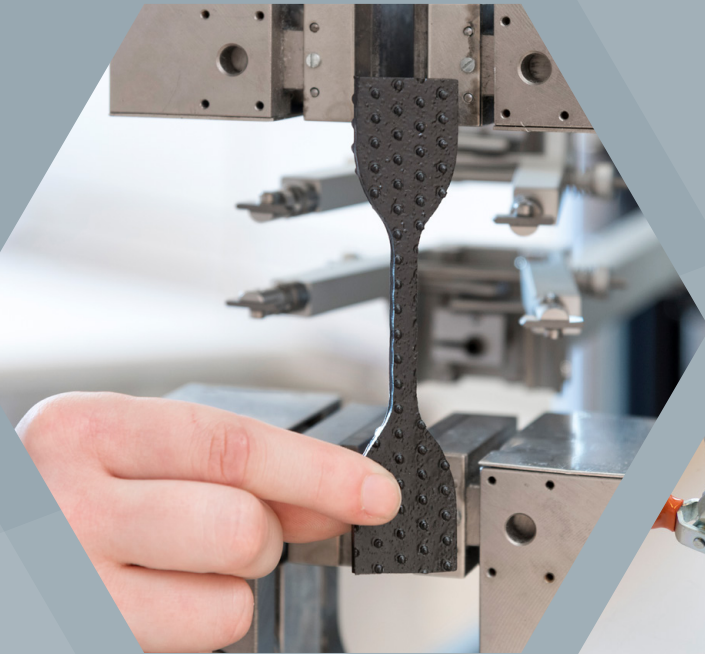


Sicherheit in Technik und Chemie



**30 JAHRE BAM-ZULASSUNG
IN DER DEPONIETECHNIK**

INHALT

Sicherheit macht Märkte	5
30 Jahre BAM-Zulassung (in der Deponietechnik): Material- und prüftechnische Entwicklungen	7
Werner Müller, Andreas Wöhlecke und Franz-Georg Simon	
Zusammenfassung	8
1. Einleitung	8
2. Kombinationsdichtung	10
3. PEHD-Dichtungsbahnen	11
4. Spannungsrissbildung	11
5. Oxidative Alterung	14
6. Schweißen	16
7. Schutzschichten	17
8. Verlegefachbetriebe und Fremdprüfung	18
9. Andere Werkstoffe für Dichtungsbahnen	20
10. Geotextile Filter	21
11. Langzeitverhalten von Kunststoff-Dränelementen	22
12. Beurteilung von Bewehrungsgittern aus Kunststoff	24
13. Standsicherheit	26
14. Jenseits von 100 Jahren	27
Literatur	30
Die Kunststoffdichtungsbahn mit BAM Zulassung als Ursprungselement für die Entwicklungssystemen im Deponiebau	35
Georg Heerten	
Kunststoffdichtungsbahnen im Deponiebau von der Empfehlung zur Verbindlichkeit	69
Wolfgang Bräcker	

SICHERHEIT MACHT MÄRKTE

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) gewährleistet Sicherheit in Technik und Chemie.

Die BAM forscht, prüft und berät zum Schutz von Mensch, Umwelt und Sachgütern. Ihre Aktivitäten bündelt die BAM in den fünf Themenfeldern Energie, Infrastruktur, Umwelt, Material und Analytical Sciences. In den Spitzen- und Schlüsseltechnologien Materialwissenschaft, Werkstofftechnik und Chemie leistet die BAM einen entscheidenden Beitrag zur technischen Sicherheit von Produkten, Prozessen und der Lebens- und Arbeitswelt der Menschen. Dazu werden Substanzen, Werkstoffe, Bauteile, Komponenten und Anlagen sowie natürliche und technische Systeme von volkswirtschaftlicher Dimension und gesellschaftlicher Relevanz erforscht und auf sicheren Umgang oder Betrieb geprüft und bewertet. Die BAM entwickelt und validiert Analyseverfahren und Bewertungsmethoden, Modelle und erforderliche Standards und erbringt wissenschaftsbasierte Dienstleistungen für die deutsche Wirtschaft im europäischen und internationalen Rahmen.

Sicherheit macht Märkte.

Die BAM setzt und vertritt für Deutschland und seine globalen Märkte hohe Standards für Sicherheit in Technik und Chemie zur Weiterentwicklung der erfolgreichen deutschen Qualitätskultur „Made in Germany“. Die BAM ist eine Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.

30 JAHRE BAM-ZULASSUNG (IN DER DEPONIETECHNIK): MATERIAL- UND PRÜFTECHNISCHE ENTWICKLUNGEN

Werner Müller, Andreas Wöhlecke und Franz-Georg Simon

ZUSAMMENFASSUNG

Vor 30 Jahren wurde die erste BAM-Zulassung in der Deponietechnik ausgestellt. Zunächst brauchen nur Kunststoffdichtungsbahnen in den Deponieabdichtungen unsere Zulassung. Vor 10 Jahren wurde dann auch für alle anderen Geokunststoffe in Deponieabdichtungssystemen eine Zulassung vorgeschrieben. Die Produkte müssen möglichst lange ihre Funktion erfüllen. Die Deponieverordnung von 2009 spezifizierte: Mindestens 100 Jahre unter allen äußeren und inneren Einwirkungen. Um die Eignung und Funktionsdauer einer Kunststoffdich-

tungsbahn, einer Schutzschicht aus einem sandgefüllten geotextilen Container, eines Kunststoff-Dränelements, eines geotextilen Filters oder eines Bewehrungsgitters aus Kunststoff abschätzen zu können, mussten immer wieder eigene wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt oder neue Forschungsergebnisse herangezogen und die Prüftechnik weiterentwickelt werden. Einige Etappen dieser Entwicklung werden in Erinnerung gerufen und Hinweise auf zukünftige Aufgaben gegeben.

1. EINLEITUNG

Ende der 1980er Jahre wurde die TA Abfall erarbeitet: der erste Höhepunkt einer dann stürmischen deponietechnischen Entwicklung. Die Kombinationsdichtung aus Kunststoffdichtungsbahn (KDB) und mineralischer Abdichtung (MD) wurde zur Regelabdichtung der Basis und Oberfläche von Sonderabfalldeponien. Die KDB mussten für diesen Anwendungszweck zugelassen sein. Das war naheliegend. Zulassungen des DIBt für die Abdichtungen bei der Lagerung wassergefährdender Stoffe und der BAM für Öltanks aus Kunststoff waren damals nämlich schon bewährter Stand der Technik. Zwar ließ die TA Abfall die Zuständigkeit für die Zulassung offen, das Land Niedersachsen gab jedoch mit einem Erlass den Startschuss für die BAM, siehe Abbildung 1. BAM-Zulassungen wurden bald in allen Bundesländern verwendet, zumal dann auch die TA Siedlungsabfall die Kombinationsdichtung als Regelabdichtung und dabei ebenfalls die Zulassung von deren KDB-Komponente forderte. Schließlich wurde mit der Deponieverordnung die BAM als bun-

desweit zuständige Zulassungsstelle nicht nur für KDB, sondern auch für alle anderen Geokunststoffe (mit Ausnahme der Bentonitmatten) inthronisiert.

Ein Geokunststoff muss unter allen äußeren und inneren Einwirkungen in der Deponieabdichtung möglichst lange seine Funktion erfüllen. Dies ist die grundlegende Zulassungsanforderung. Die Deponieverordnung fordert genauer: mindestens 100 Jahre. Die material- und prüftechnische Umsetzung dieser Anforderung erforderte immer wieder eigene Forschungsarbeiten, um die Alterung und die Eigenart des Verhaltens von Geokunststoffen besser zu verstehen. Die BAM beteiligte sich dadurch auch zunehmend an der internationalen Fachdiskussion und berücksichtigte deren Befunde. Ein Fachbeirat, der die Arbeit der BAM von Anfang an begleitete, spielte bei der Diskussion und Umsetzung der Ergebnisse in Zulassungsrichtlinien eine wichtige Rolle. Über diese Arbeit und deren Auswirkung auf die Zulassung wurde im Verlauf der letzten 30 Jahre

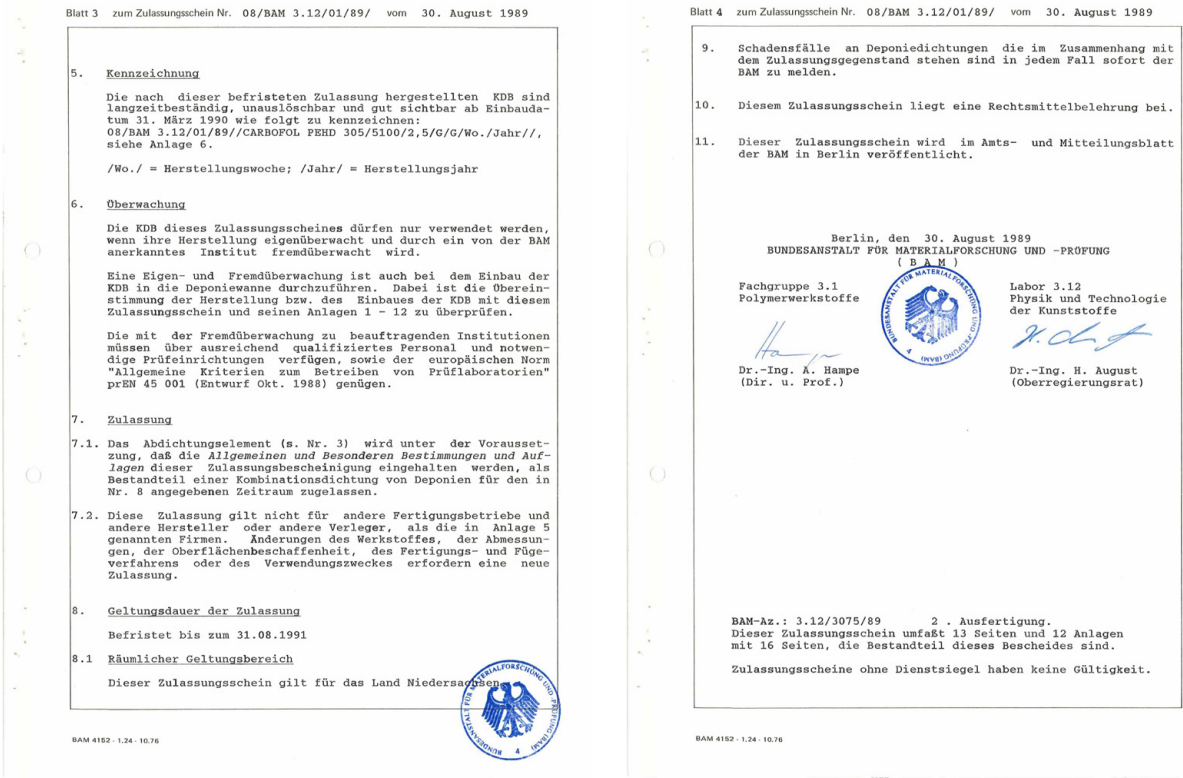
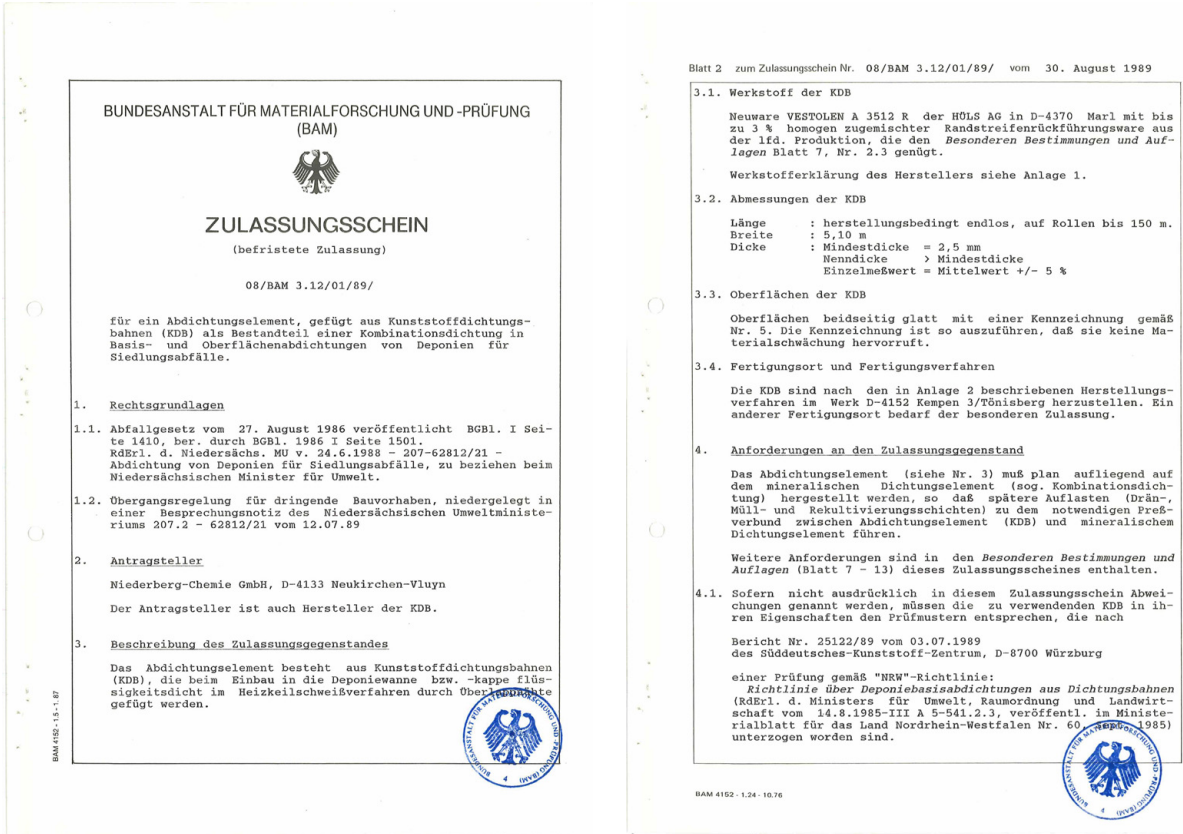


Abbildung 1: Der erste Zulassungsschein für eine Kunststoffdichtungsbahn als Bestandteil einer Kombinationsdichtung, ausgestellt am 30.08.1989

auf den Deponietagungen in Würzburg, Karlsruhe und Leipzig regelmäßig berichtet. Im Folgenden

geben wir einen Überblick. Dabei wird auf noch weiterführende Fragestellungen hingewiesen.

2. KOMBINATIONSDICHTUNG

KDB und MD waren bereits zur Abdichtung von Ablagerungen eingesetzt worden. Die Idee, beide Element zu kombinieren, resultierte aus der Erkenntnis, dass die Vorteile der einen Komponente die Nachteile der anderen auszugleichen vermögen. Untersuchungen der BAM hatten hohe Diffusionsraten von organischen Lösungsmitteln in den hydrophoben KDB ergeben (August et al. 1984). Die Kombination mit der hydrophilen mineralischen Dichtung im „Pressverbund“ konnte hier Abhilfe schaffen (August et al. 1992; Kalbe et al. 2002). Der Blickwinkel in den USA war gerade umgekehrt. Untersuchungen hatten die starke Veränderung der Durchlässigkeit mineralischer Dichtungen bei der direkten Beaufschlagung mit Sickerwässern aus Hausmülldeponien gezeigt. Hier konnte die KDB helfen. Befeuert durch das UBA in Deutschland (Stief 1985; 1986) und die EPA in den USA (Landreth 1984) verliefen die deponietechnischen Entwicklungen in beiden Ländern zum Teil sehr ähnlich.

Auch wenn Lösungsmittel als Inventar von Deponien später keine Rolle mehr spielten, so festigte sich doch die Erkenntnis, dass der Gewinn aus der Kombination von KDB und MD deren innigen Kontakt erfordert. Der Durchfluss durch ein Loch in der KDB ist nämlich umso größer, je größer der Zwischenraum zwischen KDB und Auflager ist, in den das Wasser eindringen kann (Müller 1999). Je inniger also der Kontakt zwischen MD und KDB ist, umso geringer wirken sich Schäden in der KDB aus.

Die Glattlage der KDB auf der MD wurde daher zum bleibenden Credo der bautechnischen Anforderungen der Zulassung. Aus diesem Grund wurden jedoch auch von Anfang an spezielle Anforderungen (z. B. Geradheit, Planlage und Maßänderung) an die Herstellung der KDB gestellt, um deren produktionsbedingte Welligkeit so gering wie möglich zu halten.

Auf der Grundlage der bautechnischen Anforderungen wurde von einem Fremdprüfer mit der sogenannten Riegelbauweise ein spezielles bautechnisches Verfahren für den Einbau der KDB entwickelt, das eine vollständige Glattlage auf der MD gewährleistet (Schicketanz 1992; Aversch und Schicketanz 1998). Bei Tage eingebaut, führt die Wärmeausdehnung unvermeidlich zu einer gewissen Welligkeit der KDB. Sie schrumpft jedoch und zieht sich durch die Temperaturabnahme im Verlaufe der Nacht glatt. Liegt die KDB wellenfrei, wird sie mit Riegeln (Streifen aus Schutzschicht und Dränkies) fixiert. Leider hat sich dieses Verfahren nicht vollständig durchgesetzt. Immerhin wird darauf geachtet, dass die KDB nur dann mit Dränschicht oder Rekultivierungsschicht überbaut wird, wenn sie aufgrund der Wärmeschrumpfung weitgehend wellenfrei liegt.

3. PEHD-DICHTUNGSBAHNEN

Die bis in die 1970er Jahre hinein noch wenig geordnete Deponierung von industriellen Sonderabfällen allein oder in Kombination mit Hausmüll hatte zu teilweise dramatischen Verunreinigungen, z.B. mit Chlorkohlenwasserstoffen, von Böden und Grundwasser im Bereich der Ablagerungen geführt. Die Aufmerksamkeit der deponietechnischen Fachdiskussion galt daher zunächst vor allem dem Problem der Entsorgung von Sonderabfällen. Aus diesem Blickwinkel rückte die Frage nach der Beständigkeit der KDB gegen alle möglichen industriell genutzten Chemikalien in den Vordergrund. Hier erwiesen sich in dem genannten Forschungsprojekt der BAM die Werkstoffe aus Polyethylen hoher Dichte (PEHD) als besonders geeignet. Solche KDB konnten zudem in Dicken bis zu 3 mm, in Breiten bis zu 12 m und in Längen von über 100 m hergestellt und durch maschinelles Schweißen relative einfach verbunden werden. Schon aufgrund dieser Eigenschaft schienen sie für die in der Regel sehr großen Abdichtungsflächen von Deponien besonders geeignet. Hohe chemische Beständigkeit und hervorragende bautechnische Eignung führten dann zu einem weltweiten Siegeszug der PEHD-Dichtungsbahnen (Müller 2007).

PEHD ist jedoch ein Obergriff für eine Klasse von polymeren Werkstoffen (wie etwa Stahl für eine

Klasse metallischer Werkstoffe). Die PEHD-Werkstoffe sind aus vielgliedrigen, wenig vernetzten Polyethylen-Ketten aufgebaut. Diese Ketten haben in gewissem Umfang kleine Seitenketten durch die Co-polymerisation mit 1-Buten-, 1-Hexen oder sogar 1-Octen. (Bei strenger Anwendung der Nomenklatur müsste man daher eigentlich die Bezeichnung PELLD-Werkstoffe, lineares PE niedriger Dichte, verwenden). Die Eigenschaften dieser Werkstoffe können jedoch sehr unterschiedlich sein. So wie es z. B. rostfreie und rasch rostende Stähle gibt, so gibt es z. B. gegenüber Spannungsrisssbildung sehr beständige und außerordentlich empfindliche PEHD-Werkstoffe. Trotz der hohen Beständigkeit aller PEHD-Werkstoffe gegen fast alle flüssigen Chemikalien und deren wässrigen Lösungen, kann zudem eine komplexe Reaktion mit Sauerstoff zum Verspröden führen und zwar je nach PEHD-Werkstoff zu ganz unterschiedlichen Zeiten. Auch wenn sich das Augenmerk der Zulassung von vorneherein ausschließlich auf PEHD-Dichtungsbahnen richtete, so bestand daher dennoch die Aufgabe, den gewählten Werkstoff und das fertige Produkt hinsichtlich seiner Eignung für den Deponiebau zu überprüfen. Daneben sollte sichergestellt werden, dass die zugelassenen KDB in hoher und gleichbleibender Qualität hergestellt und geschweißt wurden.

4. SPANNUNGSRISSBILDUNG

Werden teilkristalline Kunststoffe, wie die PEHD-Werkstoffe, mechanischen Spannung ausgesetzt, bilden sich allmählich Risse. PEHD-Dichtungsbahnen dürfen daher grundsätzlich nicht als „Bewehrungselement“ verwendet werden (Knipschild 1985).

Verboten ist also, dass Hangabtriebskräfte in der Böschung über die KDB durch deren Verankerung in der Böschungskrone aufgefangen werden. Setzungen des Auflagers, aber auch Dellen, die Kieskörner hervorrufen, verformen die KDB. Dadurch werden



Abbildung 2. Apparatur zur Durchführung des NCTL-Tests (links), rechts der Probenhalter nach Entnahme aus dem Wasserbad, nachdem alle Probekörper gerissen waren.

unvermeidlich Spannungen eingetragen, die ebenfalls zu diesen Spannungsrisen führen können. Bei polymeren Werkstoffen werden verformungsbedingte Spannungen jedoch durch Umlagerung der Moleküle, die sich an die Verformung anpassen, im Lauf der Zeit abgebaut (relaxiert). Bei welchen Werkstoffen und welcher Verformung gewinnt die Relaxation den Wettlauf gegenüber der Spannungsrisbildung? Dies war einer der ersten Fragen, mit denen die Zulassung sich auseinandersetzen musste. Zur Beantwortung wurden Zeitstand-Rohrinnendruckversuch und Relaxationsversuche verwendet. Die Anforderung wurde so festgelegt, dass bei einer durch eine Setzung ausgelösten Dehnung von 3 % und einer Temperatur von 40 °C, wenn überhaupt, Spannungsrisse frühestens nach 100 Jahren entstehen würden (Koch et al. 1988). Damit war auch ein Maß für die zulässigen Setzungen und damit für die Tragfähigkeit des Untergrunds der KDB vorgegeben. Weil die KDB so dünn ist, sind die danach zulässigen Krümmungsradien der Setzungen allerdings wesentlich kleiner als bei jedem anderen Abdichtungselement. (Nur bei der Bentonitmatte werden vergleichbar kleine Krümmungsradien erreicht.) Praktisch hat daher der Grenzwert keine Auswirkungen im Hinblick auf Setzungen und Tragfähigkeit. Bedeutung gewann er für die Bemessung von Schutzschichten, da dieses Kriterium dann auch auf die lokalen Verformungen bei Dellen angewendet wurde, siehe Abschnitt 7 (Seeger und Müller 1996a; 1996b; 2003).

Ungeeignete PEHD-Werkstoffe hatten in den USA zu häufigen Schäden durch Spannungsrisbildung im Bereich von Schweißnähten geführt. Daher wurde am Geosynthetic Institute (Philadelphia) eine Prüfung, der sogenannte Notched Constant Tensile Load (NCTL) Test (ASTM D5397 2019), entwickelt, mit dem direkt an der KDB deren Spannungsrisbeständigkeit untersucht werden kann (Hsuan et al. 1993), siehe Abbildung 2. Es handelte sich um einen reinen Indextest, mit dem die Beständigkeit zwar vergleichend quantifiziert, nicht jedoch realitätsnah abgebildet werden konnte. Die Anforderung wurde daher so festgelegt, dass alle Produkte, bei denen Spannungsrisse beobachtet worden waren, mit Abstand durch die Prüfung gefallen wären. Der Test wurde zwingend vorgeschrieben. Nach wenigen Jahren waren Spannungsrisprobleme auf amerikanischen Deponiebaustellen verschwunden. Der NCTL-Test wurde daher auch in die Zulassung übernommen. Inzwischen ersetzt er den Zeitstand-Rohrinnendruckversuch. Auch die Anforderung wurde übernommen. Im Laufe der Zeit jedoch verschärft.

Setzt man die Spannungsrisbeständigkeit, wie sie im NCTL-Test gemessen wird, einer der beiden ersten zugelassenen PEHD-Dichtungsbahnen gleich 1, so hatte die andere schon eine siebenmal höhere Beständigkeit. Im Verlauf der 1990er wurden nur noch KDB mit einer im Vergleich sechzigfachen Beständigkeit zugelassen. Heute sind Produkte

im Zulassungsverfahren, die schon die über 100-fache Beständigkeit der ersten Materialien haben.

Die Frage, ob die Spannungskonzentrationen am Fußpunkt von geprägten Oberflächenstrukturen der KDB zur Spannungsrisbildung führen, und die Frage nach der Beständigkeit der aufgesprühten Strukturen wurde Anfang und Mitte der 1990er Jahre sehr heftig diskutiert. In Zeitstand-Zugversuchen mit spannungsrisssförderndem Medium (wässrige Tensid-Lösung) sowie hoher Temperatur (80 °C) und Zugspannung (4 N/mm²) hatten wir nämlich eine Risbildung am Fußpunkt von besonders großen Strukturen gefunden. Es wurde daher nur solche Kombinationen von PEHD-Werkstoff und Geometrie der Struktur erlaubt, bei der die Dichtungsbahn eine Mindeststandzeit (700 h) erreichte. Bei den heute verwendeten Werkstoffen tritt dieser Effekt allerdings nicht mehr auf.

Ein Forschungsvorhaben der BAM beschäftigte sich speziell mit der Beständigkeit der aufgesprühten

Strukturen (Seeger und Müller 2001). Dabei wurden Zeitstand-Scherversuche zur Prüfung der Beständigkeit (siehe Abbildung 3) und von der MPA Darmstadt ein „Abhobel-Test“ zur Charakterisierung der Stärke der Verbindung von Strukturpartikeln und KDB entwickelt. Der Sprühprozess, der einen hohen Druck und eine hohe Temperatur erfordert, führt zu drastischen Veränderungen des Werkstoffs. Dennoch kann bei bestimmten Kombinationen von Sprühmaterial, Prozessparametern und KDB eine beständige Haftung der Partikel erreicht werden. Bei anderen Kombinationen dagegen kommt es zum Ablösen der Partikel. Was beständige Kombinationen genau auszeichnet, konnte nicht ermittelt werden. Der Hersteller ist daher darauf angewiesen, die ideale Kombination durch „trial and error“ zu ermitteln, und er muss die dann zugelassene Kombination auch sorgfältig einhalten. Die BAM beteiligte sich daher zunächst an der Fremdüberwachung der Produktion mit Zeitstand-Scherprüfungen an Proben aus den produzierten KDB.

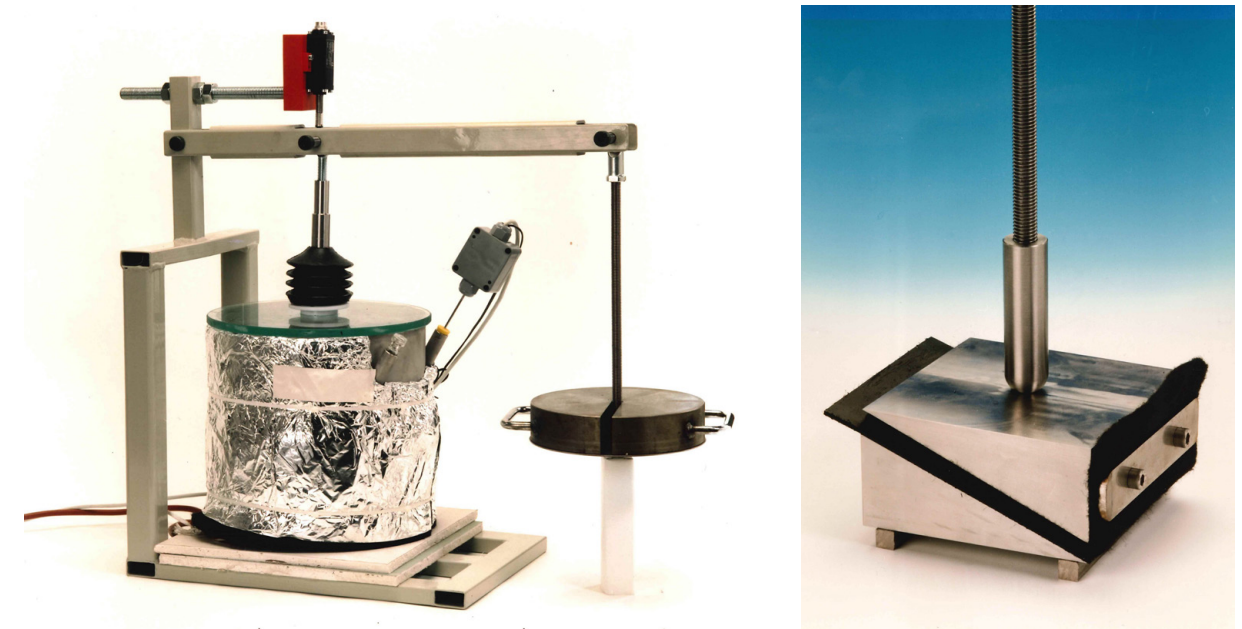


Abbildung 3. Apparatur für den Zeitstand-Scherversuch für KDB mit aufgesprühter Struktur (rechts). Im beheizten Wasserbad befindet sich die eigentliche Prüfvorrichtung (links) mit Keilen der Steigung 1:3.

5. OXIDATIVE ALTERUNG

Neben der Spannungsrisssbildung kann eine Oxidation die Eigenschaften der PEHD-Dichtungsbahnen verschlechtern. Dieser Effekt tritt natürlich auch bei den aus Polypropylen hergestellten Geotextilien auf. Polyethylen und Polypropylen werden im Verlauf einer komplizierten Abfolge chemischer Reaktionen (Radikal-Kettenreaktion) vom Sauerstoff angegriffen. Beim Polyethylen werden die Polymerketten dabei untereinander sowohl vernetzt als auch gespalten. Beim Polypropylen überwiegt dagegen die Kettenspaltung (durch die Kettenreaktion). Im Verlauf der Oxidation verspröden PEHD-Dichtungsbahnen daher ohne Rissbildung. PP-Fasern fragmentieren dagegen zu Faserpartikeln. Die Oxidation und die damit einhergehende Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften setzt nicht sofort ein, sondern erst nach einer gewissen Anlaufphase. Sie schreitet dann jedoch zügig voran.

Auch der menschliche Organismus altert durch derartige Oxidation. Er verfügt zwar über Reparaturmechanismen, dennoch braucht er Vitamine, die vor der Oxidation schützen. Reparieren können sich die PE- und PP-Kunststoffe nicht. Den Kunststoffen werden aber ebenfalls hochmolekulare Substanzen beigemischt, sogenannte Antioxidantien, die dem oxidativen Abbau entgegenwirken und den Kunststoff „stabilisieren“. Es gibt davon zwei Arten. Die eine verlängert die Anlaufzeit. Die andere verlangsamt den Abbau. Im ersten Fall verschlechtern sich mechanische Eigenschaften über lange Zeit gar nicht, dann jedoch rapide. Im zweiten Fall nehmen sie nur sehr allmählich ab.

Das Alterungsverhalten wird durch Lagerung in Wärmeschränken oder im Wasserbad geprüft. Die erhöhte Temperatur vergrößert die Reaktionsgeschwindigkeiten. Dabei wurde und wird vielfach nur die Veränderung der mechanischen Eigenschaften im Zuge der Lagerung untersucht. Aufgrund des u.U. un stetigen Verlaufs dieser Veränderung kann jedoch deren Messung allein noch keinen hinreichenden Aufschluss über das Langzeitverhalten

eines Produkts geben. Von der BAM wurde daher eingeführt, neben der Veränderung der mechanischen Eigenschaften auch die Veränderung der Wirksamkeit der Stabilisierung durch die Antioxidantien zu ermitteln. Erst auf dieser Basis wurden Lebensdauervorhersagen überhaupt möglich. Bei den PEHD-Dichtungsbahnen wird danach die Lebensdauer vor allem durch den physikalisch bedingten Antioxidantien-Verlust bestimmt (Müller und Jakob 2003; Müller et al. 2016). Zwei Diffusion-Regime wurden identifiziert: (1) Das „Ausschwitzen“ der Antioxidantien, deren Konzentration zunächst weit über der Löslichkeitsgrenze liegt. (2) Die normale Diffusion, die durch Verlust und Abbau der Antioxidantien an der Oberfläche der KDB angetrieben wird.

Solche Erkenntnisse hatten auch Auswirkung auf die Zulassungsanforderungen. Heute zugelassene KDB haben nicht nur eine höhere Spannungsrisssbeständigkeit, sondern auch eine höhere oxidative Beständigkeit als die zu Beginn zugelassenen Produkte. Der Werkstoff Dowlex 2342 M ist z. B. wesentlich beständiger gegen Oxidation (und subtiler stabilisiert) als etwa der Werkstoff der „ersten Stunde“ Hostalen 5040 T12.

Neben den Antioxidantien wird den PEHD-Dichtungsbahnen Ruß beigemischt. Das bedingt ihre schwarze Farbe. Winzige Rußpartikel bieten einen sehr effektiven Schutz, da sie die Quanten der UV-Strahlung absorbieren. UV-Strahlung beschleunigt nämlich auf dramatische Weise den oxidativen Abbau durch die Erzeugung der die Reaktion auslösenden chemischen Radikale. Die KDB werden daher durch Ruß vor der UV-Strahlung der Sonne geschützt, auch wenn sie nur für kurze Zeit der Witterung ausgesetzt sind.

Anfang der 1990er Jahre verwendeten die KDB-Hersteller fertige PEHD-Werkstoffe, die bereits mit allen Additiven versehen worden waren. Heute geben die Hersteller den Ruß und einen Teil der Additive über einen sogenannten Batch zum PEHD-Werkstoff selbst hinzu. Der Batch besteht aus einem PE-Träger-

material. Dazu kommen die Antioxidantien und der Ruß in relativ hoher Konzentration (z. B. 4 Gew.-% bzw. 40 Gew.-%). Der Batch wird dann so dosiert (z. B. 5 Gew.-%), dass die gewünschte Konzentration der Additive und des Rußes (z.B. 0,2 Gew.-% bzw. 2 Gew.-%) im fertigen Produkt erreicht wird. Die Art und Zusammensetzung (Rezeptur) der Additive ist dabei das Betriebsgeheimnis des Kunststoffherstellers und des Batchherstellers. Nur in seltenen Fällen hat auch der KDB-Hersteller alle Informationen. Werkstoff-, Batch- und KDB-Hersteller sind zwar bereit die Information vertraulich an die Zulassungsstelle weiterzugeben, nicht jedoch an Dritte. Die Identifikation eines Werkstoffs, die ja vor allem auf die Additive abheben muss, ist dadurch sehr erschwert.

Bei den PEHD-Werkstoffen, die in der Regel auf eine Verlängerung der Anlaufphase hin stabilisiert werden, kann eine thermoanalytische Messung dieser Anlaufphase bei sehr hoher Temperatur (200 °C) in einer reinen Sauerstoffatmosphäre zur pauschalen Charakterisierung der Stabilisierung verwendet werden (Oxidation-Induction-Time (OIT) Messung). Dazu müssen die Additive nicht bekannt sein. Mit den Batchherstellern wurde vereinbart, dass den verschiedenen Batches ein spezifischer Tracer in Spuren hinzugeben wird. Mit der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) kann so der Batch, der bei der Herstellung der KDB verwendet wurde, identifiziert werden. Dies setzt die Kenntnis des Tracers voraus. Die Identifikation kann deshalb nur durch die BAM vorgenommen werden. Diese Identifikation ist Teil der Fremdüberwachung. Dadurch ist die Zulassungsstelle direkt an der Fremdüberwachung beteiligt. Das verletzt allerdings das Prinzip der strikten Trennung der Ver-

antwortlichkeiten beim Qualitätsmanagement. Bei Geotextilien, die in der Regel auf die Verminderung der Abbaurate hin stabilisiert werden, konnte eine Lösung gefunden werden, bei der der Fremdüberwacher in das System der Vertraulichkeitsvereinbarung eingebunden ist. Er kann so die dort zumeist verwendete Art der Antioxidantien mit einem mit der BAM abgestimmten chemisch-analytischen Verfahren (Freitag-Methode, (Freitag 1983)) selbst überprüfen.

Wünschenswert nicht nur für den Deponiebau, sondern auch für jedes andere geotechnische Anwendungsgebiet, wäre vor diesem Hintergrund ein Verfahren, mit dem ein eindeutiger Fingerabdruck, der im polymeren Werkstoff der KDB oder den Geotextilien enthaltenen Antioxidantien, erstellt werden kann. Und zwar so, dass dazu keine vertrauliche Kenntnis der Rezeptur erforderlich ist. Es sind eben nicht die gängigen mechanischen, rheologischen oder hydraulischen Prüfwerte, sondern Art und Gehalt der Additive, die bestimmen, ob ein Produkt die im Prüfzeugnis versprochene Lebensdauer tatsächlich erreicht. Zulassungsstelle und Fremdüberwachung könnten mit solch einem Verfahren, ohne dass die Gefahr der Verletzung von Vertraulichkeitsvereinbarungen besteht, Werkstoffe identifizieren. Mit Hilfe chromatographischer Methoden (HPLC) sollte es möglich sein, einen solchen Fingerabdruck zu erstellen. Dafür gibt es schon eine erste Verfahrensbeschreibung (BAM-Prüfhinweis). Das Verfahren so zu spezifizieren, dass die Vertraulichkeitsvereinbarungen Bestand haben, und zu erproben, ist jedoch alles andere als eine triviale Aufgabe.

6. SCHWEISSEN

Ein weiterer Schwerpunkt der materialtechnischen Untersuchungen in der zweiten Hälfte der 1990er, Anfang der 2000er Jahre war das Schweißen (Lüders 1999; 2000; 2001; 2002a; 2002b). Der ganz überwiegende Teil der Schweißnähte wird maschinell gefertigt. An der Schweißmaschine werden die Schweißparameter Geschwindigkeit, Heizkeiltemperatur und Anpressdruck eingestellt. Während die Maschine den überlappenden Bereich der beiden KDB schweißend abfährt, werden die Schweißparameter auf ihre Sollwerte geregelt und die Istwerte aufgezeichnet, siehe Abbildung 4. Es werden zwei parallel laufende Schweißnähte hergestellt. In der Maschine werden dazu die obere und untere KDB über einen entsprechen gestalteten und geheizten Keil gezogen und deren Oberflächen aufgeschmolzen. Danach werden die aufgeschmolzenen Schichten durch zwei Anpressrollen zusammengedrückt. Der maschinelle Schweißvorgang besteht also aus einem thermischen Prozess (Aufschmelzen) und einem rheologischen Prozess (Vermischen). Der erste Prozess kann durch die Dicke der aufgeschmolzenen Schicht, der zweite durch den Fügeweg charakterisiert werden. Unter dem Fügeweg versteht man die Differenz zwischen den Dicken der beiden aufeinander liegenden Dichtungsbahnen vor und nach dem Schweißen.

Die Qualität der so hergestellten Heizkeil-Doppelnähte kann durch einen Zeitstand-Schälversuch überprüft werden. Dabei wird durch die Spannungsrissbildung die Naht aufgeschlossen. Aus der dafür erforderlichen Standzeit und der Morphologie der Bruchflächen kann auf die Güte der Schweißnähte geschlossen werden. Eine gute Naht zeigt eine Standzeit die nahe einem maxi-

mal erzielbaren Wert liegt und ein homogenes, durch feine Fibrillen charakterisiertes Bruchbild.

Offenbar kann eine lange Standzeit nur dann erreicht werden, wenn Fügeweg und Schmelzeschichtdicke in einem ausgewogenen Verhältnis stehen. Länge und Beschaffenheit des Heizkeils, die Schweißparameter und die Umgebungstemperatur bestimmen Fügeweg und Schmelzeschichtdicke. Es kann daher abgeleitet werden, welche Wahl der Schweißparameter bei welcher Maschine und welchen Umgebungstemperaturen zu einer langen Standzeit und damit zu einem optimalen Schweißergebnis führt. Es ergibt sich so ein maschinenabhängiges Fenster für die Schweißparameter oder genauer gesagt ein Gebiet zulässiger Punkte in dem dreidimensionalen Raum, der durch die Achsen von Geschwindigkeit, Heizkeiltemperatur und Anpressdruck aufgespannt wird. Die auf Deponiebaustellen hergestellten Schweißnähte



Abbildung 4. Heizkeilschweißmaschine bei Laboruntersuchungen der BAM.

wurden nach diesem Verfahren untersucht. Die Erhebung zeigte, dass bis auf eine Ausnahme auf allen Deponiebaustellen im Fenster, also mit optimalen Schweißparametern, gearbeitet worden war.

Es wurden maschinenbezogen zweidimensionale Nomogramme erstellt, an denen man abhängig von der Umgebungstemperatur den Bereich optimaler Schweißparameter ablesen konnte. Man hätte so die getroffene Wahl der Schweißparameter auf der Baustelle gegenprüfen können. Es gelang jedoch nicht, dieses Verfahren in der DVS-Richtlinie für das Schweißen von KDB auf Deponiebaustellen als zusätzliches Element der Qualitätssicherung zu verankern. Dem Arbeitskreis war die Nomogramme einerseits zu kompliziert. Andererseits wurde die Entwertung des Handwerks durch das Missverständnis befürchtet, dass schon ein Blick auf ein Nomogramm genügen würde und zeitaufwendige Probeschweißungen und die zerstörende und zerstörungsfrei Prüfung der Probenähte ersetzen könnte.

7. SCHUTZSCHICHTEN

KDB müssen geschützt werden. Dies bedeutet zum einen, dass sie nur auf einem hinreichend sauberen und glatten Auflager verlegt werden dürfen. Zum anderen muss auf der KDB eine Schutzschicht eingebaut werden (Seeger et al. 1995). Der grobe Kies der Drainage würde sonst unter dem Gewicht des Müllkörpers die Dichtungsbahn perforieren oder zumindest sehr große Dellen erzeugen. Zur Ermittlung von Ausmaß und Art der Abdrücke, die Kieskörner trotz Schutzschicht noch hervorrufen, stand der Lastplatten-Druckversuch zur Verfügung. Eine Schutzschicht zu bemessen, bedeutete daher, anzugeben, wie groß diese Abdrücke oder Dellen noch sein dürfen. In von der BAM begleiteten Forschungsprojekten wurde die Methode zur Ermittlung der Größe der Dellen verfeinert und überprüft (Witte 1990; 1997;

Die Anforderungen an eine möglichst hohe Standzeit ihm Zeitstand-Schälversuch fand jedoch Eingang in die Zulassungsrichtlinie. Die geforderte Standzeit muss sich dabei an der Spannungsrissbeständigkeit der Materialien orientieren. Der in der Zulassungsrichtlinie angegebene Wert bezog sich auf ein Material, das nach der oben aufgeführten Skala eine Beständigkeit von sieben hatte (Abschnitt 4). Heute wird z. B. ein Material mit einer gut achtmal höheren Beständigkeit verwendet. Entsprechend höher muss natürlich die Anforderung an die Standzeit einer im Optimum geschweißten Naht gewählt werden. Von Interesse wäre eine Studie darüber, ob das beschriebene Konzept auf neue Materialien mit noch höherer Spannungsrissbeständigkeit angewendet werden kann und ob bei solchen KDB auf Deponiebaustellen die optimal möglichen Schweißergebnisse auch tatsächlich erzielt werden.

siehe auch: Sehrbrock 1993). Das Maß für die Größe der Delle ist danach die Flächendehnung. Die Delle wird durch eine Kugelkalotte (oder ein Kreissegment) angenähert. Das Verhältnis der Fläche der Kalotte zur Grundfläche ist die Flächendehnung (oder das Verhältnis der Bogenlänge zur Sehne des Kreissegments). Es wurde eine zunächst sehr streng erscheinende Anforderung gestellt: die Flächendehnung eines noch zulässigen Abdrucks muss $\leq 0,25\%$ sein.

Dieser Grenzwert war lange sehr umstritten. Mit Simulationen konnte dann aber von uns gezeigt werden, dass bei einer Flächendehnung von $0,25\%$, einem $16/32$ mm Kies und einer entsprechend dimensionierten Schutzschicht die lokalen Dehnungen im Konturverlauf der Delle tatsächlich bis

zu 3 % betragen kann (Seeger und Müller 1996a; 1996b; 2003). Wendet man also das Kriterium, dass Dehnungen nicht größer als 3 % bei 40°C sein dürfen, auch auf die lokale Dehnung der Randfaser bei Dellen an, so findet der strenge Grenzwert für die Flächendehnung seine Rechtfertigung.

Diese Überlegung wurden in jüngster Zeit auch direkt experimentell bestätigt (Abdelaal et al. 2014). Spannungsrisse im Zusammenhang mit Eindellungen wurden in der Gruppe von K. Rowe (Queen's University) untersucht. Eine PEHD-Dichtungsbahn wurden in einem synthetischen Sickerwasser gealtert, ein Versuchsaufbau mit den Komponenten Auflager-Weichblech-KDB-Schutzvliesstoff-Kies realisiert und dieses Paket unter einer repräsentativen Auflast in einem „liner longevity simulator“ belastet. Die Spannungsrissebildung wurde in dem Simulator durch erhöhte Temperaturen und synthetisches Sickerwasser beschleunigt. Die Eindellung in der Dichtungsbahn wurden mit der dünnen Weichblechunterlage erfasst und die Undichtigkeit über einen elektrischen Kurzschluss nachgewiesen. An den Stellen der größten lokalen Dehnung am Rand der Eindellungen (Randfaserdehnung) wurden tatsächlich Spannungsrisse gefunden. Dort wurde die KDB während der Prüfung undicht. Die lokale Dehnung, bei der Spannungsrisse auftrat, wurde als Funktion der Temperatur aufgetragen. Die Extrapolation auf niedrige Temperaturen ergab für das untersuchte System, dass Spannungsrisse bei ungefähr 6 % lokaler Dehnung bei einer Temperatur von 40 °C aufgetreten waren. Damit ist noch keine Bestimmung der Versagenszeit verbunden. Es

wurde jedoch experimentell bewiesen, dass zu große lokale Dehnungen (auch bei kleiner Flächendehnung) tatsächlich Spannungsrisse erzeugen können.

Die Schutzschicht muss nach der BAM-Zulassungsrichtlinie also so bemessen werden, dass die Bildung von Spannungsrisen ausgeschlossen wird. Das Kriterium für die Flächendehnung wird nur erfüllt, wenn sehr mächtige Schutzschichten verwendet werden. Ein hartnäckiger Erfinder entwickelte Stück für Stück vor diesem Hintergrund in intensiven Gesprächen mit der BAM die sogenannte mineralische Deponiedichtungs-Schutzbahnen (MDDS-Bahn) (Zimmermann und Sehrbrock 1997). MDDS-Bahn bedeutet, dass eingepackt in ein Doppelgewebe mit Abstandshaltern eine 2 cm dicke Sandschicht als Rollenware auf die Baustelle geliefert werden kann. An den Rändern läuft das Gewebe in Keilen aus, sodass kein Stumpfstoß entsteht, in den Kieskörner eindringen könnten. An diesen sandgefüllten Schutzbahnen kann man besonders gut erkennen, dass ausreichend dimensionierte Schutzschichten auch andere Vorteile bieten. Liegt die KDB glatt, kann dieser Zustand durch diese Schutzschicht gut fixiert werden. Sandgefüllte Schutzbahnen (oder andere erlaubte Schutzschichten) bieten auch Schutz gegen Schäden aus den nachfolgenden Bauphasen. Es hat sich herausgestellt, dass auch diese Eigenschaft sehr nützlich ist. Ist eine KDB tatsächlich undicht, so ist nämlich mit überwiegender Wahrscheinlichkeit der Schaden nicht beim Einbau der KDB, sondern beim Einbau von Drainage- und Rekultivierungsschicht verursacht worden.

8. VERLEGEFACHBETRIEBE UND FREMDPRÜFUNG

Die Bedeutung von Erfahrung und Fachkunde eines Verlegefachbetriebs für die Herstellung einer einwandfreien KDB-Dichtung kann schlechterdings nicht überschätzt werden. Zwar wird in der Zulas-

sungsrichtlinie und den DVS-Merkblättern genau beschrieben, welche Anforderungen erfüllt werden müssen. Wie akkurat das Regelwerk dann aber umgesetzt wird, hängt von der Arbeit des Fach-

betriebs und der Zusammenarbeit von Genehmigungsbehörde, Fremdprüfer und Fachbetrieb ab.

Man kann sich das an einem kleinen Beispiel klar machen. Auftragnähte werden mit einem Handextruder angefertigt. Die Beschaffenheit der Nähte hängt damit von der Erfahrung und dem handwerklichen Geschick des Schweißers ab. Zwar werden zunächst Probenähte erstellt und diese gründlich zerstörend geprüft. Unvermeidlich kommt aber der Augenblick der Wahrheit, wo eine Auftragnäht von Hand geschweißt wird, die nicht mehr zerstörend analysiert und nur noch nach Kriterien einer zerstörungsfreien Prüfung bewertet werden kann. Rohrdurchdringungen liegen im Tiefpunkt der Deponie, weil das Sickerwasser dorthin fließen soll. Es wird später im Tiefpunkt sogar dauerhaft anstehen. Gerade in diesem kritischen Bereich liegen aber überwiegend Auftragnähte, die die Rohrdurchdringung mit der KDB verbinden. Die Dichtigkeit der Deponie hängt also davon ab, wie gut der Schweißer gearbeitet hat.

Zunächst wurden Fachbetriebe auf Antrag der KDB-Hersteller von der BAM selbst überprüft und in den Zulassungsschein eingetragen. Eine Prüfung von Firmen gehörte allerdings weder zu den Aufgaben der BAM, noch hatte das zuständige Labor der BAM die dafür erforderliche personelle Ausstattung. Vor allem aber standen diesem Verfahren bald wettbewerbsrechtliche Bedenken entgegen. Das Problem wurde so gelöst, dass KDB-Hersteller und Verlegefachbetriebe den Fachverband AK GWS (Arbeitskreis Grundwasserschutz) e.V., später einen zweiten Fachverband AGAS (Arbeitsgemeinschaft Abdichtungssysteme) e. V., gründeten. Der Fachbeirat erarbeitete eine Richtlinie über die Anforderungen an Verlegefachbetriebe. Die Fachverbände bauten auf der Grundlage der Richtlinie eine eigene Güteüberwachung mit einer entsprechenden Überwachungsordnung, einem Überwachungsausschuss und einem Überwachungsverfahren auf. Die BAM brauchte jetzt nur noch als Auditor bei den Überwachungsbesuchen in der Firma und auf der Deponie tätig zu werden.

Die Kontrolle und Prüfungen auf der Deponiebaustelle durch einen unabhängigen Dritten (Fremdprüfer) ist eine der Säulen des Qualitätsmanagements, das in der Deponieverordnung gefordert wird. Der

Fremdpüfer arbeitet eng mit der Genehmigungsbehörde zusammen. Um hier Kriterien für eine Auswahl qualifizierter Firmen zu haben, wurde vom Fachbeirat eine Richtlinie für die Anforderung an fremdprüfende Stellen erarbeitet. Güteüberwachte Verlegefachbetriebe und qualifizierte fremdprüfende Stellen bestimmen das hohe technische Niveau des Deponiebaus in Deutschland.

Zugelassene Dichtungsbahnen, zugelassene Schutzschichten, Einbauvorschriften in der Zulassungsrichtlinie auf deren Einhaltung Fachbehörden und Fremdprüfer achten, und hochqualifizierte Fachbetriebe: dieses System scheint zu funktionieren. Anhand der Ergebnisse von Messungen mit Dichtungskontrollsystemen kann man sich davon überzeugen, dass mit diesem System tatsächlich dichte KDB-Abdichtungen hergestellt werden (Müller und Wöhlecke 2017a). Dazu wurden die Daten von 14 Jahren der Überwachung von Oberflächenabdichtungen mit fest installierten Dichtungskontrollsystemen ausgewertet. Der Datensatz umfasst die Ergebnisse der Abnahmemessungen und der regelmäßigen Kontrollmessungen. Daten von 32 Deponien mit einer Gesamtfläche der Abdichtung von 1.276.500 m² standen zur Verfügung. Es wurden insgesamt nur sechs Leckagen gefunden. Bei 26 der 32 Baustellen wurden überhaupt keine Mängel festgestellt. Auf den restlichen sechs Baustellen konnte jeweils nur eine Fehlstelle im Abdichtungssystem nachgewiesen werden. Zu einer dieser Fehlstellen wurden keine Angaben gemacht. Alle anderen Schäden befanden sich außerhalb der Nähte in der Fläche der KDB und waren durch physikalische Einwirkungen verursacht worden. Fehlstellen aufgrund schlechter Schweiß- oder Einbauarbeiten oder von Spannungsrisen gab es keine. Eine der Fehlstellen war während des Bauprozesses bewusst und „heimlich“ hergestellt worden, mit der Absicht das Dichtungskontrollsystem zu testen. Zwei Mängel waren entstanden, weil die KDB mit einem dünnen und spitzen Objekt unbeabsichtigt perforiert worden war. Ein ziemlich großer Defekt von 1 cm Durchmesser war durch eine Baggerschaufel erzeugt worden. Für ein weiteres Loch von 1 cm Durchmesser waren keine genauen Angaben zur Ursache verfügbar.

Gemittelt über alle Deponie betrug die „Fehlerrate“ also nur eine kleinere Fehlstelle auf 21,3 Hektar oder

0,05 kleine Löcher pro Hektar (LpH). Das ist praktisch in jeder Hinsicht vernachlässigbar. Im Vergleich dazu findet man für die USA und andere Länder mit entwickelter Deponietechnik folgende Angaben: 0,5 LpH bei „striker“ Qualitätssicherung, 2,5-10 LpH bei „guter“ Qualitätssicherung und mehr als 10 LpH bei „schlechter“ Qualitätssicherung. In einer vom

U. S. Department of Energy geförderten Studie der Sandia National Laboratories zur Wirksamkeit von Abdichtungen hielt man sogar eine wohl übertriebene Fehlerrate von 60 LpH in der KDB für erforderlich, um die Auswirkungen schlechter Qualitätssicherung in den Testfeldern zu simulieren (Koerner 2002).

9. ANDERE WERKSTOFFE FÜR DICHUNGSBAHNEN

Die Werkstoffe der PEHD-Dichtungsbahnen stammen aus dem Rohrbereich oder sind Rohrwerkstoffen sehr ähnlich. Der Zeitstand-Rohrinnendruckversuch ist ein schon seit Jahrzehnten genutztes und vielfach erprobtes Prüfverfahren für die Haltbarkeit von Kunststoffrohren. Mit dieser Prüftechnik wurden insbesondere PEHD-Rohre seit den 1960er Jahren sehr intensiv untersucht. Eine Vielzahl wissenschaftlicher Arbeiten beschäftigt sich mit diesen Rohren. Bei den PEHD-Werkstoffen der Dichtungsbahnen gab es daher immer einen Erkenntnisvorsprung gegenüber solchen Werkstoffen, die entweder nicht für Rohre verwendet werden können oder für die auch aus den Rohrprüfungen nur in vergleichsweise geringerem Umfang Erfahrungen vorlagen.

Es gibt verschiedene Arten solcher Werkstoffe: weich-PVC, Polyethylen besonders niedriger Dichte (PELD und PEVLD) oder Polyethylen-Polypropylen-Copolymerisate (flexible PP-liner), Elastomere (EPDM) usw.

Es gab immer wieder Antragsteller, die die Zulassung solcher nicht aus einem PEHD-Werkstoff hergestellten KDB ins Auge gefasst hatten. In den Gesprächen ging es um die Beantwortung der grundlegenden Fragen. Welches sind die relevanten Alterungsmechanismen? Wie kann man im Hinblick darauf die Beständigkeit für mindestens 100 Jahre nachweisen? Wie werden die Dichtungsbahnen miteinander verbunden? Führt das Verfahren zu einer gleichmäßigen und

kontrollierbaren Qualität der Fügenaht? Wie lange halten diese Nähte? Es ging also zum Beispiel um das Migrations- und Abbauverhalten moderner Weichmacher in den PVC-Dichtungsbahn, oder darum, ob und wie Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen mit einer Vielzahl von Verzweigungen der Kohlenstoffketten, an denen der oxidative Abbau bevorzugt angreift, ausreichend stabilisiert werden können, oder darum, wann die oxidative Alterung gegenüber einer scheinbaren Bewahrung der mechanischen Eigenschaften aufgrund der Nachvernetzung bei elastomeren Werkstoffen durchschlägt. Es musste jeweils ein Prüfprogramm in Anlehnung an die Zulassungsrichtlinie konzipiert werden, das Antworten auf solche Fragen geben konnte. In allen Fällen schien aber den Antragstellern der Aufwand an Kosten und Zeit dann doch zu groß zu sein. Es ist jedenfalls bis heute bei den PEHD-Werkstoffen geblieben.

Damit die Untersuchungen der oxidativen Beständigkeit nicht so lange dauern, wurde an der BAM ein Prüfverfahren (Autoklav-Test) entwickelt, bei dem die oxidative Alterung nicht nur durch eine erhöhte Temperatur, sondern auch durch einen erhöhten Sauerstoffpartialdruck beschleunigt wird (Schröder et al. 2008). Genauer gesagt, wird dafür gesorgt, dass der Prüfkörper immer mit Sauerstoff vollständig gesättigt ist. Dadurch soll zusätzlich zur Verkürzung der Prüfzeiten der Effekt einer sogenannten „diffusion-limited-oxidation“ vermieden werden. Dieser Effekt

spielt insbesondere dann eine Rolle, wenn nicht das physikalische Verhalten des Stabilisators (Migration, Entmischung), sondern der chemische Oxidationsvorgang selbst, etwa bei nicht stabilisierten Elastomeren, die Beständigkeit bestimmt. Bei der beschleunigten Alterung im Wärmeschrank von Proben aus solchen Materialien mit zu großem Verhältnis von Oberfläche zu Volumen (z. B. dicke KDB) kann nämlich u. U. nicht genügend Sauerstoff in das Probeninnere diffundieren. Wohingegen bei der Anwendungstemperatur die Oxidation so verlangsamt ist, dass genügend Sauerstoff auch im Probeninneren zur Verfügung steht. Die Ofenalterung ergäbe dann eine nur scheinbar hohe Oxidationsbeständigkeit.

Der Test wurde jedoch auch auf Geotextilien und insbesondere auf die im Tunnelbau verwendeten PELD-Dichtungsbahnen angewendet. Diese Werkstoffe sind aber stabilisiert. Wie verhalten sich chemisch und physikalisch die Antioxidantien im Autoklav? In welchem Druckbereich sind die Prozesse im Autoklav mit denen unter Anwendungsbedingungen bei stabilisierten Produkten überhaupt vergleichbar? Wie extrapoliert man dabei die bei hohen Temperaturen und Drücken gewonnene Ergebnisse, um Aussagen über die Lebensdauer unter Anwendungsbedin-

gungen zu bekommen? Aus der Anwendung auf stabilisierte Produkte ergaben sich für uns diese Fragen, die noch der wissenschaftlichen Bearbeitung bedürften, bevor der Test bei der Zulassung verwendet werden kann (Müller und Wöhlecke 2016). Ofenalterung ist im Labor gut reproduzierbar. Zwischen den Laboren sind die Ergebnisse jedoch nur begrenzt vergleichbar. Der Autoklav-Test scheint dagegen auch gut vergleichbare Ergebnisse zu liefern. Er kann daher Vorteile gegenüber der klassischen Ofenalterung selbst dann bieten, wenn er bei relativ niedrigen Drücken durchgeführt werden muss.

Ein anderes Beispiel zeigt die Vielfalt von Zulassungsthemen. Die Hohnoppenbahn-Dränelemente werden auf der Unterseite mit einem Kleber beschichtet, um eine gewisse Rauigkeit der Oberfläche der Bahn zu erzeugen. Dadurch entsteht erst jene Reibungskraft zwischen diesem Dränelement und einer KDB oder einer MD, die auf einer Böschung erforderlich ist. Zudem wird der Vliesstoff auf die Oberseite der Noppen geklebt, um einen festen Verbund zu erreichen. Wie aber weist man die mindestens 100jährige Wirksamkeit eines Klebers nach? Hier wurde z. B. ein Zulassungsverfahren abgelehnt, da nur geringe Aussicht auf Erfolg bestand.

10. GEOTEXTILE FILTER

Mit dem ersten Einsatz von Filtern aus Textilien in der Geotechnik begann sogleich ein Streit um die erforderliche Dicke und Grammat, der bis heute andauert. Können dünne Gewebe zum Filtern eingesetzt werden? Müssen nicht auch die geotextilen Filter eine gewisse Mindestdicke und Porenstruktur haben? Kommen deshalb nur Vliesstoffe in Betracht? Das klassische DVWK-Merkblatt gab eine erste Antwort, indem es Anforderungen an die Dicke des Filters stellte (Saathoff 1996; 1999; Saathoff et al. 2012). Davon ausgehend kam auch die Diskussion im

Fachbeirat zu einem eindeutigen Ergebnis. Als Filter werden nur Vliesstoffe zugelassen, die ein mittleres Flächengewicht von mindestens 300 g/m² haben.

Zugelassene Vliesstoffe bestehen in der Regel aus ca. 30 µm dicken Fasern aus Polypropylen. Die Stabilisierung durch Antioxidantien ist hierbei besonders wichtig (Müller und Jakob 2000; Müller et al. 2016). Nicht stabilisierte oder schlecht stabilisierte PP-Fasern würden trotz des hohen Verstreckungsgrads viel zu schnell verspröden. Bei den zugelassenen Produkten

verlangsamen dagegen die Antioxidantien den oxidativen Abbau erheblich. Die Alterungsversuche zeigen, dass bei den zugelassenen Vliesstoffen die relative mechanische Festigkeit δF_B wie $\frac{1}{(\delta F_B)} = 1 + kt$ mit der Zeit t abnimmt (Thomas 2002; Müller et al. 2016). Die Rate hängt dabei vom Flächengewicht des Vliesstoffs ab: Je dicker umso beständiger. Nach 100 Jahren werden die Filtervliesstoffe zwar einen Gutteil ihrer Festigkeit verloren haben. Im eingebauten Zustand wird jedoch auch eine deutlich verringerte Festigkeit nicht die Filterfunktion beeinträchtigen. Der Abbau der mechanischen Festigkeit von entsprechend

stabilisierten PP-Geweben scheint sich nach einer ähnlichen Gleichung zu vollziehen. Die Rate ist jedoch wesentlich kleiner, weil das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen wesentlich kleiner ist als bei einer Faser.

Nicht nur die Alterung der Vliesstoffe wurden untersucht. Auch die mechanischen Eigenschaften der Einzelfasern und hierbei insbesondere das Verhalten der hochverstreckten Fasern unter einer dauerhaft einwirkenden Zugspannung wurden in speziellen Zeitstand-Zugversuchen studiert (Seeger et al. 2002).

11. LANGZEITVERHALTEN VON KUNSTSTOFF-DRÄNELEMENTEN

Kunststoff-Dränelemente bestehen aus einem Träger-Vliesstoff, einem Dränkern mit offener Struktur und einem Filter-Vliesstoff. Das Kunststoff-Dränelement kann in der Oberflächenabdichtung alternativ zum System aus Kiesdrainage und geotextilem Filter eingesetzt werden, wenn ausreichendes Wasserableitvermögen und die Standsicherheit gewährleistet sind (Simon und Müller 2004). Das Gewicht der Rekultivierungsschicht lastet auf dem Kunststoff-Dränelement und erzeugt Druck- und Scherkräfte. Dadurch verringert sich im Laufe der Zeit die Dicke des Dränkerns. Wobei es auch zu einem raschen Zusammenbruch der Dränkernstruktur kommen kann. Wir standen also vor der Aufgabe diese beiden Prozesse zu untersuchen und abzuschätzen, welches Wasserableitvermögen nach 100 Jahren aufgrund der stetigen Veränderung der Dränkerndicke noch vorhanden sein wird (Müller et al. 2008).

Das sind keine akademischen Fragestellungen. Und es ist auch nicht möglich, mit einem pauschalen Abminderungsfaktor Kriecheffekte oder gar Versagen der Dränkernstruktur zu berücksichtigen. Das

zeigte der Fall einer großen norddeutschen Deponie, einer der ersten Deponien bei der Mitte der 1990er Jahre großflächig ein Kunststoff-Dränelement eingebaut worden war. Nach einigen Jahren wurde beobachtet, dass sich in den Gasbrunnen während des Winterhalbjahres das Wasser aufstaute. Da man um die Standsicherheit der Rekultivierungsschicht fürchtete, wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm gestartet. Das zeitigte diverse Ergebnisse. Nachhaltige Wirkung ging jedoch vor allem von den Fotos aus, die einen vollständig platt gedrückten Dränkern zeigten (Melchior 2010).

Ob ein Stabilitätsversagen des Dränkerns auftritt und wie es verläuft, wird in Zeitstandversuchen bei sehr hohen Belastungen ermittelt. Die Versagenszeiten werden bei verschiedenen Belastungen bestimmt. Es ergibt sich so eine Zeitstandkurve, aus der abgeschätzt werden kann, ob überhaupt und wenn ja, wann frühestens, Stabilitätsversagen unter Anwendungsbedingungen auftreten wird. Daraus ergibt sich je nach Produkt eine noch zulässige Auflast und Böschungsneigung.

Erst wenn dieser Punkt geklärt ist, kann man die nur allmähliche Dickenänderung analysieren. Die Kriechkurven bei verschiedenen Belastungen, die die allmähliche Dickenänderung beschreiben, dürfen dann nämlich auf 100 Jahre extrapoliert werden. Man findet so eine Restdicke des Kunststoff-Dränelements. In den Prüfungen des Wasserableitvermögens werden Schaumstoffplatten verwendet, um die Bettung des Kunststoff-Dränelements zu simulieren. Man kann deshalb in diesen Prüfungen nicht einfach eine bestimmte Restdicke „einstellen“. Es wird daher eine „Eichkurve“ ermittelt, aus der abgelesen werden kann, welche Druckkraft erforderlich ist, um für kurze Zeit eine bestimmte Dicke des Kunststoffdränelements bei einer Prüfung mit Stahlplatten zu erzwingen. Mit dem Druck, der zur Restdicke nach 100 Jahren gehört, wird bei den verschiedenen Schaumstoff-Bettungen das Wasserableitvermögen bestimmt und als Langzeit-Wasserableitvermögen interpretiert. Je nach Druckfestigkeit des Dränkerns kann sich dieser Wert erheblich vom Wert des Wasserableitvermögens in den Datenblättern der Produkte unterscheiden.

Das Langzeit-Wasserableitvermögen wird noch durch weitere Abminderungsfaktor reduziert. Das Bemessen mit Abminderungsfaktoren stammt allerdings aus der Pionierzeit der Anwendung von Geokunststoffen. Abminderungsfaktoren sollten (nach und nach) durch eine quantifizierende Beschreibung der dahinterstehenden Prozesse ersetzt – wie oben für das Kriechen geschildert – oder zumindest nachvollziehbar abgeschätzt werden. Daher wurde auch die Abminderung experimentell bestimmt, die sich an den Stößen zwischen den ausgeroll-

ten Kunststoff-Dränelement-Bahnen ergeben (Müller und Wöhlecke 2017b). Wie diese Stöße auszuführen sind, wird von den Herstellern in den Zulassungsscheinen genau vorgeschrieben.

Im Hinblick auf die Standsicherheit ist noch ein anderer Aspekt wichtig. Damit das Kunststoff-Dränelement auch auf steilen Böschungen gebaut werden kann, werden flächig oder in einem Netzwerk von Punkten dessen Komponenten durch Schweißen miteinander verbunden. Es stellte sich daher die Frage, wie beständig diese Schweißverbindungen sind. Zum Zulassungsverfahren gehört auch die Prüfung der Beständigkeit der Verbindungsstellen in Zeitstand-Scherversuchen und natürlich die Prüfung der Oxidationsbeständigkeit der Dränkerne (Müller et al. 2009a).

Es wurde also ein ganzes Prüfpaket geschnürt, dass zwar recht aufwändig ist, dass aber überhaupt erst eine Einschätzung ermöglicht, ob ein Kunststoff-Dränelement seine Funktion über mindestens 100 Jahren erfüllen kann (Müller et al. 2008; Müller et al. 2009b).

Interessant ist gerade bei Kunststoff-Dränelementen der Vergleich zwischen den Anforderungen der europäischen Normen für Geotextilien und der Zulassungsrichtlinie. Eine solch differenzierte Bewertung der Produkte wie bei der BAM-Zulassung im Hinblick auf Dauerhaftigkeit und Standsicherheit ist auf der Grundlage der CE-Normen nicht möglich (Müller et al. 2014, Müller et al. 2015).

12. BEURTEILUNG VON BEWEHRUNGSGITTERN AUS KUNSTSTOFF

Bewehrungsgitter aus Kunststoff werden im Deponiebau selten eingesetzt. Manchmal braucht man jedoch ein Bewehrungsgitter, weil sonst die Oberflächenabdichtung im Verlauf des Einbaus und unter den daraus resultierenden besonderen Belastungen abrutschen könnte. In anderen Fällen soll dagegen die Standsicherheit der Oberflächenabdichtung dauerhaft durch das Bewehrungsgitter gewährleistet werden. Das Bewehrungsgitter wird dabei Bestandteil der Abdichtung und in der Böschungskrone dauerhaft verankert. Die Oberflächenabdichtung „hängt“ am Bewehrungsgitter. Das Bewehrungsgitter kann jedoch auch Bestandteil eines Stützbauwerks außerhalb der Abdichtung am Fuß der Böschung sein. Verankerung oder Stützbauwerk können versagen, weil ein innerer Scherbruch des Bodens auftritt, die Längs- oder Querelemente des Bewehrungsgitters reißen und die Verbindungsstellen zwischen diesen Elementen abreißen, aufschälen oder abscheren. Dementsprechend müssen bei der Bemessung drei Materialwiderstände berücksichtigt werden: die Scherfestigkeit des Bodens, die (Langzeit)-Zugfestigkeit der Elemente und die (Langzeit)-Festigkeit der Verbindungsstellen. Inwieweit diese Widerstände entlang eines eingebetteten Bewehrungsgitters mobilisiert werden, hängt davon ab, wie steif die Längselemente sind. Die geltenden Bemessungsregeln werden jedoch aus einem stark vereinfachten Modell abgeleitet. Es wird dazu angenommen, dass die Bewehrungsgitter starr und die Verbindungsstellen unzerstörbar sind. Da beide Annahmen allenfalls näherungsweise zutreffen, stand die Zulassung vor einem material- und bemessungstechnischen Problem. Das Langzeitverhalten eines Bewehrungsgitters kann auf der Grundlage dieses Modells nicht eingeschätzt werden.

Es gibt Bewehrungsgitter, bei denen die Reibung zwischen Boden und der Oberfläche der Längselemente den Widerstand gegen ein Herausziehen aus dem Boden oder gegen ein Gleiten des Bewehrungsgitters mit dem darüber liegenden Boden auf dem darunter

liegenden Boden so stark dominiert, dass es reicht, wenn die Bemessung nur diesen Mechanismus veranschlagt (reibungsdominiertes Bewehrungsgitter oder Reibungsgitter). Dann können die üblichen Bemessungsregeln angewendet werden. Dabei muss aber der Verbundkoeffizient in Prüfungen ermittelt werden, bei denen tatsächlich nur Längselemente ohne Querelemente verwendet werden. Das Verhalten der Verbindungsstellen und Querelemente wird dadurch „ausgeblendet“. Eine Zulassung dieser Produkte kann sich auf die Untersuchung des Langzeitverhaltens der Längselemente beschränken (Müller 2011). Es muss aber streng darauf geachtet werden, dass nur dieser modifizierte Verbundkoeffizient für die Berechnungen verwendet wird.

Bei den meisten Bewehrungsgittern ist die Reibung gering. Der Verzahnungs- oder „Interlocking“-Effekt und die Scherfestigkeit des Bodens bestimmen im Wesentlichen die Kräfte beim Herausziehen und auch die Kräfte beim Gleiten. Solche Bewehrungsgitter kann man als Interlocking-dominiertes Bewehrungsgitter oder Erddruckgitter bezeichnen. Die Querelemente stützen sich dabei auf den vor ihnen liegenden Boden (Interlocking). Im Versagensfall pflügen sie entweder durch den Boden (Herausziehen) oder sie schieben den oberen Boden über den unteren Boden (Gleiten). Die Querelemente übertragen dabei den Widerstand, den der Boden ihrer Verschiebung entgegensetzt (Interlocking-Kraft), über die Verbindungsstellen auf die Längselemente. Das Verhalten eines solchen Bewehrungsgitters, z. B. im Herausziehversuch, kann nicht durch das vereinfachte Modell der Bemessungsregeln beschrieben werden. Man braucht ein neues Modell (Wilson-Fahmy und Koerner 1993; Müller 2011).

Man betrachte dazu einen Herausziehversuch. Wenn die flexiblen Längselemente eines eingebetteten Bewehrungsgitters durch eine Zugkraft belastet werden, sind die Verschiebungen der Querelemente nicht

gleichmäßig verteilt. Sie sind im vorderen Bereich der Einbettung am größten und nehmen entlang der Längselemente ab, da die Zugkraft aufgrund der bereits mobilisierten Reibung und der Kräfte aus der Verzahnung mit dem Boden kontinuierlich entlang des Bewehrungsgitters abnimmt (Ziegler und Timmers 2003). Ab einer bestimmten kritischen Länge gibt es keine (oder nur noch eine zu kleine) Verschiebung. Es wird daher keine Reibungs- und Interlocking-Kraft mehr im verbleibenden Teil des Bewehrungsgitters mobilisiert. Bei einem bestimmten Wert der Zugkraft versagt entweder der Boden oder die Verbindungsstelle im vorderen Bereich der Einbettung. Der Boden versagt, weil seine Tragfähigkeit erreicht ist. Die Verbindungsstellen geben nach, wenn sie die Kräfte nicht aushalten können, die von Quer- auf Längselemente bei oder unterhalb der Tragfähigkeit des Bodens übertragen werden müssen. Ein Versagen des Bodens oder der Verbindungsstelle muss zunächst im vorderen Bereich erfolgen, da dort die Verschiebung und der entsprechend mobilisierte Erdwiderstand am größten sind. Wenn die Zugkraft weiter erhöht wird, verschiebt sich die „Zone“ des Bodenversagens oder Verbindungsversagens entlang des Bewehrungsgitters. Der Vorgang kann mit dem Öffnen eines Reißverschlusses verglichen werden. Wenn das Ende erreicht ist, beginnt der Auszug des gesamten Bewehrungsgitters. Daher tritt die maximale Zugkraft (die Herausziehkraft) im Verlauf einer Folge von lokalem Versagen auf. Aus dieser Betrachtung ergeben sich drei Schlussfolgerungen: (1) die Interlocking-Kräfte sind ungleichmäßig über das Bewehrungsgitter verteilt (Ziegler und Timmers 2003; Müller 2011). (2) Die übliche Annahme, dass die Herausziehkraft linear mit der eingebetteten Länge zunimmt, ist auf ein flexibles, Interlocking-dominiertes Bewehrungsgitter nicht anwendbar (Müller 2011). (3) Das Bewehrungsgitter kann seine Funktion nur für mindestens 100 Jahre erfüllen, wenn die Festigkeit der Verbindungsstelle auch nach dieser Zeit noch größer ist, als die aus der Tragfähigkeit des Bodens resultierende Interlocking-Kraft (Müller 2011; Swan Jr und Yuan 2016).

Eine Veränderung der Festigkeit der Verbindungsstelle hat daher nicht weniger Einfluss auf die Sicherheit der Konstruktion als eine Veränderung der Festigkeit der Längselemente. Da die Materialeigen-

schaften der Verbindungsstellen sich in der Regel von denen der Längselementen unterscheiden (z. B. Schweißnähte bei geschweißten Bewehrungsgitter, gänzlich verschiedene Morphologie bei extrudierten Bewehrungsgitter, einzelner Raschelfaden und Garne bei gewebten Bewehrungsgitter), kann aus dem Langzeitverhalten der Längselemente nicht ohne weiteres auf das der Verbindungsstellen geschlossen werden. Es bedarf eigener Untersuchungen der Eigenschaften der Verbindungsstelle und einer Bemessung, die die nach langer Zeit nur noch vorhandene Festigkeit der Verbindungsstellen berücksichtigt.

Was bedeutet dabei Festigkeit der Verbindungsstelle? Der Widerstand des Bodens führt zu Zug- und Scherkräften in der Ebene der Verbindung und möglicherweise zu einem damit verbundenen Zugscherbruch. Die zugehörige Zugscherfestigkeit kann entweder durch den GRI-GG2-Test bzw. die Methode a der ASTM D 7737 oder durch Methode b dieser Norm ermittelt werden. Wenn jedoch die Querelemente während der Verschiebung im Boden verdreht werden, tritt ein Zugkraftpaar senkrecht zur Kontaktfläche von Längs- und Querelementen auf, das zu einem Aufschälen der Verbindungsstelle führt. Schweißnähte sind z. B. empfindlich gegen Schälkräfte. Die Schälfestigkeit ist normalerweise niedriger als die Zugscherfestigkeit. Das Auftreten eines Schälversagens hängt von dem Ausmaß der Verdrehung und daher der Größe der Verschiebung ab. Die Schälfestigkeit der Verbindungsstelle kann daher indirekt durch eine noch zulässige Verschiebung charakterisiert werden, die in kleinteiligen Herausziehversuchen mit nur einem Querelement ermittelt werden kann (Jacobs 2016).

Die nach langer Zeit nur noch vorhandene Festigkeit kann dann durch Alterungsprüfungen ermittelt werden. Die Auswirkung der Alterung auf die Zugscherfestigkeit kann direkt (Zugscherversuche, gegebenenfalls Zeitstand-Zugscherversuche, an gealterten Proben) bestimmt werden. Die nach langer Zeit noch zulässige Verschiebung kann ebenfalls direkt (Herausziehversuche an gealterten Proben) oder indirekt bestimmt werden, wenn eine Beziehung zwischen der kritischen Verschiebung, die zum Aufschälen führt, und der Zugscherfestigkeit der Verbindung hergestellt werden kann. Wenn ein Langzeitwert für

die Zugscherfestigkeit ermittelt wurde, kann aus dieser Beziehung ein zugehöriger Langzeitwert für die zulässige Verschiebung extrapoliert werden.

Unsere Überlegungen und Fragen zum Verhalten und den Eigenschaften von Bewehrungsgittern wurde nur von einem Hersteller aufgegriffen. Mit seiner Unterstützung wurde in einem Promotionsvorhaben an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen ein numerisches Simulationsmodell entwickelt, das die hier beschriebenen Aspekt berücksichtigt (Jacobs 2016). Auf der Grundlage von experimentellen Werten für die Eingangsparameter, insbesondere Langzeit-Zugfestigkeit der Längselemente, Langzeit-Zugscherfestigkeit und zulässige

Langzeit-Verschiebung der Verbindungsstellen, kann mit diesem Modell das Verhalten des Bewehrungsgitter im Einbindegraben ohne die üblichen groben Vereinfachungen simuliert werden. Das Modell wurde anhand von großformatigen Herausziehversuchen und Feldversuchen zur Verformung eingebauter Bewehrungsgitter überprüft. Im Prinzip ist dieses Modell auch auf Stützbauwerke anwendbar.

Es steht also jetzt ein Konzept zur Verfügung mit dem zum ersten Mal die Lebensdauer einer Konstruktion aus bewehrter Erde fundiert beurteilt werden kann. Damit ist auch die Voraussetzung für eine Zulassung von interlocking-dominierten Bewehrungsgittern für den Deponiebau gegeben.

13. STANDSICHERHEIT

Als die BAM mit der Zulassungstätigkeit begann, wurde auf Tagungen noch die Auffassung vertreten worden, dass die KDB nach 30 Jahren spurlos verschwunden wäre. Die mineralische Dichtung würde jedoch ewig halten. Aus den USA war die gerade gegenteilige Meinung zu hören. Man hatte dort das Austrocknen mineralischer Oberflächenabdichtungen beobachtet. Das hatte grundsätzliche Zweifel an der Eignung von MD geweckt. Der Dichtungsbahn war dagegen eine Lebensdauer von 10.000 Jahren zugebilligt worden. Mit zunehmendem Wissen und in einer langen intensiven Fachdiskussion näherten sich die Einschätzungen der Lebensdauern von KDB und MD einander an, sowohl in Deutschland wie auch in den USA. Als technisch realisier- und überprüfbare Anforderung an die Lebensdauer generell von Komponenten in Deponieabdichtungen wurde schließlich in der Deponieverordnung die Formulierung fixiert: „mindestens 100 Jahre unter allen äußeren und inneren Einwirkungen“.

Sorge bereitet inzwischen nicht mehr die Dichtigkeit, sondern die Standsicherheit. Ist das Funktionieren von Dränschicht und Filter tatsächlich unter allen Einwirkungen über mindestens 100 Jahre gewährleistet? Wenn Filter und Dränage nicht mehr ausreichend Wasser ableiten, staut sich das Wasser bei einem starken Regenereignis in der Rekultivierungsschicht auf. Die Scherfestigkeit des Bodens unter dieser Bedingung reicht dann u. U. für einen sicheren Stand nicht mehr aus, so lautet das Argument.

Durchwurzelung und chemisch und auch biologisch bedingte mineralische Ablagerungen (Inkrustationen) können das Wasserableitvermögen des Kunststoff-Dränkerns im Laufe der Zeit beeinträchtigen. Die Durchlässigkeit des geotextilen Filters kann durch Verstopfung mit von feinen Bodenteilchen, durch Ausbildung eines wenig durchlässigen Filterkuchens oberhalb des Filters und durch Ausbildung einer Kruste aus mineralischen Ablagerungen unterhalb des Filters abnehmen. Feine Wurzeln im Filter und Filterkuchen können

die Durchlässigkeit zusätzlich verschlechtern. Andererseits kann die Ausbildung feiner Kanäle, die aus der Durchwurzelung stammen, sich auch positiv auf die Durchlässigkeit auswirken. Inkrustationen bilden sich zunächst immer an Grenzflächen.

In welchem Ausmaß sich diese nachteiligen Prozesse ausbilden, hängt vom Rekultivierungsboden ab. Es ist dabei nicht allein der Dränkern, sondern eben auch der Filter, der von solchen Prozessen betroffen ist. Angenommen, man befürchtet, dass das Verstopfen des geotextilen Dränkerns durch mineralische Ablagerungen die Standsicherheit der Rekultivierungsschicht gefährdet. Dann würden diese Inkrustationen sich vornehmlich in der Grenzfläche zwischen geotextilem Filter und Dränkern bilden. Dann würde die sich bildende Kruste auf der Unterseite des Vliesstoffs vor allem dessen horizontale Durchlässigkeit gefährden. Dann würde diese Kruste sich auch, und vermutlich sogar in noch stärkerem Ausmaß, an der Unterseite des geotextilen Filters einer Kiesdränage bilden. Dann wäre auch in diesem Fall die horizontale Durchlässigkeit gefährdet. Dann wäre die Gefahr für die Standsicherheit unabhängig davon, wie dick die Dränschicht und wie groß deren Porenvolumen ist, weil es eben vor allem auf den geotextilen Filter ankäme.

Mit solchen Überlegungen hat man den Bereich der Werkstoffkunde längst verlassen. Man hat es mit einer Fragestellung zu tun, auf die nur geotechnische Untersuchungen und Erkundungen eine Antwort geben können. Nur auf deren Grundlage kann man

die Auswirkungen von Durchwurzelung und Bildung mineralischer Inkrustationen einschätzen. Man weiß aus anderen Anwendungen, dass geotextile Filter unter kritischen Bedingungen auch nach 20 Jahren gut funktionieren (Faure et al. 1999; Veylon et al. 2016). Nach dieser Zeit zeigen sich allerdings auch schon Auswirkungen von Prozessen, die die Funktion beeinträchtigen. Eine mineralische Dränschicht mit einem mineralischen Filter erfüllt ihre Funktion nicht per se länger als ein nach den Regeln der Zulassung ausgewähltes Paket aus geotextilem Filter und Kunststoff-Dränmatte. In der Geotechnik der Deponien wird daher bis zum Beweis des Gegenteils davon ausgegangen, dass diese Prozesse in einer Oberflächenabdichtung nur sehr allmählich ablaufen bzw. sich in dem Maße verlangsamen, wie sie fortschreiten. Insofern besteht hier zweifellos noch eine gewisse Unsicherheit im Hinblick auf die Erfüllbarkeit der Anforderungen der Deponieverordnung.

Die Zulassung für geotextile Filter und Kunststoff-Dränelemente feiert gerade erst den zehnten Jahrestag. Deponieoberflächenabdichtungen, bei denen mit den zugelassenen Produkten vergleichbare geotextile Filter auf der Kiesdränage eingesetzt wurden, sind vermutlich nicht mehr als 20 Jahren alt. Es ist daher vielleicht noch zu früh, um sich durch Aufgrabungen ein klares Bild verschaffen zu können. Solche Aufgrabungen, die man zu einer Voraussetzung für die Entlassung aus der Nachsorge machen könnte, sind jedoch sicherlich ein Desiderat der deponietechnischen Forschung der nächsten Jahre.

14. JENSEITS VON 100 JAHREN

Man kann sich ein abgeschlossenes Deponiebauwerk ohne eine gewisse Pflege nicht recht vorstellen. Die großen Versickerungsbecken für das Oberflächenwasser werden verschlammten und verlanden. Sie müssen regelmäßig saniert werden. Sickerwasser muss

gesammelt und in Behandlungsanlagen gereinigt werden. Auch wenn die Schadstofffrachten so gering geworden sind, dass das Sickerwasser vor Ort in Teiche mit reinigenden Sumpfpflanzen eingeleitet werden kann, so müssen diese Teiche doch gepflegt wer-

den. Auf einer 1 – 1,5 m dicken Rekultivierungsschicht stehen große Bäume nicht sicher. Der Bewuchs muss kurzgehalten werden. Solche Maßnahmen werden in den USA aus den Erträgen eines Fonds finanziert, in den der Betreiber bis zum ordnungsgemäßen Abschluss seiner Deponie hat einzahlen müssen.

Was aber machen die Abdichtungskomponenten? Es ist nicht möglich, den Zustand der Komponenten eines technischen Bauwerks in sehr ferner Zukunft, sagen wir in rund 300 Jahren, zuverlässig vorherzusagen. Wechseln wir also zum Schluss vom Genre der wissenschaftlichen Sachverhaltsdarstellung in das Genre der wissenschaftlichen Spekulation. Wir gehen von einer heute nach dem Stand der Technik errichteten Oberflächenabdichtung aus. Welches Szenario (für das Jahr 2300) könnte man entwerfen?

Die feinkörnige mineralische Abdichtungskomponente ist ausgetrocknet, die Durchlässigkeit durch Trockenrisse stark erhöht. Die Dichtungsbahn mit ihrer geprägten Oberflächenstruktur ist intakt, jedoch versprödet. Man kann sich das so vorstellen: Würde z.B. ein Mitarbeiter einer Baufirma auf einer ausgegrabenen Fläche mit dem beschlagenen Absatz der schweren Baustiefel mit Wucht auf die KDB aufstampfen, so würde diese ähnlich einem Sperrholzbrettchen zerbrechen. Die Verformungen, denen die versprödete KDB schadlos folgen kann, wären jedoch noch immer erheblich. Auch eine dünne großflächige Sperrholzplatte kann man biegen (Annahme: 6 Jahre, um den Zustand bei 80 °C im Labor im Wasserbad zu erzeugen, Aktivierungsenergie 55 kJ/mol (Müller et al. 2016)). In Bereichen hoher Span-

nungskonzentration – z.B. bei den Auftragnähten der Anbindung an Gasrohre, wo eventuell größere Setzungen auftreten, oder bei in der Böschung quer zur Fallrichtung laufenden Heizkeilnähten, wo sich die Setzungen nachteilig auswirken – könnten feine Spannungsrisse entstanden sein. Die Dränernstruktur des Kunststoff-Dränelements ist intakt. Der Dränern ist jedoch stark zusammengedrückt. Das Wasserleitvermögen entspricht allenfalls noch dem vorhergesagte Langzeit-Wasserleitvermögen. Obwohl die Elemente der Dränernstruktur ebenfalls versprödet sind, können sie den Druck- und Scherkräften noch Stand halten (Müller et al. 2009a). Die Festigkeit des Filtervliesstoffs beträgt dagegen nur noch etwa ein Fünftel des Ausgangswerts (Annahme: $k=2,14 \times 10^{-3} d^{-1}$ bei 80 °C im Ofen und Aktivierungsenergie 42 kJ/mol (Thomas 2002; Müller et al. 2016)). Die Fasern sind sehr stark versprödet. Die Faserstruktur des Filters ist jedoch noch vorhanden.

Es ist nicht ausgeschlossen, dass dieser Zustand der Oberflächenabdichtung schon nach der halben Zeit eintritt. Es ist aber auch möglich, dass die doppelte oder dreifache Zeit vergehen muss. Aus materialtechnischer Sicht wäre die Abdichtung im Wesentlichen noch dicht und sie wäre standsicher. Welche Auswirkungen aber haben die oben angesprochenen äußeren Einwirkungen auf Dränage und Filter? Und was geschähe mit der Rekultivierungsschicht, wenn nicht mehr ausreichend dräniert würde? Hier müsste ein erfahrener und sachkundiger Geologe oder Geotechniker den Erzählgarn weiter spinnen.

LITERATUR

ASTM D5397: Standard Test Method for Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyolefin Geomembranes Using Notched Constant Tensile Load Test. doi:10.1520/D5397-19. ASTM International, Conshohocken, PA, USA, (2019)

Abdelaal, F., Rowe, R. K. und Brachman, R. W. I. (2014). Brittle rupture of an aged HDPE geomembrane at local gravel indentations under simulated field conditions. *Geosynthetics International* 21(1): 1-21. <https://doi.org/10.1680/gein.13.00031>.

August, H., Tatzky, R., Pastuska, G. und Win, T. (1984). *Untersuchungen zum Permeationsverhalten von handelsüblichen Kunststoffdichtungsbahnen als Deponieabdichtungen gegenüber Sickerwasser, organischen Lösungsmitteln und deren wässrigen Lösungen*. Berlin, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM).

August, H., Tatzky-Gerth, R., Preuschmann, R. und Jakob, I. (1992). *Permeationsverhalten von Kombinationendichtungen bei Deponien und Altlasten gegenüber wassergefährdenden Stoffen, Bericht zum FuE Vorhaben 10302208 des BMBF*. Berlin, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM).

Averesch, U. B. und Schicketanz, R. T. (1998). Installation procedure and welding of geomembranes in the construction of composite landfill liner system: the fixing berm construction method. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics*. Rowe, R. K. (Hrsg.). Roseville, MN, USA, Industrial Fabrics Association International (IFAI): 307-313.

Faure, Y., Farkouh, B., Delmas, P. und Nancey, A. (1999). Analysis of geotextile filter behaviour after 21 years in Valcros dam. *Geotextiles and Geomembranes* 17(5-6): 353-370. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(99\)00010-2](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(99)00010-2).

Freitag, W.: Determination of a Polymeric Light Stabiliser in Polypropylene. *Fresenius Zeitschrift für Analytische Chemie* 316, 495-496 (1983).

Hsuan, Y. G., Koerner, R. M. und Lord, A. E. (1993). Stress Cracking Resistance of High Density Polyethylene Geomembranes. *Journal of Geotechnical Engineering* 119(11): 1840-1857. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:11\(1840\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:11(1840)).

Jacobs, F. (2016). *Interaktionsmodell zur Bemessung von Verankerungsgräben mit Geogittern*, <https://d-nb.info/1130327353/34>.

Kalbe, U., Müller, W. W., Berger, W. und Eckhardt, J. (2002). Transport of organic contaminants within composite liner systems. *Applied Clay Science* 21: 67-76. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(01\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(01)00093-X).

Koerner, R. M. (2002). A GRI White Paper on The Questionable Strategy of Soil-Only Landfill Covers. <https://geosynthetic-institute.org/papers/paper2.pdf>

Knipschild, F. W. (1985). Werkstoffauswahl und Dimensionierung von Kunststoffdichtungsbahnen für Grundwasserschutzmaßnahmen. In: *Deponiebasisabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen, Müll und Abfall, Beiheft 22*. Knipschild, F. W. (Hrsg.). Berlin, Erich Schmidt Verlag: 49 - 60.

Koch, R., Gaube, E., Hessel, J., Gondro, C. und Heil, H. (1988). Langzeitfestigkeit von Deponiedichtungsbahnen aus Polyethylen. *Müll und Abfall* 20(8): 3-12.

Landreth, R. E. (1984). The Role of Flexible Membrane Liners in Support of RCRA Regulations. In: *Proceedings of the International Conference on Geomembranes*. St. Paul, Minnesota (USA), Industrial Fabrics Association International (IFAI): 21-23.

Lüders, G. (1999). Praxiserprobung eines Modells zur Bewertung der Qualität von heißkeilgeschweißten Überlappnähten. In: *Tagungsband der 15. Fachtagung: Die sichere Deponie*. Knipschild, F. W. (Hrsg.). Würzburg, Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ): M1-M20.

Lüders, G. (2000). Quality assurance in hot wedge welding of HDPE geomembranes. In: *Proceedings of the Second European Geosynthetics Conference*. Cancelli, A., Cazzuffi, D. and Soccodato, C. (Hrsg.). Bologna, Pàtron Editore.

Lüders, G. (2001). 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).

Lüders, G. (2002a). Stand der Technik beim maschinellen Heizkeilschweißen von Dichtungsbahnen aus PEHD. In: *Tagungsband der 18. Fachtagung: Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen*. Knipschild, F. W. (Hrsg.). Würzburg, Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ).

Lüders, G. (2002b). Processmodel assisted control for hot wedge welding of landfill HDPE geomembranes. In: *Geosynthetics, State of the Art, Recent Developement, Proceedings of the Seventh International Conference on Geosynthetics*. Delmas, P. und Gourc, J. P. (Hrsg.). Nisse, The Netherlands, A.A. Balkema Publishers: 1491-1494.

Melchior, S. (2010). Langzeitverhalten einer Dränmatte in einer Deponieoberflächenabdichtung - ein Fallbeispiel. In: *6. Leipziger Deponiefachtagung, Planung, Bau, Betrieb, Stilllegung, Nachsorge, Nachnutzung und Rückbau von Deponien*. Kilchert, M. (Hrsg.). Leipzig, Hochschule für Technik, Wissenschaft und Kultur: B 09 - 01 bis B 09 - 21. http://www.mplusw.de/pdf/Melchior_Leipzig_2010.pdf

Müller, W. W. (1999). Stofftransport in Deponieabdichtungssystemen, Teil 3: *Auswirkungen von Fehlstellen in der Dichtungsbahn, ein Überblick*. Bautechnik 76(9): 757-768. <https://doi.org/10.1002/bate.199904880>.

Müller, W. W. und Jakob, I. (2000). Comparison of Oxidation Stability of various Geosynthetics. In: *Proceedings of the Second European Geosynthetics Conference*. Cancelli, A., Cazzuffi, D. and Soccodato, C. (Hrsg.). Bologna, Pàtron Editore: 449-454.

Müller, W. W. und Jakob, I. (2003). Oxidative resistance of high-density polyethylene geomembranes. *Polymer Degradation and Stability* 79(1): 161-172. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00269-0](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00269-0).

Müller, W. W. (2007). *HDPE Geomembranes in Geotechnics*. Berlin, Germany, Springer Publishers.

Müller, W. W., Jakob, I. und Tatzky-Gerth, R. (2008). Long-term water flow capacity of geosynthetic drains and structural stability of their drain cores. *Geosynthetics International* 15(6): 437-451. <https://doi.org/10.1680/gein.2008.15.6.437>.

Müller, W. W., Jakob, I., Tatzky-Gerth, R. und Li, C. S. (2009b). Durability of polyolefin geosynthetic drains. *Geosynthetics International* 16(1): 28-46. <https://doi.org/10.1680/gein.2009.16.1.28>.

Müller, W. W., Jakob, I., Li, C. S. und Tatzky-Gerth, R. (2009a). Antioxidant depletion and OIT values of high impact PP strands. *Chinese Journal of Polymer Science* 27(3): 435-445.

Müller, W. W. (2011). Zur Bemessung der Verankerung von Bewehrungsgittern aus Kunststoff beim Schutz von Böschungen vor hangparallelem Gleiten. *Bautechnik* 88(6): 347-361. <https://doi.org/10.1002/bate.201101472>.

Müller, W. W. (2014). On the determination of the chemical reduction factor for PET geogrids. *Geotextiles and Geomembranes* 42: 98-110. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.12.009>.

Müller, W.W., Wöhlecke, A., Simon, F.G., Biedermann, K., Bräcker, W., Engelmann B. und Zanzinger H. (2014). Sind BAM-Zulassung und CE-Kennzeichnung im Wesentlichen gleichwertig?, Teil 1. *Müll und Abfall* 46(12): 680-688.

Müller, W.W., Wöhlecke, A., Simon, F.G., Biedermann, K., Bräcker, W., Engelmann B. und Zanzinger H. (2014). Sind BAM-Zulassung und CE-Kennzeichnung im Wesentlichen gleichwertig?, Teil 2. *Müll und Abfall* 47(1): 36-41.

Müller, W. W., Jakob, I., Tatzky-Gerth, R. und Wöhlecke, A. (2016). A Study on Antioxidant Depletion and Degradation in Polyolefin-Based Geosynthetics: Sacrificial Versus Regenerative Stabilization. *Polymer Engineering & Science* 56(2): 129-142. <https://doi.org/10.1002/pen.24199>.

Müller, W. W. und Wöhlecke, A. (2016). A Study on High Oxygen Pressure Autoclave Testing for the Oxidative Resistance of Polyolefin-based Geosynthetics. In: *Proceedings of Geo-Chicago 2016, Section: Geosynthetics, Forging a Path to Bona Fide Engineering Materials*, GSP 275. Y.G. Hsuan, S.K. Bhatia und Soong (Hrsg.). T. Y. Reston, USA, ASCE, www.asce.org: 332-341. <https://doi.org/10.1061/9780784480182.030>.

Müller, W. W. und Wöhlecke, A. (2017a). Zero leakage? Landfill liner and capping systems in Germany. *Environmental Geotechnics*: <https://doi.org/10.1680/jenge.16.00031>. <https://www.icvirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/jenge.16.00031>.

Müller, W.W. und Wöhlecke, A. (2017b). Das Wasserleitvermögen in den Querstößen von Kunststoff-Dränelementen. *Geotechnik* 40(1): 54-59.

Saathoff, F. (1996). About the dimensioning of geosynthetic drainage systems in landfill covers. In: *Geosynthetics: Applications, Design and Construction*. De Groot, M. B., Den Hoedt, G. und Termaat, R. J. (Hrsg.). Rotterdam, A. A. Balkema: 757-764.

Saathoff, F. (1999). Dränsysteme aus Wirrgelege und Vliesstoff. In: *Tagungsband der 15. Fachtagung:*

Die sichere Deponie, wirksamer Grundwasserschutz mit Kunststoffen. Knipschild, F. W. (Hrsg.). Würzburg, Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ).

Saathoff, F., Cantré, S. und Müller, W. W. (2012). The new German filtration criteria for geosynthetics in landfill construction. In: *Proceedings of the 5th European Geosynthetics Congress, Volume 5, Mining & Environmental Application*. Blanko, M., Leiro, A., Mateo, B., Torregrosa, L. B., Abad, P., Pardo de Santayana, F. und Santalla, J. (Hrsg.). IGS-Spain, www.eurogeo5.org/index_i.php: 264-268.

Schicketanz, R. (1992). Wirkungsweise der Kombinationsdichtung und Anforderungen an die mineralische Oberfläche. *Müll und Abfall* 24(5): 287-295.

Schröder, H. F., Munz, M. und Böhning, M. (2008). A New Method for Testing and Evaluating the Long-Time Resistance to Oxidation of Polyolefinic Products. *Polymers and Polymer Composites* 16(1): 71-79.

Seeger, S. und Müller, W. (1996a). Limits of stress and strain: Design criteria for protective layers for geomembrane in landfill liner systems. In: *Geosynthetics: Applications, Design and Construction, Proceedings of the First International European Geosynthetics Conference (Eurogeo 1)*. DeGroot, M. B., DenHoedt, G. und Termaat, R. J. (Ed.). Rotterdam, A. A. Balkema: 153-157.

Seeger, S. und Müller, W. (1996b). Requirement and Testing of Protective Layer Systems for Geomembranes. *Geotextiles and Geomembranes* 14(7-8): 365-376. [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(96\)89792-5](https://doi.org/10.1016/0266-1144(96)89792-5).

Seeger, S., Müller, W., Jakob, I., Tatzky-Gerth, R. und August, H. (1995). 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(8): 544-560.

Seeger, S. und Müller, W. W. (2001). *Langzeitbeständigkeit strukturierter Dichtungsbahnen*, BAM-Forschungsbericht 256. Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH.

Seeger, S., Müller, W.W. und Mohr, K. (2002). Long term tensile testing of polyolefin fibers in geotextiles. In: *Geosynthetics, State of the Art, Recent Developements, Proceedings of the Seventh International Conference on Geosynthetics*. Delmas, P., Gourc, J.P. (Hrsg.). Lisse, The Netherlands, A. A. Balkema Publishers: 1459-1462.

Seeger, S. und Müller, W. W. (2003). Theoretical approach to designing protection: selecting a geomembrane strain criterion. In: *Geosynthetics: Protecting the Environment*. Dixon, N., Smith, D. M., Greenwood, J. H. und Jones, D. R. V. (Hrsg.). London, Thomas Telford: 137-152.

Sehrbrock, U. (1993). Prüfung von Schutzlagen für Deponieabdichtungen aus Kunststoff. Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig.

Simon, F. G. und Müller, W. W. (2004). Standard and alternative landfill capping design in Germany. *Environmental Science & Policy* 7: 277-290. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2004.04.002>.

Stief, K. (1985). Anforderungen an die Wirksamkeit von Deponiebasisabdichtungen. In: *Deponiebasisabdichtungen mit Kunststoffdichtungsbahnen, Müll und Abfall, Beiheft 22*. Knipschild, F. W. (Hrsg.). Berlin, Erich Schmidt Verlag: 9-12.

Stief, K. (1986). Das Multibarrierensystem als Grundlage von Planung, Bau, Betrieb und Nachsorge von Deponien. *Müll und Abfall* 18(1): 15.

Swan Jr, R. H. und Yuan, Z. (2016). A Theoretical Analysis of the Maximum Load Transferred to the Junctions of a Geogrid Confined in Granular Soil. In: *Proceedings of Geo-Chicago 2016, Section: Geosynthetics, Forging a Path to Bona Fide Engineering Materials*, GSP 275. Y.G. Hsuan, S.K. Bhatia und Soong (Hrsg.), T. Y. Reston, USA, ASCE, www.asce.org: 37-48. <https://doi.org/10.1061/9780784480182.004>.

Thomas, R.W., 2002. Thermal oxidation of a polypropylene geotextile used in geosynthetic clay Liner. In: *Clay Geosynthetic Barriers*. Zanzinger,

H., Koerner, R.M., Gartung, E. (Hrsg.). Lisse, The Netherlands, A.A. Balkema Publishers: 87-96.

Veylon, G., Stoltz, G., Mériaux, P., Faure, Y.-H. und Touze-Foltz, N. (2016). Performance of geotextile filters after 18 years' service in drainage trenches. *Geotextiles and Geomembranes* 44(4): 515-533. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2016.02.002>.

Wilson-Fahmy, R. F. und Koerner, R. M. (1993). Finite element modelling of soil-geogrid interaction with application to the behavior of geogrids in a pullout loading condition. *Geotextiles and Geomembranes* 12(5): 479-501. [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(93\)90023-H](https://doi.org/10.1016/0266-1144(93)90023-H).

Witte, R. (1990) Kurzbericht: Weiterentwicklung des Schutzwirkungsnachweises für geotextile Schutzsysteme in der Deponieabdichtung, *Müll und Abfall* 22(12): 788-789.

Witte, R. (1997). Practice-oriented investigations to improve geotextile protective layer systems for geomembranes with regard to their long-term protective efficacy. In: *Advanced landfill liner systems*. August, H., Holzlöhner, U. und Meggyes, T. (Hrsg.). London, Thomas Telford Publishing: 270-277.

Ziegler, M. und Timmers, V. (2003). Neues Bemessungskonzept für die Bemessung der Verankerungslänge von Geogittern. In: *Geotechnik (Sonderheft, 8. Informations- und Vortragstagung über Kunststoffe in der Geotechnik)*: 51-59.

Zimmermann, J. und Sehrbrock, U. (1997). MDDS-System (Mineralisches-Deponie-Dichtungsschutzsystem). In: *Tagungsband der 13. Fachtagung: Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen*. Knipschild, F. W. (Hrsg.). Würzburg, Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ).[

Die Kunststoffdichtungsbahn mit BAM Zulassung als Ursprungselement für die Entwicklung von Dichtungssystemen im Deponiebau.



DIE KUNSTSTOFFDICHTUNGSBAHN MIT BAM ZULASSUNG ALS URSPRUNGSELEMENT FÜR DIE ENTWICKLUNGSSYSTEMEN IM DEPONIEBAU

Georg Heerten

30 Jahre BAM-Zulassung „Die Kunststoffdichtungsbahn mit BAM-Zulassung als Ursprungselement für die Entwicklung von Dichtungssystemen im Deponiebau“

von Prof. Dr.-Ing. Georg Heerten

Gliederung

- Einleitung
- Mineralische Baustoffe
- Kunststoffdichtungsbahnen (KDB)
- Schutzlagen für KDB
- Kunststoffdränsysteme
- Geosynthetische Tondichtungsbahnen
- Bewehrungsgitter
- Internationale Entwicklung



Quelle: "Deponie Georgswerder, Sanierung 1984-95", Umweltbehörde Hamburg, 1995.



Foto: <https://www.hamburg.de/energieberg-georgswerder/2567396/01-historie/>

Die Herausforderung:
 Schutz der Umwelt vor Schadstoffen aus der Deponie (Deponiesickerwasser und -gas
 ggf. bei entsprechender Wärmeentwicklung im Deponiekörper).
 Die Aufgabe:
 Dichten nicht gegen Wasser, sondern gegen Schadstoffe / Umweltgifte.

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

E3

30 Jahre BAM-Zulassung „Die Kunststoffdichtungsbahn mit BAM-Zulassung als Ursprungselement für die Entwicklung von Dichtungssystemen im Deponiebau“ von Prof. Dr.-Ing. Georg Heerten

Von 50.000 Müllkippen (1972) zu
 167 kontrollierten und regulierten
 Abfallbehandlungsanlagen (2006)



Quelle: "Deponie Georgswerder, Sanierung 1984-95", Umweltbehörde Hamburg, 1995.



Quelle: Neue Westfälische vom 09.09.2010 , Foto: Tyler Larkin.

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

E1

Zunächst die
 klassische
 Antwort
 aus Wasserbau
 und Geotechnik:



Mineralische
 Baustoffe zum

- Dränen
- Filtern
- Schützen
- Dichten

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

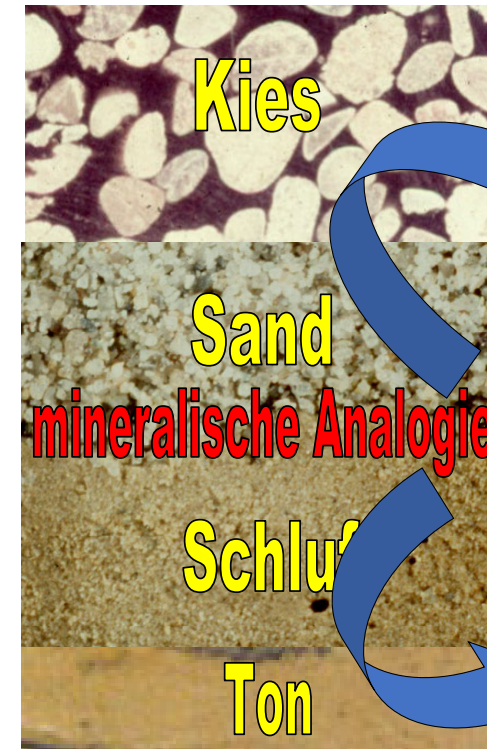
M1



Mineralische Baustoffe
mit großem Vertrauensvorschuss
für langfristig wirksame Lösungen.
„Ton ist das kleinste Zerfallsprodukt
unserer Gesteine....“
und die klassische Dichtung im Wasserbau
(..im nassen Umfeld!!).

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

M2



JA ! Körner
für die
Langzeitbeständigkeit

NEIN ! Poren
für die
Langzeitwirksamkeit

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

M4

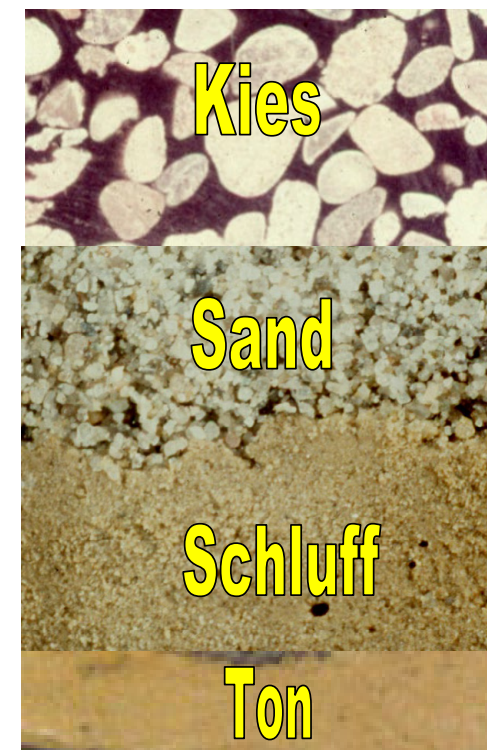
Die mineralische Dichtung / Tondichtung im Deponiebau

... ist aufwendig und schwierig
einzubauen.....
Einbauparameter (z.B. Dicke der
einzelnen Lagen,
Verdichtung, Porengehalt)
werden aufwendig überwacht....
und dann bleibt die Hoffnung,
dass sich die Parameter nicht
ändern und die Dichtung
langfristig wirksam bleibt.
**Geologen weisen zudem
bereits auf die Bedeutung der
tonmineralischen
Zusammensetzung hin.**



30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

M3



**Bei Kiesen, Sanden,
Schluffen, Tonen
definieren
die Poren
die Wirksamkeit beim
Dränen, Filtern, Dichten!**

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

M5

Die KDB als weiteres neues Dichtungselement



Fotos: GSE Lining Technology GmbH,
A Solmex Company

Erste KDB-Anwendung im Deponiebau:
Deponie Galing (1973, 110.000 m²),
2,5 mm dicke Schlegel-Platte (HDPE) mit
einer Verlegebreite von 10,2 m!
(Web-Extrusionsverfahren, Schlegel
(GSE), Hamburg)



30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

K1

Einen Vertrauensvorschuss wie bei mineralischen
Baustoffen gab es für die KDB nicht –
kritische Fragen zur (Chemikalien)-Beständigkeit
und Langzeitwirksamkeit
(100 / 1000 / 10000 Jahre!)
werden gestellt.



Foto: GSE Lining Technology GmbH,
A Solmex Company

Der Weg zu Dichtungssystemen mit
der Anwendung verschiedener
Geokunststoff-Komponenten ist
noch lang....
und einige Probleme müssen erst
noch erkannt und gelöst werden.



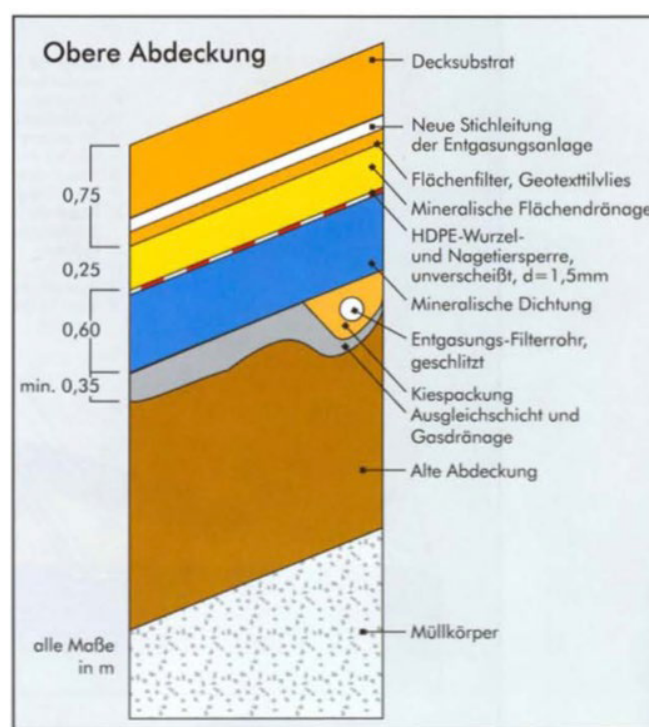
Foto: NAUE



Foto: Ingenieurbüro Schickanz, Aachen

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

K3



Das Vertrauen in eine KDB ist nicht groß –
1985 schafft es eine KDB als
Wurzel- und Nagetiersperre
in die Oberflächenabdichtung
der Deponie Hamburg-Georgswerder!

1,5 mm PEHD-Kunststoffbahn (Polyethylen hoher Dichte) als **Wurzel- und Nagetiersperre**, in der Horizontalen überlappend verlegt, in Fallrichtung verschweißt, mit sandrauer Oberfläche, 1 - 2 mm hohen Stegen an der Oberseite und 6 mm hohen Spikes an der Unterseite (gegen Abgleiten). Die Kunststoffbahn soll eine Beschädigung der mineralischen Dichtung durch biotische Einflüsse verhindern. Zugleich ist sie eine zusätzliche Abdichtung.

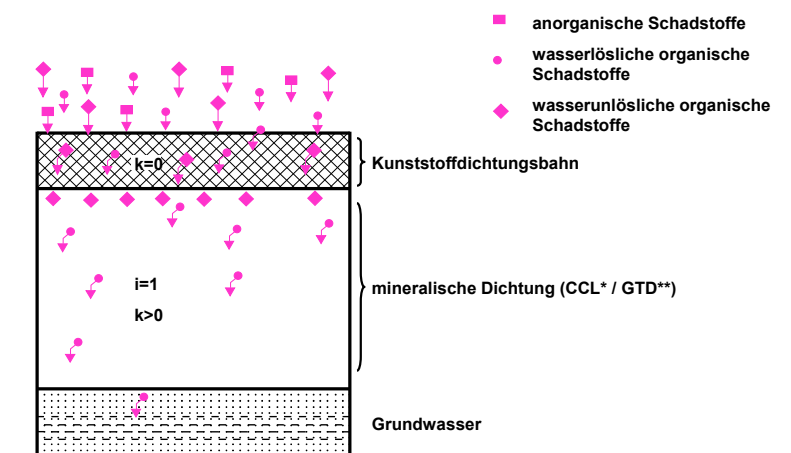
Quelle: "Deponie Georgswerder, Sanierung 1984-95",
Umweltbehörde Hamburg, 1995.

**Doch nach Jahren steht fest: Durch Austrocknung
der mineralischen Dichtungsschicht wird die KDB
zur alleinigen wirksamen Dichtung!**

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

K2

Schadstoffzurückhaltung mit Kombinationsdichtung



* CCL = verdichtete Tondichtung

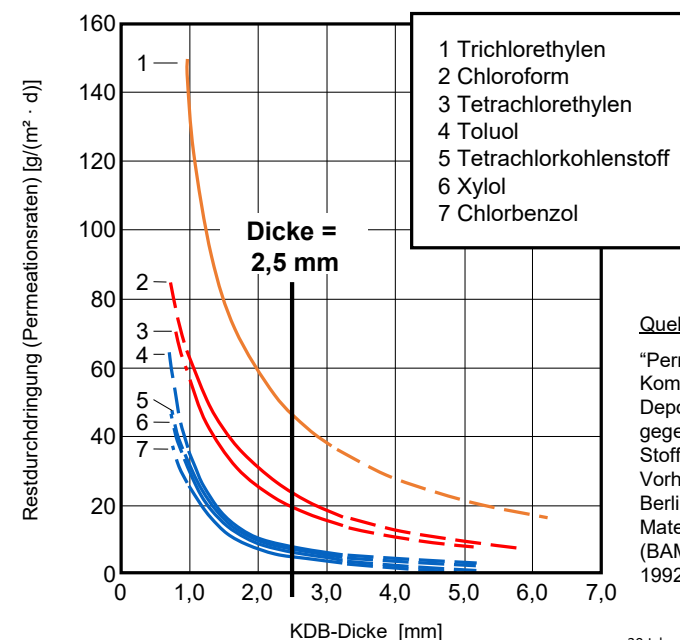
** GTD = Geosynthetische Tondichtung

Quelle: "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.

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

K4

DIFFUSION von konzentrierten und chlorierten Kohlenwasserstoffen durch PEHD-Kunststoffdichtungsbahnen



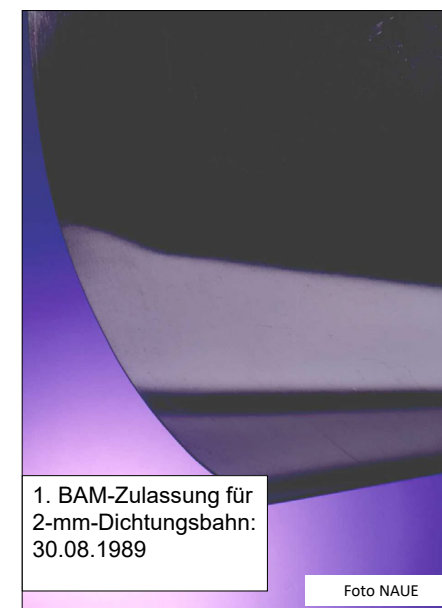
Quelle:
"Permeationsverhalten von Kombinationsdichtungen bei Deponien und Altlasten gegenüber wassergefährdenden Stoffen", Bericht zum FuE-Vorhaben 10302208 des BMBF. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Labor Deponietechnik 1992.

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

K5

1. BAM-Zulassung für Carbofol®-Kunststoffdichtungsbahnen 1989

Heute aktuell
für Kunststoffdichtungsbahnen
→ die 9. Auflage vom Mai 2018:



BAM



Menü

Sicherheit in Technik und Chemie

Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen für Deponieabdichtungen

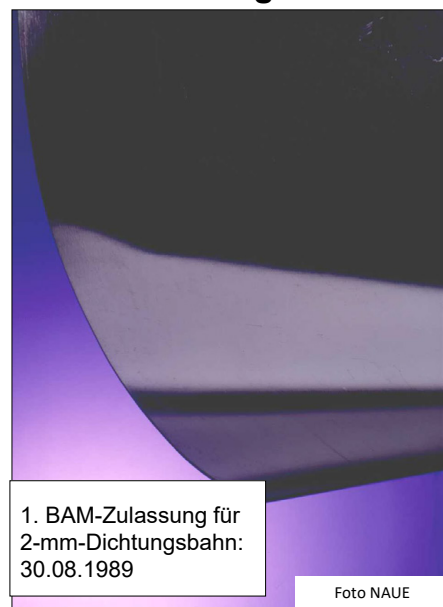
Startseite > Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen für Deponieabdichtungen

Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen für Deponieabdichtungen

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

K7

1. BAM-Zulassung für Carbofol®-Kunststoffdichtungsbahnen 1989



„Ab 1989 wurden dann für das Land Niedersachsen Eignungsnachweise und Zulassungen für Kunststoffdichtungsbahnen für Basis- und Oberflächenabdichtungen von Deponien durchgeführt“.

Quelle: Werner Müller: "Handbuch der PE-HD-Dichtungsbahnen in der Geotechnik", Birkhäuser Verlag, 2001.

1989 konnte erstmalig eine Deponie, die **Deponie Bardowick**, mit einer **BAM-zugelassenen Carbofol®-Dichtungsbahn** von der Niederberg Chemie beliefert werden.

Seit 1996 sind Carbofol®-Dichtungsbahnen Produkte der NAUE GmbH & Co.KG, Espelkamp.

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

K6



Unzulässig verformte PEHD-KDB

Schutz der KDB gegen Einbaubeanspruchungen und Müllaufkast

Foto NAUE

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

S1



**Deponie Hopferstadt:
Prüfung der Schutzwirksamkeit von
Vliesstoffen und Bentonitmatte
im Einbauversuch (1988)**

Foto NAUE

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

S2



**Testfelder zur Schutzlagenprüfung,
Deponie Hopferstadt (1988)**

Freigelegte KDB

Foto NAUE

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

S4



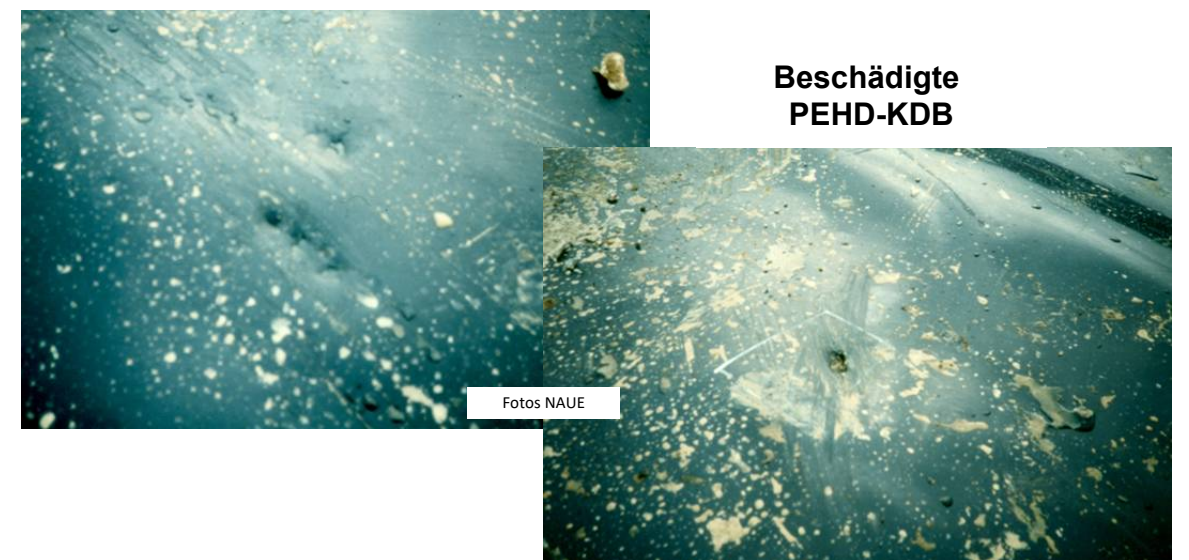
**Testfelder zur Schutzlagenprüfung,
Deponie Hopferstadt (1988)**

Foto NAUE

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

S3

**Testfelder zur Schutzlagenprüfung,
Deponie Hopferstadt**



**Beschädigte
PEHD-KDB**

Fotos NAUE

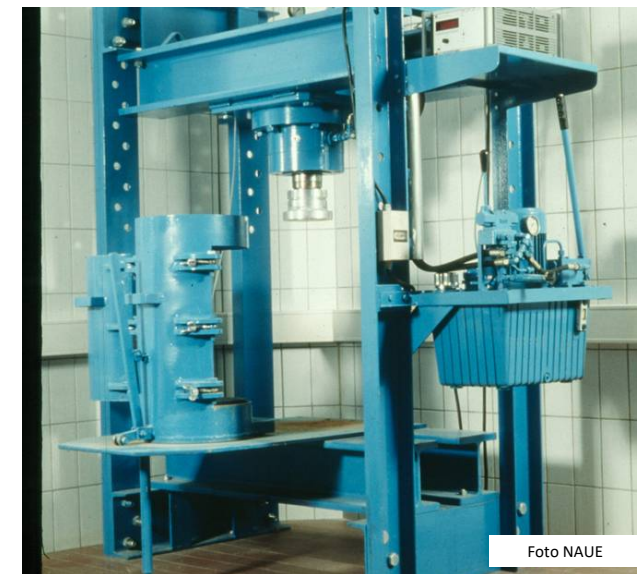
30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

S5

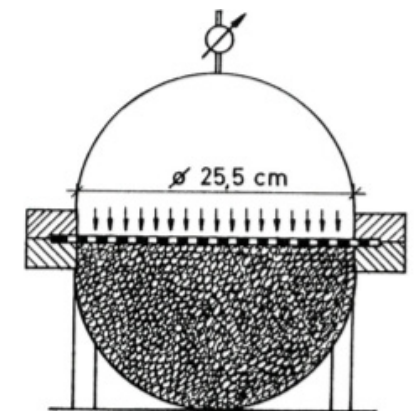


30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

S6



**Schutzwirksamkeitstest
im Drucktopf unter Müllauflast**



**Abb. 3:
Systemuntersuchungen im Drucktopf nach
STEFFEN (1987)**

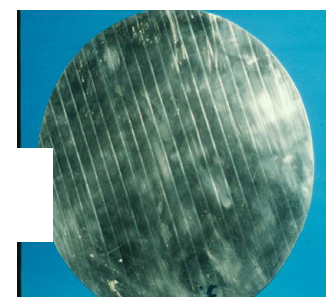
Quelle: STEFFEN, H.: Geotextilien in der Deponietechnik.
Haus der Technik Essen, Februar 1987

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

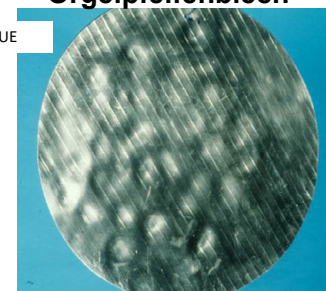
S7



**Schutzwirksamkeitstest
im Drucktopf unter Müllauflast**



**Verformungen fixiert im
Orgelpfeifenblech**



30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

S7



30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

S8

Heute aktuell für Schutzschichten
→ die 7. Auflage vom November 2016:



Menü

Sicherheit in Technik und Chemie

Richtlinie für die Zulassung von Schutzschichten für Kunststoffdichtungsbahnen in Deponieabdichtungen

Startseite > Richtlinie für die Zulassung von Schutzschichten für Kunststoffdichtungsbahnen in Deponieabdichtungen

Richtlinie für die Zulassung von Schutzschichten für Kunststoffdichtungsbahnen in Deponieabdichtungen

Erscheinungsdatum 08.12.2017

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

S9

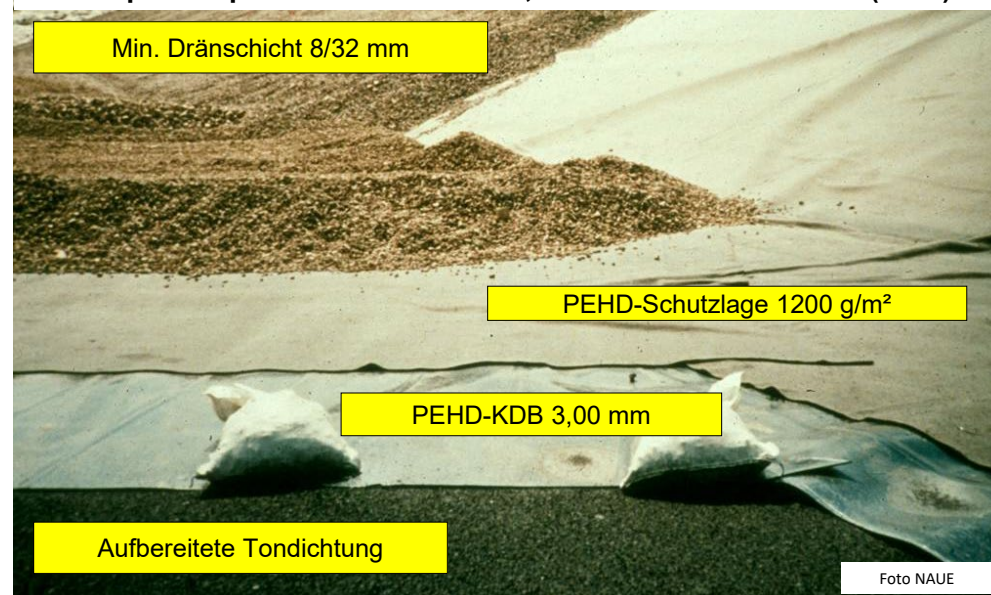
Die technische Herausforderung:
Zuverlässiger Schutz der KDB bei möglichst grober Dränschicht.
Beispiel: Deponie Pohlsche Heide, Kreis Minden-Lübbecke (1994)



Fotos NAUE

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

Die technische Herausforderung:
Zuverlässiger Schutz der KDB bei möglichst grober Dränschicht.
Beispiel: Deponie Pohlsche Heide, Kreis Minden-Lübbecke (1994)



Min. Dränschicht 8/32 mm

PEHD-Schutzlage 1200 g/m²

PEHD-KDB 3,00 mm

Aufbereitete Tondichtung

Foto NAUE

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

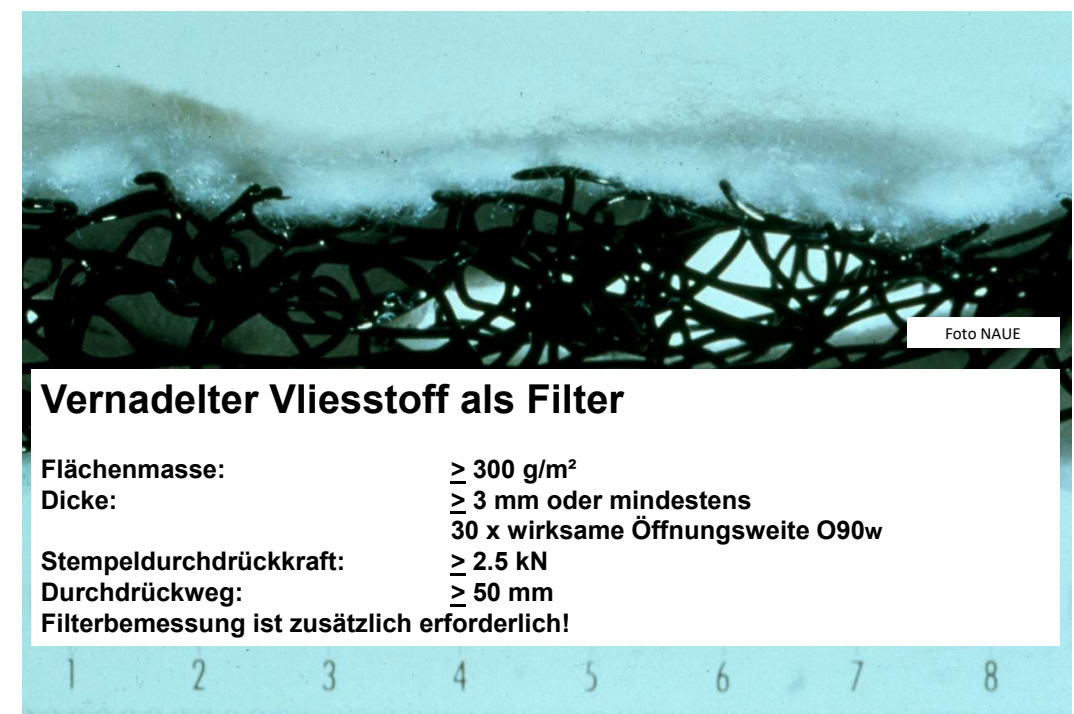


Foto NAUE

Vernadelter Vliesstoff als Filter

Flächenmasse: $\geq 300 \text{ g/m}^2$
Dicke: $\geq 3 \text{ mm}$ oder mindestens
30 x wirksame Öffnungsweite O90w
Stempeldurchdrückkraft: $\geq 2.5 \text{ kN}$
Durchdrückweg: $\geq 50 \text{ mm}$
Filterbemessung ist zusätzlich erforderlich!

1 2 3 4 5 6 7 8

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

D1

Heute aktuell für Kunststoffdränelemente
→ die 9. Auflage vom Mai 2018:



Menü

Sicherheit in Technik und Chemie

Richtlinie für die Zulassung von Kunststoff-Dränelementen für Deponieoberflächenabdichtungen

Startseite > Richtlinie für die Zulassung von Kunststoff-Dränelementen für Deponieoberflächenabdichtungen

Richtlinie für die Zulassung von Kunststoff-Dränelementen für Deponieoberflächenabdichtungen

Erscheinungsdatum 08.12.2017

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

D2

Aufgrabung Winkl (1999) (10 Jahre in Betrieb)

Quelle: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben F58(F)
„Filter- und Dränwirksamkeit von Abdecksystemen von Deponien mit oder ohne Geotextilien“ von D. Heyer, P. Rödl, A. Bauer, D. Ranis, Zentrum Geotechnik, TU München, 2004.

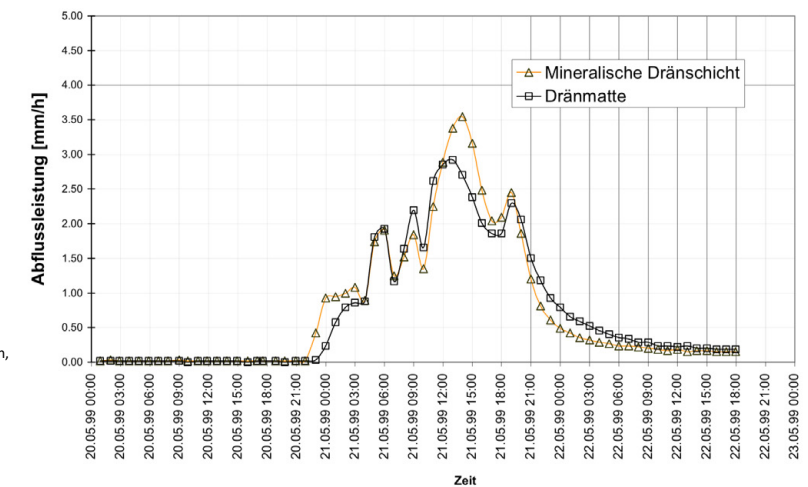
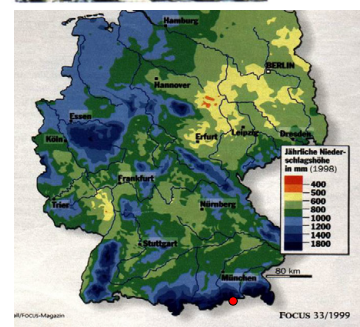
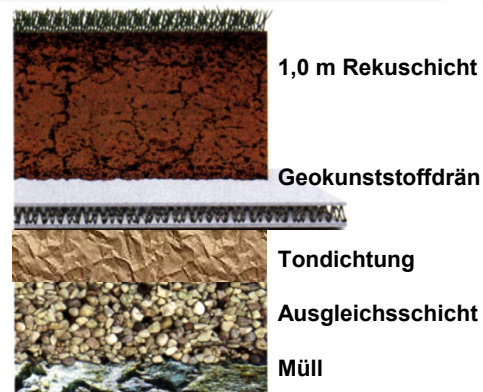


Abb. 3.31: Abflussmessungen der Dränmatte WG-1200 im Vergleich zu einer mineralischen Dränschicht (Pfungsten 1999)

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

D4

Aufgrabung Winkl (1999) (10 Jahre in Betrieb)



30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

D3

Der Umweltschutzaspekt: Transport des Geokunststoffdränsystems zur Deponiebaustelle



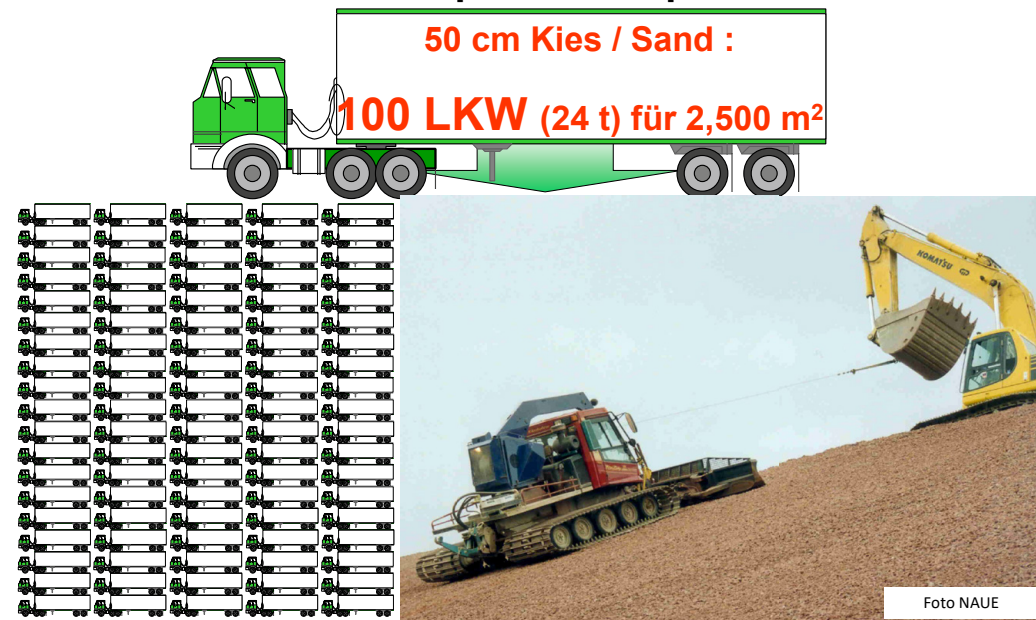
Fotos NAUE



30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

D5

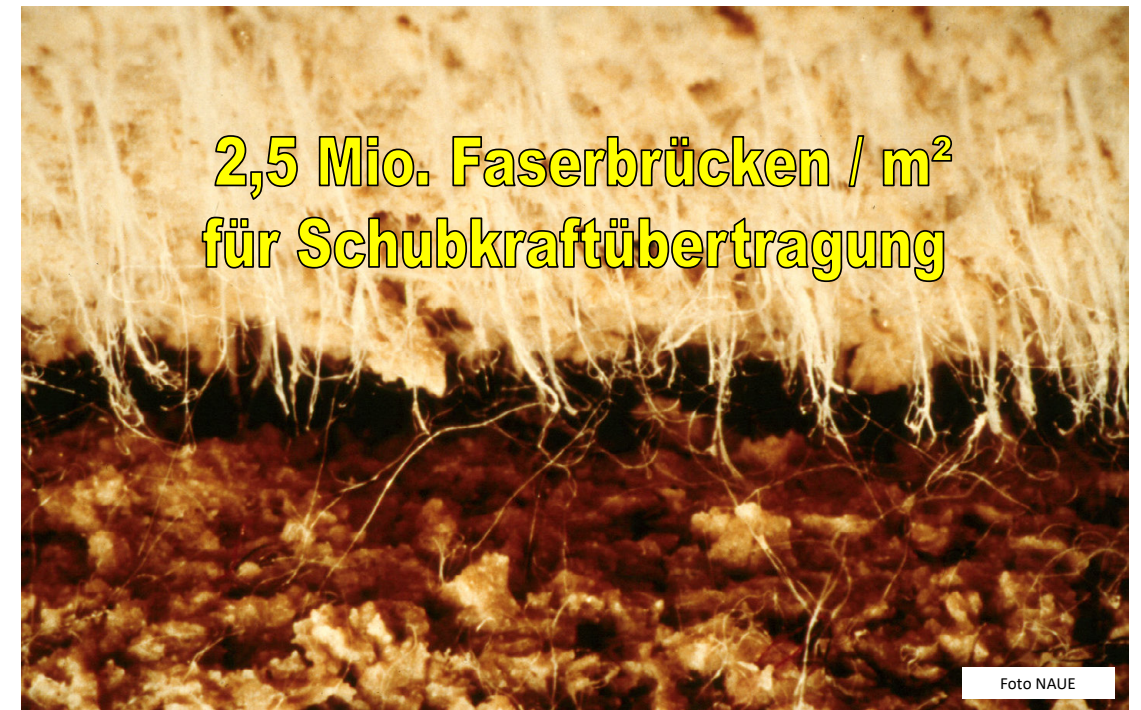
Der Umweltschutzaspekt: Kies- und Sandtransport zur Deponiebaustelle



30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

D6

2,5 Mio. Faserbrücken / m²
für Schubkraftübertragung

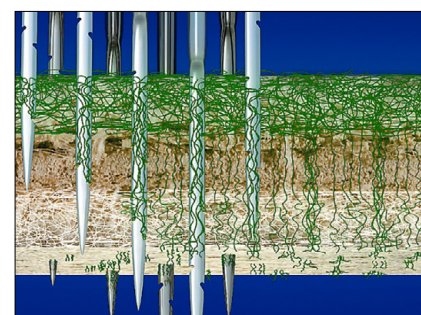
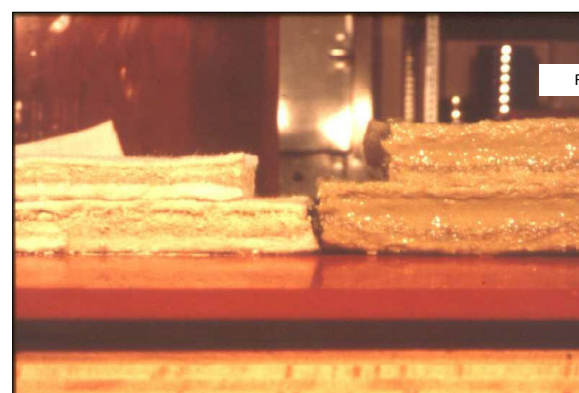


30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

G2

Schubkraftübertragende Tondichtungsbahn

Deutsches Prioritätspatent
vom Februar 1987:
DE 37 04 503

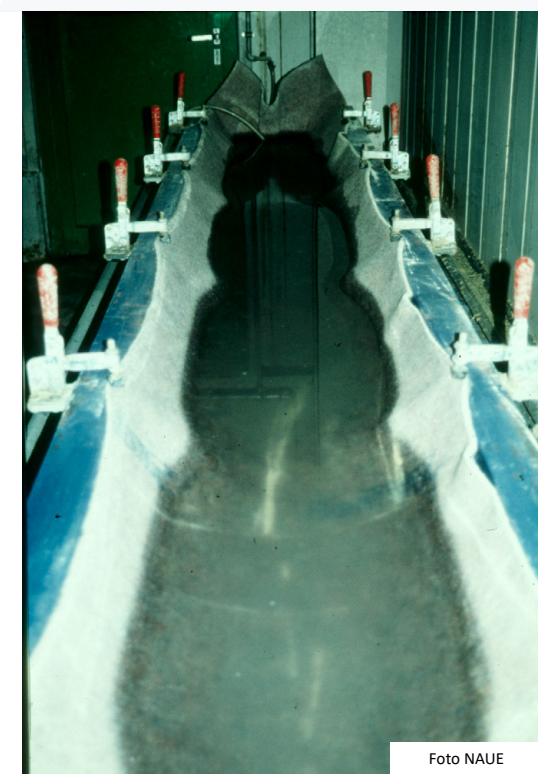


30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

G1

Ursprünglich nur Einsatz von
Bentonit - Pulver
(große Oberfläche)
bei

Bentofix®



30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

G3

Verfügbare Produkte vor der Einführung der schubkraftübertragenden Tondichtungsbahn



Bentonit-Granulat in Wellkarton

Claymax®



Bentonit-Granulat mit wasserlöslichem Kleber auf oder zwischen Textilien fixiert

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

G4

Der Unterschied zwischen GTD und Tondichtung

Eigenschaft	GTD	Tondichtung
schadenanfällig wg. Austrocknung	nass unproblematisch, Austrocknung möglich, aber Selbstheilung mit Wasser und Druck gegeben	Tondichtungen sind nahezu gesättigt, können beim Einbau und im Betrieb austrocknen, keine Selbstheilung bei Wiederbefeuchtung



(Selbst-)Heilung von GTDs nach Austrocknung
(sie brauchen nur ~ 1 l/m² Wasser und ~ 20 kN/m² Vertikallast durch Bodenabdeckung)

Fotos: NAUE

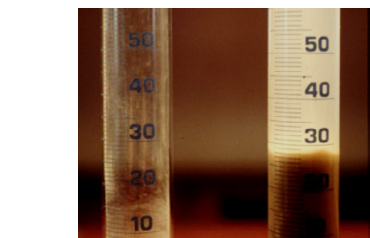


Foto: Geofabrics, Australia

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

G6

Bentonit



Sehr hohes Quellvolumen und Wasseraufnahme

4 Fotos NAUE



100 – 300 % Ca-Bentonit
400 – 700 % Na-Bentonit



Montmorillonit-Gehalt 60 - 80 %



Wasserdurchlässigkeitsbeiwert
 $k_f \sim 10^{-12} \text{ m/s}$

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

G5

Langzeitwirksamkeit von GTDs / Selbstheilung

Funktioniert das „Selbstheilungsvermögen“ nur kurzzeitig oder über Jahre?



4 Fotos NAUE

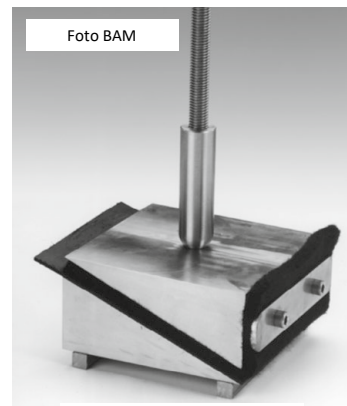


NAUE-Lysimeter-Testfeld in Lemförde (1998)

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

G7

Langzeitwirksamkeit von GTDs



Neigung 1: 2,5
Auflastspannung = 50 kPa



Alterungsbeschleunigung bei 80°C

Scherfestigkeit > 400 Jahre

Langzeitscherverhalten (BAM 2003/2004)

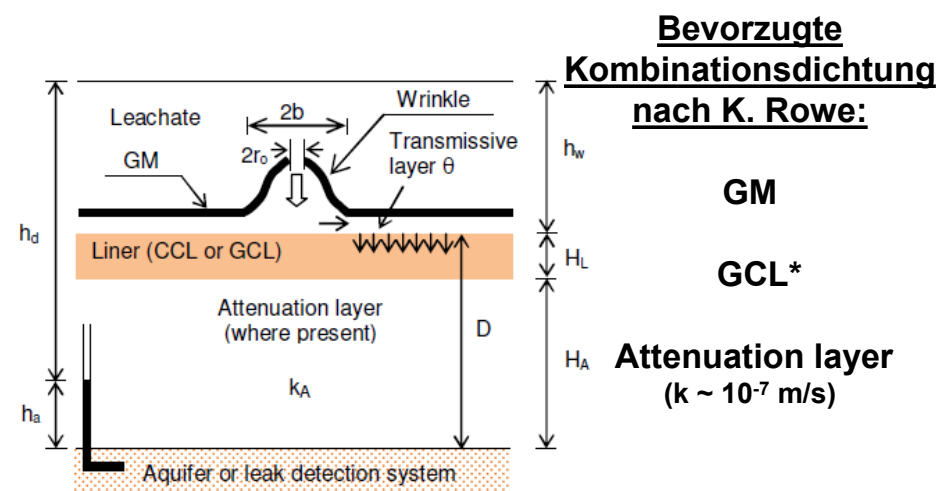
30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

G8

Geogitter,
die Knoten machen
den Unterschied!

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

B1



**Bevorzugte
Kombinationsdichtung
nach K. Rowe:**

GM

GCL*

**Attenuation layer
($k \sim 10^{-7}$ m/s)**

*** bevorzugt vernadelte GTD mit Gewebe / vernadeltem Vliesstoff
(Kombiprodukt) als Träger und vernadeltem Vliesstoff als
Deckschicht mit „Thermolock“-Verschweißung**

Quelle: The 2011 Arthur Casagrande Lecture „Short and long-term leakage through composite liners“ by Prof. Kerry Rowe, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

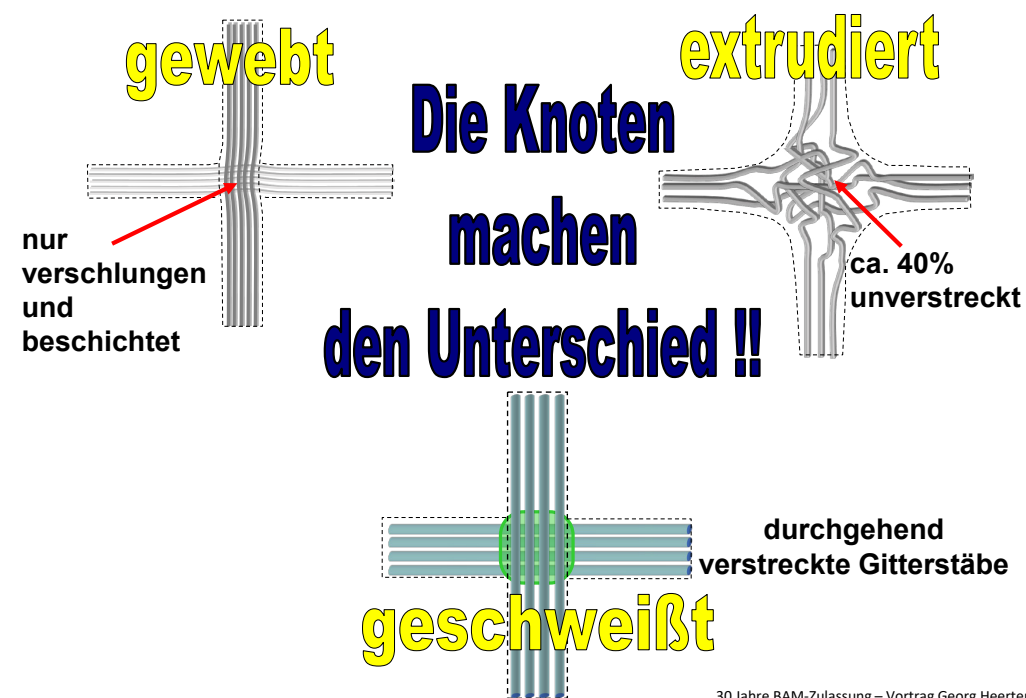
30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

G9



30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

B2



30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

B3

Heute aktuell
für Bewehrungsgitter aus Kunststoff:



Menü

Sicherheit in Technik und Chemie

Richtlinie für die Zulassung von Bewehrungsgittern aus Kunststoff für Deponieoberflächenabdichtungen

Startseite > Richtlinie für die Zulassung von Bewehrungsgittern aus Kunststoff für Deponieoberflächenabdichtungen

Richtlinie für die Zulassung von Bewehrungsgittern aus Kunststoff
für Deponieoberflächenabdichtungen

Erscheinungsdatum 14.01.2019

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

B6



30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

B5

Geogitterbewehrte Böschungen bei Oberflächenabdichtungen von Deponien

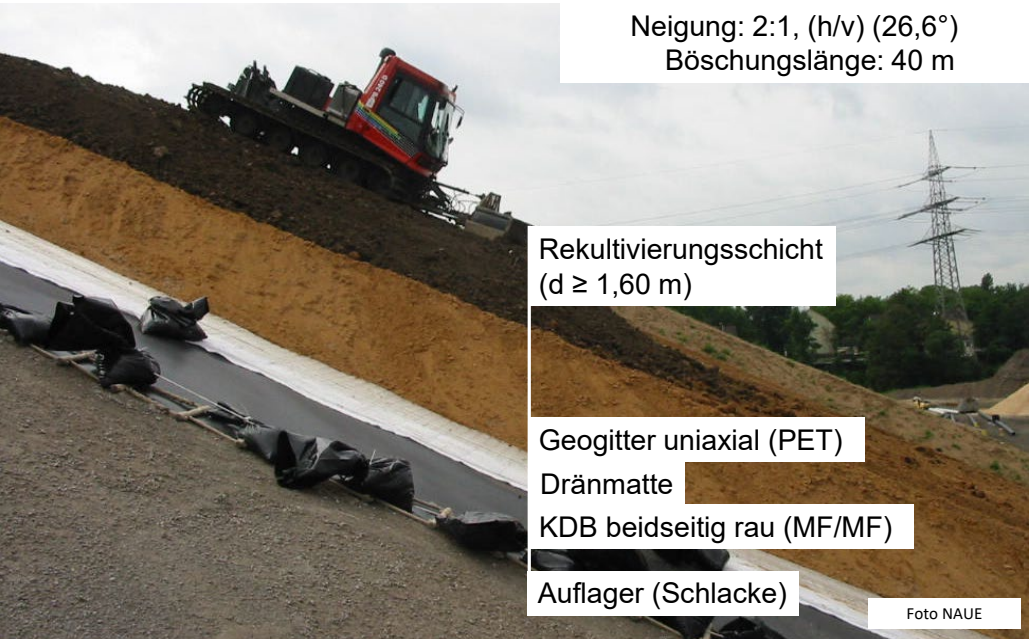


**BAM-Zulassung erforderlich
(Wirksamkeit / Standsicherheit > 100 Jahre)**

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

B7

Oberflächenabdichtung – Deponie Duisburg-Sudamin (2007)



Neigung: 2:1, (h/v) (26,6°)
Böschungslänge: 40 m

Rekultivierungsschicht
(d ≥ 1,60 m)

Geogitter uniaxial (PET)
Dränmatte
KDB beidseitig rau (MF/MF)
Auflager (Schlacke)

Foto NAUE

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

B8



The 2011 Arthur Casagrande Lecture
„Short and long-term leakage
through composite liners“

by Prof. Kerry Rowe
GeoEngineering Center at Queen’s-RMC
Queen’s University, Kingston, Ontario, Canada

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

I1

Installation von
Dehnungsmessstreifen auf dem
Geogitter
(Hauptzugrichtung / böschungsabwärts)

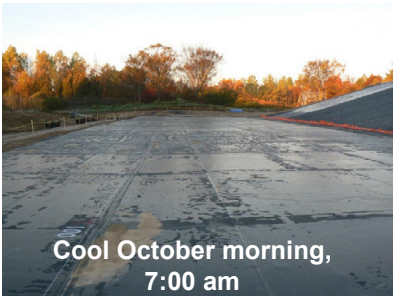


2007

3 Fotos NAUE

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

B9



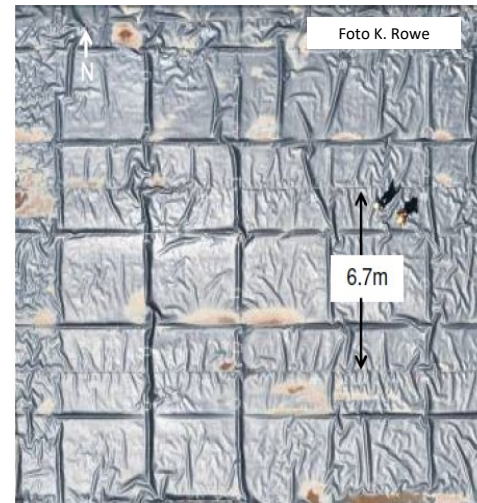
QELTS-Testfelder für die Wirksamkeit von
Kombidichtungen von Kerry Rowe



Quelle: The 2011 Arthur Casagrande Lecture „Short and long-term leakage through composite liners“ by Prof. Kerry Rowe, Queen’s University, Kingston, Ontario, Canada.

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

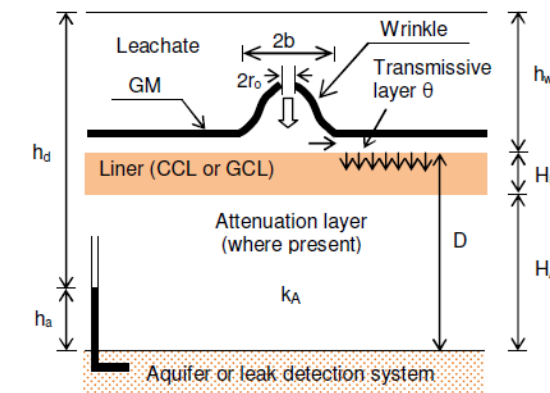
I2



**Kontrast der Ausführungspraxis bzw. des Umgangs mit KDB
in Deutschland (links) und Nordamerika (und fast überall in der Welt, rechts)**

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

13



Transmissivität:
GM / GCL $\sim 2 \text{ bis } 4 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$
GM / CCL $\sim 2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$



The 2011 Arthur Casagrande Lecture
„Short and long-term leakage
through composite liners“

by Prof. Kerry Rowe

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

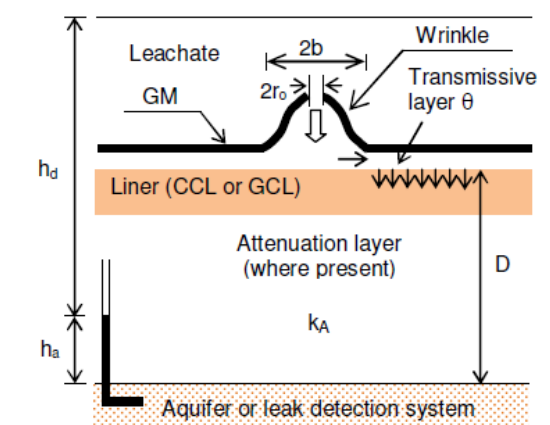
15



Das passt schon besser zusammen!
Bei entsprechenden Bedingungen (Pressverbund / intimate contact) ist die Kombidichtung KDB / GTD das mit Abstand wirksamste Dichtungssystem.
Selbst bei fünf 1 cm² großen Löchern pro Hektar in der KDB ist der Sickerwasserdurchtritt auf ca. 180 l/ha und Jahr begrenzt
[KDB allein $\sim 12000 \text{ m}^3/\text{ha}$ und Jahr (K. Rowe, 2011)!]

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

14



**Bevorzugte Kombi-Dichtung nach
K. Rowe:**

**KDB
GTD***

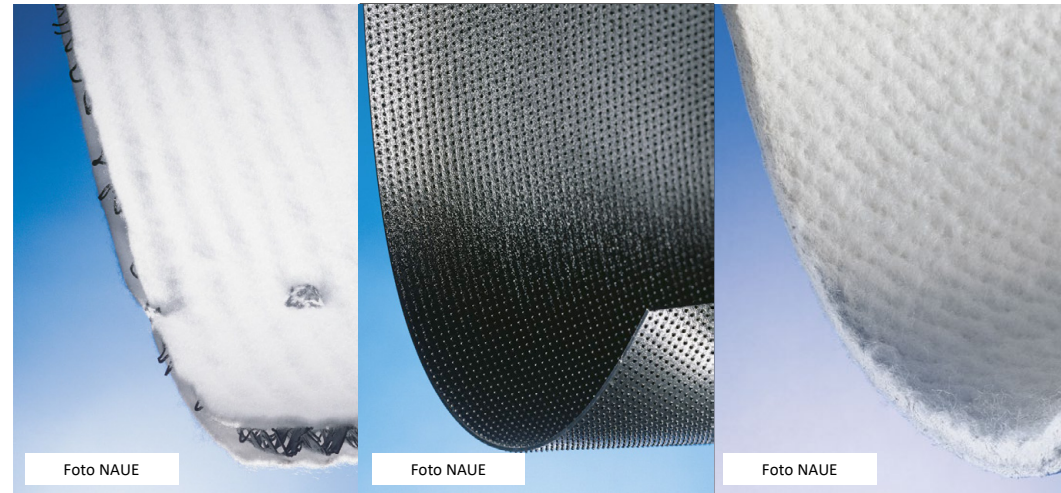
**Adsorptionsschicht / attenuation layer
($k \sim 10^{-7} \text{ m/s}$)**

***bevorzugt vernadelte GTD mit Gewebe-Vliesstoff-Träger und
Vliesstoff-Deckschicht mit „Thermolock“**

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

16

**BAM-zugel. Dränmatte BAM-zugel. KDB LAGA-eignungs-
geprüfte Bentonitmatte**

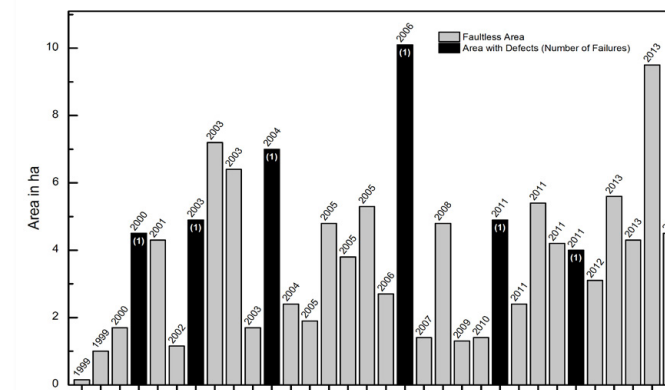


DAS Dichtungssystem für den Umweltschutz

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

17

Fehlerhäufigkeit in Deponieabdichtungssystemen



Quelle: „Aktuelles aus der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ zu BQS und Eignungsbeurteilungen sowie aus dem Fachbeirat der BAM und von der Zulassungsstelle“, Dipl.-Ing. Wolfgang Bräcker, Andreas Wöhlecke, 26. Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar 2015.

Fehlerhäufigkeiten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen

Fehlerhäufigkeit in mit DKS überwachten Deponieoberflächenabdichtungssystemen, die nach den Anforderungen der DepV gebaut wurden:

0,05 pro ha

Fehlerhäufigkeiten aus der Literatur (Einbaufehler):

- 0,5 pro ha (mit einer strengen QS)
- 2,5 bis 10 pro ha (mit einer guten QS)
- bis zu 60 pro ha (und mehr ...) (mit einer schlechten QS)

Geosynthetic Barriers For Environmental Protection at Landfills. Edward Kavazanjian, Jr., USA, Neil Dixon, United Kingdom, Takeshi Katsumi, Japan, Anthony Kortegast, New Zealand, Peter Legg, South Africa, Helmut Zanzinger, Germany. 8th International Conference on Geosynthetics

19.10.2015 26. Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar 6

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

17



Die BAM-zugel. Kunststoffdichtungsbahn...

Fotos NAUE

**d (min) 2,5 mm,
hoch stabilisiert,
QS-gesichert durch zertifizierte
Fachverleger eingebaut,
Wirksamkeit >> 100 Jahre**

**...ist das z.Zt. wirksamste und verlässlichste Dichtungselement
im Umweltschutz!**

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

18



Foto: Ingenieurbüro Schickantz, Aachen

**Unser Regelwerk ist international
einmalig und vorbildlich.**

**DepV
GDA-Empfehlungen
BAM-Zulassungen
BAM-Richtlinien
LAGA-Eignungsnachweise
LAGA-BQS
AK-GWS-Güteüberwachung**

**Hierauf dürfen wir stolz sein!
Aufrichtig danken möchte ich allen Beteiligten,
die in jahrzehntelanger Arbeit und mit großem Engagement
diese Entwicklung ermöglicht haben.
Hierin sind kontroverse, immer wieder herausfordernde Beiträge und
Kollegen ausdrücklich eingeschlossen ☺!**

30 Jahre BAM-Zulassung – Vortrag Georg Heerten, 7. Mai 2019

110

LITERATURHINWEISE:

Baldauf, S., Tarnowski, C.: Alterungsbeständigkeit von Dichtungsbahnen aus PEHD - Beurteilung des Langzeitverhaltens auf der Grundlage von projektbezogenen Erfahrungen. Geotechnische Aspekte im Umweltschutz. TU Braunschweig, 2006.

Bräcker, W., Wöhlecke, A.: Aktuelles aus der LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“ zu BQS und Eignungsbeurteilungen sowie aus dem Fachbeirat der BAM und von der Zulassungsstelle. 26. Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar, Karlsruhe 2015.

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Labor Deponietechnik: Permeationsverhalten von Kombinationsdichtungen bei Deponien und Altlasten gegenüber wassergefährdenden Stoffen. Bericht zum FuE-Vorhaben 10302208 des BMBF, Berlin 1992.

Egloffstein, T.: “Ökologischer Vergleich zwischen Bauweisen mit mineralischen Baustoffen und Bindemitteln sowie Bauweisen mit Geokunststoffen. geotechnik 32 (2009), Nr.3.

Heerten, G.: History and current state of geosynthetic applications in Germany. Welcome Lecture at 10. International Conference on Geosynthetics, Berlin 2014.

Heerten, G.: Entwicklungen von Abdichtungssystemen für den Grundwasserschutz. 28. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“, Würzburg, 2012.

Heerten, G., Koerner, R.M.: Oberflächendichtungen von Deponien und Altlasten. 24. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“, Würzburg, 2008

Heerten, G., und Schönwälder, H.: Genehmigung einer innovativen Oberflächendichtung für die Siedlungsabfalldeponie Neu Wulmstorf im Land Niedersachsen, Bundesrepublik Deutschland, 7. Karlsruher Deponie- und Altlastenseminar, Karlsruhe, 1997.

Heerten, G.: Oberflächenabdichtung von Deponien mit Dränschichten aus Kunststoffwurzeln und Bentonitmatten als Dichtungselement, 2. Kongreß Kunststoffe in der Geotechnik, K-Geo 92 , Luzern, 1992, Herausgeber: SVG Schweizerischer Verband der Geotextilfachleute , St. Gallen, Switzerland, Mai 1992.

Heerten, G., and Spreen, H.J.: Einbau von Kunststoffdichtungsbahnen im Kontakt zu groben Dränschichten in Deponiebasisabdichtungen", Straßen- und Tiefbau, Nr. 9, 1989.

Heyer, D., Rödl, P., Bauer, A., Ranis, D.: Filter- und Dränwirksamkeit von Abdecksystemen von Deponien mit oder ohne Geotextilien. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben F58(F) Zentrum Geotechnik, TU München, 2004.

Knipschild, F.W.: Von der Kunststoffolie zur Dichtungsbahn mit BAM-Zulassung. 20. Fachtagung „Die sichere Deponie“, Würzburg, 2004.

Müller, W.: Handbuch der PE-HD-Dichtungsbahnen in der Geotechnik, Birkhäuser Verlag, 2001.

Müller, W.: HDPE Geomembranes in Geotechnics. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, Germany, 2007.

Müller, W., Biedermann, K., Engelmann, B., & Wöhlecke, A. 2012. Approval procedure for geosynthetics. Müll und Abfall 43 (2012), Volume 3, Erich Schmidt Verlag, Berlin.

Müller, W.: Aging of reinforcement geogrids made of Polyester. Bautechnik 90 (2013), Volume 6, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

Müller-Kirchenbauer, A.: Funktionsnachweis für geotextile Tondichtungsbahnen in Deponieoberflächenabdichtungen. Dissertation, August 2009. In: Publikationen des Instituts für Geotechnik der Leibniz Universität Hannover, Heft 67.

Niehues, C., Psiorz, C., & Vollmert, L.: BAM approval for geogrids used in landfill applications and its implementation in practice. 10th International Conference on Geosynthetics (10ICG), Berlin 2014, Germany.

Niehues, C., Werth, K.: Bemessung und Ausführung steiler Oberflächenabdichtungen mit Geokunststoffen vor dem Hintergrund aktueller Regelwerke. 23. Nürnberger Deponie-Seminar – “Bau, Sanierung, Nachsorge und Rückbau von Deponien“, Nürnberg, 2012.

Rowe, K.: Short- and long-term leakage through composite liners. The 2011 Arthur Casagrande lecture, Pan-Am Geotechnical Conference, Toronto 2011, Canada.

Steffen, H. : Geotextilien in der Deponietechnik. Haus der Technik Essen, Februar 1987

KUNSTSTOFFDICHTUNGSBAHNEN IM DEPONIEBAU VON DER EMPFEHLUNG ZUR VERBINDLICHKEIT

Wolfgang Bräcker

Zentrale Unterstützungsstelle
Abfall, Gentechnik und Gerätesicherheit (ZUS AGG)

Kunststoffdichtungsbahnen im Deponiebau
- von der Empfehlung zur Verbindlichkeit -

Workshop 30 Jahre BAM-Zulassung
am 07./08. Mai 2019



Merkblatt 3

**„Die geordnete Ablagerung (Deponie) fester und
schlammiger Abfälle aus Siedlung und Industrie“**

Aufgestellt im Auftrag von Bund und Ländern vom
Bundesgesundheitsamt — Zentralstelle für Abfallbeseitigung —
unter Mitwirkung von Sachverständigen
(Bundesgesundheitsblatt 12. Jahrg., 1969, Nr. 22, S. 362—370)

Merkblatt 3

2.7 Wasserwirtschaftliche Maßnahmen

Wenn auf Grund der Art der abgelagerten Abfälle und der geologischen
und hydrologischen Gegebenheiten eine **schädliche Veränderung**
der Grundwasserbeschaffenheit zu besorgen ist, müssen
Maßnahmen zum Schutze des Grundwassers getroffen werden.

Dies soll **mit geeigneten Materialien** geschehen.

(Ton/Lehm, Vermörtelungen, Bitumen-/Teerdichtungen)

Das Verlegen genügend starker verschweiß- oder verklebbarer
Kunststoff-Folien kommt in Sonderfällen auch in Betracht.

LAGA-Deponiemerkblatt

Merkblatt „Die geordnete Ablagerung von Abfällen“

(Deponie-Merkblatt, Stand 1. September 1979)

Aufgestellt im Auftrag der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall unter
Mitarbeit des Umweltbundesamtes und des Verbandes Kommunaler
Städtereinigungsbetriebe

→ Durch Erlasse der Länder eingeführt
(z. B. Anlage zum RdErl. des ML vom 26.9.1979, Nds. MBl. S. 1691)

LAGA-Deponiemerkblatt

Ausbildung der Deponiebasis

natürlich anstehender dichter Untergrund

oder

Besondere Dichtungsmaßnahmen (gegenüber der Deponiesohle und
ggf. Deponieflanken) sind erforderlich, wenn der Zutritt von Sickerwasser
aus der Deponie in den Untergrund verhindert oder auf ein Mindestmaß
beschränkt werden soll.

→ natürliche Dichtungen (mineralische Dichtung) oder

→ **künstliche Dichtungen**

LAGA-Deponiemerkblatt

Die künstlichen Dichtungen umfassen insbesondere:

- **an Ort und Stelle verschweißte Dichtungsbahnen aus geeigneten Kunststoffen**
- **an Ort und Stelle verschweißte Dichtungsbahnen aus geeigneten Bitumina mit Trägerschicht.**
- ...

LAGA-Deponiemerkblatt

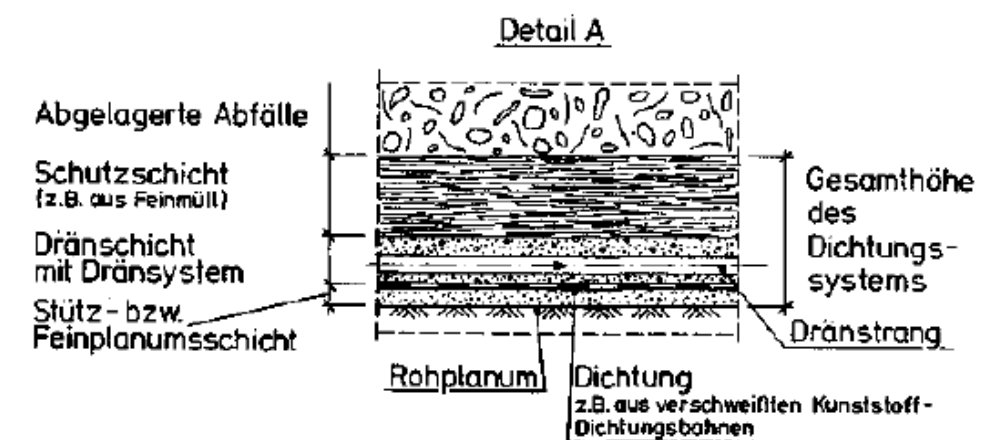


Abb. 1 Dichtungssystem einer Deponie-Basis — Schematischer Querschnitt —

Quelle: Müllhandbuch 55. Lieferung 1/1980; Erich-Schmidt-Verlag



LAGA-Deponiemerkblatt

Da die **technischen Erfahrungen und Entwicklungen** auf dem Gebiet der Deponiebasisabdichtungen **noch verhältnismäßig jung** sind, ist davon auszugehen, daß die planerische bzw. entwurfsmäßige Bearbeitung einer Basisabdichtung **fast immer eine Reihe von Sonderuntersuchungen** voraussetzt.



LAGA-Deponiemerkblatt

Dies können Untersuchungen sein über

- ...
- Sonderfragen bei künstlichen Dichtungen (z. B. **Bestimmung des Materials von Dichtungsbahnen** in Anbetracht der abzulagernden Abfälle, **Festlegung der Fügechnik dieser Bahnen**).

Mit der Durchführung derartiger Untersuchungen sind **nur qualifizierte Fachleute** zu betrauen.

Das Dichtungssystem muß auch nach Abschluß des Deponiebetriebes und der Rekultivierung noch **so lange funktionsfähig bleiben, bis kein behandlungsbedürftiges Sickerwasser mehr anfällt**.



NRW

- **1982**
Entwurf einer Richtlinie über Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen (Erl. v. 18. 2. 1982 - III C 8 - 902/4 - 26443 (Gelbdruckes zur Erprobung))
- **1985**
„Deponiebasisabdichtungen aus Dichtungsbahnen“
RdErl. d. Ministers für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft v. 14. 8. 1985 -III A 5 - 541.2.3; MBL NW. 1885 S. 1288



NRW-RdErl. vom 14.08.1985

Grundlage:

Forschungsbericht 103 02 208 des Umweltbundesamtes

Arbeitsgruppe:

- Landesamt für Wasser und Abfall NRW (Federführung)
- Umweltbundesamt
- Staatliche Materialprüfamt Nordrhein-Westfalen
- gewerbliche Wirtschaft
- Entsorgungsunternehmen
- staatliche Verwaltung für Wasser- und Abfallwirtschaft NRW



NRW-RdErl. vom 14.08.1985

Um ein einheitliches Verwaltungshandeln bei der Zulassung von Deponien sicherzustellen, ist bis zum Erlaß entsprechender bundeseinheitlicher Verwaltungsvorschriften die nachstehende Richtlinie als vorläufige Regelung zu beachten.



NRW-RdErl. vom 14.08.1985

Inhalt:

1. Vorbemerkungen
2. Technische Grundsätze
 - 2.1 Die Unterscheidungsmerkmale der Deponiebasisabdichtungen
 - 2.2 Der Aufbau des Dichtungssystems
 - 2.3 Allgemeine Anforderungen an das Dichtungssystem
3. Mögliche Beanspruchungen der Dichtung
 - 3.1 Physikalische Beanspruchungsfaktoren
 - 3.2 Chemische Beanspruchungsfaktoren
 - 3.3 Biologische Beanspruchungsfaktoren



NRW-RdErl. vom 14.08.1985

Inhalt (Fortsetzung):

4. Die Dichtungsbahnen - technischer Stand

4.1 Werkstoffe

4.1.3 Bisher eingesetzte Werkstoffe

Nach derzeitigem Stand sind Dichtungsbahnen für Basisabdichtungen von Abfalldeponien insbesondere aus folgenden Werkstoffen zum Einsatz gelangt:

ECB, PEC, HDPE, LDPE, PVC weich, Bitumen.

4.2 Charakterisierung und Gestaltung der Dichtungsbahnen

4.3 Fügetechniken



NRW-RdErl. vom 14.08.1985

Inhalt (Fortsetzung):

5. Anforderungen an die Dichtungsbahnen, Prüfung, Güteüberwachung und Kennzeichnung

5.1.1.2 Dicke (Nenndicke)

*Unter Hinweis auf die Ausführungen des Abschnitts 4.2.4 hat die erforderliche **Mindest-Nenndicke** bei Dichtungsbahnen aus*

- **Polymer-Werkstoffen 2,0 mm** (Thermoplasten, Elastomeren) und
- **Bitumen-Werkstoffen 5,0 mm** zu betragen.

6. Planung des Dichtungssystems

7. Bauausführung

NRW-RdErl. vom 14.08.1985

Medien zur chemischen Prüfung von Dichtungsbahnen

Inhalt (Fortsetzung): Anhang

Anlage 1: Medien zur chemischen Prüfung von Dichtungsbahnen

Anlage 2: Zusammenstellung der Anforderungen bei Polymer- und Bitumenbahnen und zugehöriger Prüfvorschriften

Anlage 3: Schriftums- und Regelwerksverzeichnis

1. Gruppe A: Hochkonzentrierte flüssige Medien

Lfd. Nr.	Stoffgruppen	Zusammensetzung der Prüfflüssigkeiten
1	Benzine (Otto-Kraftstoffe) und aromatische Kohlenwasserstoffe	40 Vol.-% 2,2,4 Trimethyl-pentan (Isooktan) 15 Vol.-% Benzol 20 Vol.-% Methylbenzol (Toluol) 15 Vol.-% Dimethylbenzol (Xylol) 10 Vol.-% Methyl-naphthalin
2	Heizöl, Dieselloststoffe, Paraffinöle, Schmieröle	35 Vol.-% Dieselloststoff 35 Vol.-% Paraffinöl (C ₁₀ -C ₂₀) 30 Vol.-% Schmieröl HD 30

Tabelle 1.1: Physikalische Anforderungen bei Polymerbahnen¹⁾

Kenngröße	Prüfgröße	Kennwerte (Merkmale)	Prüfverfahren, Prüfvorschriften	Richtlinienabschnitt
1	2	3	4	5
Allgemeine physikalische Anforderungen				
Äußere Beschaffenheit	Oberfläche	geschlossen	visuelle Beurteilung	5.1.1.1 5.2.1.1
	Homogenität des Materials	frei von Fehlern (Poren, Lunker, Fremdeinschlüsse)		
	Formverhalten	kantengerades und gleichmäßig breites Abrollen		
Dicke (Nenndicke)	Mindest-Nenndicke Mittelwert Einzelwert	2,0 mm ≥ Nenndicke ± 10 %, ≤ + 10 % bezogen auf Mittelwert	DIN 53 370	5.1.1.2 5.2.1.2
Wärmelagerungsverhalten	Maßänderung	± 2,0 %	DIN 53 377	5.1.1.3 5.2.1.3

Dichtungserlass Niedersachsen

Der Dichtungserlass stellt Anforderungen an den Untergrund und das **Basisabdichtungssystem**

Im Übrigen gilt das LAGA-Merkblatt aus 1979 fort

Dichtungserlass Niedersachsen

Durchführung des Abfallgesetzes;
Abdichtung von Deponien für Siedlungsabfälle

RdErl. d. MU v. 24. 6. 1988 — 207-62812/21 —

— GültL 30/36 —

Bezug: RdErl. d. ML v. 23. 6. 1981 (Nds. MBl. S. 623 — GültL jetzt MU 30/19)

Dichtungserlass Niedersachsen

Die **kombinierte Dichtung** und die Entwässerungs- und Schutzeinrichtungen sind wie folgt aufzubauen:

1. ...

3. **Kunststoffdichtungsbahn** direkt aufliegend auf der mineralischen Dichtungsschicht im **Preßverbund** in einer **Dicke von mindestens 2,0 mm** nach DIN 53 370 aus **PEHD** oder hinsichtlich der physikalischen und chemischen Eigenschaften **gleichwertig**.

4. **Filtervlies** mit einem Gewicht von **mindestens 400 g/m²** mit aufliegender, mindestens 10 cm dicker Schutzschicht aus Sand oder einem Material mit vergleichbarer **Lastverteilung für Punktlasten**.

5. ...

Dichtungserlass Niedersachsen

Auf die Kunststoffdichtungsbahn ... kann verzichtet werden, wenn der unmittelbar angrenzende Deponieuntergrund ein ausreichend großes Schadstoffrückhaltevermögen besitzt. Dies kann dann angenommen werden, wenn er über eine Dicke von $d > 5$ m einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8}$ m/s aufweist.

Dichtungserlass Niedersachsen

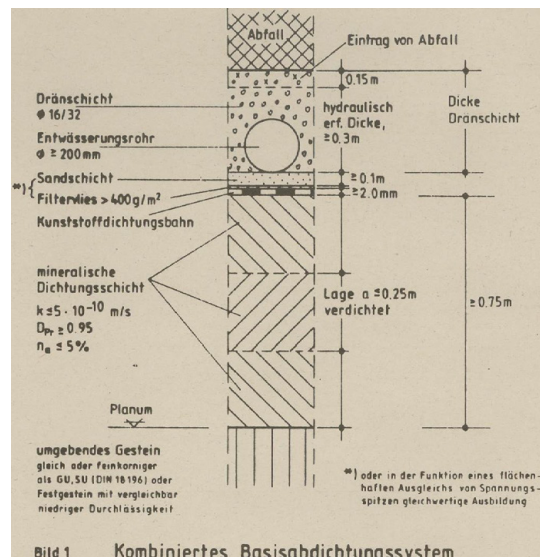


Bild 1 Kombiniertes Basisabdichtungssystem
Quelle: RdErl. d. MU vom 24.6.1988- 207-62812/21

Dichtungserlass Niedersachsen

2. Anforderungen

2.2 Kunststoffdichtungsbahn

Die Kunststoffdichtungsbahn muß **mindestens $d = 2,0$ mm dick sein.**

Bei der Wahl der Kunststoffdichtungsbahn ist die **Zusammensetzung der Abfälle** sowie die zu erwartende **Sickerwasserqualität** zu beachten. **Kunststoffe mit einer breiten Beständigkeitsskala gegenüber organischen und anorganischen Chemikalien sind zu bevorzugen.**

Dichtungserlass Niedersachsen

3. Eignungsprüfungen

3.2 Kunststoff

Der Nachweis für die Eignung der Kunststoffdichtungsbahn ist durch einen Zulassungsbescheid der Zulassungsbehörde*) zu erbringen.

Dichtungserlass Niedersachsen

3. Eignungsprüfungen

3.2 Kunststoff

Der Nachweis für die Eignung der Kunststoffdichtungsbahn ist durch einen Zulassungsbescheid der Zulassungsbehörde*) zu erbringen.

*) Eine Zulassungsbehörde ist bundeseinheitlich noch nicht benannt. Bis dies erfolgt ist, ist die Eignung der vorgesehenen Kunststoffdichtungsbahn durch einen auf das Land Niedersachsen beschränkten Zulassungsbescheid der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, zu bescheinigen.

BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND -PRÜFUNG
(BAM)



ZULASSUNGSSCHEIN

(befristete Zulassung)

08/BAM 3.12/01/89/

für ein Abdichtungselement, gefertigt aus Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) als Bestandteil einer Kombinationsdichtung in Basis- und Oberflächenabdichtungen von Deponien für Siedlungsabfälle.

1. Rechtsgrundlagen

- 1.1. Abfallgesetz vom 27. August 1986 veröffentlicht BGBl. I Seite 1410, ber. durch BGBl. 1986 I Seite 1501.
RdErl. d. Niedersächs. MU v. 24.6.1988 - 207-62812/21 -
Abdichtung von Deponien für Siedlungsabfälle, zu beziehen beim Niedersächsischen Minister für Umwelt.
- 1.2. Übergangsregelung für dringende Bauvorhaben, niedergelegt in einer Besprechungsnotiz des Niedersächsischen Umweltministeriums 207.2 - 62812/21 vom 12.07.89

Erste BAM-Zulassung
vom 30. August 1989

Dichtungserlass Niedersachsen

4. Herstellung

4.3 Kunststoffdichtungsbahn

- **Aufbringung unmittelbar nach der Abnahme der mineralischen Dichtungsschicht**
- **Schweißen der Nähte auf der Baustelle** (Warmgas, Heizkeil, Extrusion), **Nahtvorbereitung, Doppelnaht mit Prüfkanal 2 x 15 mm**
- **vorläufiger und endgültiger Verlegeplan (Bestandsplan)**
- **Probeschweißungen**
- **Witterung (nicht unter 5°C, trocken)**
- **Schweißprotokolle**
- **Fehlstellenreparatur**

Dichtungserlass Niedersachsen

4. Herstellung

4.4 Schutz während Herstellung und Betrieb

Transport und Lagerung

*zur **Sicherung gegenüber punktförmigen Überlastungen** aus der unter Auflast stehenden Dränschicht ist die Kunststoffdichtungsbahn mit einem **400 g/m² schweren Filtervlies** und einer darauf aufzubringenden **mindestens 10 cm dicken Sandschicht** abzudecken.*

Andere Schutzschichtausbildungen sind zulässig (Nachweis einer ausreichenden lastverteilenden Wirkung)



Dichtungserlass Niedersachsen

5. Prüfung

5.1 Überwachung

Eigenkontrolle (des Herstellers)

Fremdprüfung (geeignetes Ingenieurbüro, das nicht gleichzeitig auch die dichtungstechnischen Arbeiten für den Antragsteller betreuen darf)

Überwachung (Überwachungsbehörde bzw. eine von ihr damit beauftragte Stelle)



Dichtungserlass Niedersachsen

5. Prüfung

5.2 Umfang der Prüfung

5.2.3 Kunststoffdichtungsbahn

- **Einhaltung der bei der Probeschweißung festgelegten Randbedingungen**
- **Zerstörungsfreie Prüfung der Dichtigkeit** (Druckluft, Vakuum, visuelle Beurteilung - Unversehrtheit der KDB, unzulässige Wellenbildung, gezerzte Bereiche durch Temperatur, Faltenbildung)
- **Homogenität und Breite der Nähte** (Ultraschall)
- **Laboruntersuchungen** (Festigkeit und Dichtheit)



Dichtungserlass Niedersachsen

5.2.4 Abnahmeunterlagen

- **Endgültiger Verlegeplan (Bestandsplan)**
- **Ergebnisse von Eigen- und Fremdüberwachung**
- **Schweißprotokolle**
- **Protokolle der Dichtheitsprüfung**
- **Konstruktive Einzelheiten und Nachbesserungen**



TA Abfall 1991 / TA Siedlungsabfall 1993

Regelabdichtungssysteme

➔ **Kunststoffdichtungsbahnen (KDB)** als Bestandteil der Kombinationsdichtung in Basis- und Oberflächenabdichtung von Deponien der Klassen DK II und DK III

➔ **„Gleichwertiges“ ist zulässig**

➔ **Was ist gleichwertig?**





TA Abfall 1991 / TA Siedlungsabfall 1993

TA Abfall Nr. 9.4.1.1

*Die **Eignung von Kunststoffdichtungsbahnen** in Deponieabdichtungssystemen sollte in der Regel mit Hilfe eines geeigneten Gutachters - z.B. des Instituts für Bautechnik, Berlin oder der Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin - festgestellt werden.*



TA Abfall 1991 / TA Siedlungsabfall 1993

TASi Nr. 10.4.1.1

Es gelten die Anforderungen des Anhangs E der TA Abfall.

Die Zulassung von Materialien für die Deponieabdichtung, z. B. Dichtungsbahnen, Geotextilien usw., kann auch durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung erfolgen.

Es dürfen nur für Deponieabdichtungssysteme zugelassene Kunststoffdichtungsbahnen verwendet werden. Für den speziellen Anwendungsfall hat eine Eignungsfeststellung zu erfolgen.



TA Abfall 1991 / TA Siedlungsabfall 1993

Anhang E - Material- und Prüfanforderungen bei der Herstellung von Deponieabdichtungssystemen

1. Material- und Einbauparameter

1.2 Kunststoffdichtungsbahn

a. Der Einsatz von **Regeneraten**, das Vermischen von Regeneraten mit Neuware, das Mischen **verschiedener Formmassetypen** und die Verarbeitung von **Rückführmaterial (Regranulat)** darf nur nach Maßgabe des **Zulassungsbescheides der Zulassungsstelle** für die Dichtungsbahn erfolgen.

b. Die Kunststoffdichtungsbahn muß im eingebauten Zustand den nach Nr. 9.4.1.1 dieser Technischen Anleitung zu berechnenden **Verformungen schadlos** folgen können.



TA Abfall 1991 / TA Siedlungsabfall 1993

Anhang E

2. Eignungsprüfungen

2.2 Kunststoffdichtungsbahn

*Der Nachweis der Eignung der Kunststoffdichtungsbahn sowie der geplanten Füge-technik ist durch einen **Zulassungsbescheid** zu erbringen.*



TA Abfall 1991 / TA Siedlungsabfall 1993

Anhang E

3. Qualitätssicherung und Abnahme

3.1 Qualitätslenkung

3.1.2 Kunststoffdichtungsbahn

- a. Transport und Lagerung
- b. Verlegeplan
- c. **Schweißarbeiten** nur durch **qualifiziertes Personal**
- d. Witterung
- e. Nähte



TA Abfall 1991 / TA Siedlungsabfall 1993

Anhang E

3.2 Qualitätsprüfung

3.2.2 Kunststoffdichtungsbahn

3.2.2.1 Anlieferung

3.2.2.2 Verlegung

3.2.2.3 Fügearbeiten



TA Abfall 1991 / TA Siedlungsabfall 1993

Anhang E

3.3 Abnahme von Deponieabdichtungssystemen

- a. **Unversehrtheit** der Kunststoffdichtungsbahn,
- b. **korrekte Ausführung** der im Verlegebestandsplan aufgeführten **Nachbesserungen**,
- c. **keine Wellenbildungen**, die unter Auflast zu Falten mit Zerstörungsgefahr führen können,
- d. **keine durch Temperaturveränderungen sichtbar gezerrten Bereiche**.



BAM-Zulassungen ab 1993

Rechtsgrundlagen:

- Dichtungserlass Niedersachsen
- TA Abfall
- TA Siedlungsabfall
- Verwaltungsvorschrift des Thüringer Ministeriums für Umwelt und Landesplanung „Die geordnete Ablagerung von Abfällen“ vom 11.09.1992 (Thüringer StAnz, Nr. 40, S. 1344, 1992)





BAM-Zulassungen ab 1993

Gegenstand:

- **Kunststoffdichtungsbahnen (KDB)**
- **Geotextile Schutzschichten**



BAM-Richtlinien und Eignungsbeurteilungen

- **Verlegefachbetriebe**
- **Fremdprüfer**
- **Dichtungskontrollsysteme**
- **geotextile Entwässerungsschichten**



Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen 1994 bis 1997

TA Abfall Nr. 9.4.1.1

TASi Nr. 10.4.1.1

Prüfpflichten nach anderen Rechtsvorschriften - z.B. des Bauordnungsrechts in Form der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung oder des Wasserrechts - bleiben hiervon unberührt.

→ Das **Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt)**, die **BAM** und das **Umweltbundesamt (UBA)** vereinbarten:

Das DIBt ist zuständig für die Zulassung von Deponiebaustoffen und übernimmt nach einer Übergangszeit auch die Zulassungsverfahren der BAM für Geokunststoffe.



Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen 1994 bis 1997

Das **DIBt** (früher **IfBt**) wurde auf der Grundlage eines **Bund-/Länderabkommens** gegründet. Seine Aufgabe bestand in der **Zulassung von Bauprodukten auf der Grundlage des Baurechts**, später auch des Wasserrechts.

Für den **Vollzug des Abfallrechts** sind die **Obersten Abfallbehörden der Länder zuständig**. Sie waren in die zwischen DIBt, BAM und UBA getroffene Vereinbarung nicht eingebunden. Einige Länder waren daher nicht bereit, die mit der abfallrechtlichen Zulassung verbundenen Kosten (i. W. Personalstellen) zu tragen.

→ Das DIBt setzte 1997 **Produkte für Deponieabdichtungssysteme** auf die **Liste C („Bauprodukte von untergeordneter baurechtlicher Bedeutung“)** und stellte in Folge dessen die bereits begonnene Zulassungstätigkeit ein.





Abfallablagerungsverordnung 2001 Deponieverordnung 2002

TA Abfall und TA Siedlungsabfall werden durch Verweis auf die Abfallablagerungsverordnung und die Deponieverordnung auf **Verordnungsniveau** gehoben.

Ordnungswidrigkeiten nur in AbfAbIV (DK I und DK II)



Deponieverordnung 2009

Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts
(Artikelverordnung)

- **Deponieverordnung 2009**
- **Aufhebung von**
 - **Abfallablagerungsverordnung 2001**
 - **Deponieverordnung 2002 und**
 - **Deponieverwertungsverordnung 2005**

Verwaltungsvorschrift zur **Aufhebung von TA Abfall und TA Si**



Deponieverordnung 2009

Die Deponieverordnung gilt unmittelbar; die Anforderungen müssen nicht erst durch einen Bescheid der zuständigen Behörde umgesetzt werden.

Ordnungswidrig handelt, wer **vorsätzlich oder fahrlässig entgegen** § 10 Absatz 1 Nummer 1 in Verbindung mit Anhang 1 Nummer 2.1 Satz 1 DepV **einen Geokunststoff, ein Polymer, ein Dichtungskontrollsystem einsetzt**.

Bußgeld bis zu 100.000 € (§ 69 Abs. 1 Nr. 8 Kreislaufwirtschaftsgesetz)



Deponieverordnung 2009 vom 27. April 2009

2.1.1 Anforderungen zum Stand der Technik

Funktionserfüllung der einzelnen Komponenten und des Gesamtsystems unter allen äußeren und gegenseitigen Einwirkungen **mindestens 100 Jahre /**

serienmäßig hergestellte **Dichtungskontrollsysteme**
mindestens 30 Jahre

Deponieverordnung 2009

Basisabdichtungssystem

Nr.	Systemkomponente	DK 0	DK I	DK II	DK III
2	Erste Abdichtungs- komponente ²⁾	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich
3	Zweite Abdichtungs- komponente ²⁾	nicht erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich

²⁾ Werden **Kunststoffdichtungsbahnen** als Abdichtungskomponente eingesetzt, darf ihre **Dicke 2,5 mm nicht unterschreiten**.

Deponieverordnung 2009

Oberflächenabdichtungssystem

Nr.	Systemkomponente	DK 0	DK I	DK II	DK III
3	Erste Abdichtungs- komponente	nicht erforderlich	erforderlich ²⁾	erforderlich ²⁾	erforderlich ³⁾
4	Zweite Abdichtungs- komponente	nicht erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich ²⁾	erforderlich ³⁾

^{2), 3)} Werden **Kunststoffdichtungsbahnen** als Abdichtungskomponente eingesetzt, darf ihre **Dicke 2,5 mm nicht unterschreiten**.

Deponieverordnung 2009

Oberflächenabdichtungssystem

Nr.	Systemkomponente	DK 0	DK I	DK II	DK III
6	Dichtungskontroll- system	nicht erforderlich	nicht erforderlich	nicht erforderlich	erforderlich
7	Entwässerungs- schicht ⁴⁾ d ≥ 0,30 m, k ≥ 1x10⁻³ m/s, Gefälle > 5 %	nicht erforderlich	erforderlich	erforderlich	erforderlich

⁴⁾ Die zuständige Behörde kann auf Antrag des Deponiebetreibers **Abweichungen von Mindestdicke, Durchlässigkeitsbeiwert und Gefälle der Entwässerungsschicht** zulassen, wenn nachgewiesen wird, dass die **hydraulische Leistungsfähigkeit der Entwässerungsschicht** und die **Standsicherheit der Rekultivierungsschicht** dauerhaft gewährleistet sind.

Deponieverordnung 2009

Für das **Abdichtungssystem** dürfen **Materialien, Komponenten oder Systeme nur eingesetzt werden, wenn sie dem Stand der Technik nach Nummer 2.1.1 entsprechen** und wenn dies der zuständigen Behörde nachgewiesen worden ist.

Als Nachweis nach Satz 1 ist **für Geokunststoffe, Polymere und serienmäßig hergestellte Dichtungskontrollsysteme die Zulassung dieser Materialien, Komponenten oder Systeme durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung nach Nummer 2.4 erforderlich**.



Deponieverordnung 2009

2.4 Zulassung von Geokunststoffen, Polymeren und Dichtungskontrollsystemen

2.4.1 Zuständigkeiten und Aufgaben

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ist zuständig für die Prüfung und Zulassung von Geokunststoffen wie Kunststoffdichtungsbahnen, Schutzschichten, Kunststoff-Dränelemente, Bewehrungsgitter aus Kunststoff, von Polymeren und von Dichtungskontrollsystemen für die Anwendung in Basis- und Oberflächenabdichtungen von Deponien auf der Basis eigener Untersuchungen und von Ergebnissen akkreditierter Stellen. Sie hat in diesem Zusammenhang folgende Aufgaben:

1. **Definition von Prüfkriterien,**
2. **Aufnahme von Nebenbestimmungen in die Zulassung,**
3. **Festlegung von Anforderungen an den fachgerechten Einbau und das Qualitätsmanagement.**



Deponieverordnung 2009

2.4.2 Zulassung

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung berücksichtigt bei der Zulassung ... mindestens die Kriterien und Einwirkmechanismen nach Nummer 2.1 zum Stand der Technik:

1. **Dichtigkeit**
 2. **Verformungsvermögen**
 3. **Widerstandsfähigkeit** gegenüber **mechanisch** einwirkenden Kräften
 4. **Widerstandsfähigkeit** gegen **hydraulische** Einwirkungen
 5. **Beständigkeit** gegenüber **chemischen und biologischen** Einwirkungen
 6. **Beständigkeit** gegenüber **Witterungseinflüssen**
 7. **Beständigkeit** gegenüber alterungsbedingten nachteiligen **Materialveränderungen**,
 8. gesicherte, reproduzierbare und qualitätsüberwachte **Vorfertigung**
 9. gesicherte, die Funktionalität wahrende und qualitätsüberwachte **Herstellung** sowie **Einbau der Systemkomponenten und des Abdichtungssystems**
- ...



Deponieverordnung 2009

2.4.4 Fachbeirat

*Bei der **Bearbeitung der Zulassungsrichtlinien**, die die Voraussetzungen und Anforderungen der Zulassung der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung beschreiben, wirkt ein **Fachbeirat beratend** mit, in dem Vertreter der **Länderfachbehörden, des Umweltbundesamtes und Fachleute aus anderen relevanten Bereichen** vertreten sind. Die **Geschäftsführung** des Fachbeirats liegt bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.*

2.4.5 Veröffentlichung

*Die **Zulassungsrichtlinien** sowie die **Zulassungsscheine** bestandskräftiger Zulassungen werden von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in geeigneter Form öffentlich zugänglich gemacht.*

➔ Internet



BAM-Richtlinien (und Zulassungen)

- für die Zulassung von
 - **Dichtungskontrollsystemen für Konvektionssperren**
 - **Geotextilien zum Filtern und Trennen**
 - **Kunststoffdränelementen**
 - **Kunststoffdichtungsbahnen**
 - **Schutzschichten für Kunststoffdichtungsbahnen**
 - **Bewehrungsgittern aus Kunststoff**
- mit Anforderungen an
 - **Fachbetriebe für den Einbau**
 - **Fremdprüfende Stellen**





Resümee

Der Bund und die Länder haben mit der Übertragung aller Aufgaben im Zusammenhang mit der Eignung von Geokunststoffen, Polymeren und Dichtungskontrollsystemen für den Deponiebau auf die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung die hohe Qualität ihrer Arbeit in den vorangegangenen 20 Jahren anerkannt. Sie haben darauf verzichtet, in der Deponieverordnung konkrete Anforderungen an Geokunststoffe, Polymere und Dichtungskontrollsysteme zu formulieren.

Seit 1989 begleitet ein Fachbeirat die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung bei der Zulassung von Geokunststoffen, Polymeren und Dichtungskontrollsystemen. Die damit gewonnenen positiven Erfahrungen veranlasste den Verordnungsgeber, auch diesen Fachbeirat unmittelbar in der Deponieverordnung zu verankern.



Danke!

- dem **Verordnungsgeber (Bundestag und Bundesrat in Verbindung mit den Obersten Abfallbehörden des Bundes und der Länder)** für die weise Entscheidung zur Aufgabenübertragung für Zulassungen von Geokunststoffen, Polymeren und Dichtungskontrollsystemen auf die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
- dem **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie** dafür, dass die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung die Aufgabe der Zulassung wahrnehmen darf
- der **Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung** dafür, dass sie die Aufgabe der Zulassung wahrnimmt



Danke!

- den **fachlichen Wegbereitern** des Einsatzes von Kunststoffdichtungsbahnen im Deponiebau
- den **Mitgliedern des Fachbeirates** für die fachlich konstruktive und sachliche Diskussion
- dem **Umweltbundesamt** für die erfolgreiche Moderation der Sitzungen des Fachbeirates
- dem **AK GWS und dem AGAS** für Ihren fachlichen Input durch ergänzende Papiere und Ergebnisse von ihnen veranlasster eigener Untersuchungen



Danke!

- den **Kolleginnen und Kollegen der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung** für
 - ihre **maßgebliche Rolle bei der Entwicklung des Standes der Technik im Deponiebau**
 - die **Geschäftsführung des Fachbeirates**
 - die **fachliche und organisatorische Arbeit in den Zulassungsverfahren**



Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung (BAM)
4.3 Schadstofftransfer und Umwelttechnologien
Dr. Franz-Georg Simon
Unter den Eichen 87
12205 Berlin

✉ franz-georg.simon@bam.de
☎ +49 30 8104 1430
🌐 www.bam.de