

Überlegungen zu geotechnischen Anforderungen an Oberflächenabdichtungssysteme

Karl Josef Witt

1 Exposition

Oberflächenabdichtungen von Deponien sollen zwei Hauptanforderungen erfüllen. Sie sollen (i) über sehr lange Zeiträume hinweg die Zusickerung von Niederschlagswasser in den Abfallkörper auf ein verträgliches Maß begrenzen und (ii) eine unkontrollierte Emission von Deponiegas verhindern. Von einem Dichtungssystem spricht man, da unterschiedliche Komponenten wie Rekultivierungsschicht, Dränageschicht, Dichtungs- und Tragschicht teils interaktiv zusammenwirken. Der Anteil der Komponenten an der Leistungsfähigkeit des Systems Oberflächenabdichtung recht unterschiedlich.

Mit Beginn der geordneten Deponierung von Siedlungsabfällen wurde die Emission von kontaminiertem Sickerwasser zunächst nur an der Deponiebasis durch die sog. Basisdichtung verhindert, für die es in der TA Abfall erstmals abfallrechtlich eine bundesweite Vorschrift über Aufbau und technische Anforderungen gab. In Anhang E zu dieser Verwaltungsvorschrift sind detaillierte Material- und Prüfungsanforderungen zur Herstellung von Abdichtungssystemen festgelegt. Die Deponieoberflächen wurden anfangs mit nicht näher definierten Böden abgedeckt. Erst mit der TA Siedlungsabfall (TASI) wurden 1993 die Anforderungen an Deponieoberflächenabdichtungssysteme definiert. Gefordert wird ein rein mineralischer Aufbau für Deponien der Klasse DK I und eine Kombinationsdichtung mit einer mindestens 50 cm dicken mineralischen Dichtungsschicht für DK II ($k \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$). Hinsichtlich Material- und Prüfanforderungen gilt sinngemäß Anhang E der TA Abfall. Gleichwertige Dichtungssysteme sind zugelassen. Der Rekultivierungsschicht wird eine Schutzwirkung zugeordnet.

Die EU-Richtlinie 1999/31 lässt hinsichtlich des Aufbaus der Abdeckung einer Deponie wesentlich mehr Freiraum. Eine Oberflächenabdichtung kann nach Maßgabe der Behörde gefordert werden, wenn der Bildung von Sickerwasser vorgebeugt werden muss. Bei einer Deponie DK I und DK II wird dann eine Rekultivierungsschicht $d > 1 \text{ m}$ und eine „undurchlässige“ mineralische Dichtungsschicht gefordert.

Die aktuellen Anforderungen an Oberflächenabdichtungssysteme in Deutschland sind in Anhang 1 der DepV beschrieben. Sie entsprechen weitestgehend den Festlegungen der TA-Abfall bzw. TASI. Präzisiert wurde in Anhang 5 die Funktion der Rekultivierungsschicht, der neben der Schutzwirkung ein wasserspeichernder Effekt zugewiesen wird. Die Mindestmächtigkeit beträgt 1 m, soll sich aber im Einzelfall an der Durchwurzelungstiefe des Bewuchses orientieren. Das Wasserspeichervermögen soll durch eine hohe, nicht näher quantifizierte Feld- und Luftkapazität sichergestellt werden.

Neben diesem bundesgesetzlichen Rahmen werden technische Anforderungen durch nachgeordnete Regelungen, Merkblätter und Empfehlungen teils länderspezifisch definiert. Diese Vorschriften regeln meist die Anforderungen an die Komponenten und betreffen den Gestaltungsspielraum sowie den Nachweis der Gleichwertigkeit von alternativen Aufbauten gegenüber dem oben aufgeführten Regelsystem. Hier ist vor allem die Arbeit der LAGA Ad-hoc AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ hervorzuheben, welche Grundsatzpapiere zu technischen Anforderungen erarbeitet hat. In dem Papier „Allgemeine Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme“ (Allgemeine Grundsätze) sind die grundlegenden Anforderungen an Abdichtungskomponenten für Deponieoberflächenabdichtungssysteme systemunabhängig festgeschrieben (BRÄCKER, 2005a, 2005b). Weitere, teils noch in der Bearbeitung befindliche Papiere behandeln Grundsätze für die Eignungsbeurteilung spezieller Dichtungsmaterialien. Da diese Papiere auf Entscheidungskriterien zur Beurteilung der Gleichwertigkeit von alternativen Dichtungskomponenten zielen, wird darin deren Eignung relativ zur Leistungsfähigkeit der Regelsysteme betrachtet. In diesem Vortrag wird dagegen versucht, die Leistungsfähigkeit von Abdichtungen absolut zu diskutieren.

Im Hinblick auf eine künftige gesetzliche Regelung der Anforderungen an Oberflächenabdichtungssysteme liegt bereits ein breiter Rahmen von Spezifizierungen wie auch reichlich Erfahrung aus Projekten vor. Aus technischer Sicht lassen sich die Anforderungen an Dichtungssysteme durch zwei Kriterien zusammenfassen, die erwartete Dichtigkeit des Systems und die Langzeitfunktion. Die Anforderung an die Dichtigkeit kann nur aus einer akzeptierbaren Durchflussrate unter den gegebenen und erwarteten klimatischen Verhältnissen abgeleitet werden, deren Größe sich an dem Gefährdungspotenzial orientiert. Die Langzeitfunktion schließt die Standsicherheit des gesamten Aufbaus wie auch alle Aspekte der Beständigkeit ein, so auch mögliche nachteilige Veränderungen der Materialien im Lebenszyklus. Die geotechnischen Aspekte dieser beiden Kriterien werden im Folgenden aus der fachlichen Sicht des Autors als Anregung zur weiteren Diskussion in diesem Workshop dargestellt und begründet.

2 Geotechnische Anforderungskriterien

2.1 Dichtigkeit

Die Leistungsfähigkeit von Oberflächenabdichtungssystemen ist die Eigenschaft, infiltriertes Niederschlagswasser zu speichern oder abzuleiten um die Zusickerung in den Abfallkörper zu begrenzen. Mit der Dichtwirkung gegen infiltrierendes Niederschlagswasser ist gleichzeitig eine hinreichende Sperre gegen die Emission von Deponiegas gegeben.

Aus der Palette von Lösungen sind technisch konvektiv undurchlässige Dichtkomponenten wie eine Kunststoffdichtungsbahn (KDB) oder eine optimal funktionierende Kapillarsperre und gering durchlässige Komponenten wie mineralische Abdichtungs-

schichten zu unterscheiden, zu denen auch geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD), organisch (polymer) oder anorganisch vergütete Böden sowie aus Abfällen hergestellte Dichtungen zählen.

Ein Abdichtungssystem aus verschiedenen Komponenten wirkt immer in Serie, wenn es senkrecht zur Schichtung durchsickert wird. Die Komponente mit der größten Dichtwirkung, d.h. mit der geringsten Wasserdurchlässigkeit, ist hydraulisch dominant. Der Vorteil eines Systems aus mehreren Dichtkomponenten, beispielsweise einer Kombinationsdichtung, einer Kombination KDB mit GTD oder KDB mit Kapillarsperre, liegt immer nur in der Redundanz und in der Robustheit, nicht in der Leistungsfähigkeit. Ausgenommen ist lediglich die Wasserhaushaltsschicht über einer geringdurchlässigen Dichtkomponente, da hiermit - im Sinne einer abgeschwächten Einwirkung - die Menge des an der Dichtkomponente anfallenden infiltrierten Niederschlagswassers reduziert wird, was sich auf den Gesamtdurchfluss durch das System und damit auf dessen Leistungsfähigkeit günstig auswirkt.

Die Anforderung an die Dichtigkeit eines Oberflächenabdichtungssystems kann nur aus der akzeptierten oder der erwünschten Durchflussrate, der Sickerwasserneubildung im Abfallkörper abgeleitet werden. In der EU-Richtlinie spiegelt sich dies durch die Kann-Bestimmung, dass eine Abdichtung nur erforderlich ist, wenn der Bildung von Sickerwasser vorgebeugt werden muss. Insofern richtet sich die Forderung nach der Dichtigkeit oder nach der Leistungsfähigkeit einer Oberflächenabdichtung auch an lokale, objektspezifische Randbedingungen wie Klima, Gesamtwasserhaushalt der Deponie, Abfallzusammensetzung, Reaktions- und Elutionsverhalten des Abfalls sowie an ökonomische Überlegung zur Entsorgung von Sickerwasser.

Für das heutige Regelsystem DK I mit einer rein mineralischen Dichtung ergibt sich aus der Wasserdurchlässigkeit ($k \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$) der Komponente eine theoretische jährliche Durchflussrate von

$$Q = 158 \text{ mm} = 158 \frac{l}{m^2 \cdot a}$$

Für eine Kombinationsdichtung ist die theoretische Durchflussrate Null, unter Vernachlässigung der KDB ergibt sich für die Regeldichtung nach DK II der vorgenannte Wert. Der Durchfluss durch den mineralischen Block der Dichtung nach DK III beträgt 1/10 hiervon.

Die „Allgemeinen Grundsätze“ (BRÄCKER, 2005a, 2005b) betrachten einen momentanen Aufstau von infiltriertem Niederschlagswasser in der Dränageschicht und leiten aus der geforderten Wasserdurchlässigkeit und Mindestdicke der Regeldichtung folgende Grenzwerte der theoretischen Leistungsfähigkeit ab:

$$\text{DK I/II: } q \leq 8 \cdot 10^{-9} \frac{m^3}{m^2 \cdot s} \qquad \text{DK III: } q \leq 8 \cdot 10^{-10} \frac{m^3}{m^2 \cdot s}$$

Unter der unrealistischen Annahme einer permanenten Beaufschlagung mit diesem Aufstau führt dies zu jährlichen Durchflussraten

$$\text{DK I/II: } Q = 252 \text{ mm} = 252 \frac{l}{m^2 \cdot a} \qquad \text{DK III: } Q = 25,2 \text{ mm} = 25,2 \frac{l}{m^2 \cdot a}$$

Die reale Neubildung von Sickerwasser wird erheblich von dem theoretischen Wert abweichen. Günstig wirkt, dass die Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130 unter Laborbedingungen für hohe Gradienten und gesättigte Bedingungen ermittelt und somit überschätzt wird. Bei kleinen Gradienten und bei Teilsättigung, wie dies im Feld überwiegend vorliegt, wirken deutlich höhere Strömungswiderstände. Ungünstig wirken sich Einbaufehler, Biegeverformungen, Quellen, Schrumpfrisse, Erosion und manche Alterungseffekte auf die Wasserdurchlässigkeit mineralischer Dichtkomponenten aus. Quantitativ lassen sich diese Effekte nicht abschätzen. Feldbeobachtungen zeigen, dass reale jährliche Durchflussraten intakter, junger mineralischer Dichtungsschichten in der Größenordnung von $Q \leq 50 \text{ mm/a}$ liegen. Mit der Alterung kann die Durchsickerung bei zu wenig geschützten rein mineralischen Aufbauten durch allmähliche Trockenrisse bereits nach einer Dekade bis auf eine Größenordnung von 15 % des Jahresniederschlages zunehmen (HUBER ET AL., 2002).

Eine zulässige theoretische Durchflussrate ist ein sinnvolles Kriterium der Dichtigkeit oder Leistungsfähigkeit für die Festlegung künftiger Anforderungen an Oberflächenabdichtungen. Das genaue Maß muss sich an der technischen Realisierbarkeit einerseits und andererseits an der potenziellen Gefährdung von Boden und Grundwasser durch die Deponie orientieren. Eine Forderung in der Größenordnung der bisherigen Praxis, wie dies auch in den „Allgemeinen Grundsätzen“ aufgenommen wurde, ist angemessen und empirisch als erreichbar abgesichert, wenn die Alterungseffekte beherrscht werden.

Neben dieser grundsätzlichen Frage der theoretischen und realen Leistungsfähigkeit muss bei der Festlegung künftiger Anforderungen die Herstellbarkeit und Robustheit des Dichtungssystems aufgenommen werden, indem technische Mindeststandards wie Art und Qualität der Dichtungsmaterialien, Mindestschichtdicken, Einbaubedingungen und Qualitätssicherungsmaßnahmen gefordert werden. Solche technische Vorgaben sind insbesondere in den Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponiebauwerke“ des AK 6.1 der DGGT auf der Grundlage praktischer Erfahrungen zusammengestellt (DGGT, 1997). Mit diesen Vorgaben und Erfahrungen lassen sich Typen von Abdichtungssystemen mit unterschiedlichen Komponenten zumindest halbquantitativ hinsichtlich der Leistungsfähigkeit, Robustheit und Beständigkeit objektunabhängig bewerten und klassifizieren. Es sollte dann dem Bauherrn überlassen bleiben, mit welchem Abdichtungssystem, mit welcher Zuverlässigkeit und Robustheit und letztlich mit welcher ökonomischen Strategie er die objektspezifischen Zielvorgaben erreicht.

2.2 Standsicherheit

Der für Oberflächendichtungen maßgebende Versagensmechanismus der Standsicherheit ist ein Gleiten in den Schichtgrenzen des Aufbaus. Ein System versagt, wenn in einer Schicht oder Schichtgrenze die für das Gleichgewicht erforderlichen

Scherkräfte nicht aufgenommen bzw. in der Schichtgrenze nicht übertragen werden können. Beim böschungsp parallelen Gleiten von Schichten kommt es am Böschungsfuß zu Aufwölbungen und Abstütungen, was zu einer Selbsthemmung führt. Diese Art von Rutschungen, die nicht progressiv verlaufen und sich bei Kriechverformungen durch Zugrisse am Böschungskopf ankündigen, zählen zu den harmlosesten Versagensformen von Böschungen. In Hinblick auf die Langzeitstandsicherheit von Oberflächenabdichtungen liegt damit ein vergleichsweise geringes Risiko oder ein vergleichsweise geringes Potenzial an Schadensfolgen vor.

Bei dem rechnerischen Nachweis der Sicherheit werden auf der Einwirkseite Gewicht- und Strömungskräfte betrachtet, auf der Widerstandsseite die Scherfestigkeit in den Gleitflächen, Reibung und Kohäsion bzw. Adhäsion. Die Scherparameter der Systemkomponenten werden in Eignungsuntersuchungen ermittelt. Die Standsicherheit wird für einen Bemessungslastfall nachgewiesen, der im Wesentlichen einen ungünstigen Wasserstand in der Drän- und Rekultivierungsschicht berücksichtigt. Zur Langzeitbetrachtung sind wiederum Einwirkungen und Widerstände getrennt zu analysieren. Langzeiteinwirkungen können extreme Niederschläge oder Erdbeben sein. Auf der Widerstandsseite wäre eine alterungsbedingte Abminderung der mobilisierbaren Scherfestigkeit anzusetzen. Für rein mineralische Materialien können sich Scherwiderstände durch Frosteinwirkung, Quellen, Vernässen oder durch Mineralumbildung verringern. Bei Geokunststoffen können die polymeren Werkstoffe altern oder verspröden, was unter Dauerlast zu Spannungsrissen oder zu einem reduzierten Schubverbund führt.

Wird die Scherfestigkeit in den Schichtgrenzen mit den richtigen Materialien und Spannungszuständen ermittelt (GDA E 2-7), erhält man verlässliche Kenngrößen für die Anfangsstandsicherheit. Die Langzeitstandsicherheit von mineralischen Schichten kann mit der Restscherfestigkeit (post-peak-Verhalten) als außergewöhnlicher Lastfall nachgewiesen werden, wobei abzuwägen ist, ob und in welchem Maß eine Kohäsion mobilisierbar ist. Zum Nachweis der Langzeit-Schubübertragung von geosynthetischen Produkten wurden in Reaktorversuchen unter zeitraffenden Milieubedingungen Belastungsversuche gefahren, mit denen sich eine äquivalente Standzeit errechnen lässt (SEEGER ET AL., 2000, MÜLLER, 2004). Für GTD (Bentonitmatten) geht ein anderer Ansatz von dem Ausfall der polymeren Schubübertragungselemente (Vernadelung oder Nähte) aus und prüft die Scherfestigkeit des ausgetauschten, gealterten Bentonits unter realen Auflasten. Diese ultimativen Kenngrößen können dann als Langzeitwiderstand bei einem Sicherheitsnachweis angesetzt werden.

Die „Allgemeinen Grundsätze“ der LAGA fordern als Eignungsnachweis für Materialien die „Dauerbeständigkeit“ aller Komponenten, welche die Standsicherheit beeinflussen. Dies gilt für mineralische wie für polymere Baustoffe. In Anbetracht des geringen Risikos einer Hautrutschung halte ich einen Nachweis der Widerstände für einen Zeitraum bis zu 100 Jahren als vollkommen ausreichend. Dies ist auch konform mit der empfohlenen Funktionsdauer eines Bauprodukts gemäß den Leitlinien der European Organisation for Technical Approvals (EOTA). Weitergehende Forderungen übersehen, dass Langzeit-Abbauprozesse des Abfallkörpers zu einer Abfla-

chung der Böschung führen und der unvermeidliche Bewuchs einer aus der Nachsorge und Pflege entlassenen Fläche zu einer standsicherheitserhöhenden Durchwurzelung führen wird. Dem Konzept der Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau folgend müssten Langzeitbetrachtungen auch die Langzeiteinwirkungen mit den zugehörigen Wiederkehrintervallen extremer Ereignisse betrachten, so ein 100-jähriges Niederschlagsereignis, Erdbeben, die vollkommene Aufsättigung der Überdeckung oder generelle klimatische Veränderungen. Eine Bemessung von Böschungen gegen Naturkatastrophen ist weder für natürliche Hänge noch für Damm- und Einschnittsböschungen des Verkehrswegebbaus üblich, sondern bleibt beschränkt auf Bauwerke mit sehr hohen Risiken wie Staudämme und Schutzdeiche. Bei den Anforderungen an die Standsicherheit von Oberflächenabdichtungen für Deponien sind dagegen Zeiträume und Wiederkehrwahrscheinlichkeiten über 100 Jahre nicht angemessen.

2.3 Beständigkeit

Im Lebenszyklus einer Oberflächenabdichtung können zahlreiche Alterungseffekte aus mechanischen, thermischen, chemischen und biologischen Einwirkungen wie auch durch Tiere auftreten, welche die Funktion nachteilig beeinflussen. Eine systematische Bewertung dieser Einwirkungen wurde erstmals in den „DIBt-Grundsätze für Eignungsnachweise“ ausgearbeitet. Die „Allgemeinen Grundsätze“ der LAGA greifen die dort formulierten Forderungen nach Beständigkeit sinngemäß auf. Die Anforderungen an polymere Komponenten des Dichtungssystems und die Nachweise der Beständigkeit gegen chemische und biologische Einwirkungen werden in anderen Beiträgen dieses Workshops behandelt. Bei der Beständigkeit mineralischer Dichtkomponenten sind neben den oben beschriebenen Effekten aus Vernässung und Frost vor allem zwei Arten der Einwirkungen zu betrachten, welche die Dichtwirkung stark beeinträchtigen:

- Zwangsverformungen der Dichtung infolge ungleicher Setzungen des Abfallkörpers und
- Trockenrisse aus Schrumpfen bei zyklischer Reduktion des Wassergehaltes.

Als Kriterium der Verträglichkeit von Zwangsverformungen mineralischer Abdichtungen wird in der GDA EMPFEHLUNG E 3-13 ein Nachweis der Beständigkeit vorgeschlagen, der eine erwartete Randfaserdehnung der Grenzdehnung im Bruchzustand gegenübergestellt. In den „Allgemeinen Grundsätzen“ wird eine verträgliche Biegebeanspruchung des Dichtungsmaterials gefordert, ohne dass der experimentelle Nachweis beschrieben ist. Für künftige technische Empfehlungen bietet sich an, die Wasserdurchlässigkeit direkt an Versuchskörpern mit einer axialen Dehnung $\varepsilon = 2 ‰$ zu ermitteln (WITT, 2005). Derartige Versuche sind noch zu standardisieren.

Im Hinblick auf Trockenrisse in mineralischen Dichtkomponenten gibt es zwei Hauptprobleme:

- Direkte Durchwurzelung der mineralischen Dichtung oder der Dichtungsoberflä-

che bei zu dünner oder zu trockener Rekultivierungsschicht und

- Trockenrissbildung in der mineralischen Dichtung durch periodischen Wasserentzug infolge zu hoher Wasserspannungen in den angrenzenden Schichten.

Der Gefahr eines durch Wurzeln verursachten Entzugs von Porenwasser aus mineralischen Dichtkomponenten muss mit einem wurzelsicheren Aufbau des Abdichtungssystems begegnet werden. Die Entwicklung der Wurzeln hängt in erster Linie von der Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht ab, aber auch von der Art und der Pflege des Bewuchses, von den klimatischen Bedingungen, der Exposition des Standortes und von der Qualität des Rekultivierungsbodens. Lediglich für Kunststoffdichtungsbahnen und vergleichbare geosynthetische Trennelemente liegen bisher abgesicherte Erfahrungen als Wurzelsperre vor. Will man auf diese Elemente verzichten, müssen der Bewuchs und die Schichtenfolge so abgestimmt werden, dass auch in den trockenen Sommermonaten der untere Bereich der Rekultivierungsschicht feucht bleibt. Die Mindestmächtigkeit einer Rekultivierungsschicht beträgt mit dieser Forderung für Standorte mit durchschnittlichem kontinentalem Klima und ca. 800 mm Jahresniederschlag 1,5 m. Für trockenere Standorte muss die Rekultivierungsschicht noch mächtiger sein. Empfehlungen zur Qualität und zum Einbau finden sich in den GDA EMPFEHLUNGEN E 2-31 und E 2-32.

Trockenrisse infolge unverträglichen Wassergehaltsschwankungen können grundsätzlich in allen mineralischen Dichtkomponenten, also auch in Kombinationsdichtungen auftreten. Die Gefährdung ist jedoch dort von untergeordneter Bedeutung. Eine Kunststoffdichtungsbahn stellt derzeit sowohl als Schutz vor Austrocknung als auch als Wurzelsperre die wirksamste Maßnahme dar. Eine genauere Untersuchung der Gefährdung und Bewertung der Schutzwirksamkeit ist dagegen für alle rein mineralischen Aufbauten erforderlich. Der Regelaufbau nach DepV für DK I ist mit der vorgeschlagenen Mächtigkeit der Rekultivierungsschicht von nur 1 m nicht a priori rissbeständig.

Physikalische Ursache von Trockenrissen ist die Volumenabnahme mit der Abgabe von Porenwasser bei aufgeprägten Matrixspannungen benachbarter Schichten oder infolge thermischer Einwirkungen. Im eingebauten, funktionsgemäßen Zustand besitzt jedes mineralische Dichtungsmaterial einen spezifischen Wassergehalt, dem eine bestimmte Matrixspannung zugeordnet ist. Jegliche Änderung des Wassergehaltes im Lebenszyklus der Dichtung ist mit Volumenänderungen des Dichtungsmaterials verbunden. Wasserentzug führt immer zu Schrumpfen. Ein zeitlich streuender Wassergehalt bzw. ein streuendes Matrixpotenzial ist Resultat der Wechselwirkung des lokalen Klimas mit dem speziellen Aufbau des Systems. Trockenrisse treten in einer mineralischen Dichtkomponente dann auf, wenn der materialspezifische kritische Wassergehalt unterschritten, bzw. wenn infolge der kritischen Matrixspannung die Zugfestigkeit des Materials überschritten wird. Diese Grenzwerte hängen von der mineralogischen Zusammensetzung des Materials, vom Spannungszustand aus der Überlagerung, von der Belastungsgeschichte und von den Einbaubedingungen ab. Allgemein ist davon auszugehen, dass immer dann eine Rissgefährdung vorliegt,

wenn im Lebenszyklus der Dichtung der Einbauwassergehalt unterschritten wird.

Ein rechnerischer Nachweis der Austrocknungssicherheit kann durch Vergleich des vorhandenen mit dem kritischen Wassergehalt bzw. Matrixpotenzial geführt werden, wenn die Kenngrößen bekannt sind (WITT U. ZEH, 2004; WITT, 2005). Das vorhandene Potenzial lässt sich durch Messungen in Testfeldern oder durch Simulationsrechnungen mit angenommenen künftigen Klimaereignissen ermitteln (GDA-EMPFEHLUNG E 2-30; ROESLER AND BENSON, 2002). Denkbar wäre auch die Definition eines regionaltypischen Bemessungsklimas, das der Simulation zugrunde gelegt wird.

Für das kritische Potenzial liegen bisher Erfahrungswerte für mineralische Dichtungskomponenten vor (RAMKE ET AL., 2002). Eine Ableitung des Grenzwertes aus den bekannten bodenmechanischen Kenngrößen des Dichtungsmaterials ist noch nicht zufriedenstellend möglich. Bewährt hat sich dagegen die experimentelle Bestimmung des auflastabhängigen kritischen Wassergehaltes einer Dichtung, ab dem eine Zunahme der Wasserdurchlässigkeit durch Rissbildung beobachtet wird. Durch Versuche in einer modifizierten Festwandzelle lassen sich Zyklen beliebige Feuchteschwankung nachfahren. Der Grenzwassergehalt eines Dichtungsmaterials lässt sich damit unter definierten Randbedingungen ermitteln und als Kennwert des Materials definieren (KÖDITZ ET AL., 2004).

Auf dieser Grundlage ist es möglich, Oberflächenabdichtungen mit mineralischen Dichtungskomponenten so zu bemessen und zu konstruieren, dass Schrumpfrisse langfristig minimiert werden. Umgekehrt ist es damit möglich, für definierte Systeme oder Klassen von Oberflächenabdichtungen und mit definierten klimatischen Randbedingungen den Nachweis der Schutzwirksamkeit bzw. Austrocknungssicherheit objektunabhängig zu erbringen. Rissgefährdete Aufbauten können durch zusätzliche Schutzschichten verbessert werden (WITT U. ZEH, 2005).

In den „Allgemeinen Grundsätzen“ der LAGA wird diese Nachweisstrategie und die verfügbare Versuchstechnik nicht betrachtet. Als Kriterium der Beständigkeit wird gefordert, dass eine mineralische Dichtung bei einer Wassergehaltsschwankung von $\Delta w = 10 \%$ bezogen auf den Einbauwassergehalt keine Schrumpfrisse zeigen darf. Da jedes mineralische Material seine spezifische Entwässerungskurve hat, ist diese Forderung in Anbetracht der Spannweite mineralischer Dichtungsmaterialien zu allgemein und stellt auch kein physikalisch abgesichertes Kriterium dar. Für Bentonitmatten ist eine Wassergehaltsschwankung dieser Größe unproblematisch, während ein gering- bis mittelplastischer Ton schon bei geringeren Schwankungen des Wassergehaltes reißen kann.

Anhang E der TA Abfall empfiehlt für mineralische Dichtungen den Einbau auf der nassen Seite des Proctor-Astes, alternativ eine Verdichtung bis auf einen Luftporenanteil $n_a \leq 5 \%$. Diese Forderung beruht auf der abgesicherten Erkenntnis, dass bei diesem überoptimalen Einbauwassergehalt aufgrund der geregelten Struktur der bindigen Bodenaggregate und Partikel die geringste Wasserdurchlässigkeit eines bindigen Bodens erreicht wird. Im Hinblick auf das Schrumpfpotenzial ist diese Einbauan-

weisung allerdings nachteilig. Bodenphysikalische Betrachtungen des Be- und Entwässerungsverhaltens bindiger Böden zeigen, dass das Schrumpfpotenzial umso größer ist, je höher der Einbauwassergehalt über dem Wert liegt, der sich unter den Randbedingungen im Feld später langfristig einstellt. Aus dieser Überlegung heraus wird zunehmend ein unteroptimaler Einbau auf der trockenen Seite der Verdichtungskurve empfohlen (HORN U. JUNGE, 2002). Die bodenkundlichen Grundlagen und erste Praxiserfahrungen sind in VIELHABER ET AL., 2006 dargestellt. Eigene Untersuchungen haben ergeben, dass die Zugfestigkeit bindiger Böden, die bei einem unteroptimalen Wassergehalt verdichtet werden, deutlich geringer ist, als optimal oder gar überoptimal eingebaute Böden (ZEH U. WITT, 2005). Unteroptimal eingebaute Böden haben zwar ein geringeres Schrumpfpotenzial, reißen aber schon bei geringeren Zugspannungen.

Die Erkenntnisse über die sich überlagernden nichtlinearen mechanischen und mikrohydraulischen Zusammenhänge während der Be- und Entwässerung bindiger Böden lassen noch keine allgemeingültige Aussage zum günstigsten Einbau zu. Der überoptimale Einbau, wie in den heutigen Regelwerken empfohlen und meist praktiziert, darf künftig nicht mehr gefordert werden. Ebenso sollte man künftig keine ausgeprägt plastischen Böden als Dichtungsmaterial einsetzen. Nach dem heutigen Kenntnisstand und eigenen Erfahrungen erreicht man ein ausgewogenes Verhältnis von Wasserdurchlässigkeit, Zugfestigkeit, Schrumpfpotenzial und Herstellbarkeit, wenn man leicht- bis mittelplastische Böden als Dichtungsmaterial verwendet, diese im Bereich des Proctor-Optimums oder auch geringfügig unteroptimal einbaut und möglichst hoch verdichtet.

Mit der Wahl des Dichtungsmaterials und der Einbautechnik kann man in gewissem Umfang die Schrumpfempfindlichkeit der Dichtung, also die Beanspruchbarkeit der Dichtung optimieren. Die starke Einflussmöglichkeit liegt aber in der optimierten Schutzwirkung des gesamten Systems, also in der Beherrschung der Beanspruchung durch eine möglichst mächtige Rekultivierungsschicht, durch die Vermeidung von Luftströmungen in der Dränageschicht und eventuell durch Schutzschichten. In diesem Zusammenhang muss die heute übliche und auch in der DepV vorgeschriebene grobe Kiesdränage hinterfragt werden. Mit einer Dränage aus Sand oder mit einer hierfür ausgelegten synthetischen Komponente könnten die Anforderung an den Schutz einer mineralischen Dichtkomponente und an die Dränage des Systems gleichzeitig erfüllt werden.

3 Zusammenfassung

Zum Schutz des Bodens und des Grundwassers sollen Oberflächenabdichtungen von Deponien die Neubildung von Sickerwasser minimieren. In Abhängigkeit des Schadstoffpotenzials bzw. der Deponieklasse werden in der aktuellen DepV Regelabdichtungssysteme vorgeschlagen. Bei gleichwertiger Funktion sind Alternativen zugelassen. Der Stand der Technik ist u. a. in den GDA Empfehlungen der DGGT zusammengestellt. Zur Beurteilung der Eignung alternativer Abdichtungskomponenten in Relation zu den Regelsystemen wurde im Auftrag der LAGA das Papier „All-

gemeine Grundsätze zur Eignungsbeurteilung“ erarbeitet, in dem allgemeine Anforderungen definiert sind.

Die geotechnischen Anforderungen an Oberflächenabdichtungssysteme lassen sich im Wesentlichen auf die Funktionen Dichtigkeit, Standsicherheit und Beständigkeit zurückführen. Hieraus leiten sich Eignungsanforderungen in Form von Materialkenngrößen, Abmessungen und Einbaubedingungen ab. Die Dichtigkeit oder Leistungsfähigkeit eines Systems betrifft die Zusickerung von infiltrierendem Niederschlagswasser in den Abfallkörper. Das in Regelwerken zu fordernde übergeordnete Kriterium sollte daher eine zulässige Durchsickerungsrate des Systems sein. In Anlehnung an die heutige Praxis ist theoretisch eine jährlich maximale Durchsickerungsrate von 150 mm für DK I / DK II sinnvoll. Die Forderung muss sich aber immer an der potenziellen Gefährdung durch den Standort orientieren. Das Regelsystem DK I und vergleichbare Alternativen erfüllen diese Anforderung. Unter Feldbedingungen ergeben sich bei intakter Dichtung deutlich geringere Raten. Der Unterschied zwischen den Alternativen liegt weniger in der anfänglichen Leistungsfähigkeit als in der Redundanz der Dichtungskomponenten und in der Robustheit der Systeme.

Der maßgebende Mechanismus der Standsicherheit eines Oberflächenabdichtungssystems ist das schichtparallele Gleiten. Die Sicherheit gegen dieses einfache Schadensszenario lässt sich hinreichend genau nachweisen. Die für die Anfangsstandsicherheit relevanten Kenngrößen müssen experimentell so ermittelt werden, dass auch eine Alterung bewertet werden kann. Ein Betrachtungszeitraum von bis zu 100 Jahren ist angemessen und ausreichend.

Im Hinblick auf die Beständigkeit sind an polymere und mineralische Komponenten in Oberflächenabdichtungen unterschiedliche Anforderungen zu stellen. Polymere Materialien sind neben der Strukturalterung thermischen, chemischen und biologischen Einwirkungen ausgesetzt. Die Langzeitbeständigkeit mineralischer Dichtungsmaterialien wird hauptsächlich durch den Wasserhaushalt im System bestimmt. Vernässungen von Dichtkomponenten führen zu Standsicherheitsdefiziten. In mineralischen Dichtungen führen Wurzeln oder Trockenstress benachbarter Schichten zu Wasserentzug und zu Schrumpfrissen. Der sicherste Schutz vor Durchwurzelung und Austrocknung einer mineralischen Schicht ist eine aufliegende Kunststoffdichtungsbahn. Rein mineralische Dichtungssysteme bedürfen einer optimal zusammengesetzten und möglichst mächtigen Rekultivierungsschicht. Der Regelaufbau für DK I erfüllt diese Anforderung nicht generell.

Die Beanspruchung einer mineralischen Dichtungskomponente lässt sich durch Simulation des langfristigen Wasserhaushaltes im System objektspezifisch abgrenzen. Die Beanspruchbarkeit, die verträgliche Schwankungsbreite des Wassergehaltes, lässt sich experimentell für die vorherrschenden Randbedingungen ermitteln. Die Beanspruchung kann für gegebene Klimaeinwirkungen nur durch den Aufbau beeinflusst werden, der ggf. durch zusätzliche Schutzschichten oder durch eine sandige Dränageschicht verbessert wird. Die Beanspruchbarkeit einer tonmineralischen Dichtung lässt sich durch die Art und die Einbaubedingungen des Dichtungsmaterials in

gewissem Umfang optimieren. Ausgeprägt plastische Böden wie auch der Einbau auf der nassen Seite des Proctor-Optimums führen zu einer geringen Beanspruchbarkeit und sind daher ungünstig.

4 Literatur

- Bräcker, W., 2005a: Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme durch die LAGA. 21. Fachtagung „Die sichere Deponie“, SKZ Würzburg 2005
- Bräcker, W., 2005b: AbfallwirtschaftsFakten 11: "Eignungsbeurteilung von unter Verwendung von Abfällen hergestellten mineralischen Deponieoberflächenabdichtungen", Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim, 2005; unter www.gewerbeaufsicht.niedersachsen.de
- DepV, 2002: Verordnung über Deponien und Langzeitlager, Anhang 1: Anf. a. d. geologische Barriere, Basis- und Oberflächenabdichtungssysteme, 24. 7. 2002, u. 12. 8. 2004
- DGGT (Hrsg.), 1997: GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten; Verlag Ernst&Sohn. Aktualisierungen unter <http://www.gdaonline.de>
- DIBt, 1995: Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen. Deutsches Institut für Bautechnik
- GDA Empfehlung E 2-7, 1998: Gleitsicherheit der Abdichtungssysteme. Bautechnik 9/1998
- GDA Empfehlung E 2-13, 1997: Verformungsnachweis für mineralische Abdichtungsschichten. GDA-Empfehlungen, 3. Auflage, 1997, S. 135-140, Verlag Ernst&Sohn
- GDA Empfehlung E 2-30, 2004: Modellierung des Wasserhaushalts der Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien, überarbeitete Fassung, www.gdaonline.de
- GDA Empfehlung E 2-31, 2006: Rekultivierungsschichten. Bautechnik 9/2006
- GDA Empfehlung E 2-32, 2000: Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien. Bautechnik 9/2000, überarbeitete Fassung, www.gdaonline.de
- Horn, R. u. Junge, T., 2002: Wege zur langfristig sicheren Abdichtung von Mülldeponien mit mineralischen Dichtschichten. In: EGLOFFSTEIN / BURKHARDT / CZURDA (Hrsg.) (2002): Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten 2002. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Bd. 125, Erich-Schmidt-Verlag. S. 167 – 182
- Huber, W., Schutz, S. u. Quentin, A., 2002: Statistische Auswertung des Sickerwasseranfalls auf bayrischen Deponien. Endbericht, LfU-Projekt 3250, Augsburg 2002
- Köditz, J., Witt, K. J. u. v. Maubeuge, K. P., 2004: Laboratory tests on the effect of static load to the desiccation of GBR-C. Proc. 3rd Europ. Geosynthetics Conf., Munich 2004
- Müller, W. W., 2004: Langzeit-Scherfestigkeit von Geokunststoffen aus mehreren Komponenten. In Stahlmann, J. (Hrsg.): 11. Braunschweiger Deponie- und Dichtwandseminar 2004, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft Nr. 74. S. 213-230
- Ramke, H.-G., Gartung, E., Heibroock, G., Lükewille, W., Melchior, S., Vielhaber, B., Bohne, K., Maier-Harth, U., Witt, K. J., Hrsg. (2002): Status-Workshop Austrock-

- nungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen, Höxteraner Berichte zu angewandten Umweltwissenschaften, Heft 03
- Roesler, A. C. u. Benson, C. H., 2002: Field Hydrology and Model Predictions for Final Covers in the Alternative Assessment Program - 2002, Geo Engineering Report No.02-08, Geo Engineering Program, University of Wisconsin-Madison, unter: <http://www.acap.dri.edu>
- Seeger, S., Böhm, H., Söhring, G. und Müller, W., 2000: Long term testing of geomembranes and geotextiles under shear stress. In Cancelli, A., Cazzuffi, D. u. Soccodato, C. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd Europ. Geosynthetics Conf. Bologna: Pàtron Editore 2000, S. 607-610
- Simon, F.-G. u. Müller, W. W., 2004: Standard and alternative landfill capping design in Germany. Environmental Science & Policy 7 (2004) pp. 277-290
- TA Abfall, 1991: Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. 2. AbfVwV, Teil 1: Technische Anleitung.....,Anhang E: Material- und Prüfungsanforderungen, 12. 3. 1991
- TA Siedlungsabfall (TASI), 1993: Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. 3. AbfVwV, Technische Anleitung....., 14. 5. 1993
- Vielhaber, B., Locker, J., Hütteroth, D., Junge, T. u. Melchior, S., 2006: "Trockener" Einbau von mineralischen Dichtungsschichten; Grundlagen und Praxiserfahrungen. In Henken-Mellies, U. (Hrsg.):17. Nürnberger Deponieseminar 2006, Abdichtung, Stilllegung und Nachsorge von Deponien. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Nürnberg, Heft 85, S. 129-146
- Witt, K. J. u. Zeh, R., 2004: Maßnahmen gegen Trockenrisse in mineralischen Abdichtungen. In Krahnert (Hrsg): Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 81, S. 83-98
- Witt, K. J., 2005: Plädoyer für eine angemessene Betrachtung des Langzeitaspektes bei der Planung und der Genehmigung von Oberflächenabdichtungen. In Egloffstein et al. (Hrsg.): Abschluss und Rekultivierung von Deponien und Altlasten 2005, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis 135, S. 81-100, Erich Schmidt Verlag
- Witt, K. J., Zeh, R., 2005: Wirkungsweise von Kapillarschutzschichten für mineralische Oberflächenabdichtungen. In Henken-Mellies (Hrsg.): 16. Nürnberger Deponieseminar 2005, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstitutes, Nürnberg, Heft 84, S. 233-246
- Zeh, R. u. Witt, K. J., 2005: Tensile Strength of Compacted Clays as a Criterion of Crack Initiation in Clay Liners of Landfills. Proc. Int. Conf. on Problematic Soils, 2005, Eastern Mediterranean University, Famagusta, N. Cyprus

Autor

Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt
Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Grundbau,
Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystr. 11c, D-99423 Weimar
Tel.: 03643-584560 Fax: 03643-584564
e-Mail: kj.witt@bauing.uni-weimar.de
Web: www.uni-weimar.de/geotechnik