

Kombinationsabdichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen

Ulrich Henken-Mellies

Zusammenfassung

Kombinationsabdichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen bestehen aus zwei unabhängig voneinander wirksamen Dichtungskomponenten – üblicherweise aus einer mineralischen Komponente und einer Kunststoffdichtungsbahn. Die Regel-Oberflächenabdichtungssysteme der DK II und DK III in Deutschland, für „gefährliche Abfälle“ nach EU Deponierichtlinie und für „hazardous waste“ nach „RCRA Subtitle C“ in den USA beinhalten Kombinationsabdichtungen.

Kunststoffdichtungsbahnen sind – unter Voraussetzung einer durchgehenden Qualitätssicherung von der Produktion bis zur Verlegung – als sehr wirksame Dichtungselemente anerkannt. Der Kunststoff-Komponente wird eine lange, aber dennoch zeitlich begrenzte Lebensdauer von ca. 100-300 Jahren zugeschrieben.

Die mineralische Komponente soll über diese Zeitspanne hinaus langfristig wirksam bleiben. Bei der Verwendung tonmineralischer Komponenten, die den Vorgaben des Anhangs E der TA Abfall entsprechen, bestehen – selbst bei Einsatz erhöhter Schichtdicken der Rekultivierungsschicht – begründete, erhebliche Zweifel an der langfristigen Wirksamkeit.

Beim Bau von Oberflächenabdichtungen mit Kombinationsabdichtungen gemäß dem Regelsystem muss somit auf lange Sicht (> 100 Jahre) mit nachlassender Wirksamkeit gerechnet werden. In wieweit dies bei Siedlungsabfalldeponien tolerierbar ist, ist im Rahmen der Stilllegungs- und Nachsorgestrategie im Einzelfall zu entscheiden. Bei Deponien mit sehr hohem Schadstoffpotenzial (wie Sonderabfalldeponien) sollten alterungsbeständige mineralische Dichtungskomponenten oder eine wesentlich dickere Rekultivierungsschicht zum Einsatz kommen.

1 Einführung

1.1 Definition

Eine Kombinationsabdichtung im weiteren Sinne ist eine Abdichtung aus einer Kombination von mindestens zwei unabhängigen Dichtungskomponenten.

Im engeren Sinne versteht man unter einer Kombinationsabdichtung einen Abdichtungsverbund, der aus einer tonmineralischen Dichtungsschicht mit hohem Feinstkornanteil (> 20% der Fraktion „< 2 µm“) und einer darauf aufliegenden Kunststoffdichtungsbahn (KDB; BAM-zugelassen; $d \geq 2,5$ mm) besteht (Regelsystem nach TA Abfall, TAsi und DepV).

Als Kombinationsabdichtung mit zwei Dichtungskomponenten sind in der Praxis auch weitere Varianten ausgeführt worden:

KDB in Kombination mit Bentonitmatte, gemischtkörniger mineralischer Abdichtung (mit geringem Feinkornanteil), Trisoplast, oder mit Kapillarsperre.

Asphaltabdichtung (als Ersatz für die KDB) in Kombination mit einer mineralischen Dichtungskomponente.

Kombination aus tonmineralischer Dichtung und Kapillarsperre.

1.2 Kombinationsabdichtung in Regelsystemen

Die Kombinationsabdichtung im engeren Sinne, bestehend aus einer tonmineralischen Dichtungsschicht mit darauf aufliegender Kunststoffdichtungsbahn, ist Bestandteil des Regelsystems für die Basisabdichtung und Oberflächenabdichtung der Deponieklassen DK II und DK III (gemäß TA Abfall, TASI und DepV).

In der EU-Deponierichtlinie wird für das Oberflächenabdichtungssystem von gefährlichen Abfällen eine Kombinationsabdichtung aus „undurchlässiger mineralischer Abdichtungsschicht und künstlicher Abdichtungsschicht“ empfohlen.

In den USA besteht das Regel-Oberflächenabdichtungssystem für Deponien mit gefährlichen Abfällen (RCRA Subtitle C „Hazardous waste“) aus einer Kombinationsabdichtung mit einer tonmineralischen Dichtungsschicht (compacted clay, CCL) und einer Kunststoffdichtungsbahn (geomembrane).

In den Verordnungen bzw. Richtlinien wird implizit unterstellt, dass ein verordnungskonform gebautes Oberflächenabdichtungssystem mit Kombinationsabdichtung (bestehend aus tonmineralischer Dichtungsschicht [nach TA Abfall Anhang E mit möglichst ≥ 20 Gew. % Feinstkorn $< 2 \mu\text{m}$, jedoch mit geringer Rissanfälligkeit, vgl. Fußnote/Amtl. Anm. 2 zur Tabelle 2 des Anhang 1, DepV] und einer KDB) auf unbegrenzte Zeit wirksam ist. Insbesondere wird ohne weiteren Beweis vorausgesetzt, dass die tonmineralische Dichtungsschicht durch die Rekultivierungsschicht nach Anhang 5, DepV vor äußeren Einflüssen so wirksam geschützt wird, dass sie ihre beim Einbau nachgewiesenen Eigenschaften (Wassergehalt, k-Wert etc.) auf unbegrenzte Zeit behält. An diesem (unbewiesenen) Anspruch werden alternative Systeme und Komponenten gemessen (vgl. DIBt-Grundsätze; LAGA – Allgemeine Grundsätze, 2005).

1.3 Wirkungsweise des Systems

Eine Kombinationsabdichtung besteht im Regelfall aus einer mineralischen Abdichtungsschicht mit einem sehr geringen Durchlässigkeitsbeiwert, an deren Oberfläche eine KDB angeordnet ist. Die KDB ist gegenüber Wasser in flüssiger Phase vollkommen dicht und wird dementsprechend in den DIBt-Grundsätzen als Konvektionssperre betrachtet. Wasserdampftransport wird durch die KDB nahezu vollkommen unterbunden.

Im Basisabdichtungssystem ist die KDB insbesondere für die Zurückhaltung von im Sickerwasser gelösten Schwermetallen und anderen Schadstoffen mit polarer Ausbildung der Moleküle bzw. Ionen von Bedeutung. Polare Teilchen werden von der aus unpolaren Molekülketten des Polyethylens bestehenden KDB - ebenso wie das polare Wasser - vollständig zurückgehalten. Hingegen können unpolare

Schadstoffe, z.B. flüssige und leicht flüchtige Kohlenwasserstoffverbindungen, die unpolare KDB durchdringen. August et al. (1992) haben in ihren Forschungsarbeiten nachgewiesen, dass diese unpolaren Stoffe, wenn sie die KDB durchdrungen haben, durch den polaren Charakter der Teilchen der mineralischen Abdichtung, an der weiteren Ausbreitung gehindert werden. Dadurch kommt es in der Grenzfläche zwischen KDB und mineralischer Abdichtung zu einer Aufkonzentration der unpolaren Stoffe bis das Konzentrationsgefälle zwischen der Oberseite und der Unterseite der KDB ausgeglichen ist und die Migration von unpolaren Stoffen durch die KDB hindurch aufhört.

Dieser Verbund-Effekt bewirkt, dass die Kombination aus KDB und mineralischer Dichtung eine effizientere Schutzwirkung gegen den Schadstoffaustritt an der Deponiebasis entwickelt, als es der Summe der beiden Einzelwirkungen der Komponenten entspricht. Vorausgesetzt ist allerdings ein vollständiger Kontakt der beiden Abdichtungskomponenten, von der BAM als Pressverbund bezeichnet. Um den vollständigen Kontakt der KDB mit der mineralischen Abdichtung auf der Baustelle zu erreichen, werden an die Herstellung von mineralischer Abdichtungsschicht und die Verlegung der KDB hohe Anforderungen gestellt.

Die mineralische Abdichtungsschicht hat neben der geschilderten Wirkung im Hinblick auf die KDB als Konvektionssperre noch einen gewünschten Redundanz-Effekt: Wenn der geschilderte Pressverbund erzielt wird, wird sich ein Loch in der KDB nur lokal auswirken. Sickerwasser, das durch das Loch hindurchtritt, wird sich nicht über eine große Fläche unter der KDB an der Oberseite der mineralischen Abdichtung ausbreiten. Die mineralische Abdichtung verhindert damit, dass ein Loch in der KDB sich auswirkt wie das Herausziehen des Stöpsels aus der Badewanne. Etwaige lokale Undichtigkeiten in der KDB werden durch die mineralische Abdichtung ausgeglichen. Zu diesem Thema wurden von Giroud et al. (1992) umfangreiche Untersuchungen angestellt.

Aufgrund der oben dargestellten Systemwirkung wird die Kombinationsabdichtung im Basisabdichtungssystem generell als sehr wirksam anerkannt. An der Deponieoberfläche wird das Abdichtungssystem von oben mit schwach mineralisiertem Niederschlagswasser (nach Bodenpassage) und von unten gegebenenfalls mit Deponiegas beaufschlagt. Die Problematik der Diffusion organischer Schadstoffe durch die KDB stellt sich hier in der Regel nicht. Die Aufgabe des Abdichtungssystems besteht vor allem darin, das Einsickern von Wasser in den Deponiekörper sowie das Austreten von Deponiegas zu verhindern.

In der Kombinationsdichtung des Oberflächenabdichtungssystems übernimmt die Kunststoffdichtungsbahn mehrere Funktionen:

- Konvektionssperre gegenüber eindringendem Niederschlagswasser,
- Konvektionssperre gegenüber austretendem Deponiegas,
- Schutz der mineralischen Dichtungsschicht vor Austrocknung,
- Schutz der mineralischen Dichtungsschicht vor biologischer Aktivität (Durchwurzelung; Wühltätigkeit von Tieren).

Die mineralische Dichtungskomponente der Kombinationsdichtung hat zunächst die Funktion, im Verbund bei etwaigen kleinen Leckagen der Kunststoffdichtungsbahn den Wasserdurchtritt zu begrenzen. Ob sich bei der im Oberflächenabdichtungssystem herrschenden geringen Auflast der für die besondere Wirksamkeit der Kombinationsabdichtung zusätzlich postulierte „Pressverbund“ einstellt und wirksam ist, erscheint eher fragwürdig. Aufgrabungen von Oberflächenabdichtungen haben auf steilen Böschungen meistens einen guten Kontakt zwischen strukturierten KDB (z. B. Mikros pik es) und mineralischen Dichtungen gezeigt. Dennoch waren an der Unterseite der KDB in manchen Fällen deutliche Fließspuren zu erkennen, die auf Wasserbewegungen in der Kontaktfuge hinweisen. Bei geringer Neigung (ca. 5 %) der Oberfläche wurden unter der KDB einzelne Fehlstellen im flächigen Kontakt beobachtet, die auf Wellen in der KDB zurückzuführen waren (Gartung, persönliche Mitteilung).

Auf lange Sicht (Zeitraum $\gg 100$ Jahre), in einem hypothetischen Zustand nach dem Unwirksamwerden der KDB, soll die mineralische Dichtungskomponente quasi als „Ewigkeitskomponente“ eine dauerhafte Abdichtungsfunktion erfüllen.

Im Endzustand nach mehreren Jahrhunderten wird die Abdichtungsfunktion nur noch von den mineralischen Komponenten bestimmt. Nach diesen Zeiträumen kann weder die Durchführung von Vegetationspflegemaßnahmen noch die bestehende Funktion von Wurzelsperren in Ansatz gebracht werden. Daher ist im Endzustand (vgl. Phase IIIb der DIBt-Grundsätze) für die Beurteilung der mineralischen Komponente u. a. in Ansatz zu bringen, dass ein Eindringen von Wurzeln unvermeidlich ist.

1.4 Vorteile des Systems

Im Idealfall bildet eine Kombinationsabdichtung ein redundantes System in Form von zwei unabhängig voneinander wirkende Abdichtungskomponenten: Bei Schädigung oder nachlassender Wirkung der einen Komponente wirkt die zweite Abdichtungskomponente. Zunächst wirkt die KDB bzw. die Asphaltabdichtung als – im Rahmen der Herstellungsqualität – vollständige Konvektionssperre. Nach dem Ende von deren Lebensdauer übernimmt die zweite, unabhängige Komponente langfristig die Dichtungsfunktion.

1.5 Risiken des Systems

Grundsätzlich gibt es keine endgültige Gewissheit darüber, ob das System der Kombinationsabdichtung die ihr zugeordnete Aufgabe einer über mehrere Jahrhunderte währenden Abdichtungsfunktion erfüllen kann. Zunächst ist eine Kombinationsabdichtung so lange wirksam, wie die Konvektionssperre (KDB oder Asphaltabdichtung) intakt ist. Nach deren Versagen ist die weitere Abdichtungswirkung von der Funktion der zweiten Dichtungskomponente abhängig.

1.5.1 Lebensdauer der Komponenten

In den Textbeiträgen zu den einzelnen Dichtungskomponenten in diesem Tagungsband werden Abschätzungen zur Funktionsdauer und den Risiken und Einschränkungen der jeweiligen Komponenten dargestellt. Bezogen auf die Kombinationsabdichtung lässt sich daraus folgendes ableiten:

- Die Lebensdauer einer BAM-zugelassenen KDB aus HDPE wird mit > 100 Jahren angesetzt.
- Die Geokunststoff-Komponente von Bentonitmatten (vernäht oder vernadelt) besteht ebenfalls aus chemisch beständigen Polymeren wie PP oder HDPE, wobei aufgrund der geringen Dicke der einzelnen Fasern zunächst davon ausgegangen werden muss, dass die Lebensdauer tendenziell kürzer ist als bei den 2,5 mm dicken Kunststoffdichtungsbahnen. Wenn langfristig die Geokunststoff-Komponente von Bentonitmatten versagt, verliert dieses Dichtungselement seine Scherfestigkeit, was zu Gleitsicherheitsproblemen auf Böschungen führen kann.
- Bei dem Materialgemisch Trisoplast ist weitgehend ungeklärt, wie die Lebensdauer der Polymerkomponente einzuschätzen ist und welche Auswirkungen ein teilweises Versagen der Polymere haben kann.
- Bei Einsatz einer schrumpfanfälligen tonmineralischen Dichtungsschicht (≥ 20 % Feinstkornanteil $< 2 \mu\text{m}$) unter der Kunststoffdichtungsbahn bestehen erhebliche Zweifel, ob die tonmineralische Komponente die ihr zuge dachte Langzeitwirksamkeit entfalten kann. Nach den Ergebnissen der aktuellen Forschung ist vielmehr davon auszugehen, dass ein erheblicher Anteil des Niederschlagswassers, das die Entwässerungsschicht erreicht, durch die gealterte tonmineralische Dichtung in den Deponiekörper einsickert.
- Gemischtkörnige mineralische Abdichtungen mit geringem Feinkornanteil sind weniger anfällig gegen Schädigungen bei Wasserentzug (vgl. Forschungsergebnisse von Floss et al. (1999a) und Bienen & Heyer (2003)). Sie sind daher aus heutiger Sicht besser geeignet, die Funktion der Langzeitkomponente zu erfüllen.
- Kapillarsperren sind ebenfalls nicht anfällig gegen Austrocknung. Ihre Funktionsfähigkeit kann jedoch prinzipiell durch Setzungen beeinträchtigt werden. Inwieweit die Funktion von Kapillarsperren langfristig durch Ausfällungen in der Kapillarschicht und durch andere Alterungsprozesse gemindert werden kann, ist derzeit nicht abschließend geklärt.

1.5.2 Grundsätzliche Risiken der Einzelkomponenten

Für die Wirksamkeit der einzelnen Abdichtungskomponenten bestehen im System der Kombinationsabdichtung grundsätzlich die gleichen Risiken wie bei ihrer alleinigen Betrachtung. Stichwortartig seien hier die folgenden Risiken genannt (ohne Anspruch auf Vollständigkeit; für weiterführende Betrachtungen wird auf die jeweiligen Spezialkapitel verwiesen):

- Evapotranspiration, kapillarer Wasseraufstieg und Durchwurzelung können zur Austrocknung und zu irreversiblen Schäden tonmineralischer Dichtungs-

komponenten führen.

- Erhöhte Temperaturen im oberflächennahen Bereich (z.B. bei Schlackedeponien; vgl. Klein et al, 1999) können zu einer Verringerung der Lebensdauer geosynthetischer Komponenten führen.
- Langfristig zu erwartende, ungleichmäßige Setzungen und Sackungen des Abfallkörpers können zu nicht tolerierbaren Verformungen der Dichtungskomponenten führen (z.B. bei KDB, Asphaltabdichtungen, Kapillarsperren, mineralischen Dichtungen).
- Geosynthetische Komponenten (in Filter- und Trennvliesen, Dränmatten, Bentonitmatten, KDB, Polymerkomponente von Trisoplast) sind grundsätzlich Alterungsprozessen unterworfen (Oxidation, Mikroorganismen) und haben nur eine endliche Lebens- und Funktionsdauer.

1.5.3 Temperaturinduzierter Wassertransport

Bei der Beurteilung der Langzeitwirksamkeit der Kombinationsabdichtung im Basisabdichtungssystem wurden Untersuchungen und Modellrechnungen zu der Frage durchgeführt, ob durch temperaturinduzierten Wassertransport (Wasserbewegung von der Wärmequelle weg) eine Austrocknung der tonmineralischen Dichtungskomponente stattfindet. Grundsätzlich ist mit einem temperaturinduzierten Wassertransport auch im Oberflächenabdichtungssystem zu rechnen. Hausmülldeponien und Schlackedeponien stellen beispielsweise über Jahrzehnte erhebliche Wärmequellen dar, mit Temperaturen in der Größenordnung von 20°C bis 40°C im Bereich der Oberflächenabdichtung. Dies hat im Tiefenbereich der Dichtungsschicht (ca. 1 – 2 m unter der Oberfläche) über die meiste Zeit des Jahres einen positiven Temperaturgradienten zur Folge (= Temperatur nimmt zur Tiefe hin zu).

Ein temperaturinduzierter Wassertransport im Oberflächen-Kombinationsabdichtungssystem führt demnach zu einem aufwärts gerichteten Wassertransport von der mineralischen Komponente zur Unterseite der KDB. Dies kann zur Ansammlung von freiem Wasser zwischen tonmineralischer Dichtung und KDB führen, das eventuell abfließt und eine ausgetrocknete mineralische Dichtung hinterlässt .

Vielhaber (1997) berichtet von Aufgrabungen an Kombinationsabdichtungen, bei denen beobachtet wurde, dass auf der tonmineralischen Dichtungsschicht unterhalb der KDB freies Wasser (1 – 2 mm hoch) vorhanden war. Es wurden Aufweichungen der tonmineralischen Oberfläche sowie Erosionsstrukturen festgestellt. Die Autorin führt diese Beobachtungen auf temperaturinduzierte Wasserbewegungen innerhalb der tonmineralischen Dichtungsschicht während des Winterhalbjahres zurück. Sie weist darauf hin, dass eine Aufweichung der tonmineralischen Dichtung im Kontaktbereich zur KDB zu einer Herabsetzung des Scherwiderstands in dieser potenziellen Gleitfuge führt.

Gartung et al, (2005) berichten von Beobachtungen bei Aufgrabungen an einer Kombinationsabdichtung auf einer Deponie in Norditalien (der Abfallkörper weist wegen der dort abgelagerten Industrieschlacken außergewöhnlich hohe

Temperaturen auf): Die tonmineralische Abdichtung aus mittelplastischem Ton zeigte unter der KDB bis zu 1,2 mm breite Trockenrisse; der Wassergehalt des Tons hatte von 18% auf 16% abgenommen. Gleichzeitig wurde an der Unterseite der KDB Kondenswasser festgestellt.

1.6 Wechselwirkung Oberflächenabdichtung – Abfallkörper

Je nach Zusammensetzung und Aufbau des Abfallkörpers kommt es nach der Verfüllung der Deponie über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten zu erheblichen Setzungen und Sackungen sowie zur Entwicklung von Deponiegas und Reaktionswärme. Das Ausmaß dieser Prozesse ist je nach Deponietyp sehr unterschiedlich:

- Hausmülldeponien mit einem hohen Anteil an unbehandelten Siedlungsabfällen haben ein entsprechend hohes Potenzial für organische Abbaureaktionen, was mit großen Sackungen verbunden ist (durch Masse-Entzug und durch die Zersetzung organischer Stützstrukturen im Abfallkörper).
- Inertstoffdeponien und Sonderabfalldeponien, in denen nur Abfälle mit geringem organischen Anteil abgelagert wurden, unterliegen nur geringen Setzungen.
- Schlackedeponien unterliegen zwar ebenfalls nur geringen Setzungen. Bei ihnen ist aber mit Wärmeentwicklung durch exotherme chemische Reaktionen zu rechnen.

Bei der Wahl des Oberflächenabdichtungssystems und des Zeitpunkts für dessen Bau ist diesen Gesichtspunkten Rechnung zu tragen.

1.7 Bisheriger Einsatz

Kombinationsabdichtungen sind bei einer großen Anzahl von Oberflächenabdichtungen zum Einsatz gekommen. In zahlreichen Fällen wurde das Regelsystem mit einer Kombination aus tonmineralischer Abdichtung mit hohem Feinstkorngehalt und KDB ausgeführt.

Daneben gibt es weitere Kombinationen von Dichtungselementen, die in Oberflächenabdichtungssystemen eingebaut wurden, z.B.

- Kombination aus Bentonitmatte und KDB,
- Kombination aus Trisoplast und KDB,
- Kombination aus Kapillarsperre und KDB,
- Kombination aus tonmineralischer Dichtung und Kapillarsperre,
- Kombination aus tonmineralischer Dichtung und Asphaltabdichtung.

Im Kapitel 7 werden Ausführungsbeispiele für diese Kombinationen von Dichtungselementen dokumentiert.

1.8 Vorschläge für künftige Einsatzmöglichkeiten

Ich schlage vor, für die Beschreibung des künftigen Einsatzes von Kombinationsabdichtungen die Definition der Kombinationsabdichtung und ihrer langfristigen Leistungsfähigkeit zu präzisieren und die Erfordernis einer dauerhaften Kombinationsabdichtung bezogen auf den Deponietyp und auf den Standort in Abhängigkeit vom Stoff- und Gefährdungspotenzial zu überdenken.

1.8.1 Deponien mit gefährlichen Abfällen

Bei Deponien mit gefährlichen Abfällen, die ein großes Stoffinventar an leicht löslichen, umweltgefährdenden Stoffen beinhalten, ist ein sehr langfristig und nachhaltig dichtes Oberflächenabdichtungssystem wichtig. Für diesen Deponietyp ist meines Erachtens das Regelsystem der Deponieklasse III wegen der Anfälligkeit der tonmineralischen Komponente mit hohem Feinstkornanteil nicht ausreichend. Nach Ausfall der KDB muss bei konservativem Ansatz mit einer Sickerwasserneubildungsrate in Höhe von 5 – 15% des Niederschlags gerechnet werden; (vgl. Huber, 2001). Hier sollten statt dessen mineralische Komponenten zum Einsatz kommen, die gegenüber Wassergehaltsänderungen unempfindlich sind, wie z.B. gemischtkörnige Abdichtungen mit geringem Feinkornanteil oder Kapillarsperren.

1.8.2 Deponien mit nicht gefährlichen Abfällen

Bei Deponien der Klasse II wäre zu überlegen, ob langfristig u.U. die vom Regelsystem der Oberflächenabdichtung (nach Ausfall der KDB) zu erwartenden Sickerwasserneubildungsraten in Höhe von 5 – 15% des Niederschlags (Huber, 2001) toleriert werden können. Nach Möglichkeit sollte bei Altdeponien mit hohem organischen Anteil vor dem Aufbringen des Oberflächenabdichtungssystems ein weitgehender Abbau der organischen Substanz – und somit eine Reduzierung des Schadstoffpotenzials forciert werden.

2 Entwurfsgrundsätze und Systemanforderungen

2.1 Generelle Entwurfsprinzipien

Generell besteht eine Kombinationsabdichtung aus einer Kombination zweier unabhängig voneinander wirksamer Abdichtungskomponenten; im Regelfall aus einer Konvektionssperre und einer mineralischen „Langzeit-Komponente“:

- Konvektionssperre: KDB oder Asphaltabdichtung;
- Langzeit-Komponente auf mineralischer Basis: Tonmineralische Dichtung, gemischtkörnige mineralische Dichtung mit geringem Feinkornanteil, Kapillarsperre, sonstige mineralische Komponenten; Bentonitmatten und Trisoplast-Dichtungen enthalten auch polymere, organische Komponenten.

Kombinationsabdichtungen haben sich im Basisabdichtungssystem nach TASI / TA Abfall bewährt. Wenngleich zwischen den Einwirkungen auf die Abdichtungssysteme an der Deponiebasis und an der Deponieoberfläche Unterschiede bestehen, wurde das Prinzip der Kombinationsabdichtung für das Oberflächenabdichtungssystem

nach TA Abfall /TASi und ebenfalls für das Oberflächenabdichtungssystem nach DepV für DK II und DK III übernommen.

2.2 Anforderungen an die Drän- und Rekultivierungsschicht

Solange die KDB voll funktionsfähig ist, beschränken sich die Anforderungen an die darüberliegenden Schichten darauf, dass die KDB vor Beschädigungen zu schützen ist und dass der Aufstau von Wasser auf der Dichtung zu vermeiden ist.

Spezielle Anforderungen an die Drän- und Rekultivierungsschicht ergeben sich für die späte Nachbetriebsphase nach dem fiktiven, vollständigen Ausfall der KDB: Wenn die Oberflächenabdichtung weiterhin wirksam sein soll, dann müssen an die Dränschicht und die Rekultivierungsschicht die gleichen Anforderungen gestellt werden wie für eine Oberflächenabdichtung mit nur dieser (mineralischen oder sonstigen) Komponente. Die KDB darf dabei für den Entwurf nicht als Wurzelsperre oder mit einer sonstigen Schutzfunktion angesetzt werden.

Ein weiterer Aspekt der Anforderungen an die Drän- und Rekultivierungsschicht besteht darin, dass bei Betrachtung sehr langer Zeiträume davon ausgegangen werden muss, dass etwaige Geotextilien zwischen den Schichten ihre Funktion nicht mehr erfüllen können. In diesem Zusammenhang wurden im BayFORREST-Forschungsvorhaben F 58 Untersuchungen zur Filterstabilität mineralischer Schichten in Abdecksystemen von Deponien durchgeführt (Floss et al, 1999b).

2.3 Anforderungen an die Geometrie der Deponieoberfläche

Das System „Kombinationsabdichtung“ an sich erfordert keine speziellen Geometrien der Deponieoberfläche. Die maximale und minimale Neigung sowie die Böschungs- und Abschlagslängen werden durch die im Einzelfall gewählten Materialien und Materialkombinationen bestimmt.

Die maximal zulässige Böschungsneigung wird durch die Reibungswinkel der Materialien bzw. der Schichtgrenzen determiniert. Es sei darauf hingewiesen, dass mit strukturierten KDB auch steile Böschungen standsicher ausgeführt werden können; bei Altdeponien wurden unter Einbeziehung von Geogittern Böschungsneigungen steiler als 1 : 2 ausgeführt.

Die minimal erforderliche Neigung der Deponieoberfläche sowie die Böschungslängen werden durch das jeweilige Entwässerungssystem bzw. durch die Anforderungen an Kapillarsperren determiniert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass je nach Deponietyp auch langfristig noch erhebliche Setzungen und insbesondere Sackungen (vor allem bei Deponien mit unbehandelten organischen Stoffen) auftreten werden.

3 Untersuchungen zur Systemwirksamkeit und Eignungsprüfungen

Die Systemwirkung der Kombinationsabdichtung besteht im Grundsatz darin, dass eine als Konvektionssperre wirkende Dichtungskomponente mit einer weiteren, unabhängig und zeitlich unbegrenzt wirkenden Komponente kombiniert wird. Die im Abschnitt 1.3 erläuterte Systemwirkung zur Unterbindung des Schadstoffaustrags im Basisabdichtungssystem ist im Oberflächenabdichtungssystem nicht erforderlich. Im Oberflächenabdichtungssystem steht die Anforderung im Mittelpunkt, dass die Abdichtung langfristig und nachhaltig das Einsickern von Niederschlagswasser in den Deponiekörper verhindern bzw. auf ein je nach Deponieklasse tolerierbares Maß begrenzen muss.

Gezielte Untersuchungen zur Systemwirksamkeit von Kombinationsabdichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen liegen nicht vor; es wird Bezug genommen auf die entsprechenden, ausführlichen Untersuchungen für das Basisabdichtungssystem (zusammengefasst z.B. von Rowe, 2006 und Gartung et al, 2001).

In den Verordnungen wird im Grundsatz eine Abfolge von Funktionsschichten, die im Basisabdichtungssystem sinnvoll ist, auf das Oberflächenabdichtungssystem übertragen (tonmineralische Dichtungsschicht / KDB / Entwässerungsschicht). Es existieren aber wichtige Unterschiede hinsichtlich der Einwirkungen auf Basisabdichtung und Oberflächenabdichtung, die beim Entwurf des jeweiligen Kombinationsabdichtungssystems berücksichtigt werden sollten:

- Die sperrende Verbundwirkung von tonmineralischer Dichtung und KDB hinsichtlich wasserlöslicher Stoffe und unpolarer organischer Substanzen ist im Oberflächenabdichtungssystem nicht erforderlich.
- Die oberflächennahen Bodenschichten bis zur Tiefe von ca. 2 – 3 m werden (bedingt durch Klima und Vegetation) durch wechselnde Wassergehalte und Wasserspannungen geprägt. Diese Dynamik wirkt auch in Deponieoberflächenabdichtungen, was in schrumpfanfälligen tonmineralischen Dichtungsschichten häufig zu irreversiblen Veränderungen führt.

Ein Abdichtungssystem, in dem die KDB erforderlich ist, um das andere Dichtungselement zu schützen (z.B. als Wurzelsperre und Austrocknungssicherung für die tonmineralische Dichtungsschicht) kann nicht als Kombinationsabdichtung bezeichnet werden, da in diesem Fall die beiden Dichtungskomponenten nicht unabhängig voneinander wirken.

4 Herstellung

Um einen guten Kontakt der KDB mit der mineralischen Abdichtung auf der Baustelle zu erreichen, werden an die Herstellungsgenauigkeit der mineralischen Abdichtungsschicht hohe Anforderungen gestellt. Die KDB muss ohne Falten, Wellen und Fehlstellen auf der ebenen Oberfläche der mineralischen Schicht verlegt

werden. Da die schwarze KDB sich in der Sonne aufheizt und infolge ihrer Wärme-Ausdehnung Wellen bildet, kann der Pressverbund nur erreicht werden, wenn die Verlegearbeiten und die danach folgende Überschüttung der Dichtung nach einem minutiösen Zeitplan ausgeführt werden. Unter Berücksichtigung der Temperaturentwicklung des Tag- Nachtzyklus wird die Abfolge der Bauarbeiten so gesteuert, dass die am Vortag verschweißte KDB in den kühlen Morgenstunden, wenn sie unter einer geringen, thermisch verursachten Zugspannung steht und vollkommen glatt und eben ist, überschüttet wird. Die Technik wurde von Schicketanz (1992) zur Praxisreife entwickelt und vielfach erfolgreich eingesetzt. Sie ist aufwändig und erfordert neben guter Koordination der Bauarbeiten auch besondere Aufmerksamkeit im Qualitätsmanagement.

5 Qualitätsmanagement

Das Qualitätsmanagement für den Bau einer Kombinationsabdichtung ergibt sich aus den Anforderungen für die jeweiligen Komponenten (KDB, mineralische Komponente). Der Anhang E zu TA Abfall sowie die einschlägigen BAM-Richtlinien und GDA-Empfehlungen enthalten alle wichtigen Aspekte der Qualitätssicherung im Detail.

An Kombinationsabdichtungen wird in den DIBt-Grundsätzen (Ziffer 5.6.4) darüber hinaus die Forderung gestellt, „die Schichten so herzustellen, dass eine Unterläufigkeit zwischen den Schichten und somit eine großflächige Verteilung von durch Fehlstellen eingedrungenes Wasser nicht möglich ist.“

6 Nachsorge

Die Nachsorgeerfordernis der Oberflächenabdichtung ist stets im Zusammenhang mit der Nachsorgeerfordernis der Deponie als Ganzes – in Abhängigkeit vom langfristig vorhandenen Gefährdungspotenzial – zu sehen.

Bei Oberflächenabdichtungen mit KDB bestehen während deren Funktionsdauer keine speziellen Anforderungen an die Nachsorge. Die KDB mit ihrer Wirkung als Konvektionssperre und Wurzelsperre schützt während dieser Zeit auch eine darunter angeordnete empfindliche mineralische Dichtungsschicht.

Die kritische Phase der Nachsorge setzt erst nach mehr als 100 Jahren ein, wenn unter Umständen die Funktion der KDB nachlässt. Im Rahmen der Nachsorge müsste für diese sehr späte Phase sichergestellt werden, dass nach dem potenziellen Versagen der KDB das verbleibende (mineralische) Dichtungselement keine Schäden erleidet. Es sei denn, der Langzeit-Wasserhaushalt der Deponie gestattet die ohne KDB zu erwartende Sickerwasserbildung, die sich bei einer mineralischen Dichtung mit verminderter Wirksamkeit ergibt.

Das Dilemma besteht darin, dass die Erfordernis für Nachsorgemaßnahmen zu einem unbestimmten Zeitpunkt in der Zukunft beginnt, wenn eigentlich die Deponie

längst aus der Nachsorge entlassen sein sollte.

7 Beispiele und Zulassungen

In den nachfolgenden Abschnitten werden exemplarisch Beispiele für genehmigte Oberflächenabdichtungssysteme mit unterschiedlichen Kombinationsabdichtungen aufgelistet. Die Zusammenstellung zeigt, dass es in der Genehmigungs- und Bau-praxis ein weites Spektrum von Kombinationsabdichtungen gibt.

Diese Aufzählung darf jedoch nicht dahingehend interpretiert werden, dass diese Systemvarianten gleichartig wirksam oder gleichermaßen zu empfehlen wären.

7.1 Kombination aus tonmineralischer Abdichtung und Kunststoffdichtungsbahn

Die Kombination aus tonmineralischer Abdichtung gemäß TA Abfall Anhang E und Kunststoffdichtungsbahn entspricht dem Regelsystem, das an zahlreichen Standorten ausgeführt wurde.

7.2 Kombination aus Bentonitmatte und Kunststoffdichtungsbahn

Thüringen: Auf 7 Deponien bzw. Deponieabschnitten (zusammen ca. 31 ha) wurden Kombinationsabdichtungen aus KDB auf Bentonitmatten ausgeführt; weitere ca. 11 ha sind in Planung (Wilhelm, 2003).

Industriedeponie Obernburg (Bayern): Im flachen Bereich der Deponieoberfläche wurde eine Kombinationsabdichtung mit einer KDB auf einer Bentonitmatte ausgeführt.

7.3 Kombination aus Trisoplast und Kunststoffdichtungsbahn

Deponie Karlsbad-Ittersbach (Baden-Württemberg; Deufel, 2005):

- 2,0 m Rekultivierungsboden
- 0,3 m Dränageschicht
- 2,5 mm KDB
- 0,07 m Trisoplast

Deponie Oberlangheim (Bayern)

- 1,0 m Rekultivierungsschicht
- 0,3 m Dränageschicht
- 2,5 mm KDB
- 0,10 m Trisoplast

7.4 Kombination aus Kapillarsperre und Kunststoffdichtungsbahn

Deponie Breinermoor (Niedersachsen): KDB über Kapillarsperre (v.d.Hude, 2001):

- 1,0 m Rekultivierungsschicht (unterteilt in 3 Funktionsschichten)
- 0,4 m Dränageschicht
- 2,5 mm KDB

- 0,6 m Kapillarschicht
- 0,25 m Kapillarblock

Deponie Penig (Sachsen): Kapillarsperre über KDB (v.d.Hude, 2001):

- 2,0 m Rekultivierungsschicht (unterteilt in 3 Funktionsschichten)
- 0,4 m Kapillarschicht
- 0,25 m Kapillarblock
- 2,5 mm KDB

Deponie „Am Lemberg“ (Baden-Württ.): Kapillarsperre über KDB (Tschackert, 2006):

- Rekultivierungsschicht
- Kapillarschicht
- Kapillarblockbahn
- KDB

7.5 Kombination aus mineralischer Komponente und Asphaltabdichtung

Deponie Hohberg, Pforzheim (Baden-Württemberg) (Giurgea et al., 2005):

- 1,5 m Rekultivierungsschicht
- 0,3 m Dränageschicht
- 0,075 m Asphaltabdichtung
- 0,2 m mineralische Tragschicht
- 0,2 m Kapillarschicht
- 0,1 m Kapillarblock

7.6 Kombination aus mineralischer Dichtung und Kapillarsperre

Deponie Karlsruhe-West (Baden-Württemberg; Giurgea & Hötzl, 2004):

- 2,0 m Wurzelboden
- 0,15 m Dränageschicht
- 0,6 m tonmineralische Dichtungsschicht
- 0,3 m Kapillarschicht
- 0,15 m Kapillarblock

Die tonmineralische Dichtung hat hier im gut dokumentierten Großlysimeter-Versuchsfeld nach wenigen Jahren ihre Wirksamkeit fast vollständig eingebüßt.

8 Folgerungen, Empfehlungen, offene Fragen

8.1 Grundsätze

Abfalldeponien dienen als Schadstoffsinken, in denen die jeweiligen Schadstoffe auf Dauer sicher verwahrt werden sollen. Die Oberflächenabdichtung dient im Wesentlichen dazu, die Deponie auf Dauer von der Biosphäre abzuschirmen und den Eintritt von Niederschlagswasser in den Deponiekörper zu verhindern bzw. zu minimieren.

Grundsätzlich besteht der Anspruch an Deponie-Oberflächenabdichtungen, dass diese „auf Dauer“ wirksam sind und nach einer begrenzten Nachsorgezeit (von ca. 30 Jahren) den nachfolgenden Generationen keine bleibenden Pflichten und Folgeaufgaben aufgebürdet werden.

Auf lange Sicht (Zeiträume > 100 Jahre) ist eine Kombinationsabdichtung nur so gut wie die nicht zersetzbare (mineralische) Komponente.

Die Diskussion um Abdichtungstypen für Deponien sollte nicht unter Einengung des Blickwinkels einzig auf die Wirksamkeit der Dichtung geführt werden, sondern sie sollte auch die Deponie als Ganzes und die Emissionen, sowie deren zeitliche Entwicklung mit berücksichtigen.

8.2 Wirksamkeit der Kombinationsabdichtung des Regelsystems

Eine entsprechend dem Regelsystem und nach den speziellen Anforderungen der TA Abfall, Anhang E gebaute Kombinationsabdichtung ist während der Zeit, in der die KDB voll wirksam ist, nahezu 100-prozentig dicht. Nach Ablauf der vollständigen Funktionsfähigkeit der KDB verliert diese auch ihre Wirkung als Wurzelsperre und als Schutz der mineralischen Dichtung von Trockenstress.

Die Grundkonzeption der Kombinationsabdichtung baut darauf auf, dass die mineralische Komponente eine potenziell deutlich längere Wirksamkeitsdauer hat als die KDB. Hierfür gibt es bislang keine belastbaren positiven Nachweise, aber zahlreiche Gegenbeispiele dergestalt, dass tonmineralische Oberflächenabdichtungen nach wenigen Jahren erheblich nachlassende Wirkung zeigten.

Eine mineralische Komponente in Form einer tonmineralischen Dichtung mit hohem Feinkornanteil nach TA Abfall, Anhang E ist schrumpfrissanfällig und austrocknungsgefährdet und daher nicht geeignet, langfristig das Einsickern von Wasser in den Deponiekörper fast vollständig zu verhindern. Die vorhandenen Untersuchungsergebnisse weisen vielmehr darauf hin, dass im Regelfall langfristig mit einer erheblichen Sickerwasserneubildung zu rechnen ist.

8.3 Deponietyp – Gefährlichkeit – Erfordernis der Barriere

Abfälle werden je nach ihrer Umweltgefährlichkeit verschiedenen Deponieklassen zugeordnet: Abfälle mit einem sehr hohen Auslaugungspotenzial an giftigen Stoffen werden in Untertagedeponien (DK VI) auf Dauer von der Biosphäre getrennt.

In Deponien der Klasse DK 0 werden demgegenüber nur Materialien abgelagert, deren Stoffgehalte im geogenen Rahmen liegen. Dementsprechend bestehen hier hinsichtlich der Oberflächenabdeckung keine Anforderungen an eine zu minimierende Durchsickerung.

Inertdeponien der Klasse DK I sind gemäß Regelsystem nur mit einer mineralischen Oberflächenabdichtung zu versehen. Hier ist nach der Alterung der mineralischen Dichtung mit zunehmenden Durchsickerungen zu rechnen, die angesichts des wenig kritischen Stoffinventars dieser Inertdeponien jedoch tolerierbar sind.

In die Deponieklasse DK II fallen neben aktuell weiterbetriebenen Reststoffdeponien auch die Altdeponien / Hausmülldeponien mit hohem organischen Anteil. Deren Schadstoffinventar stammt im Wesentlichen aus der Zersetzung der organischen Stoffe. Das Schadstoffpotenzial der Altdeponien baut sich mit der Zeit teilweise ab; die Konzentration der kritischen Inhaltsstoffe im Deponiesickerwasser geht zurück. Diese Prozesse lassen sich durch eine geeignete Betriebsführung in der Stilllegungs- und Nachsorgephase deutlich beschleunigen. Hier besteht aktuell Diskussionsbedarf, ob unter Umständen für aktiv stillgelegte Reaktordeponien nach dem Ende der Funktionsdauer der KDB eine geringere Abdichtungswirkung tolerierbar ist.

Die Deponien für gefährliche Abfälle /Sonderabfalldeponien (DK III) haben auf Dauer ein hohes Potenzial an auslaugbaren gefährlichen Stoffen. Bei diesem Deponietyp ist daher auf Dauer eine intakte Barriere an der Oberfläche erforderlich. Ein Rückgang der Abdichtungswirkung nach > 100 Jahren (nach Nachlassen der Funktion der KDB) kann hier nicht toleriert werden. Daher sollte der langfristigen Wirksamkeit der unabhängigen (mineralischen) Komponente hier erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet werden. Eine tonmineralische Dichtungsschicht ohne wesentliche zusätzliche Vorkehrungen zur Reduzierung der Durchwurzelung und der Rissanfälligkeit ist in Anbetracht der vorliegenden Erkenntnisse nicht ausreichend. Hier besteht erheblicher Aufklärungs- und Handlungsbedarf zur Planung von nachhaltig dichten Oberflächenabdichtungssystemen. Aus heutiger Sicht sind als mineralische Komponente von Oberflächenabdichtungen für DK III – Deponien Kapillarsperren oder gemischtkörnige mineralische Dichtungskomponenten mit geringem Feinkornanteil zu empfehlen, nicht jedoch tonmineralische Dichtungen gemäß TA Abfall Anhang E oder Bentonitmatten.

8.4 Kritische Fragen und Antworten

Ist eine Kombinationsabdichtung im Deponieoberflächenabdichtungssystem wirksamer als eine KDB als einziges Dichtungselement?

- Auf mittlere Sicht (Zeitraumen ca. 100 - 300 Jahre) bestimmt die KDB die Dichtwirkung einer Kombinationsabdichtung. Auf lange Sicht (>> 100 Jahre) ist eine Kombinationsabdichtung (nur) so gut wie es der Langzeitwirksamkeit der mineralischen Komponente entspricht.

Welche Komponenten sind als Elemente für Kombinationsabdichtungen zu empfehlen? – Gibt es Einschränkungen, bzw. nicht empfehlenswerte Dichtungselemente?

- Als Konvektionssperre haben sich in Deutschland BAM-zugelassene KDB bewährt und sind zu empfehlen. Asphaltabdichtungen sind gleichfalls geeignet, wenn es sich um nicht setzungsempfindliche Deponien handelt.
- Das Material der unabhängigen wirkenden mineralischen Komponente sollte

prinzipiell nicht austrocknungs- und durchwurzelungsempfindlich sein, keinen nachteiligen Alterungsprozessen unterliegen und langfristig zu erwartende Setzungen ohne Schaden überstehen. Kein einzelnes Material kann diesen Anforderungskatalog restlos erfüllen; jedoch erscheinen gemischtkörnige mineralische Dichtungen mit geringem Feinkornanteil sowie Kapillarsperren relativ gut geeignet, während tonmineralische Dichtungen gemäß TA Abfall, Anhang E mit hohem Feinkornanteil und Bentonitmatten kritisch zu hinterfragen sind und allenfalls in Verbindung mit sehr dicken Rekultivierungsschichten (> 2 m) verwendet werden sollten.

Für welche Deponiearten bzw. Abfälle sind Kombinationsabdichtungen erforderlich bzw. empfehlenswert?

- Für Deponien mit gefährlichen Abfällen (DK III) wird eine sehr lange wirksame (>> 100 Jahre), dichte Oberflächenabdichtung benötigt. Hierfür ist eine Kombinationsabdichtung unabdingbar, wobei an die mineralische Dichtungskomponente hinsichtlich der nachhaltigen Wirksamkeit erheblich höhere Ansprüche gestellt werden sollten, als dies mit der tonmineralischen Komponente des Regelsystems der Fall ist.
- Für Altdeponien und DK II – Deponien sollte die Sinnhaftigkeit der Regel-Kombinationsabdichtung kritisch hinterfragt werden, da absehbar ist, dass diese nach dem Ende der Funktionsdauer der Konvektionssperre in ihrer Wirkung erheblich nachlässt. Diese langfristige Perspektive sollte in die Überlegungen zur Stilllegungs- und Nachsorgestrategie aktiv einbezogen werden.

Literatur

EU-Deponierichtlinie: Richtlinie 1999/31 EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien.

TA Siedlungsabfall (TA Si): Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen vom 14. Mai 1993.

TA Abfall: Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12. März 1991.

EPA RCRA: United States Environmental Protection Agency; Resource Conservation and Recovery Act, Subtitle C (hazardous waste).

GDA-Empfehlungen, Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage 1997, herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT). Verlag Ernst & Sohn. speziell:

E 2-4: Kombiniertes Oberflächenabdichtungssystem, S. 94 – 97.

E 3-8: Bestimmung des Scherverhaltens von kombinierten Abdichtungsschichten, S. 247 – 248.

Die nach 1997 herausgegebenen GDA-Empfehlungen sind vollständig in der Zeitschrift Bautechnik jeweils im Septemberheft der Jahrgänge 1997 bis 2006 veröffentlicht. Einige sind auch unter www.GDAonline.de zugänglich.

DIBt – Grundsätze (1995): Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen. Deutsches Institut für Bautechnik AöR (DIBt), November 1995; veröffentlicht im Anhang der GDA-Empfehlungen, 3. Auflage, 1997, S. 637 – 708.

LAGA (2004): Allgemeine Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme. –LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“, 10.09.2004.

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin (1992). Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsdichtung für Siedlungs- und Sonderabfalldeponien sowie für Abdichtungen von Altlasten.

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin (1999). Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen für die Abdichtung von Deponien und Altlasten.

August H., Tatzky-Gerth, Preuschmann R. & Jakob I. (1992) Permeationsverhalten von Kombinationsabdichtungen bei Deponien und Altlasten gegenüber wassergefährdenden Stoffen. F+E-Vorhaben 10203412, BAM, Berlin, Abschlussbericht 1992.

August H. & Tatzky-Gerth R. (1992) Die Wirkungsweise der Kombinationsabdichtung aus wissenschaftlicher Sicht. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 65 S. 45 – 64.

August H., Holzlöhner U & Meggyes T. Herausgeber (1998): Optimierung von Abdichtungssystemen. Ergebnisse der Forschungsarbeiten im BMBF Verbundforschungsvorhaben „Weiterentwicklung von Abdichtungssystemen“ Springer.

August, H. & K. Stief (2002): Zur Gleichwertigkeit von Deponieabdichtungen; Was ist mit wem und warum gleichwertig? Fragen und Antworten. – in: Tagungsband, 18. Fachtagung „Die sichere Deponie“, SKZ Würzburg.

Bienen, B. & D. Heyer (2003): Optimierung gemischtkörniger Dichtungsstoffe bei besonderer Betrachtung des Austrocknungsverhaltens. – in: Tagungsband 14. Nürnberger Deponieseminar; Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 81, S. 135 – 147.

Demmert S. (1993): Analyse des Emissionsverhaltens einer Kombinationsabdichtung. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 67, S. 161 – 176.

Deufel (2005): Abschluss und Rekultivierung der Kreismülldeponie Karlsbad-Ittersbach mit alternativer Oberflächenabdichtung. – in: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 135, S. 149 – 159.

Floss, R., D. Heyer & I. Maurer (1999a): BayFORREST-Forschungsvorhaben F 157: Optimierung der Zusammensetzung gemischtkörniger Abdichtungsmaterialien. – BayFORREST-Berichtsheft 11, S. 449 – 456.

Floss, R., D. Heyer, P. Rödl & A. Bauer (1999b): BayFORREST-Forschungsvorhaben F 58(F); Filter- und Dränwirksamkeit von Abdecksystemen von Deponien mit oder ohne Geotextilien. - BayFORREST-Berichtsheft 11, S.425 – 435.

Gartung, E., L. Cadrobbi, M. Weiss & G. Simeoni (2005): Sanierung der Altdeponie Sigmundskron – Bozen in Südtirol; Testfelder für die Oberflächenabdichtung. – in: Henken-Mellies (Hrsg.) Tagungsband 16. Nürnberger Deponieseminar. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 84, S. 177 – 189.

Gartung, E., U. Henken-Mellies & H. Sporer (2001): Deponieabdichtungen – Zusammenstellung und Diskussion von Forschungsergebnissen für Abdichtungssysteme. Im Auftrag des Bay. StMLU. – Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 80, 122 S.

Giroud J. P., Badu-Tweneboah K. & Bonaparte R. (1992): Rate of leakage through a composite liner due to geomembrane defects. Geotextiles and Geomembranes 11(1) pp. 1 – 29.

Giurgea, V.I. & H. Hötzl (2004): Langzeituntersuchung von alternativen Oberflächenabdichtungssystemen in Großlysimetern: Deponie Karlsruhe-West. – in: Henken-Mellies (Hrsg.) Tagungsband 16. Nürnberger Deponieseminar. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 82, S. 257 – 279.

Giurgea, V.I., H. Hötzl & A. Gerlach (2005): Erste Ergebnisse des Lysimetermonitorings einer Asphaltabdichtung mit untenliegender Kapillarsperre, Hausmülldeponie Hohberg, Pforzheim. in: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 135, S. 121 - 137.

Gottheil K.-M. & Brauns J. (1994): Das Austrocknungsverhalten von mineralischen Abdichtungsschichten unter Kunststoffdichtungsbahnen bei erhöhten Temperaturen. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 72 S. 297 – 306.

Horn, A. (1989): Mineralische Deponie-Flächendichtungen aus gemischtkörnigen Böden. – Bautechnik 69, S. 311 ff.

Huber, W. (2001): Sickerwasseranfall bei mineralischen Oberflächenabdichtungen unter dem Gesichtspunkt der Nachsorge. – in: Tagungsband Bayer. Abfall- und Deponietage Augsburg, 2001.

Huber, W., S. Schatz & A. Quentin (2002): Statistische Auswertung des Sickerwasseranfalls auf bayerischen Deponien; Endbericht. Projekt 3260 des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz, 37 S.

von der Hude, N. (2001): Kapillarsperren als Oberflächenabdichtung: Dimensionierung, Einbauempfehlungen, Einschränkungen, Erfahrungen und Kosten am Beispiel verschiedener Projekte. – in: Tagungsband 4. Deponieseminar des Geol. LA Rheinland-Pfalz, Mainz, S. 73 – 91.

Jessberger H.-L., Gartung E. & Heibroock G. (1994) Sicherheitskonzept für Deponieabdichtungssysteme, Expertenbefragung Kunststoffdichtungsbahn. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 72 S. 241 – 264.

Klein, R., C. Speiser, T. Baumann & R. Niessner (1999): BayFORREST-Forschungsvorhaben F 158; Exothermer Stoffumsatz in MVA-Schlackedeponien. – BayFORREST Berichtsheft 11, S. 457 – 471.

Müller W. (2001) PE-HD Dichtungsbahnen in der Geotechnik. BauHandbuch . Basel (Birkhäuser).

Rowe. R. K. (2006): Some factors affecting Geosynthetics used for geoenvironmental applications. – Proceedings 5th ICEG Environmental Geotechnics, London 2006, P. 43 – 69.

Schicketanz R. (1992) Wirkungsweise der Kombinationsdichtung und Anforderungen an die mineralische Oberfläche. Müll und Abfall 5/92.

Stoffregen, H. et al. (1999): Rissgefährdung von Kombinationsabdichtungen durch temperaturabhängige Austrocknung. Müll und Abfall 1/99.

Vielhaber B. (1997) Temperaturabhängiger Wassertransport in Deponieoberflächenabdichtungen – Feldversuche, Aufgrabungen, Berechnungen. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 76 S. 267 – 286.

Wilhelm, L: (2003): Alternative Maßnahmen zur Sicherung und Rekultivierung von Thüringer Deponien. in: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 128, S. 19 - 30.