

# Unorthodoxe Gedanken zur Eignungsfeststellung von mineralischen Abdichtungskomponenten für Oberflächenabdichtungen von Deponien

K. J. Witt

*Professur Grundbau, Bauhaus-Universität Weimar,  
Obmann DGGT AK 6.1: Geotechnik der Deponiebauwerke*

## *Zusammenfassung*

Die der Genehmigung von Deponien zugrunde liegenden Regelwerke geben Systemaufbauten für Oberflächenabdichtungen und Anforderungen an die Wasserdurchlässigkeiten mineralischer Komponenten vor. Gleichwertige Alternativen sind zugelassen. In den Grundsätzen zum Nachweis der Gleichwertigkeit werden an die Komponenten der Alternativen teils unverhältnismäßige Anforderungen gestellt. Die im Erd- und Grundbau üblichen Sicherheitsnachweise - Gegenüberstellung von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit innerhalb eines endlichen Lebenszyklus - sollten mit dem Ziel einer Systembemessung auch für Abdichtungssysteme von Deponien angewendet werden. Der Beitrag zeigt die sicherheitsrelevanten Aspekte anhand der Langzeitdichtigkeit und Langzeitbeständigkeit auf, diskutiert die daraus resultierenden Eignungsanforderungen und zeigt Wege für Nachweismethoden auf.

## *1 Einleitung*

Mit der Schließung einer Abfalldeponie beginnt die letzte Phase ihres Lebenszyklus, die Nachsorge und der Übergang in den geologischen Kreislauf. Oberflächenabdichtungen sollen die Umwelteinwirkungen der Deponie nachhaltig auf ein vertretbares Maß begrenzen. Das Dichtungssystem soll die unkontrollierte Emission von Deponiegas sowie die Verbreitung von Schadstoffen durch Erosion verhindern und zusammen mit der Rekultivierungsschicht und dem Bewuchs die Infiltration von Niederschlagswasser sowie überschüssiges Deponiesickerwasser minimieren. Die meisten deponiespezifischen Regelwerke der Industrieländer fordern bindend aber teils recht allgemein eine derartige Schutznahme, ohne das Schutzziel physikalisch zu definieren. Im EU-Recht wie auch in der nationalen Umsetzung, der *DepV (2002)*, sind anstelle von Emissionsgrenzwerten oder zulässigen Infiltrationsraten die Qualitätsanforderungen bezüglich Systemaufbau, Schichtstärken und Wasserdurchlässigkeiten beschrieben. Tabelle 1 zeigt eine Gegenüberstellung dieser Anforderungen für die unterschiedlichen Deponieklassen. Ausnahmeregelungen sind mit §14 Abs. 6 *DepV* den Genehmigungsbehörden (für bis zum 15. 7. 2005 betriebene Deponien) freigestellt, wenn der Nachweis erbracht wird, dass mit der Abdichtungsmaßnahme das Wohl der Allgemeinheit im Sinne der Anforderungen der *AbfAbIV (2001)* und der *DepV (2002)* erreicht wird.

Anforderungen an die Art und die Qualität der Materialien finden sich in der TA-Abfall, Anhang E sowie im Anhang 1 der *DepV*. In der Gruppe E 3 der Empfehlungen der DGGT Fachsektion „Geotechnik der Deponien und Altlasten“ (GDA-Empfehlungen) sind die Eignungsnachweise für alle Komponenten und Materialien näher beschrieben. Hier wird besonders auf die Empfehlungen E 3-1, E 3-7 bis -9, E 3-12 und E 3-30 verwiesen.

BRD (Deponieverordnung DepV, 2002)				EU-Richtlinie (1999)	
Systemelemente	DK 1	DK 2	DK3	nicht gefährlich	gefährlich
Oberfläche	Gefälle nach Abklingen der Setzungen $\geq 5\%$			k. A.	k. A.
Rekultivierungsschicht* $\geq 100\text{cm}$	oder Überdeckung mit gleicher Schutzwirkung, Ausbildung nutzungsabhängig		k. A.	$\geq 100\text{cm}$	$\geq 100\text{cm}$
Entwässerungsschicht $\geq 30\text{cm}$	vollflächig, $k_f \geq 1 \cdot 10^{-3}$			$\geq 50\text{cm}$	$\geq 50\text{cm}$
Schutzschicht	entfällt	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Kunststoff-Dichtungsbahn $\geq 0,25\text{cm}$	entfällt	Zulassung erf., vorzugsweise Recyclingmaterial	Zulassung erf., kein Recyclingmaterial	-	Ja
mineralische Dichtung $\geq 50\text{cm}$	$k_f \leq 5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ , $D_{Pr} > 95\%$ , feucht		$k_f \leq 5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ , $D_{Pr} > 95\%$ feucht	undurchlässig	undurchlässig
Ausgleichsschicht $\geq 50\text{cm}$	grobkörniger Boden nach DIN 18196			k. A.	k. A.
Gasdränschicht $\geq 30\text{cm}$	entfällt	Kalziumkarbonatanteil $\leq 10 \text{ M}\%$		erforderlich	nicht erforderlich
Abfall	Abf AbIV §3, §4		Anhang D, TA-Abfall	Siedlungsabfall, nicht gefährl. Abfälle (restl.)	gefährliche Abfälle

DepV quantifiziert die erforderlichen Eigenschaften der Rekultivierungsschicht genauer in Anhang 5  
k. A. – keine Angaben

**Tabelle 1:** Regelaufbauten von Oberflächenabdichtungen, Stand der Technik

Vom Arbeitskreis „Grundsätze der Deponietechnik und Sicherung von Altlasten“, AK GDSA, beim Deutschen Institut für Bautechnik, DIBt, wurde 1995 das Dokument „Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponieabdichtungssystemen“ publiziert, im weiteren *DIBt-Grundsätze* genannt. Unabhängig von den Regelaufbauten für Basis- und Oberflächenabdichtungen, die in den Verwaltungsvorschriften als Stand der Technik verstanden werden, werden in diesem Papier Anforderungen an die Dichtigkeit, mechanische Widerstandsfähigkeit, Beständigkeit und Herstellbarkeit der Dichtungselemente definiert. Die *DIBt-Grundsätze* sollten der Bewertung alternativer Dichtungssysteme zur Erteilung bauaufsichtlicher Zulassungen von Systemkomponenten durch das DIBt dienen. Diese bauaufsichtliche Zulassungen sollten im Sinne der Bauordnungen der Länder sog. Bauprodukte definieren, die projektunabhängig als Dichtungselemente in Abdichtungssystemen verwendet werden können, so dass die Anforderungen an die Wirksamkeit im Ganzen erfüllt werden. Einige Bentonitmatten (GTD) erhielten auf dieser Grundlage befristet eine Zulassung durch das DIBt. Die Befristungen sind mittlerweile abgelaufen. Eine Verlängerung wie auch die Zulassungen von neuen Produkten sind nicht möglich, da das DIBt dieses Zulassungswesen zwischenzeitlich wegen rechtlicher Widersprüche bei der Einstufung der Dichtungselemente als Bauprodukt eingestellt hat.

Der Regelaufbau einer Oberflächenabdichtung nach *DepV*, Tab. 1, oder eine als „technisch gleichwertig“ nachgewiesene Variante ist eine notwendige Voraussetzung für die Entlassung des Deponiebetreibers aus der Nachsorge der Deponie. Für Aufbauten, die dem Regelsystem nicht gleichwertig sind, kann diese „Entlassung aus der Nachsorge“ nicht erteilt werden. Der

Deponiebetreiber bleibt dann in der Verantwortung für künftige Emissionen. Wegen dieser enormen Tragweite werden zur objektiven Beurteilung und Genehmigung von Alternativen eindeutige, validierbare und handhabbare technische Regeln benötigt. Die *DIBt Grundsätze* gehen zwar in diese Richtung, decken aber nicht die heutige Rechtslage ab und zielen auch nicht speziell auf Oberflächenabdichtungen.

Durch die *LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“* wird derzeit im Auftrag der LAGA ein vergleichbares Papier erarbeitet, das sich speziell auf Abdichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungen von Deponien bezieht und diese Lücke schließen soll. Ziel ist die Definition von Anforderungen und die Erarbeitung von Grundlagen zur einheitlichen Beurteilung von Abdichtungskomponenten bei der Genehmigung von Dichtungssystemen, die von der Regeldichtung abweichen. Mit einer Geschäftsordnung gibt sich die Arbeitsgruppe das Mandat, auf der Grundlage dieses Papiers künftig anlassbezogen und objektunabhängig die Eignung von solchen Dichtungskomponenten zu beurteilen, für die keine hoheitliche Eignungsbeurteilung vorliegt. Das im Folgenden *LAGA-Grundsätze* genannte Papier greift sinngemäß die *DIBt-Grundsätze* auf, führt einige Aktualisierungen ein und definiert in knapper Form die allgemeinen Anforderungen an Dichtungskomponenten hinsichtlich der Kriterien Dichtigkeit, Mechanische Widerstandsfähigkeit, Beständigkeit und Herstellbarkeit. Die ansonsten allgemein gehaltene aktuelle Version dieses Papiers geht in einigen Punkten, die insbesondere die Dauerbeständigkeit von mineralischen Dichtungselementen sowie von Bentonitmatten in alternativen Aufbauten betreffen, über die bisherigen Grundsätze bei der Beurteilung der Gleichwertigkeit hinaus. Die Auslegung des Begriffes „Dauerbeständigkeit“ bleibt jedoch weiterhin offen (vgl. *Bräcker, 2005*).

Wegen der technischen und ökonomischen Tragweite und wegen der Konsequenzen bei der Umsetzung dieser *LAGA-Grundsätze* will dieser Beitrag rechtzeitig vor Inkrafttreten die Diskussion über die Sinnhaftigkeit einiger Forderungen anregen und mit einigen Betrachtungen zur Sicherheit und Zuverlässigkeit von Oberflächenabdichtungen die langfristigen umweltrelevanten Einflüsse aufzeigen. Dabei werden beispielhaft die Aspekte Langzeitdichtigkeit und Langzeitstandsicherheit betrachtet.

## 2 Sicherheit und Zuverlässigkeit

Im Ingenieurwesen orientiert sich die Bemessung an Grenzzuständen, dem Übergang der erwarteten Funktion zum Versagen. Die hinreichende Sicherheit einer Konstruktion oder eines Bauteils wird durch den Nachweis erbracht, dass ein Grenzzustand nicht erreicht wird, dass die aus den Materialwiderständen resultierende Beanspruchbarkeit größer ist, als die Beanspruchung, die sich aus den Einwirkungen ergibt. Für den Nachweis wird die charakteristische Beanspruchung  $E_k$  um einen Teilsicherheitsbeiwert erhöht, die charakteristische Beanspruchbarkeit  $R_k$  dagegen durch Division mit einem Teilsicherheitswert abgemindert. Die so ermittelten Bemessungswerte werden gegenübergestellt und es muss nachgewiesen werden:

$$\text{Beanspruchung } E_d \leq \text{Beanspruchbarkeit } R_d \quad (1)$$

Die Größe der Teilsicherheitsbeiwerte, Faktoren und Divisoren, richtet sich nach dem erforderlichen Sicherheitsniveau, das sich an den unvermeidlichen Unschärfen der Grenzzustandsbeschreibung, an der zu erwartenden Streuung der Parameter und an den Folgen eines Versagens orientiert. Dieser Betrachtung liegt zugrunde, dass die Anforderungen an die Si-

cherheit nicht willkürlich oder subjektiv empirisch festgelegt werden, sondern tatsächliche Risiken zu betrachten sind. Der Risikobegriff wird dabei als funktionale Verknüpfung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensmaß bei einer Verletzung des Grenzzustandes verstanden. Weitere Kriterien ergeben sich aus dem zeitlichen Verlauf der Schadensentwicklung, z. B. plötzlicher Bruch oder langsame Kriechverformung. So birgt die Rutschung an einer Deponieoberfläche im Vergleich zu dem Bruch eines Deiches selbst bei gleicher Eintrittswahrscheinlichkeit ein deutlich geringeres Risiko. An die Standsicherheit der Oberflächenabdichtung sind daher im Vergleich geringere Anforderungen zu stellen.

Überall dort, wo die Grenzzustandsfunktion aufgrund fehlender Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge oder der mathematischen Gesetzmäßigkeiten nicht bestimmbar ist, aber auch wenn die relevanten Daten für Einwirkungen und Widerstände nicht hinreichend exakt prognostiziert werden können, ist die Beobachtungsmethode angesagt. Die erwartungsgemäße Funktion der Konstruktion oder des Bauteils wird dabei durch Messungen nachgewiesen. Für den Fall, dass nicht akzeptierbare Zustände eintreten, dass vorab definierte Grenzwerte überschritten werden, wird durch Reparatur eingegriffen, indem die Widerstände erhöht oder die Einwirkungen abgemindert werden. Diese Vorgehensweise wird im Ingenieurwesen seit jeher praktiziert und hat sich bestens bewährt. Zur Bemessung werden nach den EU-Empfehlungen primäre Nutzungszyklen von 50 bis 100 Jahren empfohlen. Darüber hinaus gehende Qualitätsanforderungen sind unrealistisch, unangemessen und überspannen die Forderung nach nachhaltigen Bauwerken. Das Ewigkeitsprinzip kann ein Bauwerk nicht erfüllen. Nicht nur eine nachsorgelose Deponie, die gesamte Geologie unterliegt einem zeitlichen Wandel.

Bei Konstruktionen und Bauteilen, bei denen ein Nachweis nicht möglich oder nicht verhältnismäßig ist, weil nur ein geringes Risiko im Versagensfall vorliegt und gleichzeitig die erwartungsgemäße Funktion leicht zu erkennen ist, kann ein System auch ohne Messungen sich selbst überlassen werden. Mit der Bemessung und Konstruktion werden dann empirisch abgesicherte Materialeigenschaften gefordert. Der Sicherheitsnachweis reduziert sich schlicht auf den Vergleich von Soll- und Istwerten dieser Eigenschaften. Solche vorgegebene Parameter können im Falle einer Abdichtung Schichtdicken, Wasserdurchlässigkeiten, Biegeradien oder Mineralzusammensetzungen sein. Selbstverständlich kann auch bei dieser einfachen Vorgehensweise nicht a priori gefordert werden, dass das System für infinite Zeiträume die erwünschten Anforderungen vollständig erfüllt. Auch hierbei ist zu akzeptieren, dass durch Alterung, außergewöhnliche Einwirkungen oder aufgrund unerwarteter Streuungen der Materialeigenschaften lokal oder flächig, temporär oder bleibend die Grenzbedingungen verletzt werden können, so dass Unterhaltungsmaßnahmen oder Reparaturen erforderlich werden.

In Sicherheitsnachweisen des Erd- und Grundbaus, so auch bei Oberflächenabdichtungen von Deponien, werden zwei Arten von Grenzzuständen unterschieden, die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit.

Die Tragfähigkeit betrifft die Standsicherheit des Aufbaus auf den Böschungen, untergeordnet auch Sackungen des Abfallkörpers. Bei einer anfänglichen Böschungsneigung von  $1:n = 1:3$  ist der relevante Bruchmechanismus kein Bruchkörper mit tiefreichender gekrümmter Gleitfuge, sondern böschungsparalleles Abgleiten entlang Schichtgrenzen. Der Bruch wird durch eine reduzierte Scherfestigkeit oder durch lateral wirkende Strömungskräfte ausgelöst und kündigt sich meist durch Kriechverformungen und durch Zugrisse am Kopf der Rutschung an. Es handelt sich damit um die einfachste und ungefährlichste Art von Böschungsbrüchen.

Die Gebrauchstauglichkeit betrifft die Dichtfunktion des Systems. Auf Seiten der Beanspruchbarkeit ist die Wasserdurchlässigkeit des Dichtungselementes der relevante bodenphysikalische Parameter, die Beanspruchung wird durch das Klima, die Durchwurzelung und durch Zwangsverformungen aufgeprägt. Der Zusammenhang zwischen Klima, Wasserhaushalt und Dichtigkeit ist sehr komplex und dazu instationär. Eine exakte Prognose ist derzeit noch nicht möglich. Die Anforderung kann daher nur in der Forderung einer zulässigen Infiltrationsrate bestehen, die das System für eine zu betrachtende Zeitdauer zu garantieren hat. Die derzeitige Praxis, auf der sicheren Seite liegende empirisch abgesicherte Materialeigenschaften und Abmessungen für die Dichtungselemente zu fordern, ist daher konsequent, erlaubt jedoch nicht das Prädikat „dauerbeständig“. Dies gilt für die Regelabdichtungen und die Alternativen gleichermaßen. Die Beobachtungsmethode ist nach der oben erläuterten Sicherheitsphilosophie dort angemessen, wo von empirisch nachgewiesenen robusten Konstruktionen abgewichen wird.

### 3 Langzeitdichtigkeit

Die Infiltrationsrate durch eine mineralische Dichtungskomponente einer Oberflächenabdichtung ist proportional zur effektiven Wasserdurchlässigkeit der Dichtung. Im Feld liegt das hydraulische Potenzial etwa bei  $i = 1$ , die effektive Wasserdurchlässigkeit liegt wegen der kleinen Gradienten und der Teilsättigung immer unter dem im Labor nach DIN 18 130 ermittelte  $k$ -Wert. Über längere Zeiträume betrachtet können zwei Einwirkungen die Dichtfunktion beeinträchtigen:

- Zwangsverformungen infolge ungleicher Setzungen des Abfallkörpers
- Trockenrisse aus Schrumpfen bei Reduktion des Wassergehaltes.

Zur Verträglichkeit der Zwangsverformungen mineralischer Abdichtungen wurde von *Scherbeck u. Jessberger (1992)* ein Ansatz entwickelt, der in der *GDA-Empfehlung E 3-13 (1997)* berücksichtigt wurde. Als Nachweis der Beständigkeit wird eine erwartete Randfaserdehnung  $\epsilon_{RF}$  der Grenzdehnung im Bruchzustand  $\epsilon_{zq}$  gegenübergestellt. Auflastspannungen können berücksichtigt werden. Neuere Untersuchungen wurden von *Thomas (2004)* publiziert. Mit sehr anschaulichen Laborversuchen werden in dieser Arbeit die Verformungen im Querschnitt von biegebelasteten mineralischen Oberflächenabdichtungen unter Auflast visualisiert. Als eines der Ergebnisse zeigte sich, dass die neutrale Faser entgegen der bisherigen Annahmen sehr nah am Rand der Dichtung verläuft, die Zugdehnung wird in den bisherigen Ansätzen unterschätzt. Auch wenn sich mit genaueren Berechnungen die Randdehnungen für vorgegebene Biegebeanspruchungen ermitteln lassen, fehlt das Kriterium der Beanspruchbarkeit, i.e. der Grenzwert einer materialspezifisch zulässigen Dehnung, ab der unter den realen Spannungszuständen die Wasserdurchlässigkeit zunimmt.

Zur Eignungsbeurteilung von mineralischen Dichtungsmaterialien werden in jüngster Zeit vermehrt Biegezugversuche gefordert, um den Nachweis nach *GDA E 3-13* zu führen. Die *LAGA-Grundsätze* greifen diese Art der Beanspruchung ebenfalls auf und fordern als Eignungsnachweis der mechanischen Widerstandsfähigkeit u. a. eine Biegebeanspruchung der mineralischen Dichtungskomponente bis zu einem Krümmungsradius von  $R = 200$  m, ohne dass sich die Wasserdurchlässigkeit erhöht. Dieses Kriterium ist jedoch nicht eindeutig, wenn man fordert, dass die Ränder der Dichtung bei der Durchbiegung unverschieblich sind. Bei konstantem Biegeradius hängt die Randdehnung nichtlinear von der Größe des Versuchskörpers ab. Bei dicken biegebelasteten Proben ist darüber hinaus noch eine überdrückte Zone zu erwarten, so dass sich die Wasserdurchlässigkeit des gesamten Versuchskörpers gar verrin-

gert. Auch fehlen in den Erläuterungen der aktuellen Version der *LAGA-Grundsätze* Hinweise, mit welcher Versuchstechnik an den durch Biegung gedehnten Versuchskörper die Wasserdurchlässigkeit ermittelt werden soll. Die Forderung ist in dieser Form als Eignungskriterium unvollständig und nicht zweckmäßig. Sinnvoller wäre die Definition einer Längsstreckung des Probekörpers, an dem dann, ggf. nach einer Trocknung auf einen vorgegebenen Wassergehalt (vgl. unten), ein Durchlässigkeitsversuch gefahren wird. Aus praktischen Überlegungen heraus halte ich den Nachweis für zweckmäßig, dass der Grenzwert der Wasserdurchlässigkeit bei einer Längsstreckung der Probe von  $\varepsilon_l = -2 \text{ ‰}$  nachgewiesen wird (in der Nomenklatur der Bodenmechanik sind Streckungen negative Dehnungen). Diese Längsdehnung ist in einer Oberflächenabdichtung beispielsweise zu erwarten, wenn sich auf einer Fläche mit einem Durchmesser von ca. 45 m eine Absenkung mit einem Stichmaß von 1,3 m einstellt, ein m. E. realistischer Grenzwert.

Aus Aufgrabungen und Feldbeobachtungen, wie sie u. a. von *Maier-Harth & Melchior (2001)*, *Henken-Mellies & Gartung (2002)* und *Roesler & Benson (2002)* publiziert wurden, lassen sich für Oberflächenabdichtungen mit einem rein mineralischen Aufbau im Hinblick auf Trockenrisse zwei Hauptprobleme ableiten:

- Direkte Durchwurzelung der mineralischen Dichtung oder der Dichtungsoberfläche bei zu dünner oder zu trockener Rekultivierungsschicht
- Trockenrißbildung in der mineralischen Dichtung durch periodischen Wasserentzug infolge zu hoher Wasserspannungen in den angrenzenden Schichten. Ursache kann ein kapillarer Aufstieg zur trockenen Rekultivierungsschicht oder ein konvektiver Wasserdampftransport in der durchlüfteten Entwässerungsschicht sein

Auch bei Kombinationsdichtungen mit oberliegender Kunststoffdichtungsbahn (KDB), z. B. bei dem Regelaufbau nach DepV für DK 2 u. DK 3, kann es zu einem allmählichen Austrocknen der mineralischen Dichtung kommen, wenn das Auflager aus grobkörnigem Boden besteht und sich eine Gasströmung mit geringer Wassersättigung einstellt. Die Gefährdung ist jedoch von untergeordneter Bedeutung, die KDB stellt derzeit sowohl als Schutz vor Austrocknung als auch als Wurzelsperre die wirksamste Maßnahme dar.

Bei rein mineralischen Aufbauten, Regeldichtung nach DepV DK 1 und Alternativen, können die oben beschriebenen Phänomene innerhalb einiger Jahre nach Fertigstellung auftreten. Physikalische Ursache von Trockenrissen ist die Unterschreitung einer kritischen Wasserspannung in der mineralischen Dichtung. Den Feld- und Labormessungen zufolge liegt diese kritische Saugspannung je nach Typ der Dichtungskomponente, Mineralbestand, Struktur, Dichte und Belastungsgeschichte in der Größenordnung von  $\Psi_{\text{krit}} = 250$  bis  $500 \text{ hPa}$ . Für Bentonitmatten und für spezielle Böden sind auch höhere Grenzspannungen verträglich (*Siegmund et al., 2001, Gröngröft et al., 2003*).

Das in der Dichtung vorhandene Potenzial  $\Psi_{\text{vorh}}$  ist Resultat der Wechselwirkung des lokalen Klimas mit dem speziellen Aufbau des Systems. Das kritische Potenzial  $\Psi_{\text{krit}}$ , bei dem Trockenrisse beobachtet werden, ist eine Kenngröße des Dichtungserdstoffes und hängt von den in Gl. 2 angegebenen Parametern und Randbedingungen ab:

$$\psi_{krit} = f(\sigma_o, t_{max}, E, C_{Mat}, A_{Ri\beta}) \quad (2)$$

mit

$\sigma_o = \sum \gamma_i \cdot d_i$ : Auflastspannung über Dichtung

$t_{max} = f(\sigma_o, c, \varphi, \psi)$ : wasserspannungsabhängige Zugfestigkeit des Bodens

$E$  = Young'scher Modul (Zugspannung zu Dehnung)

$C_{Mat} = f(\text{Tongehalt}, \rho_{Einbau}, \text{Energie}_{Einbau}, \text{Struktur})$ : Material- und Einbaukonstante

$A_{Ri\beta} = f(\text{Anzahl Risse, max. zul. Ri\betatiefe, Ri\betalänge})$ : genormte Ri\betafläche.

Ein rechnerischer Nachweis der Ri\betasicherheit könnte durch Vergleich des vorhandenen mit dem kritischen Potenzial nach Gl. 3 geführt werden, wenn die Kenngrößen bekannt sind:

$$\text{Nachweis der Ri\betasicherheit durch Potenzialvergleich:} \quad \psi_{vorh} \leq \psi_{krit} \quad (3)$$

Das vorhandene Potenzial lässt sich durch Messungen in Testfeldern oder durch Simulationsrechnungen mit angenommenen künftigen Klimaereignissen ermitteln (*GDA-Empfehlung E 2-30*). 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 (250-500 hPa). Eine analytische Ableitung des Wertes aus den bekannten bodenmechanischen Kenngrößen des Dichtungserdstoffs ist noch nicht möglich, Ansätze zur Abschätzung von Obergrenzen werden in *Zeh u. Witt (2005)* abgeleitet. Die Problematik der Trockenrisse wurde in *Ramke et al. (2002)* ausführlich diskutiert, die Einflussparameter, Grenzbedingungen sowie Strategien zur Reduzierung der Trockenri\betagefährdung werden u. a. in *Heibroek et al. (2004)*, *Witt u. Zeh (2004)*, *Zeh u. Witt (2005)* behandelt.

Ein bewährter Weg ist die experimentelle Bestimmung des auflastabhängigen kritischen Wassergehaltes des Dichtungsmaterials, ab dem eine Zunahme der Wasserdurchlässigkeit durch Ri\bbildung beobachtet wird. Der Grenzwert hängt von den Einbaubedingungen und vom Einbauwassergehalt ab. Durch Versuche in einer modifizierten Festwandzelle lassen sich in Trocken-Na\beta-Zyklen beliebige natürliche Feuchteschwankungen nachfahren. Der Grenzwassergehalt eines Dichtungsmaterials lässt sich damit unter definierten Randbedingungen ermitteln. Die Probe wird in der Festwandzelle getrocknet, die Ri\bbentstehung wird durch eine sog. pneumatische Falle exakt gemessen (*Witt u. Siegmund, 2001*, *Köditz et al. 2004*).

Der Nachweis der Austrocknungssicherheit kann anstelle mit den Potenzialen auch durch gegenüberstellen vorhandener und kritischer Wassergehalte geführt werden:

$$\text{Nachweis der Ri\betasicherheit durch Vergleich der Wassergehalte} \quad w_{vorh} \geq w_{krit} \quad (4)$$

Auch hier lässt sich der vorhandene Wassergehalt  $w_{vorh}$  durch numerische Simulation unter Zuhilfenahme der Entwässerungscharakteristik (Wasserspannungskurve) abschätzen und durch Messungen im Feld verifizieren. Den kritischen Wassergehalt  $w_{krit}$  erhält man unter Berücksichtigung eines Sicherheitszuschlages aus der Eignungsprüfung, die mit definierten Randbedingungen (Auflast, Einbauwassergehalt, Streckung, Trocknung usw.) gefahren wird.

Die Bestimmung des kritischen Wassergehaltes in der Festwandzelle hat sich für Bentonitmatten bewährt, eine zuverlässigere Methode zur Ermittlung dieses Grenzwertes gibt es derzeit nicht. Der Materialwiderstand ist damit bekannt, der Aufbau des Systems muss unter Be-

rücksichtigung von Exposition, Klima und Nachnutzung so geplant und konstruiert werden, dass mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit der kritische Wassergehalt in der Dichtungskomponente nicht unterschritten wird. Durch Kapillarschutzschichten, wie sie in *Siegmund et al. (2002)* und *Witt et al. (2004)* beschrieben sind, wie auch durch den Einbau mit unteroptimalem Wassergehalt, lassen sich die klimatischen Einwirkungen abschwächen bzw. die Widerstände erhöhen (vgl. *Witt u. Zeh, 2004*). Quellfähige mineralische Komponenten, z. B. Bentonitmatten, bieten darüber hinaus mit dem Regenerierungsvermögen eine gewisse Sicherheitsreserve.

Auf dieser Grundlage ist es möglich, Oberflächenabdichtungen mit mineralischen Dichtungskomponenten so zu bemessen und zu konstruieren, dass die Schrumpfrißbildung langfristig minimiert wird. Ob bei der relativ geringen Auflast selbst bei geringen Wassergehaltsreduktion aufgrund der damit verbundenen unvermeidlichen Längsdehnung dennoch lokal Risse auf den großen Flächen auftreten, ist derzeit noch nicht untersucht und Gegenstand der aktuellen Forschung.

In den *LAGA-Grundsätzen* werden diese Nachweisstrategie und die verfügbare Versuchstechnik nicht betrachtet. Da die Eignung von Dichtungskomponenten objektunabhängig definiert werden soll, geht diese Empfehlung von einem festen Maß für verträgliche Wassergehaltsänderungen aus. Als Kriterium der Beständigkeit wird gefordert, dass die 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 der mineralischen Dichtungskomponenten zu allgemein und stellt auch kein physikalisch abgesichertes Kriterium dar. Für Bentonitmatten ist eine derartige Wassergehaltsschwankung zum Beispiel unproblematisch, während ein gering- bis mittelplastischer Ton dieses Kriterium meist nicht erfüllt.

Als weitere Eignungsanforderung wird in den *LAGA-Grundsätzen* die Beständigkeit gegenüber erhöhten Temperaturen aufgeführt. Maßgebend sind eine ständige Einwirkung von 30°C, wechselnde Einwirkungen von 0 bis 30°C sowie eine 3-jährige Beanspruchung mit 40°C. Nach bisherigen Erfahrungen mit konvektionsoffenen mineralischen Dichtungsschichten gibt es keinen natürlichen Boden, der ohne ständige Befeuchtung derart hohen Temperaturen austrocknungsfrei standhält. Dies gilt für die Regeldichtung gleichermaßen wie für Alternative Aufbauten. Eigene unpublizierte Berechnungen zeigen, dass bei unserem kontinentalen Klima im langjährigen Mittel die Temperatur in der Dichtungskomponente einer Oberflächenabdichtung über die Jahreszyklen betrachtet nicht über 20 °C steigt.

Der Gefahr der Durchwurzelung muss mit einem wurzelsicheren Aufbau begegnet werden. Die Entwicklung der Wurzeln hängt ab 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 durchschnittlichen klimatischen Standortbedingungen 1,5 m. Für trockene Standorte muss die Rekultivierungsschicht mächtiger sein. Hinweise zur Qualität und zum Einbau finden sich in den GDA Empfehlungen E 2-31 und E 2-32.



#### 4 Langzeitstandsicherheit

Zur Analyse der Standsicherheit von Böschungen wird das Gleichgewicht kinematisch möglicher Bruchmechanismen untersucht. Der für Oberflächendichtungen maßgebende Mechanismus ist ein Gleiten in den Schichtgrenzen des Aufbaus. Das System versagt, wenn in einer Schicht oder Schichtgrenze die für das Gleichgewicht erforderlichen Scherkräfte nicht aufgenommen bzw. in der Schichtgrenze nicht übertragen werden können. Bei dem rechnerischen Nachweis werden auf der Einwirkseite Gewichts- und Strömungskräfte betrachtet, auf der Widerstandsseite die Scherfestigkeit in der Gleitfläche, Reibung und Kohäsion bzw. Adhäsion. Spannungs-Verformungsbeziehungen werden nicht berücksichtigt, mit dieser statischen Analyse sind daher keine Aussagen über Verformungen oder Verformungsgeschwindigkeiten möglich. Der Faktor Zeit kann nur über die Bemessungswerte der Kenngrößen berücksichtigt werden. Der Nachweis nach dem globalen Sicherheitskonzept ist *GDA E 2-7* zu entnehmen, nach dem neuen Sicherheitskonzept wird der Standsicherheitsnachweis im Grenzzustand GZ1C (DIN 1054) bzw. GEO (EC 7) mit Bemessungswerten der Scherfestigkeit geführt.

Beim böschungsp parallelen Abgleiten von Schichten kommt es am talseitigen Teil der Rutschung zu Aufwölbungen oder Abstütungen, was zu einer Selbsthemmung führt. Diese Art von Rutschungen, die nie progressiv verlaufen, zählen zu den harmlosesten Versagensformen von Böschungen im Hinblick auf die Folgen.

Zum Bau einer Oberflächenabdichtung werden die übertragbaren Schwerkräfte der Systemkomponenten in Eignungsuntersuchungen ermittelt (*GDA 3-8*). 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, Vliesen und Bentonitmatten können Fasern altern oder verspröden, was unter Dauerlast zu einem reduzierten Schubverbund führen kann.

Frosteinwirkungen wie auch permanente Wasserzutritte müssen konstruktiv vermieden werden. Wird die Scherfestigkeit in den Schichtgrenzen mit den richtigen Materialien und Spannungszuständen durchgeführt, erhält man verlässliche Kenngrößen. Mit den in DIN 4084 bzw. DIN 1054 empfohlenen Sicherheits- und Teilsicherheitsfaktoren erreicht man damit ein ausreichendes Sicherheitsniveau. Die Langzeitstandsicherheit von mineralischen Schichten kann mit der Restscherfestigkeit (post-peak-Verhalten) als außergewöhnlicher Lastfall nachgewiesen werden. Zum Nachweis der Langzeit-Schubübertragung von Bentonitmatten bieten sich 2 Strategien an. Für verschiedene Produkte wurden in Reaktorversuchen unter zeitraffenden Milieubedingungen Belastungsversuche gefahren, mit denen sich eine äquivalente Standzeit errechnen lässt (*Thies et al., 2002, Simon u. Müller, 2004*). Ein anderer Ansatz geht 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 in einem Sicherheitsnachweis angesetzt werden.

Die *LAGA-Grundsätze* fordern als Eignungsnachweis für Materialien die „Dauerbeständigkeit“ aller Komponenten, welche die Standsicherheit beeinflussen. Dies gilt für mineralische wie für polymere Baustoffe. In den *DIBt-Grundsätzen* wird „Dauerbeständigkeit“ als Zeitraum verstanden, der mehrere 100 Jahre umfassen kann. In Anbetracht des geringen Risikos einer evtl. Hautrutschung, die sich darüber hinaus noch durch Kriechverformungen ankündigt und nicht progressiv verläuft, halte ich einen Nachweis der Widerstände für einen Zeitraum bis zu 100 Jahren als vollkommen ausreichend. Weitergehende Forderungen übersehen, dass die Langzeitabbauprozesse des Deponiekörpers zu einer Abflachung der Böschung führt und der unvermeidliche Bewuchs einer aus der Nachsorge und Pflege entlassenen Fläche in dieser Zeit zu einer standsicherheitserhöhenden Durchwurzelung führen wird. Dem Konzept der Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau folgend müssen Langzeitbetrachtungen auch die Langzeiteinwirkungen mit den zugehörigen Widerkehrintervallen extremer Ereignisse betrachten, so ein 100jähriges Niederschlagsereignis, Erdbeben, die vollkommene Aufsättigung der Überdeckung oder generelle klimatische Veränderungen. Auch ohne Abminderung der Schubübertragung infolge Alterung halten die nach dem heutigen Stand der Technik bemessenen Böschungen diesen extremen Einwirkungen nicht stand. Die Anforderungen an eine Materialbeständigkeit >>100 Jahre sind daher fraglich.

## 5 *Schlussfolgerungen*

Die zentrale Aufgabe der Oberflächenabdichtung von Deponien ist die langfristige Begrenzung der Infiltration von Niederschlagswasser. Die Dichtfunktion und die Standsicherheit müssen über den betrachteten Zeitraum des Lebenszyklus der Deponie garantiert werden. Nach den bisherigen Erfahrungen besteht die Langzeitgefährdung der Dichtfunktion in der Durchwurzelung und in der allmählichen Austrocknung durch Wasserentzug. Diese Gefahr betrifft besonders rein mineralische Aufbauten, wie sie als Regelsystem für DK 1 in der DepV vorgeschlagen und vielfach als gleichwertige Alternative zur Kombinationsdichtung für Deponien DK 2 genehmigt werden. Der Gesetzgeber negiert diese potenzielle Leistungsminderung und setzt voraus, dass für die Regelsysteme eine Dauerbeständigkeit gegeben ist. Die bisherige Erfahrung mit mineralischen Aufbauten zeigt, dass durch den Schichtaufbau und durch geeignete Materialauswahl hinreichend robuste Systeme baubar sind. Eine Bemessung und ein Sicherheitsnachweis sind für Standsicherheitsfragen präzise und für die Austrocknungsproblematik mit einer gewissen Unschärfe möglich. Die relevanten Parameter lassen sich in Eignungsuntersuchungen ermitteln, die allerdings teilweise über bodenmechanische Standardversuche hinausgehen.

Zusammenfassend ist zur Eignungsfeststellung von Oberflächenabdichtung festzuhalten:

- Gegen die Gefahr der Durchwurzelung ist die Kombinationsdichtung die zuverlässigste Lösung. Rein mineralische Aufbauten können nur durch mächtige Überdeckungen und durch Pflege des Bewuchses langfristig geschützt werden. Sie sind daher unter praktischen Gesichtspunkten langfristig nicht durchwurzelungssicher.
- Die Austrocknungsgefahr von rein mineralischen Dichtungen kann auf der Einwirkseite durch den Systemaufbau, auf der Widerstandsseite durch geeignete Materialien und Einbautechniken beherrscht werden. Der Grenzwassergehalt einer mineralischen Dichtungskomponente lässt sich als Materialkennwert in Trocknungsversuchen ermitteln. Der ungünstigste Wassergehalt in der Dichtung kann unter Berücksichtigung der klimatischen

Einwirkungen durch standortspezifische Simulationsrechnungen abgeschätzt und durch Feldmessungen verifiziert werden.

- Die Scherfestigkeit der Materialien lässt sich mit den verfügbaren Versuchstechniken hinreichend genau ermitteln. Für polymere Komponenten lässt sich die Alterung in Reaktorversuchen simulieren. Die Langzeitstandsicherheit wird jedoch eher von außergewöhnlichen Einwirkungen beeinflusst, als durch die Alterung von Materialien. Der maßgebende Gleitmechanismus, ein Schichtgleiten im Abdichtungssystem der Deponieoberfläche, stellt unter Beachtung der möglichen Folgen ein vergleichsweise geringes Risiko dar.

Beim Entwurf und beim Bau von Oberflächenabdichtungen für Deponien verbleiben Unsicherheiten und Einschränkungen im Langzeitverhalten. Der rechtliche Akt der Entlassung des Betreibers aus der Nachsorge der Deponie wird mit der Erwartung verknüpft, dass auch die Oberflächendichtung nachsorgefrei ihre Leistungsfähigkeit behält. Wir tun mit dem Stand der Technik derzeit unser Bestes, Messungen und Aufgrabungen belegen dies. Der Anspruch, dass eine Dichtung über Zeiträume von vielen hundert Jahren ohne Nachsorge, Pflege und ggf. Reparatur ihre Leistungsfähigkeit behält ist nicht angemessen und auch nicht notwendig. Es verbleiben die oben beschriebenen Risiken, die genannt und akzeptiert werden müssen.

### *Literatur*

***Abfallablagerungsverordnung AbfAbIV (2001):*** Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen vom 20. 2. 2001, BGBl. IS. 2807

***Bräcker, W. (2005):*** Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme durch die LAGA. Fachtagung „Die sichere Deponie“, SKZ Würzburg, Feb. 2005

***Deponieverordnung DepV (2002):*** Verordnung über Deponien und Langzeitlager und zur Änderung der Abfallablagerungsverordnung, BUM Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2002 Teil 1 Nr. 52, 29. 07. 2002

***Deutsches Institut für Bautechnik (1995):*** Grundsätze für den Eignungsnachweis von Dichtungselementen in Deponiedichtungssystemen. Eigenverlag DIBt, 1995

***Deutsches Institut für Normung, e.V., Normausschuss Bauwesen (1985):*** Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen von baulichen Anlagen

***EU-Richtlinie, Europäische Gemeinschaft, EG (1999):*** Richtlinie über Abfalldeponien, Richtlinie 1999/31/EG Des Rates, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 182 vom 26.04.1999

***GDA Empfehlung E 2-7:*** 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](http://www.gdaonline.de)

***GDA Empfehlung E 2-31:*** Rekultivierungsschichten. Bautechnik 9/2000, überarbeitete Fassung, [www.gdaonline.de](http://www.gdaonline.de)

***GDA Empfehlung E 2-32:*** Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien. Bautechnik

9/2000, überarbeitete Fassung, [www.gdaonline.de](http://www.gdaonline.de)

- GDA Empfehlung E 3-1:** Eignungsprüfung mineralischer Oberflächen- und Basisabdichtungen. GDA-Empfehlungen, 3. Auflage, 1997, S. 220-224, Verlag Ernst&Sohn
- GDA Empfehlung E 3-7:** Erosions- und Suffosionsbeständigkeit von mineralischen Abdichtungsmaterialien. GDA-Empfehlungen, 3. Auflage, 1997, S. 244-246, Verlag Ernst&Sohn
- GDA Empfehlung E 3-8:** Reibungsverhalten von Geokunststoffen. Bautechnik 9/1997,
- GDA Empfehlung E 3-9:** Eignungsprüfung für Geokunststoffe. GDA-Empfehlungen, 3. Auflage, 1997, S. 248-263, Verlag Ernst&Sohn
- GDA Empfehlung E 3-12:** Eignungsprüfung mineralischer Entwässerungsschichten. GDA-Empfehlungen, 3. Auflage, 1997, S. 268-277, Verlag Ernst&Sohn
- Gröngröft, A., Berger, W., Tresselt, K. u. Miehlich, G. (2003):** Abdichtung von Deponien mit aufbereitetem Baggergut: Ergebnisse eines mehrjährigen Feldversuches. In: Katzenbach u. Witt (Hrsg.): 1. Symposium Umweltgeotechnik der DGGT, Weimar, 2003, Schriftenreihe Geotechnik, Heft 10, Universitätsverlag Bauhaus-Universität Weimar, S. 311-323
- Heibroek, G., Zeh, R. M. u. Witt, K. J. (2004):** Tensile strength of compacted clays. in: Schanz (Ed). :Unsaturated Soils: Experimental Studies. Proc. Int. Conf.“From Experimental Evidence towards Numerical Modelling of Unsaturated Soils“, Vol. I, Weimar, Springer Proceedings in Physics 2004
- Henken-Mellies, U. u. Gartung, E. (2002):** Wirksamkeit einfacher Deponieoberflächenabdeckungen: Langzeituntersuchung an einem Versuchsfeld in Aurach. Müll und Abfall, Heft 1, 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. 3<sup>rd</sup> Europ. Geosynthetics Conf., Munich 2004
- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“ (2004):** Allgemeine Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme. Arbeitspapier vom 10. 09. 2004
- Maier-Harth, U. u. Melchior, S. (2001):** Überprüfung der Wirksamkeit der 10 Jahre alten mineralischen Oberflächenabdichtung der ehemaligen Industriemülldeponie Prael in Sprendlingen – Kreis Mainz-Bingen, in: Maier-Harth (Hrsg.): Oberflächenabdichtungen und Rekultivierung von Deponien, 4. Deponieseminar des Geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz, 28.03.2001, Mainz
- Ramke, H.-G., Gartung, E., Heibroek, G., Lükewille, W., Melchior, S., Vielhaber, B., Bohne, K., Maier-Harth, U., Witt, K. J., Hrsg. (2002):** Tagungsband - Austrocknungsverhalten mineralischer Abdichtungsschichten in Deponie-Oberflächenabdichtungssystemen, Status-Workshop, 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>
- Scherbeck, R. u. Jessberger, H.-L. (1992):** Zur Bewertung der Verformbarkeit mineralischer Abdichtungsschichten. Bautechnik 9, 1992

- Siegmund, M., Witt, K. J. u., Alexiew, N. (2001):** Calcium-Bentonitmatten unter Feuchtigkeitsänderungen, 7. Informations- und Vortragsveranstaltung über , Kunststoffe in der Geotechnik', März 2001 München, DGGT
- 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):** Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12. März 1991; GMBI Nr. 8, S. 139, 1991
- TA Siedlungsabfall (1993):** Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen vom 14. Mai 1993; GBAnz. Nr. 99a, S. 139, 1993
- Thies, M. Gerloff, C., Müller, W. & Seeger (2002):** Long-term shear testing of geosynthetic clay liners. Zanzinger et al. (Eds): Proc. Int. Symp. Clay Geosynthetic Barriers, pp97-104.
- Thomas, H. (2004):** Zum Einfluss von Geogitterbewehrungen auf das Reißverhalten von mineralischen Deponieabdichtungen. Dissertation Fakultät Agrar- und Umweltwissenschaften, Universität Rostock
- Witt K. J. u. Siegmund, M. (2001):** Laboratory testing of GCLs under changing humidity. Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia Second Conference, Euro Waste, Sardinia 2001, Vol III, 197-205
- 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., Zeh, R. u. Fabian, F. (2004):** Kapillarschutzschichten für mineralische Dichtungskomponenten in Oberflächenabdichtungen. Müll und Abfall, 11/2004, S. 540-546
- Zeh, R. u. Witt, K. J. (2005):** Tensile strength of compacted clay as a criterion of crack-initiation in clay liners of landfills. Int. Conf. On Problematic Soils, Famagusta, Cyprus, May 2005 (submitted)

*Anschrift des Autors: Univ. Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt  
Bauhaus-Universität Weimar  
Coudraystr. 11C  
99421 Weimar*

tel: (03643) 58-4560 fax: (03643) 58-4564  
e-mail: [kj.witt@uni-weimar.de](mailto:kj.witt@uni-weimar.de)  
net: [www.uni-weimar.de/geotechnik](http://www.uni-weimar.de/geotechnik)