

Entwicklungen von Abdichtungssystemen für den Grundwasserschutz

Prof. Dr.-Ing. Georg Heerten

1. Einleitung

Die Industrialisierung und das Wirtschaftswunder nach dem zweiten Weltkrieg ließen auch die Abfallmengen steigen und „Müllkippen“ waren die Antwort, die sich bald als unzulänglich erweisen sollte. Mit dem Bundesseuchenschutzgesetz von 1961 wurde in § 12 den Kommunen die Beseitigung flüssiger und fester Abfall- und Schmutzstoffe auferlegt, sodass „unter seuchenhygienischen Gesichtspunkten Gefahren nicht entstehen“. Erst 1972 folgt in der Bundesrepublik Deutschland ein erstes Abfallbeseitigungsgesetz (AbfBesG), mit dem die Abfallbeseitigung von den Gemeinden auf die leistungsfähigeren Landkreise und kreisfreien Städte übertragen und die Abfallbeseitigung auf wenige hundert Groß- und Zentraldeponien konzentriert wird. Doch erst mit der TA-Abfall (1991) und der TASI (1993) werden verbindliche Regelungen für Dichtungssysteme für die Basis und die Oberfläche von Deponien eingeführt und „Regelsysteme“ vorgegeben. Mit der Deponieverordnung (DepV) von 2009 werden die Regelsysteme durch Anforderungen an Systemkomponenten und Wirksamkeitsziele ersetzt und damit eine breitere an projektspezifischen Randbedingungen orientierte Ausgestaltung von Deponiebasisdichtungen und Deponieoberflächendichtungen ermöglicht. Die praktische Entwicklung und die jeweils aktuellen Fragestellungen sollen an maßgeblich beeinflussenden Schlüsselobjekten aus der Sicht und Beteiligung des Verfassers dargestellt werden. Hierbei wird sich auf Entwicklungen der Geokunststoffe im Konflikt und Wettbewerb mit klassischen mineralischen Lösungen und Regelsystemen nach TA-Abfall und TASI beschränkt. Auf die vielen anderen Varianten von Dichtungssystemen wird nicht weiter eingegangen. Abschließend wird über neuste Untersuchungen aus Kanada (Rowe, 2011) berichtet, mit dem Ergebnis, dass Kombinationsdichtungen aus geosynthetischen Tondichtungsbahnen und PEHD-Kunststoffdichtungsbahnen als effektivste Dichtungssysteme für den Grundwasserschutz hervorgehoben und deutsche Anforderungskriterien und Ausführungspraxis als vorbildlich dargestellt werden. Ein Ergebnis, auf das alle Beteiligten an der historischen Entwicklung von entsprechenden Dichtungssystemen für den Grundwasserschutz in Deutschland stolz sein dürfen.

2. Entwicklung der Dichtungssysteme mit Geokunststoffen

Nachdem durch die Entwicklung der Abfallmengen aus Industrie und privaten Haushalten gesellschaftspolitischer Handlungsdruck entstand, waren klassische Antworten aus dem Erdbau die erste Lösung: feinkörnige Böden als „wasserundurchlässige“ Schicht und grobkörnige Drän- und Filterschichten. Doch die Aufgabe, Grundwasser und Umwelt vor Auslaugungen und Emissionen aus dem Müll zu schützen, erforderte keine Dichtung gegen Wasser, sondern eine Dichtung gegen Schadstoffe im Müllsickerwasser und in den aus dem Müllkörper entweichenden Gasen.

Nach Anfangserfahrungen mit unterschiedlichen Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) im Wasserbau finden PEHD-Kunststoffdichtungsbahnen Anfang der 70er Jahre Anwendung als Dichtungselement an der Deponiebasis. Doch der Weg zum „Multibarrierenkonzept“ (z. B. vorgestellt von Stief, 1986) mit

- geologischer Barriere
- Kombinationsdichtung an der Basis
- vorbehandeltem Abfall
- Oberflächenabdichtung

ist noch weit und sollte noch Jahrzehnte in Anspruch nehmen, um vorbildliche gesetzliche Vorgabe in Deutschland zu werden. Auf dem Weg der Entwicklung waren viele Einzelfragen zu klären, die auch Einfluss auf spezielle Anforderungen an Geokunststoffe in den Deponieabdichtungssystemen hatten. Hierauf soll im Folgenden aus der Sicht des Verfassers aus konkreten Projektentwicklungen eingegangen werden.

3. Projektbezogene Entwicklungen von Komponenten von Deponiedichtungssystemen

3.1 Oberflächenabdichtung Deponie Georgswerder

Die Deponie Hamburg-Georgswerder wurde nach dem Austritt von Dioxin in die die Deponie umgebenden Vorfluter zum Sanierungsfall mit höchster öffentlicher Aufmerksamkeit. Als einer der ersten Sanierungsschritte wurde in den Jahren 1986 bis 1988 auf die Kuppe der Deponie eine ca. 150.000 m² umfassende Oberflächenabdichtung aufgebracht, die in einigen Details neue Standards setzte:

Auf die 0,6 m dicke mineralische Dichtung wurde erstmals bei einem Oberflächenabdichtungssystem eine 1,5 mm PE-HD-Dichtungsbahn aufgelegt. Die Dichtungsbahn wurde als „Nagetiersperre“ konzipiert und nur in Fallrichtung verschweißt. Zur Stabilisierung potenzieller Gleitflächen war die Oberfläche der KDB sandrau und mit 1 bis 2 mm hohen Stegen versehen, während auf der Unterseite 6,5 mm hohe Spikes den Verbund zur mineralischen Dichtung bildeten. Auf der KDB wurde ein 0,25 m dicker Flächendränder Körnung 0,5 bis 8 mm eingebaut, der wiederum durch einen vernadelten PE-HD-Vliesstoff vom 0,75 m mächtigen Decks substrat filtertechnisch getrennt wurde, damit kein Feinkorn aus dem Decks substrat in den Flächendrän eingetragen werden konnte. Alle Kunststoffkomponenten des Oberflächenabdichtungssystems – Gassammelleitungen, Nagetiersperre, Filtervliesstoff – waren aus dem Rohstoff PE-HD, um der geforderten hohen Chemikalienbeständigkeit zu entsprechen. Bei Untersuchungen des Deponiegases war festgestellt worden, dass es eine Vielzahl von zum Teil gefährlichen Schadstoffen enthielt und es wurde eine Beständigkeit der Geokunststoffe gegenüber diesen Schadstoffen gefordert. Da sich auch renommierte Institutionen nicht in der Lage sahen, die Beständigkeit von Vliesstoffen aus Fasern unterschiedlicher Rohstoffe gegenüber dem veränderlichen Schadstoffmix im Deponiegas bei sommerlichen oder winterlichen sowie trockenen oder feuchten Umgebungseinflüssen zu untersuchen, wurde neben den Rohren und der KDB aus PE-HD auch ein Vliesstoff aus PE-HD-Fasern verlangt. Hierdurch kam erstmals ein PE-HD-Faserprodukt auf einer Deponie zum Einsatz mit ausstrahlender Wirkung auch für andere Deponieprojekte.

Begleitende, umfangreiche F+E-Projekte (hier das Teilvorhaben 7, Wasserhaushalt und Wirksamkeit mehrschichtiger Abdecksysteme – Untersuchungszeitraum 1986 bis 1990) führten am Beispiel der Deponie Georgswerder u. a. zu der Erkenntnis, dass die mineralische Dichtung durch die Ausbildung von Trockenrissen keine Langzeitwirksamkeit aufweist und die PE-HD-Kunststoffdichtungsbahn als das entscheidende Dichtungselement anzusehen ist. Ergebnisse, die fundamental sowohl für die klassische mineralische Dichtung als auch für die inzwischen entwickelten geosynthetischen Tondichtungsbahnen (Bentonitmatten) die Diskussion um Anforderungen und Regelsysteme für Deponieabdichtungen national und international beeinflussten. In Hamburg verzichtete man daher von da ab auf derartige Kombinationsdichtungen (Kilger, 2010).

Langsam setzt sich die Erkenntnis durch, dass es die mineralische Dichtung mit über längere Zeiträume unveränderlichem Wassergehalt nicht gibt und der oft penibel überwachte Einbauwassergehalt keine Konstante ist. Doch selbst bei Oberflächenabdichtungen benötigen Austrocknungsprozesse häufig einige Jahre, bis eine nicht mehr tolerierbare

Verminderung der Dichtwirkung einsetzt. Beobachtungszeiträume von Testfeldern von 1 bis 2 Jahren, wie in der Vergangenheit häufig praktiziert, sind eindeutig zu kurz, um diese Veränderungen anzuzeigen, die zudem für Oberflächenabdichtungssysteme kritischer betrachtet werden müssen als für Basisabdichtungssysteme, wenn sie im Einbauwassergehalt schnell mit anderen Systemkomponenten und Abfall überlagert werden. Allerdings fehlt bis heute für erdbautechnisch hergestellte mineralische Dichtungen eine Nachweisstrategie für einen langfristig zur Aufrechterhaltung der Dichtwirkung erforderlichen Wassergehalt. Ein Nachweis, der im feuchten oder nassen Umfeld der klassischen Anwendung im Wasserbau auch entbehrlich war. Der zeitlich veränderliche Wassergehalt erdbautechnisch hergestellter mineralischer Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen wird auch aus den Vereinigten Staaten von Amerika (USA) bestätigt. Zunächst anforderungsgerecht eingebaute Tondichtungsschichten ($k_f < 1 \cdot 10^{-9}$ m/s) wiesen nach wenigen Jahren Betriebszeit erheblich erhöhte Wasserdurchlässigkeiten als Folge von Austrocknungsvorgängen mit begleitender Rissbildung auf mit an Proben bemessenen Wasserdurchlässigkeitsbeiwerten, die k_f -Werte von 10^{-6} bis 10^{-7} m/s erreichen (Heerten & Koerner, 2010).

Ergänzend muss darauf hingewiesen werden, dass auch eine mögliche Erhöhung des Wassergehaltes einer erdbautechnisch hergestellten mineralischen Dichtung betrachtet werden muss, da sie zu Standsicherheitsproblemen durch Verringerung der Scherfestigkeit der mineralischen Dichtungsschicht an Böschungen führen kann.

Für geosynthetische Tondichtungsbahnen mit qualitativ hochwertigen Na-Bentoniten liegen inzwischen umfangreiche Untersuchungsergebnisse für Trocken-Nass-Zyklen oder Frost-Tau-Zyklen und Aufgrabungsergebnisse von langjährig eingebauten Produkten vor, die bei entsprechendem Systemaufbau langfristige Dichtwirkungen erwarten lassen. Dies hat auch in den inzwischen vorliegenden Eignungsbeurteilungen von geosynthetischen Tondichtungsbahnen durch die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) seinen Niederschlag gefunden.

3.2 Basisabdichtung Deponie Pohlsche Heide

Aus Sicht des Verfassers war der 1986/87 ausgeführte Bau der Basisdichtung des 1. Bauabschnittes der Deponie Pohlsche Heide des Kreises Minden-Lübbecke ein „Leuchtturm“-Projekt. Bei dieser Neuanlage konnten viele Details ohne Einschränkungen durch Altanlagen richtungsweisend gelöst werden. Erwähnt werden soll hier

- die mineralische Dichtung, die, nachdem eine unzureichende Dichtwirkung des im Baufeld anstehenden Tonsteins bei Schürfen festgestellt wurde, als „mixed in plant“ aufbereitete, vergütete Tondichtung 3-lagig in einer Gesamtdicke von 75 cm eingebaut wurde (mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $k_f = 1 \cdot 10^{-10}$ m/s),
- die 3,0 mm dicke PE-HD-Dichtungsbahn, die im Pressverbund auf die Tondichtung aufgelegt wurde,
- der Schutzvliesstoff aus PE-HD-Fasern mit einer Flächenmasse von 1200 g/m², der überprüft durch Einbauversuche im Feld und durch Laborversuche mit dem eingesetzten Korn 8/32 mm in der überlagernden, 45 cm dicken Dränschicht ausgewählt wurde (im 2. Bauabschnitt kamen später wegen weiter gestiegener Anforderungen Schutzvliesstoffe mit einer Flächenmasse von 2.300 g/m² zum Einsatz),
- die großformatigen PE-HD-Wickelrohre DN 300, verlegt in Mulden mit Feinkiesbett und abgedeckt mit 32/63 mm Grobkies, für Betrieb, Überwachung und Reinigung in entsprechendem Gefälle gradlinig verlegt und durch die Randböschungen der Deponie in die Sickerwasser-Sammelschächte geführt,
- die funktionsgerecht gestalteten und ausgeführten PE-HD-Durchdringungsbauwerke für die Sickerwassersammelrohre durch die Dichtung der Deponieböschung,
- die außerhalb des Deponiekörpers angeordneten Deponiesickerwasser-Sammel- und Kontrollschächte aus PE-HD, die auch für die Funktionsüberwachung und Wartung der Sickerwasserleitungen dienen.

Weitere Details hat z. B. Knipschild 1994 veröffentlicht.

Bei der Deponie Pohlsche Heide wurde vieles bereits beispielgebend umgesetzt, bevor 1992 überhaupt die erste BAM-Richtlinie Maßstäbe für Herstellung und Einbau von PE-HD-Dichtungsbahnen setzte, die allerdings zunächst nur in wenigen Bundesländern, erstmals in Niedersachsen, verbindlich beachtet wurden (Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, BAM, Berlin, 1992: Richtlinien für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als

Bestandteil einer Kombinationsdichtung für Siedlungs- und Sonderabfalldeponien sowie für Abdichtungen von Altlasten).

3.3 Basisabdichtung Deponie Hopferstadt

Etwa zeitgleich mit dem Bau der Basisdichtung der Deponie Pohlsche Heide wurden für die Basisdichtung der Deponie Hopferstadt Versuchsfelder für die Prüfung der Schutzwirksamkeit von Vliesstoffen und einer Bentonitmatte im realen Einbauversuch durchgeführt. Hatten schon Einbauversuche an der Pohlschen Heide gezeigt, dass die Art des Einbaus und die Auswahl der Geräte entscheidenden Einfluss auf die Einbaubeanspruchungen haben, konnte in Hopferstadt nachgewiesen werden, dass ein Schutzvliesstoff von 1200 g/m² keinen ausreichenden Schutz für eine BAM-zugelassene PE-HD-Kunststoffdichtungsbahn mit 2,5 mm Mindestdicke gegenüber dem nunmehr verlangten Dränkie 16/32 mm bietet. Nur die Bentonitmatte zeigte eine perfekte Schutzwirkung, da sich das Dränkorn in die Matte einbettete. Die Versuche Hopferstadt waren ein wichtiges Element bei der Entwicklung von Schutzschichtsystemen bzw. geotextilen Schutzlagen. So erfordern grobe Dränschichten aus 16/32 mm zum Schutz der Kunststoffdichtungsbahn an der Basis in der Regel Schutzschichtsysteme, während in Oberflächenabdichtungssystemen geotextile Schutzlagen (Schutzvliesstoff / Dränmatten) ausreichend sein können, um gegen Einbaubeanspruchungen und langfristig statisch wirksame Auflasten aus überlagernden Schichten zu schützen. Näheres regeln heute die Empfehlungen GDA E3-9 Eignungsprüfung für Geokunststoffe, 1997, aus den Empfehlungen des AK 6.1 „Geotechnik der Deponiebauwerke“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT) und die Richtlinie für die Zulassung von Schutzschichten für Kunststoffdichtungsbahnen in Deponieabdichtungen (2010) der BAM, Berlin. Dieser in Deutschland eingeführte Stand der Technik zum Schutz von Kunststoffdichtungsbahnen in Deponieabdichtungssystemen mit einer Begrenzung der im Laborversuch an der KDB gemessenen Verformung < 0,25 % ist weltweit einzigartig, aber dem Ziel des Schutzes von Grundwasser und Umwelt geschuldet.

3.4 Basisabdichtung Deponie Nienburg in der Krähe

Das System zur Sickerwassererfassung an der Deponiebasis ist eine bedeutende Komponente des Dichtungssystems mit ggf. höherem Versagenspotenzial als die Dichtungsschichten, wie versinterte oder kollabierte Dränrohre und versinterte, verkrustete, mit Bakterien-schlämmen überwucherte Dränschichten in der Vergangenheit zeigten. Vor dem Hintergrund dieser Erfahrungen und umfangreichen Laborversuche wurden

Dränschichten mit groben Körnungen 16/32 mm verlangt. Bei der Auslegung der Sickerwasserfassung im Basisdichtungssystem bei der Erweiterung der Deponie Nienburg in der Krähe wurden folgende Randbedingungen und Einflussgrößen betrachtet (Heerten, 1988):

Eine Sickerschicht der Körnung 16/32 mm mit einer Mindestdicke von 30 cm hat einen Porenanteil von ca. 40 % und Poren in der Größenordnung von ca. 4 bis 8 mm. Pro Quadratmeter Flächensickerschicht steht damit ein Volumen von ca. 120 dm³ für die Sickerwasserabführung und die Aufnahme von sich gegebenenfalls ablagernden Feinteilen zur Verfügung. Durch Mindestneigungen in der Deponiesohle von 3 % und den Einsatz von Sickerrohren DN 300 mit mindestens 3 % Rohrgefälle sollen Ablagerungen im Sickersystem weitgehend verhindert und außerdem Möglichkeiten für Kontrolle und Unterhaltung (Kamerabefahrungen und Spülungen) geschaffen werden.

Bevor Filterregeln für Geotextilien für die Bemessung von Filtern in Deponieabdichtungssystemen herangezogen werden, sind folgend Grundsätze zu beachten:

1. Werden grobe Sickerschichten, z. B. mit einer Körnung 16/32 mm und Porenkanäle zwischen ca. 4 und 8 mm eingesetzt, so kann der Anteil der Partikel im Hausmüll, der in Poren dieser Größe eingeschlämmt werden könnte, im Mittel zwischen ca. 2 und 30 % liegen. Das heißt, es kann bereits das Ausschlämmen der Partikel aus den ersten Dezimetern Müll ausreichen, um die 40 % Porenanteil einer ca. 30 cm dicken Dränschicht zuzuschlämmen und zu einem örtlichen Versagen der Dränschicht zu führen.
2. Hausmüll bzw. Müll für Hausmülldeponien hat eine sehr heterogene Struktur. Im Müllkörper werden Bereiche mit wesentlich mehr und mit wesentlich weniger Feinmüllanteilen vorgefunden. Unter dieser heterogenen Müllstruktur gilt es, eine durchgängig wirksame Dränschicht zu erhalten, damit Wasser, das aus den durchlässigeren Bereichen zur Deponiebasis sickert, einwandfrei abgeführt werden kann. Teilverstopfungen der Dränschicht sind durch eine entsprechend dimensionierte Filterschicht, die die Dränschicht von überlagernden Schichten filterstabil trennt, zu verhindern.

3. Die Frage, ob zwischen Müll und Dränschicht ein geotextiler Filter anzuordnen ist und wie dieser ggf. zu dimensionieren ist, hat zu berücksichtigen, ob ein Ausspülen feiner Müllbestandteile (z. B. Aschen/Schlämme/deponierte Böden) in das Dränsystem in begrenztem Umfang zugelassen werden kann oder nicht. Grundsätzlich dürfen einzelne Komponenten des Entwässerungssystem (Dränschicht/Dränleitungen/Kontrollschächte) nicht in ihrer Funktion gefährdet werden, um ein Überstauen der Dichtungsschichten mit einem Aufstau von Deponiesickerwasser langfristig zu verhindern.

Diesen Ansätzen folgend wurde vor ca. 25 Jahren für Filterschichten im Systemaufbau von Basisabdichtungen ein spezieller Verbundstoff entwickelt (Depotex 755 GG). Dieser Verbundstoff besteht aus einem PE-HD-Gittergewebe mit aufgenadeltem Grobfaservlies, ebenfalls aus PE-HD-Fasern, und weist eine im Vergleich zu handelsüblichen Geotextilien sehr grobe und offenporige Struktur auf. Bei einem Flächengewicht von ca. 850 g/m² und einer Dicke von ca. 7,5 mm (bei 2 kN/m²) wird eine wirksame Öffnungsweite von $D_w = 0,53$ mm nachgewiesen, was einer Porengröße etwa von Feinkies entspricht.

Abb. 1 zeigt den Einbau dieses Spezialgeotextils Depotex 755 GG als Rigolenfilter in der Deponie Krähe bei Nienburg. Bei dieser Anwendung wirkt der Verbundstoff als Filter zwischen dem groben Rigolenmaterial (Korngröße 16/32 mm) und dem als Dränlage eingebauten Sand (Korngröße 0/16 mm).

Nach Betreiberaussagen funktioniert das Sickerwassersammelsystem der Deponie Nienburg in der Krähe seit fast 25 Jahren einwandfrei.



Abb. 1: Einbau eines Spezialfiltervliesstoffes als Rigolenfilter in der Deponie Krähe bei Nienburg

Ein entsprechender geotextiler Filter könnte aktuell auch auf PP-Rohstoffbasis hergestellt werden, da PE-HD-Faserprodukte wegen des als gering eingeschätzten Unterschiedes in der Chemikalienbeständigkeit zu PP am Markt nicht mehr nachgefragt werden. In Nordamerika ist die Anordnung eines Geotextils zwischen der Sickerwasserdränschicht und den überlagernden Abfällen z. B. allgemein üblich (allerdings mit handelsüblichen Produkten mit deutlich kleineren wirksamen Öffnungsweiten von ca. 0,08 bis 0,12 mm).

3.5 Oberflächenabdichtungssystem Deponie Neu Wulmstorf

Nachdem NAUE 1987 die schubkraftübertragende, quellgedruckerzeugende Bentonitmatte entwickelt hatte und erste großtechnische Anwendungen bei der Sanierung des Lechkanals, beim Bau des Flughafens München und beim Einbau einer Bentonitmatte als alleiniges Dichtungselement in einer Oberflächenabdichtung auf der Deponie Grabow (1990) erfolgreich durchgeführt worden waren, war die Oberflächenabdichtung der Deponie Neu Wulmstorf 1996 das erste große Projekt (320.000 m² / 32 ha) in Deutschland mit Kombinationsdichtung aus Bentonitmatte und Kunststoffdichtungsbahn und dem Einsatz

einer Kunststoffdränmatte. Hier wurde eine klassische Oberflächenabdichtung aus Tondichtung und Kiesdränschicht durch eine geosynthetische Alternative ersetzt. Die Oberflächenabdichtung wurde auf einer mineralischen, gasdurchlässigen Ausgleichsschicht ausgeführt, die direkt auf den Müllkörper aufgebracht wurde. Abb. 2 zeigt das 1996 in Bau befindliche Projekt.



Abb. 2: Einbau der geosynthetischen Tondichtungsbahn (GTD) als Teil der Oberflächenabdichtung der Deponie Neu Wulmstorf, Nähe Hamburg, 1996/97

Da die technischen Anforderungen an die Elemente eines entsprechenden Dichtungssystems vor dem Hintergrund von BAM-Zulassungen für Kunststoffdichtungsbahn und Dränelement sowie der LAGA-Eignungsnachweise für Bentonitmatten allgemein akzeptiert sind, soll hier auf andere, positive Aspekte für den Umweltschutz durch das in Neu Wulmstorf gewählte System hingewiesen werden.

Für dieses Projekt wurde eine enorme Reduzierung des Umschlags und Transports von Massen erzielt, denn der benötigte Ton für die erdbautechnisch herzustellende Tondichtung und der benötigte Kies für die mineralische Dränschicht brauchten nicht gewonnen, transportiert und wieder eingebaut werden. Vom Projekt Oberflächenabdichtung Deponie Neu Wulmstorf kann berichtet werden, dass

- anstelle von 21.000 Lkw-Ladungen für Ton und Kies nur 165 Lkw-Ladungen für die Lieferung der GTD und Dränmatte erforderlich waren,
- anstelle der geplanten Baukosten von ca. 36 Mio. € nur Kosten von ca. 25 Mio. € entstanden sind und so die Baukosten gegenüber dem Planansatz um 30 % reduziert werden konnten,
- anstelle der vorgesehenen Bauzeit von ca. 3 Jahren das Projekt innerhalb von 2 Jahren fertiggestellt werden konnte.

Von der ursprünglich geplanten Lösung konnten mehr als 99 % der Lkw-Fahrten vermieden werden. Die Entlastung für die lokale Infrastruktur in ländlicher Umgebung mit kleinen, schmalen Straßen wird auch bei folgendem Vergleich deutlich: Die Überfahrt eines schweren Lkws (45 t) belastet einen Autobahnquerschnitt etwa in gleichem Maße wie die Überfahrt von 100.000 Pkws. Gleichzeitig werden natürlich beträchtliche Mengen an Diesel eingespart und entsprechende Emissionen des Treibhausgases CO₂ und auch anderer Schadstoffe vermieden.

Auch wenn die Wirksamkeit der Dränmatte kritisiert wurde (Melchior, 2010), bleibt festzuhalten, dass das Oberflächenabdichtungssystem zwei Regenereignisse in den Jahren 2006 und 2007 standsicher überstanden hat, deren Wiederkehr mit „weit über 100 Jahren“ angegeben wird (Melchior, 2010). Ein Bild aus dieser Veröffentlichung (Abb. 3) zeigt einen Maulwurfsgang am Böschungsfuß, aus dem nach dem Jahrhundertregenereignis von 2006 ein Wasser-Boden-Gemisch ausströmte. Dieses Bild sollte uns mahnen, bei Dichtungssystemen nicht nur die Flora mit möglichen Durchwurzelnungen zu betrachten, sondern auch die Entwicklung der Fauna einzubeziehen. Insekten, Würmer und kleine Säugetiere können ein Bodengefüge und damit die Eigenschaften einer Komponente eines Dichtungssystems erheblich verändern. Auf Grasnarben von Deichen wird zum Kampf gegen Mäuse- und Maulwurfsgänge z. B. eine Schafbeweidung durchgeführt.



Abb. 3: Bodenauswaschung nach Ausströmen von Druckwasser entlang eines Maulwurfsganges im Böschungsfuß der Deponie Neu Wulmstorf (Melchior, 2010).

Für ein anderes Deponieprojekt in Norddeutschland (Deponie Hillern) konnte beispielhaft der Gesamtenergiebedarf zur Herstellung folgender Komponenten verglichen werden:

Eine 50 cm dicke, doppelagige, erdbautechnisch hergestellte Tondichtung wird mit einer vernadelten GTD verglichen, bestehend aus

- einer vernadelten Vliesstoffschicht als Abdeckung (300 g/m²)
- Natriumbentonit (4700 g/m²)
- einer vernadelten Vliesstoff-Gewebe-Kombination (350 g/m²)

und die 30 cm dicke Kiesdränschicht mit 16/32 mm Korngröße wird verglichen mit einem Geokunststoffdrän, bestehend aus

- einer vernadelten Vliesstofffilterschicht (300 g/m²)
- einem labyrinthähnlichen, groben Monofilamentdränkern (600 g/m²)
- einer vernadelten Vliesstoffträgerschicht (300 g/m²)

Der Gesamtenergiebedarf für die geosynthetische Lösung ist 114 MJ im Vergleich zu 192 MJ für die konventionelle mineralische Lösung, die damit einen um 70 % höheren Energiebedarf aufweist (Heerten, 2010). In dem ermittelten Wert für die Geokunststoffalternative ist der

Energiegehalt der Kunststoffe, der theoretisch durch Verbrennung zurückgewonnen werden könnte, noch mit 70 % enthalten.

Oberflächenabdichtungen von Deponien haben noch einen weiteren wichtigen Klimaschutzaspekt: In einem Zeitraum von 15 bis 20 Jahren entwickelt 1 Tonne Müll aus einer kommunalen Mülldeponie 100 bis 200 m³ Deponiegas, davon entfallen ca. 55 % auf das Methangas CH₄, was zu einer 20 mal höheren globalen Erwärmung als CO₂ führt. Daher steht die Sammlung von Deponiegas und dessen Nutzung zur Energieproduktion für eine beträchtliche Reduzierung der Treibhausgasemission und damit für Klimaschutz.

3.6 Oberflächenabdichtung Deponie Lichte

Das Oberflächenabdichtungssystem der Deponie Lichte war 1999 die erste Ausführung eines Dichtungssystems, bei dem alle technischen Komponenten aus Geokunststoffen bestanden. Oberhalb des Abfalls wurde auf einer Tragschicht eine komplett aus PE-HD gefertigte Dränmatte verlegt, die das Deponiegas und ggf. Gaskondensat ableitet (Abb. 4).

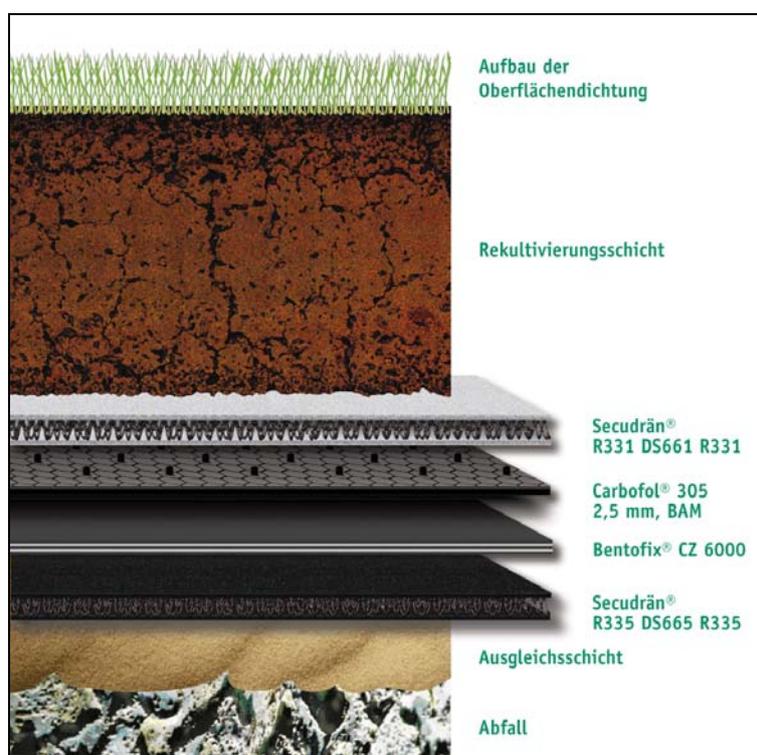


Abb. 4: Aufbau der Oberflächenabdichtung Deponie Lichte, 1999 (1. Bauabschnitt)

Die auf der Gasdränschicht angeordnete Kombinationsdichtung besteht aus einer doppelagigen, nach DIBt-Zulassung austrocknungssicheren Bentonitmatte mit PE-HD-Geokunststoffkomponenten und einer BAM-zugelassenen PE-HD-Kunststoffdichtungsbahn. Darauf wurde eine Dränmatte mit Einzelfallbegutachtung zur Ableitung von Sickerwasser aus der Rekultivierungsschicht und als Schutzlage für die KDB eingebaut. Das System wurde in einem großen Testfeld erfolgreich erprobt.

Durch die Geokunststoffalternative für die Dränschicht wurden hier ca. 10.000 t Kies durch 16 t Geokunststoff ersetzt und die Kosten konnten von 142,00 DM/m² für das TASI-konforme System auf 75,00 DM/m² für das Geokunststoffabdichtungssystem reduziert werden.

Vor einem 2. Bauabschnitt wurden die Bentonitmatte und die oberhalb der Kombinationsdichtung eingebaute Dränmatte nach ca. 10 Betriebsjahren aufgedigelt und untersucht (Haubrich, 2010). Bei ca. 100 % Wassergehalt wurden k_f -Werte der Bentonitmatte von 1,3 und $2,0 \cdot 10^{-11}$ m/s bestimmt. Auch die Dicke und die Abflussleistung der Dränmatte lagen im Erwartungsbereich der vor Bauausführung erbrachten Nachweise. Der 2. Bauabschnitt konnte dann mit den inzwischen BAM-zugelassenen oder LAGA-eignungsgeprüften Geokunststoffen ebenfalls nach erfolgreicher Ausführung eines großen Testfeldes gebaut und im Jahre 2010 fertiggestellt werden.

Technisch und qualitativ im internationalen Vergleich sehr hochwertige Deponieabdichtungssysteme können in Deutschland vor dem Hintergrund eines umfassenden, geschlossenen Gesetzes-, Vorschriften-, Regel- und Zulassungswerkes mit durchgängiger Qualitätssicherung ausgeführt werden. Vorrangig sind hier zu nennen:

- die neue Deponieverordnung DepV von 2009 mit verbindlichen Regelungen u. a. für die Festlegung von Anforderungen und das Qualitätsmanagement für Geokunststoffe und Kunststoffbauteilen bei Deponiedichtungssystemen durch die BAM
- die ständig fortgeschriebenen GDA-Empfehlungen des AK 6.1 „Geotechnik der Deponiebauwerke“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V., DGGT, Essen
- die Zulassungsrichtlinien der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM), Berlin, für/an
 - Kunststoffdichtungsbahnen, 3. überarbeitete Auflage, 2010
 - Dränsysteme, Kunststoff-Dränelemente, 2. Auflage, 2010
 - Schutzschichten, 2. überarbeitete Auflage, 2010
 - Geotextilien zum Filtern und Trennen, 2. Auflage, 2010
 - Fachbetriebe für den Einbau von Kunststoffdichtungsbahnen, weiterer Geokunststoffe und Kunststoffbauteile in Deponiedichtungssystemen, 3. überarbeitete Auflage, 2011
 - die Qualifikation und Aufgaben einer fremdprüfenden Stelle, 1998
- Überwachungsordnung des Arbeitskreises Grundwasserschutz e. V. (AK GWS) in Zusammenarbeit mit der BAM.

Beim qualitätsorientierten, verantwortungsvollen Umgang aller Beteiligten mit diesem Gesetzes- und Vorschriftenwerk sind sehr leistungsfähige Deponieabdichtungssysteme zum Schutz von Grundwasser und Umwelt zu realisieren.

3.7 Versuchsfelder Deponie Kienberg

Bereits 1992 wurden auf der Deponie Kienberg des Landkreises Traunstein Testfelder mit unterschiedlichen Filter- und Entwässerungsschichten errichtet. Diese Testfelder wurden 1998 im Rahmen eines BayFORREST-Forschungsvorhabens (F58) mit Tensiometern, TDR-Sonden, Temperaturfühlern und Abflussmesszählern mit Kippwaagen neu ausgestattet. Im Beobachtungszeitraum von 1998 bis 2002 konnte die Situation während der extremen Niederschläge, die zum Pfingsthochwasser in Bayern führten, erfasst werden. Im Abflussverhalten der seit 1992 eingebauten Wirrgelege-Dränschicht der

Geokunststoffdränmatte und der mineralischen Dränschicht konnte kein markanter Unterschied festgestellt werden. Eins von vielen Aufgrabungsergebnissen, mit denen langfristig anforderungsgerechte Abflussleistungen von Dränmatten aus Kunststoffwirrgelegematten nachgewiesen werden konnten (Müller-Rochholz & von Maubeuge, 2000).

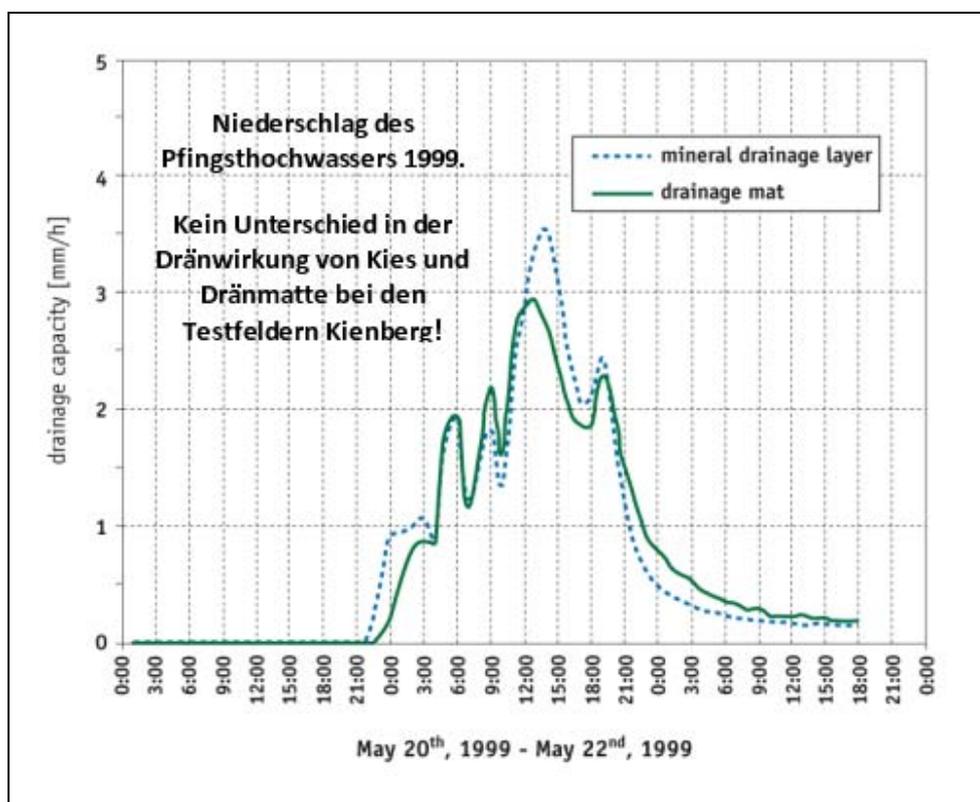


Abb. 5: Vergleich der Abflussmessungen in den Feldern mit Wirrleuge-Dränschicht und mineralischer Dränschicht, Pfingsten 1999

3.8 Oberflächenabdichtung Deponie Duisburg-Sudamin

In den letzten Jahren waren zunehmend Oberflächenabdichtungssysteme auf steilen Böschungen aufzubringen. So musste z. B. auf der Deponie Furth im Wald im Jahre 2005 auf 1:1,5 geneigten Böschungen ein mehrlagiges Geokunststoffabdichtungssystem aufgebracht werden. Die Stabilität der in diesem Fall 0,70 m bis 1,50 m mächtigen Rekultivierungsschicht kann nur mit einer Geogiterrückverankerung an der Böschungskrone nachgewiesen werden. Für entsprechende Nachweise stehen die GDA-Empfehlung E2-7 (2008), „Empfehlungen zur Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen“ und die EBGEO (2010) „Empfehlung für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen“, Kapitel 8, Deponiebau – Bewehrung oberflächenparalleler geschichteter Systeme der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) e. V. zur

Verfügung. Der Entwurf der Zulassungsrichtlinie der BAM für zur Bewehrung von Deponieböschungen einzusetzende Geogitter ist aktuell auf der Homepage der BAM veröffentlicht.

Auf der Deponie Duisburg-Sudamin wurde 2007 ein Böschungsabschnitt mit Dehnmessstreifen in der Hauptzugrichtung (Böschungfalllinie) ausgerüstet (Abb. 6), um über einen längeren Zeitraum die Belastung der eingebauten Geogitter im Feld zu messen und mit den in der Dimensionierung/Bemessung rechnerisch ermittelten Werten zu vergleichen. Die gemessenen Geogitterverformungen bleiben deutlich geringer als die rechnerischen Erwartungswerte (Abb. 7). Weitere Hinweise zu In-Situ-Beanspruchungen von Geogittern sind in Vollmert et al (2012) enthalten.



Abb. 6: Messfeldausrüstung auf der Deponie Duisburg-Sudamin

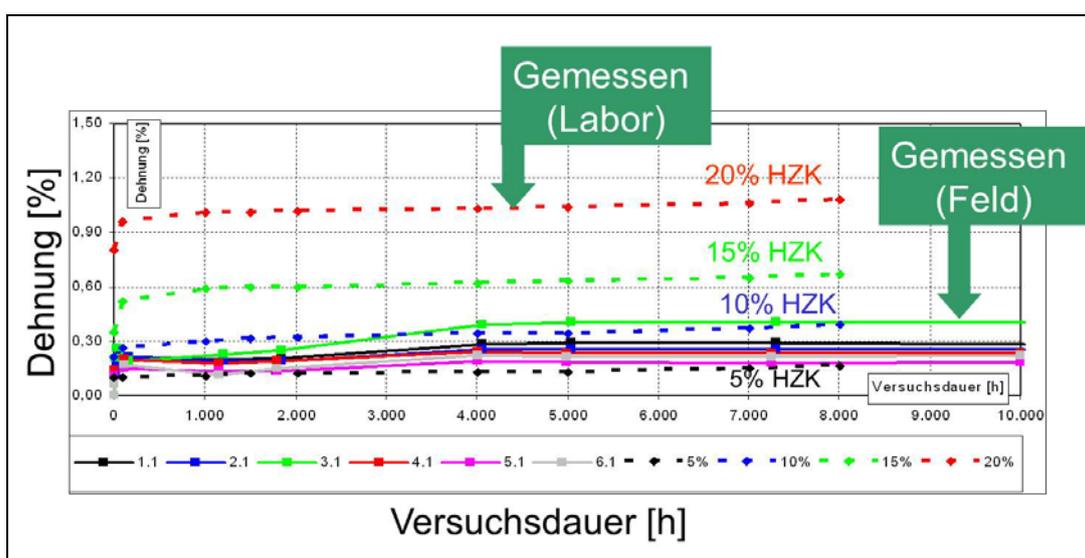


Abb. 7: Dehnungen im Geogitter über die Zeit, Gegenüberstellung von Feld- und Laboregebnissen

Bei der Beurteilung der Lastabtragungsmechanismen zwischen umgebenden Boden und Geogittern ist zukünftig z. B. bei den Zulassungskriterien auch die innere Stabilität von Geogittern zu prüfen, sollte es sich um umhüllte oder beschichtete Zugelemente handeln. In Laborversuchen am Institut für Geotechnik der RWTH Aachen wurde in der engen Umgebung von Scherzonen beobachtet, dass die Isolierung von den Anschlusskabeln der Dehnmessstreifen abgezogen wurde, also die Reibung zwischen Isolierung und Drahtlitze nicht ausreichte, die in die Isolierung durch Bodenpartikel eingetragenen Kräfte in die Litzen zu übertragen (Abb. 8).

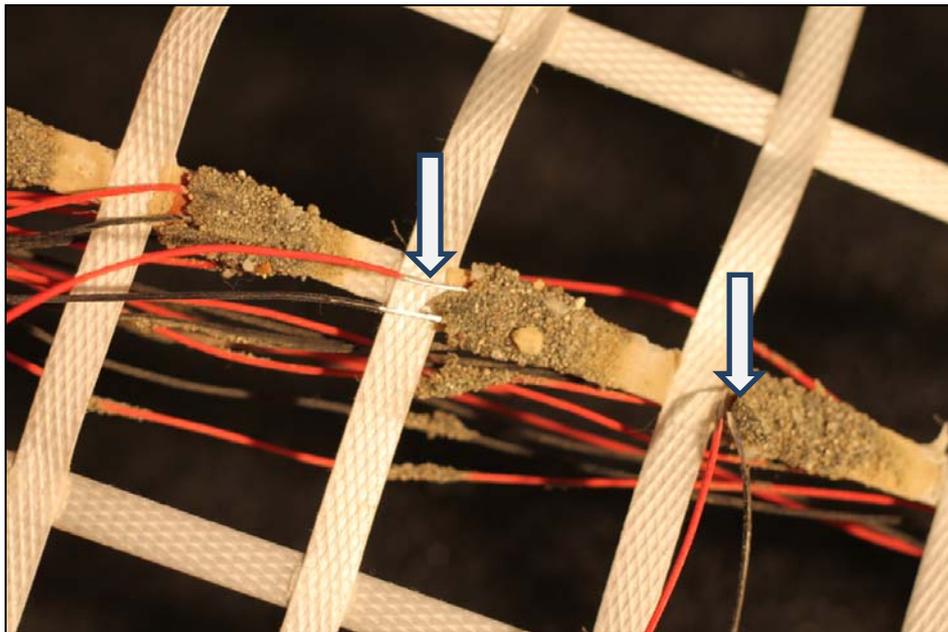


Abb. 8: Durch Bodenreibung abgezogene Isolierung von DMS-Anschlusskabeln

4. Neue Untersuchungsergebnisse aus Nordamerika

Über mehrere Jahrzehnte entwickelten sich Deponietechnik und Umweltschutz parallel in den USA und Deutschland beispielgebend für jeweilige Nachbarländer und -regionen. Kombinationsdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahn und mineralischer Abdichtungskomponente wurden beiderseits des Atlantiks die bevorzugte und in Regelwerken und Gesetzen verankerte Lösung für Schadstoffbarrieren im Deponiebau mit zum Teil allerdings deutlichen Unterschieden in technischen Anforderungen und Ausführungspraxis. Da in Nordamerika (USA und Kanada) an der Deponiebasis in der Regel und häufig auch bei Deponieoberflächenabdichtungen Doppeldichtungssysteme mit Sickerwasserfassung und -kontrolle zwischen der Primär- und Sekundärdichtung gebaut wurden, liegen deutlich mehr Informationen über die Wirksamkeit bzw. die Leckraten von

Primärdichtungssystemen vor. Während in Deutschland erwartet wird, und bei den Vorgaben entsprechender Ausführung auch erwartet werden darf, dass eine heute nach dem Stand der Technik gebaute Kombinationsdichtung dicht ist, werden in Nordamerika Leckraten theoretisch ermittelt und praktisch gemessen. Dass diese unterschiedliche Erwartungshaltung zur Wirksamkeit einer Kombinationsabdichtung vor dem Hintergrund der Auswahl der Komponenten und der praktischen Bauausführung berechtigt sind, zeigen die beiden Aufnahmen in Abb. 9 mit der Ausführung einer Kombinationsdichtung nach technischen Anforderungen und Qualitätsvorgaben in Deutschland (linkes Bild) und in Nordamerika (rechtes Bild).



Abb. 9: Unterschiede in der Ausführung von Kombinationsabdichtungen in Deutschland (links) und Nordamerika (rechts)

In Nordamerika und fast überall in der Welt sind die eingesetzten PE-HD-Kunststoffdichtungsbahnen deutlich dünner (häufig 1,5 mm), die Anforderungen an Schrumpfung und Formstabilität der KDB sowie die Anforderungen an Schutzschichten geringer und die Anforderung an eine Glattlage der KDB für den Pressverbund nahezu unbekannt. Dass in Nordamerika in der Praxis normalerweise sehr viel größere Leckraten beobachtet werden als nach theoretischen Ansätzen erwartet wurde, nahm K. Rowe zum Anlass für ein umfangreiches Untersuchungsprogramm zur Kurzzeit- und Langzeitwirksamkeit von Abdichtungssystemen und Abdichtungskomponenten für die Deponiebasis und Staubecken zur Aufnahme von Deponiesickerwasser. Eine umfassende Ergebnisdarstellung mit vielen weiterführenden Literaturangaben findet sich in Rowe, 2011. Im Rahmen der „2011 Arthur Casagrande Lecture“, mit der Prof. Kerry Rowe ausgezeichnet wurde, konnte der Verfasser die Ergebnispräsentation, die deutsche Anforderungsprofile und Qualitätssicherungsansätze beeindruckend bestätigt, miterleben. Zusammenfassend bleibt festzuhalten:

Rowe untersucht die Leckraten von Kunststoffdichtungsbahnen, geosynthetischen Tondichtungsbahnen und erdbautechnisch hergestellten Tondichtung sowie von Kombinationsabdichtungen aus Kunststoffdichtungsbahn (Geomembrane, GM) mit geosynthetischer Tondichtungsbahn (Geosynthetic Clay Liner, GCL) oder erdbautechnisch hergestellter Tondichtung (Compacted Clay Liner, CCL) für den Anwendungsfall Deponiebasis mit 0,3 m Einstau als wirksamen hydraulischen Gradienten und für den Anwendungsfall des Sickerwasserbeckens mit 5,0 m Einstau als wirksamen hydraulischen Gradienten.

Je nach definiert angenommener Schädigung (Größe und Anzahl von Löchern in der KDB, Zunahme der Durchlässigkeit der mineralischen Dichtungskomponente durch Trockenstress und Umgebungseinflüsse) sind die Leckraten bei der Betrachtung nur einer Dichtungskomponente für die Kunststoffdichtungsbahn (GM) in beiden betrachteten Anwendungsfällen größer als für die geosynthetische Tondichtungsbahn (GCL), während die erdbautechnisch hergestellte Tondichtung (CCL) am besten abschneidet. Eine drastische Reduzierung der Leckraten ergibt sich aber bei der Betrachtung der Kombinationsdichtung mit klaren Vorteilen für die KDB/GCL-Variante gegenüber der KDB/CCL-Ausführung. Es wird nachgewiesen, dass die Transmissivität in der Verbundebene von KDB zu GCL oder CCL die Leckraten der jeweiligen Kombinationsabdichtung bestimmt und nicht der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert (kf-Wert) der mineralischen Dichtungsschicht. Aus Labor- und Feldversuchen gibt Rowe die Transmissivität von schubkraftübertragenden geosynthetischen Tondichtungsbahnen in der Kontaktfläche KDB/GCL mit im Mittel $4 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ an. Bei Verwendung von Natrium-Bentonit und 50 kPa Auflast werden $2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ angegeben. Die Transmissivität in der Grenzfläche von KDB und erdbautechnisch hergestellter Tondichtung (CCL) wird selbst bei guter Einbaupraxis nur mit $2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ angegeben und ausdrücklich darauf hingewiesen, dass schon wenige Stunden unter einer im Sonnenschein aufgeheizten KDB ausreichen, in der Oberfläche der erdbautechnisch hergestellten Tondichtung Trockenrisse entstehen zu lassen mit gravierender Erhöhung der Transmissivität in der Grenzfläche.

Vor diesem Hintergrund gelingt es Rowe auch, den großen Einfluss von Wellen (wrinkles) in der KDB auf die Durchsickerung von Kombinationsdichtungen nachzuweisen und die Differenz zwischen theoretisch ermittelter und im Feld praktisch gemessener Durchsickerung von Kombinationsabdichtungen zu erklären. Er plädiert für einen schnellen Einbau der Dränschicht und verweist in diesem Zusammenhang auf deutsche Einbaupraxis und erwähnt die „Riegelbauweise“ mit Glattlage und Pressverbund der KDB auf der mineralischen Abdichtungskomponente. Auch andere durch nordamerikanische Einbaupraxis verursachte

Probleme wie der Überlappungsverlust bei GCLs durch Schrumpfung könnte so vermieden werden. Wiederholt weist Rowe auf die in Einzelaspekten überlegene Marktform der geosynthetischen Tondichtungsbahn mit Gewebe-Vliesstoff-Verbundstoff als Trägermaterial und vernadeltem Vliesstoff als Deckschicht hin. Zusammenfassend wird betont, dass Kombinationsdichtungen in der Praxis über Jahrzehnte außerordentlich gut funktioniert haben und dass die vorgelegten Untersuchungsergebnisse helfen, diese gute Wirksamkeit zu verstehen und zusätzlich Informationen zu Sachverhalten liefern, die beachtet werden müssen, um eine exzellente Langzeitwirksamkeit des Kombinationsabdichtungssystems zu gewährleisten mit besonderem Hinweis auf Anwendungen, wo die Temperaturen am Dichtungssystem 35°C überschreiten können. Eine überlegene Wirksamkeit eines Deponiebasisabdichtungssystems ist nach Rowe (2011) mit den Dichtungskomponenten

- PE-HD-Kunststoffdichtungsbahn
- geosynthetische Tondichtungsbahn
- Adsorptionsschicht ($\geq 0,60$ m) (attenuationlayer)

zu erwarten.

5. Zusammenfassung

Nach jahrzehntelanger Entwicklung hat sich in Deutschland mit

- der neuen Deponieverordnung DepV (2009)
- den Empfehlungen für Deponien der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Essen
- den Zulassungs- und Anforderungsrichtlinien der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin
- der Güteüberwachungsverordnung des Arbeitskreises Grundwasserschutz (AK GWS e. V.), Berlin

ein weltweit beachtetes und vorbildliches Anforderungs-, Ausführungs- und Qualitätssicherungsprofil für Deponieabdichtungssysteme entwickelt, das die Ausführung von langfristig hochwirksamen Abdichtungssystemen aus Kombinationsdichtungen aus PE-HD-Kunststoffdichtungsbahnen, geosynthetischen Tondichtungsbahnen, geosynthetischen Schutz- und Dränschichten und ggf. Kunststoffbewehrungsgittern für den Schutz von Boden, Wasser und Atmosphäre gewährleisten kann.

Neue, umfassende Untersuchungsergebnisse von K. Rowe aus Kanada (Rowe, 2011) bestätigen eindrucksvoll die überlegene Wirksamkeit von Kombinationsabdichtungen mit deutlichen Vorteilen für die Kombination von PE-HD Kunststoffdichtungsbahn kombiniert mit geosynthetischen Tondichtungsbahnen für Oberflächen- und Basisabdichtungen. An der Basis von Deponien oder Deponie-Sickerwasserbecken kann diese KDB/GTD-Kombinationsdichtung sinnvoll durch eine Adsorptionsschicht (attenuationlayer) ergänzt werden. Unter verschiedenen Randbedingungen sind vollflächig vernadelte, geosynthetische Tondichtungsbahnen mit Vliesstoff-Gewebe-Verbundstoff als Trägergeotextil und vernadeltem Vliesstoff als Deckgeotextil sowie Verstärkung des Faserverbundes durch thermische Oberflächenbehandlung des Trägergeotextils vorteilhaft.

Der Verfasser möchte ausdrücklich allen Fachkollegen, die in Deutschland an dieser Entwicklung beteiligt waren, herzlich danken und gratulieren.

6. Literatur

- Haubrich, E. (2010): "Oberflächenabdichtung vollständig aus Geokunststoffen. Praxisbeispiel Deponie „Lichte“ (BW). Vergleich zweier Bauabschnitte – heute und vor 10 Jahren". 6. Leipziger Deponiefachtagung, 2010.
- Heerten, G. (1988): „Leistungsfähige Dränsysteme in Deponie-Basisabdichtungen“. 1. Kongress Kunststoffe in der Geotechnik, K-GEO 88, Hamburg. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V., Essen, 1988.
- Heerten, G. (2005): „Kritische Anmerkungen zur Genehmigungspraxis bei Deponieoberflächenabdichtungen“. 2. Symposium Umweltgeotechnik, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Freiberg, 2005.
- Heerten, G. und Koerner, R. M. (2010): „Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten“. 24. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“, Würzburg, 2010.
- Heerten, G. (2010): „The new German landfill directive and environmental advantage of using geosynthetics in landfill sealing systems“. 6th International Congress on Environmental Geotechnics (6 ICEG 2010), New Delhi, Indien, 2010.
- Kilger, R. (2010): „Entstehung und Sanierung der Deponie Georgswerder“. Fachtagung: 25 Jahre Sanierung der Deponie Georgswerder, Hamburg, Juni 2010.
- Knipschild, F.-W. (1994): „Konstruktive Einzelheiten von Kombinationsdichtungen“. 10. SKZ-Fachtagung „Die sichere Deponie“, Würzburg, 1994.
- Melchior, S. (2010): „Langzeitverhalten einer Dränmatte in einer Oberflächendichtung – ein Fallbeispiel“. 6. Leipziger Deponiefachtagung, März 2010.

- Müller-Rochholz, J., Heerten, G. und von Maubeuge, K. (2000): „Long-term performance of geosynthetic drainage systems with filter components“. GEOFILTERS 2000, 3rd International Conference on Filters and Drainages in Geotechnical and Environmental Engineering, Warschau, Polen, 2000.
- Rowe, K. (2011): „Short- and long-term leakage through composite liners“. The 2011 Arthur Casagrande lecture, Pan-Am Geotechnical Conference, Toronto, Canada, 2011.
- Stief, K. (1986): „Das Multibarrierenkonzept als Grundlage von Planung, Bau, Betrieb und Nachsorge von Deponien“. Müll und Abfall, 18 (1986), Heft 1.
- Vollmert, L., Werth, K., Emersleben, A. und Holm, B. (2012): „In-Situ-Beanspruchungen eines Geogitters im Verankerungsbereich einer Oberflächenabdichtung am Beispiel der Pochsandhalde Zellerfelder Tal“, 28. Fachtagung „Die sichere Deponie“, Würzburg, 2012.
- Werth, K. (2010): „Steil, lang und kurvig – Herausforderungen bei Bemessung und Ausführung von Oberflächenabdichtungen in Böschungen unter Einsatz von Geogittern“. 26. Fachtagung „Die sichere Deponie“, Würzburg, 2010.

