

# Die Standsicherheit im Lebenszyklus von Oberflächenabdichtungssystemen

## Zusammenfassung

Standsicherheitsdefizite können im Lebenszyklus einer Deponie global in Form von tiefgreifenden Rutschungen im Abfallkörper oder lokal als Rutschung im Schichtsystem der Oberflächenabdichtung auftreten. Beide Szenarien lassen sich mit den Methoden der Bodenmechanik gut modellieren und realitätsnah quantifizieren. Der Nachweis der Gleitsicherheit mit dem Teilsicherheitskonzept wird erläutert. Im zweiten Teil des Beitrages werden die Einwirkungen und Bodenwiderstände mit ihrer Variabilität im Lebenszyklus einer Deponie diskutiert und daraus abgeleitet, dass wegen Effekten der Alterung der Materialien und aus Unkenntnis der langfristigen klimatischen Einwirkungen die Langzeit-Standsicherheit nur unscharf prognostiziert werden kann. Diese Unsicherheiten können aber durch geeignete Materialien und robuste Bauweisen minimiert werden. Es verbleiben als kritische Punkte im Leben einer Oberflächenabdichtung die Einflussfaktoren Rekultivierungsschicht und Bewuchs, dessen Entwicklung langfristig die Funktion und Standsicherheit der Abdichtung mit bestimmt.

## 1 Einleitung

Die letzte und längste Phase im Lebenszyklus einer Abfalldeponie betrifft die Nachsorge und den Übergang in den geologischen Kreislauf. Oberflächenabdichtungen sollen für diesen unbestimmt langen Zeitraum die Umwelteinwirkungen der Deponie nachhaltig auf ein vertretbares Maß begrenzen. Das aktuelle Deponierecht und die Genehmigungsgrundsätze der Länder erheben die Forderung, dass der Abfallkörper selbst, wie auch die Oberflächenabdichtung, dauerhaft standsicher sein müssen, wobei diese unbestimmte Periode als >100 Jahre verstanden wird (*Bräcker 2005*). Ein Nachweis der Langzeitstandsicherheit, wie er etwa für Untertagedeponien zu führen ist, wird in den Regelwerken für Deponien bis Klassen III nicht explizit gefordert.

Unter dem Begriff Gesamtstandsicherheit werden Versagensszenarien zusammengefasst, die den Bruch oder das Gleiten des gesamten Deponiekörpers, ggf. einschließlich Deponieuntergrund betreffen. Bodenmechanisch handelt es sich immer um Scherversagen entlang ungünstiger Gleitflächen im Abfallkörper bzw. im geologischen Untergrund. Im weitesten Sinne zählt auch der klassische Grundbruch, das reine Versagen des Baugrundes zu dieser Gruppe. Diese Großrutschungen unterscheiden sich weder im Bruchphänomen noch in der Mechanik von den Böschungs-, Geländebrüchen oder Hangdeformationen, wie wir sie aus natürlichen Massenbewegungen als geologisches Risiko kennen (*Genske 2008*). Lediglich die Scher- und Festigkeitsparameter der beteiligten Materialien sind abfallspezifisch. Außerdem können Basis- und Zwischendichtungen präferentielle Gleitflächen vorgeben. Derartige Standsicherheitsfragen lassen sich auf der Grundlage einer umfassenden Baugrunderkundung und unter Zuhilfenahme einer einfachen Abfallmechanik mit hinreichender Genauigkeit modellieren und mit den in der Geotechnik bekannten erdstatischen Methoden quantitativ analysieren. Langfristig kann die Standsicherheit zum einen durch abbaubedingte Änderungen der Scherfestigkeit des Abfallkörpers beeinflusst werden, zum anderen durch den Wasserhaushalt im Abfallkörper und durch Änderungen der Grundwassersituation. Beides lässt sich zuverlässig abschätzen, so dass eine weitreichende Prognose der Entwicklung der Gesamtstandsicherheit möglich ist.

Die zweite Standsicherheitsgefährdung betrifft die Deponieoberfläche und hier die Standsicherheit des Oberflächenabdichtungssystems. Als Versagensszenario kann Oberflächenerosion der Rekultivierungsschicht, Kriechen einzelner Schichten mit den finalen Rutschungen von Schichtpaketen in Form von schichtparallelem Gleiten auftreten. Alle drei Phänomene werden primär vom Wasserhaushalt und von dem Materialverhalten der eingesetzten Komponenten und Stoffe beeinflusst. Klimaeinwirkungen sind thermische Einflüsse und die sich aus der Infiltration des Niederschlags ergebenden Feuchteänderungen und Schichtwasserabflüsse sowie Schädigungen durch den Bewuchs. Auf der Widerstandsseite können sich Änderungen der physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Stoffe infolge Alterung, Trocknung oder Vernässung im Laufe des Lebenszyklus ergeben. Bei einem Versagen der Oberflächenabdichtung durch Gleiten handelt es sich um ein vergleichsweise harmloses Schadensszenario, das sich durch einfache und klare statische Nachweise modellieren lässt. Die Problematik der Langzeitprognose der Standsicherheit liegt hier in der zuverlässigen Parameteridentifikation, da keine Erfahrungen über die mögliche Entwicklung extremer klimatischer Einwirkungen über den hier betrachteten, ungewöhnlich langen Lebenszyklus vorliegen, in dem keine systematische Überwachung oder Unterhaltung vorgesehen ist.

Dieser Beitrag behandelt schwerpunktmäßig den Standsicherheitsnachweis für Oberflächenabdichtungssysteme und gibt Hinweise zur Berücksichtigung von möglichen Risiken, wie sie im Laufe des Lebenszyklus infolge Unschärfen und Unsicherheiten der Einwirkungen und der Widerstände auftreten können. Er will vermitteln, wie der Nachweis der Standsicherheit nach den aktuellen Regelwerken zu führen ist und welche Prognosen realistischereweise möglich sind.

Unabhängig von diesen Fragen der Standsicherheit treten bei Oberflächenabdichtungen mit dem Nachweis der Gebrauchstauglichkeit Probleme auf. Dies betrifft vor allem die Langzeitfunktion der Dichtungselemente unter Verformungseinfluss. Allmählich aufgezwungene Biegeverformungen und Zerrungen der Oberfläche als Folge der Setzungen aus dem biologischen Abbau und der Konsolidation des Abfallkörpers werden bisher in der Ingenieurpraxis nicht in der erforderlichen Tiefe berücksichtigt. Die daraus resultierende Gefährdung der Funktion einer Oberflächenabdichtung lassen sich derzeit noch nicht befriedigend analysieren, da bis heute weder die Abfallmechanik über die erforderlichen Modelle und Stoffgesetze verfügt, noch genügend Wissen über das Materialverhalten solcher Verbundsysteme unter der Kombination aus Alterung und Verformung bekannt ist (*Witt 2007a und 2007b*).

## 2 Methoden zum Nachweis der Standsicherheit

### 2.1 Standsicherheitsnachweise nach dem Teilsicherheitskonzept

In der Geotechnik werden beim Nachweis der Standsicherheit Grenzzustände betrachtet. Die Sicherheit einer Konstruktion oder eines Bauteils wird dadurch nachgewiesen, dass ein Grenzzustand nicht erreicht wird, dass die aus den Materialwiderständen resultierende Beanspruchbarkeit größer ist, als die Beanspruchung, die sich aus den Einwirkungen ergibt.

Bei dem früher üblichen globalen Sicherheitskonzept wurden ungünstige Einwirkungen und Widerstände ins Verhältnis gesetzt und daraus ein Sicherheitsfaktor  $\eta \geq 1$  ermittelt. Beim Nachweis der Gleitsicherheit und der Gesamtstandsicherheit ist der Sicherheitsfaktor definiert als Verhältnis der tatsächlich mobilisierten Scherfestigkeit und der Scherfestigkeit, die im Grenzzustand wirken würde:

$$\eta = \frac{\text{Scherfestigkeit im Grenzzustand}}{\text{mobilisierte Scherfestigkeit}} = \frac{c' + \sigma \cdot \tan \varphi'}{\tau_{mob}} \quad (1)$$

Ebenso können widerstehende Kräfte oder Momente mit aktivierenden ins Verhältnis gesetzt werden. Einen umfassenden Überblick über Nachweismethoden und Sicherheitsdefinitionen findet sich in *Abramson et al 2002*. Das hier angewendete Berechnungsverfahren und die erforderliche Größe des Sicherheitsfaktors waren bislang in DIN 4084 (1984) vorgegeben. Für den Lastfall 1, ständige und regelmäßig auftretende Verkehrslasten, musste nach DIN 4084 ein Sicherheitsfaktor von  $\eta \geq 1,4$  (Gesamtstandsicherheit, Lamellenverfahren) bzw.  $\eta \geq 1,3$  (böschungsparalleles Gleiten bei  $c > 20 \text{ kN/m}^2$ ) nachgewiesen werden.

Für den nun nach dem aktuellen Normenwerk anzuwendenden Nachweis der Standsicherheit nach dem Teilsicherheitskonzept wird die charakteristische Beanspruchung  $E_k$  um einen Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkung  $\gamma_E$  erhöht, die charakteristische Beanspruchbarkeit  $R_k$  dagegen durch Division mit einem Teilsicherheitswert des Widerstandes  $\gamma_R$  abgemindert (Gl. 3). Die so ermittelten Bemessungswerte werden gegenübergestellt und es muss nachgewiesen werden, dass über den Lebenszyklus betrachtet für alle Bemessungssituationen gilt:

$$\text{Beanspruchung } E_d \leq \text{Beanspruchbarkeit } R_d \quad (2)$$

mit

$$E_d = E_k \cdot \gamma_E \quad ; \quad R_d = R_k / \gamma_R \quad \text{für } \gamma_E, \gamma_R \geq 1 \quad (3)$$

Der Grad der Inanspruchnahme der Sicherheitsreserven wird durch den Ausnutzungsgrad  $\mu \leq 1$  ausgedrückt, der näherungsweise als Reziprokwert des früheren Sicherheitsfaktors verstanden werden kann.

$$\mu = \frac{\text{Bemessungswert der Einwirkung } E_d}{\text{Bemessungswert des Widerstandes } R_d} = \frac{\tau_{d, mob}}{c'_d + \sigma \cdot \tan \varphi'_d} \quad (4)$$

Die Größe der Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_E$  und  $\gamma_R$  sollten sich explizit an dem erforderlichen Sicherheitsniveau orientieren, implizit an den unvermeidlichen Unschärfen der Grenzzustandsbeschreibung, an der zu erwartenden Streuung der Parameter und an den Folgen eines Versagens. Dieser Betrachtung liegt zugrunde, dass die Anforderungen an die Sicherheit nicht willkürlich oder subjektiv empirisch festgelegt werden, sondern tatsächliche Risiken zu betrachten sind (*GRUSIBAU 1985*). 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 das Ver-

sagen der Oberflächenabdichtung im Vergleich zu einer Rutschung der gesamten Deponie auf ihrem Auflager bei gleicher Eintrittswahrscheinlichkeit ein deutlich geringeres Risiko. An das Sicherheitsniveau der Oberflächenabdichtung wären daher vergleichsweise geringere Anforderungen zu stellen, da einerseits der Schaden von seiner zeitlichen Entwicklung langsam und i. A. ohne Gefahr für Menschenleben abläuft und andererseits generell die Möglichkeit der Reparatur und Sanierung vor wie nach einem Bruch besteht.

Die wesentlichen Grundlagen der Nachweisführung nach dem heute verbindlichen Teilsicherheitskonzept und die Größe der erforderlichen Teilsicherheitsbeiwerte sind durch die Normen *DIN 4084*, *DIN 1054* und Eurocode 7 (*DIN EN 1997-1*) gegeben. Weitere Festlegungen und einen Abgleich der nationalen und europäischen Norm gibt das derzeit im Gelbdruck befindliche Normenhandbuch zu *DIN EN 1997-1* und *DIN 1054*. Sowohl zum Gleitnachweis für Oberflächenabdichtungen, als auch zum Nachweis der Gesamtstandsicherheit ist das Verfahren 3 (GEO-3) anzuwenden, welches nach der bisher gültigen Norm *DIN 1054 (01/2005)* als Grenzzustand des Verlustes der Gesamttragfähigkeit (GZ 1C) bei einem Böschungs- oder Geländebruch beschrieben wird. Versagen tritt durch große Verformungen oder durch eine nicht ausreichende Scherfestigkeit in den Schichtgrenzen oder innerhalb von Gleitflächen, Schichtflächen des Untergrundes oder Schichten des Abdichtungssystems ein.

Um die verschiedenen standsicherheitsrelevanten Situationen im Lebenszyklus des Bauwerkes zu berücksichtigen, werden in dem Normenhandbuch Bemessungssituationen definiert, die etwa den bisher betrachteten Lastfällen entsprechen. Dabei werden ständige (BS-P), vorübergehende (BS-T) und außergewöhnliche (BS-A) Bemessungssituationen unterschieden. Die in dem hierauf abgestimmten Entwurf der Empfehlung *GDA E 2-7* für die Standsicherheitsnachweise von Oberflächenabdichtungen vorgesehenen Bemessungssituationen und die jeweils zu berücksichtigenden Einwirkungen sind in *Tab. 1* zusammengestellt. Die im Grenzzustand GEO-3 maßgebenden Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Bodenkenngrößen (Scherwiderstände) sind in *Tab. 2* angegeben. Diese Werte gelten sowohl für den Gleitnachweis, als auch für den Nachweis der Gesamtstandsicherheit.

**Tab. 1:** Einwirkungen und Bemessungssituationen beim Nachweis der Standsicherheit von Abdichtungssystemen im Grenzzustand GEO-3

	<b>Definition</b>	<b>Einwirkungen</b>
<b>BS-P</b>	Bemessungssituation für ständige Einwirkungen, auf die Funktionszeit des Bauwerkes ausgelegt	Eigengewicht (Abdichtung und Überlagerung), Einstau der Drainage Schneelast
<b>BS-T</b>	Bemessungssituation für vorübergehende Einwirkungen, gültig für zeitlich begrenzte Zustände (im wesentlichen Bauzustand)	Eigengewicht (Abdichtung und Überlagerung), Einstau der Drainage bauzeitliche Verkehrslasten
<b>BS-A</b>	Bemessungssituation für außergewöhnliche Einwirkungen, Bezug zu Bedingungen des Tragwerkes oder seiner Umgebung	Eigengewicht (Abdichtung und Überlagerung), Einstau der Drainage Kombinationen aus Schneelast, bauzeitlichen Verkehrslasten und Zusatzlasten

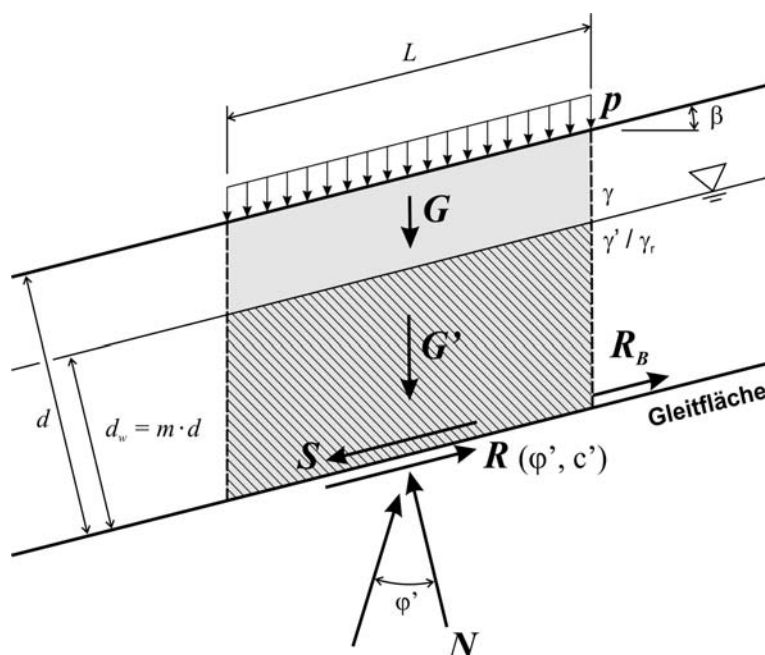
Im direkten Vergleich mit dem bisher global geführten Nachweis lässt sich vermuten, dass durch die geringeren Sicherheitsanforderungen das Sicherheitsniveau auf ca. 90 % (Gesamtstandsicherheit, Lamellenverfahren) bzw. 96 % (Gleiten bei  $c_k > 20 \text{ kN/m}^2$ ) herabgesetzt ist. Tatsächlich ist aber zu berücksichtigen, dass der Ausgangspunkt des Nachweises mit Teilsicherheiten charakteristische Bodenkenngrößen  $\varphi_k$  und  $c_k$  sind, die als vorsichtige Mittelwerte oder konservative Schätzwerte und nicht etwa als Laborwerte festzulegen sind. Insofern verbleibt dem Aufsteller der erdstatischen Berechnung ein subjektiver Spielraum, in dem er die natürliche Streuung und die Unschärfe der Kennwertermittlung zu berücksichtigen hat.

**Tab. 2:** Teilsicherheitsbeiwerte zur Bemessung im Grenzzustand GEO-3

Bemerkung	Formelzeichen	Bemessungssituation		
		BS-P	BS-T	BS-A
<i>Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Beanspruchungen</i>				
ständige Einwirkungen	$\gamma_G$	1,00	1,00	1,00
ungünstige veränderliche Einwirkungen	$\gamma_Q$	1,30	1,20	1,00
<i>Teilsicherheitsbeiwerte für Bodenkenngrößen (Scherwiderstände)</i>				
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des Bodens	$\gamma_\varphi$	1,25	1,15	1,10
Reibungsbeiwert $\tan \delta'$ in Kontaktfuge zu Geokunststoffen	$\gamma_\delta$	1,25	1,15	1,10
Kohäsion $c'$ des Bodens	$\gamma_c$	1,25	1,15	1,10
Adhäsion $a'$ in Kontaktfuge zu Geokunststoffen	$\gamma_a$	1,25	1,15	1,10

## 2.2 Nachweis der Gleitsicherheit von Oberflächenabdichtungssystemen

Zum Nachweis der Standsicherheit einer Oberflächenabdichtung wird die Gleitsicherheit für einen angenommenen Scherbruch in den Schichten des Abdichtungssystems oder in den Kontaktflächen zwischen den Schichten untersucht. Hierbei werden in allen potentiellen Scherfugen die stabilisierenden und destabilisierenden Scherkräfte gegenübergestellt. Der aktivierbare Widerstand wird schichtintern durch die innere Scherfestigkeit ( $\tan \varphi'$  und  $c'$ )



**Abb.1:** Schichtparalleles Gleiten eines teilweise durchströmten Abdichtungssystems: Definition von Schichthöhen und Kräften am Böschungselement

repräsentiert. Gleiches gilt für Kontaktfugen von Bodenschichten. Die Scherfestigkeit im Kontakt zu Geokunststoffen oder sonstigen nichtmineralischen Bauteilen wird durch die Kontaktscherfestigkeit ( $\tan \delta'$  und  $a'$ ) repräsentiert. Bei mächtigen Wasserhaushaltsschichten muss dieser Gleitsicherheitsnachweis bis in den Abfallkörper geführt werden, da infolge mächtiger Überlagerungen auch tiefliegende böschungparallele Gleitfugen auftreten können.

Als Grundlage für die Standsicherheitsberechnung eines zum Teil eingestauten 1-Schicht-Systems sind in *Abb. 1* die geometrischen Definitionen und die bodenmechanisch relevanten Kenngrößen zusammengestellt. Das Bodenelement ist mit einer konstanten Einstauhöhe beaufschlagt, in der ein böschungparalleler Wasserfluss stattfindet. Die Wasserspiegelhöhe in der Schicht wird in Relation zur Gesamtschichtdicke durch den Faktor  $m$  charakterisiert. Beim Nachweis der Gleitsicherheit des Abdichtungssystems wird für alle potentiellen Gleitflächen der Bemessungswert der Beanspruchung  $E_d$  dem Bemessungswert des Widerstandes  $R_d$  gegenübergestellt. Der Ausnutzungsgrad  $\mu$  des Abdichtungssystems wird durch das Verhältnis von Einwirkungen und Widerständen beschrieben (*Gl. 6*). Das System ist ausreichend standsicher, wenn die folgenden Ungleichungen erfüllt sind:

$$R_d - E_d \geq 0 \quad (5)$$

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} \leq 1 \quad (6)$$

Nach der Definition des Entwurfs der *GDA E 2-7* sind beim Standsicherheitsnachweis Einwirkungen aus der Gewichtskraft  $G_d$  und einer Verkehrslast  $P_d$  als hangparallele Komponenten in den untersuchten Gleitflächen zu berücksichtigen. Zusätzlich ist die innerhalb der durchströmten Schichtbereiche wirksame schichtparallele Strömungskraft anzusetzen. Im Regelfall wirkt sie in der Dränschicht, bei einer extremen Aufsättigung der Überlagerung oder bei Ausfall der Dränage auch als außergewöhnliche Belastung in der Rekultivierungsschicht. Kennzeichnend für Oberflächenabdichtungen ist, dass das Dichtungselement als Stauer wirkt, selbst nicht wassergesättigt ist und auch unterhalb keine Porenwasserdrücke wirken. Die auf das Böschungselement von oben und von unten wirkenden Erddrücke werden bei dieser Modellierung als unendlich lange (infinite) Böschung vernachlässigt. Bei kurzen Böschungslängen besteht die Möglichkeit, am Böschungsfuß eine Stützkraft als stabilisierende Komponente zu berücksichtigen.



Wie bereits durch die Definition der Bemessungssituationen deutlich wird, sind Verkehrslasten nach dem Nutzungszeitpunkt im Lebenszyklus der Abdichtung zu berücksichtigen. Im Detail ist bei der ständigen Bemessungssituation (BS-P), gültig im dauerhaften Nutzungsstadium, eine Schneelast als nicht ständige Belastung vorgesehen. Zur Ermittlung der Belastung ist der Deponiestandort im Hinblick auf seine lokal relevante Schneelastzone und die Höhenlage einzuordnen. Hinweise und Empfehlungen zur Ermittlung der Schneelast sind in *DIN 1055-5* enthalten.

Bauzeitlich vorhandene Belastungen, z. B. aus Baustellenverkehr, sind durch die vorübergehende Bemessungssituation (BS-T) abgedeckt. Neben einer pauschal gleichmäßigen Flächenlast ist die Berücksichtigung der real durch Baugeräte auf die Abdichtung einwirkenden Belastung als Kombination aus statischem und dynamischem Lastanteil üblich. Der statische Lastanteil wird durch das Eigengewicht des Baugerätes bestimmt. Der dynamische Lastanteil ist außerdem, ausgehend von einer definierten Basisgeschwindigkeit, von einer gerätespezifischen Bremsverzögerung abhängig. Beide Anteile der Verkehrslast haben mit zunehmender Tiefenlage der untersuchten Gleitfuge eine abnehmende Wirkung. Grund hierfür ist im statischen Belastungsfall die Lastausbreitung und im dynamischen der tiefenabhängige Schwingbeiwert. Die Berechnung der dynamischen Belastung anhand des tiefenabhängigen Schwingbeiwertes ist konform zu den Vorgaben der *DIN 1054* und ist aufgrund der oft nur schwer ermittelbaren Gerätekennwerte der praktikabelste Ansatz zur Ermittlung der Belastung. Für tiefere Gleitfugen wird zwangsläufig die gleichmäßige Flächenlast die dominante nicht ständige Beanspruchung der Abdichtung. Detaillierte Empfehlungen zur Ermittlung der nicht ständigen Lasten im Bauzustand sind der *EBGEO* zu entnehmen.

Weitere Belastungen finden vor allem im Zusammenhang mit der außergewöhnlichen Belastungssituation (BS-A) Berücksichtigung. Sind gleichzeitig mehrere Verkehrslasten bei der Standsicherheitsanalyse anzuwenden, müssen Einwirkungskombinationen mit dem Ziel der Feststellung der ungünstigsten Belastungssituation gebildet werden.

Für eine angenommene ständige Bemessungssituation (BS-P) kann das charakteristische Gewicht einer teilweise schichtparallel durchströmten Schicht eines Abdichtungssystems, z. B. mineralische Dränageschicht, wie folgt ermittelt werden:

$$G_k = (\gamma_k \cdot (1 - m) + \gamma'_k \cdot m) \cdot d \cdot L \quad (7)$$

Besteht das Abdichtungssystem aus mehreren unterschiedlichen Schichten, setzt sich das charakteristische Gewicht  $G_k$  aus der Summe der Schichtgewichte zusammen.

$$G_k = \sum (\gamma_{k,i} \cdot (1 - m) + \gamma'_{k,i} \cdot m) \cdot d_i \cdot L \quad (8)$$

$$S_k = \gamma_{w,k} \cdot d_w \cdot L \cdot \sin \beta \quad (9)$$

$$P_k = p_k \cdot L \quad (10)$$

Hierbei sind:

$\gamma_k, \gamma'_{k, k}$	charakteristische Wichte des Bodens (erdfeucht, unter Auftrieb und wassergesättigt)
$\gamma_{w,k}$	charakteristischer Wichte des Wassers
$p_k$	charakteristischer Wert der Verkehrslast (Ersatzlast eines Fahrzeugs, Schnee, etc.)
$m$	Faktor, $m = d_w / d$
$d$	Dicke der Schicht (orthogonal zur Oberfläche)
$d_w$	Dicke der durchströmten Schicht (orthogonal zur Oberfläche)
$L$	Länge des betrachteten Böschungselements (parallel zur Oberfläche)
$\beta$	Neigung der Böschung relativ zur Horizontalen

Für den Nachweis der Gleitsicherheit eines Abdichtungssystems sind die charakteristischen Einwirkungen unter Berücksichtigung des Grenzzustandes und der Bemessungssituation durch Multiplikation mit Teilsicherheitsbeiwerten,  $\gamma_G$  für ständige Einwirkungen und  $\gamma_Q$  für nicht ständige Einwirkungen, zu erhöhen. Die Beanspruchung wird dann wie folgt zusammengefasst:

$$E_d = G_k \cdot \gamma_G \cdot \sin \beta + S_k \cdot \gamma_G + P_k \cdot \gamma_Q \cdot \sin \beta \quad (11)$$

Bei Standsicherheitsanalysen im geotechnischen Grenzzustand GEO-3 werden Widerstände durch Bemessungswerte der Scherfestigkeit in den untersuchten Gleitfugen aktiviert. Die Bemessungsscherfestigkeit wird durch Abminderung der charakteristischen Scherfestigkeit,  $\tan \varphi'_k$  und  $c'_k$ , mit den ebenfalls in *Tab. 2* zusammengestellten Teilsicherheitsbeiwerten in Abhängigkeit der Bemessungssituation ermittelt. Der aktivierbare Scherwiderstand in einer Gleitfuge ist als innere Scherfestigkeit wie folgt darstellbar:

$$R_d = (G_k + P_k) \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi_d + c_d \cdot L + E_p \quad (12)$$

Hierbei sind:

$\varphi_d$  Bemessungswert des Reibungswinkels;  $\tan \varphi_d = \tan \varphi_k / \gamma_\varphi$

$c_d$  Bemessungswert der Kohäsion;  $c_d = c_k / \gamma_c$

Wird die Scherfestigkeit in einer Kontaktfuge mit Geokunststoffen untersucht, sind sinngemäß die charakteristischen Werte der Kontaktscherfestigkeit,  $\tan \delta'_k$  und  $a'_k$ , zu verwenden. Die Bemessungswerte der Scherparameter werden analog zur inneren Scherfestigkeit ermittelt.

Die Festlegung der in den potentiellen Gleitfugen eines Abdichtungssystems vorhandenen Scherparameter ist entscheidend für die Standsicherheit von Oberflächenabdichtungen. Die charakteristischen Scherparameter  $\varphi'_k$ ,  $\delta'_k$ ,  $c'_k$  und  $a'_k$  basieren meist auf den in Laborversuchen ermittelten Versuchswerten  $\varphi'_0$ ,  $\delta'_0$ ,  $c'_0$  und  $a'_0$ . Um repräsentative Versuchsergebnisse zu erhalten sind die Versuche mit den tatsächlichen Böden und Materialien und bei einem möglichst realitätsnahen Spannungsniveau zu fahren. Für Scherversuche mit Geokunststoffen gilt *GDA E 3-8*. Um Unsicherheiten der Kennwerte resultierend aus der typischen Parameterstreuung und der versuchsbedingten Unschärfe zu berücksichtigen, sind die Laborergebnisse wie folgt in charakteristische Kennwerte umzurechnen:

$$\tan \varphi'_k = \frac{\tan \varphi_0}{1,1}; \quad \tan \delta'_k = \frac{\tan \delta_0}{1,1} \quad (13)$$

$$c'_k = \frac{c_0}{1,3}; \quad a'_k = \frac{a_0}{2,0} \quad (14)$$

Werden die Schereigenschaften durch eine ausreichend große Anzahl von Versuchen repräsentiert, kann auf diese pauschale Abminderung nach den Gleichungen 13 u. 14 verzichtet werden. Die charakteristischen Werte sind dann als vorsichtige Schätzung des Mittelwertes des Versuchsergebnisse nach *DIN EN 1997-1* festzulegen. Für Kontaktfugen mit Geokunststoffen darf der Abminderungsfaktor der Laborwerte der Adhäsion jedoch nicht kleiner als 1,5 sein (*GDA 3-8*).

Der Ausnutzungsgrad der Scherfestigkeit einer Oberflächenabdichtung ist durch Gegenüberstellen von Einwirkungen und Widerständen nach Gl. 6 berechnet. In Gl. 15 ist für ein teilweise durchströmtes Mehrschichtsystem der Berechnungsansatz des Ausnutzungsgrades geschlossen dargestellt. Die Schichten 1-k liegen oberhalb des Wasserspiegels, so das cha-

rakteristische Feuchtraumgewicht  $\gamma_{k,i}$  zu berücksichtigen ist, in den durchströmten Schichten k+1 bis n ist das Auftriebsraumgewicht  $\gamma'_{k,i}$  anzusetzen.

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} = \frac{\sin \beta \left[ (1-m) \cdot \gamma_G \cdot \sum_{i=1}^k d_i \cdot \gamma_{k,i} + m \cdot \gamma_G \cdot \sum_{i=k+1}^n d_i \cdot (\gamma'_{k,i} + \gamma_w) + p_k \cdot \gamma_Q \right]}{c'_d + \cos \beta \cdot \tan \varphi_d \left[ (1-m) \cdot \sum_{i=1}^k d_i \cdot \gamma_{k,i} + m \cdot \sum_{i=k+1}^n d_i \cdot \gamma'_{k,i} + p_k \right]} \quad (15)$$

Die charakteristischen Scherparameter, die unter Feldbedingungen über lange Zeiträume mobilisierbar sind, bestimmen wesentlich das Ergebnis des Standsicherheitsnachweises. Speziell eine in den Kontaktflächen angesetzte Kohäsion bzw. Adhäsion kann leicht zu einer Überschätzung der tatsächlichen Standsicherheit bzw. Unterschätzung des tatsächlichen Ausnutzungsgrades führen. Dieser Scherwiderstand ist nicht nur besonders empfindlich gegenüber Änderungen des Wassergehalts mineralischer Schichten, die bei der Ermittlung versuchstechnisch erforderliche Normalspannung liegt meist weit über dem realen Überlagerungsdruck, so dass eine Inanspruchnahme dieses von der Konsolidationsspannung abhängigen Widerstandes in Schichtfugen sehr ungewiss ist (vgl. *Blümel u. Heinemann 2005*). Insbesondere vor dem Hintergrund eines möglichen Wasseraufstaus an Kunststoffdichtungsbahnen und Wassertransportvorgängen an Geotextilien wird auf in den Empfehlungen *GDA E 3-8* und *GDA E 2-7* für folgende Reibpartner grundsätzlich keine Adhäsion zugelassen:

- in Schichtflächen mit einer glatten Kunststoffdichtungsbahn
- in Schichtflächen zwischen Geotextilien und tonmineralischen Abdichtungsschichten
- in Schichtflächen zwischen Geotextilien und Rekultivierungsschichten

Kann allein mit Bodenwiderständen keine ausreichende Gleitsicherheit nachgewiesen werden, muss entweder der Aufbau in den Abmessungen, Neigungen oder Materialien angepasst oder eine haltende Kraft durch eine Bewehrung aufgebracht werden. In Abb. 1 ist dies durch die Haltekraft  $R_b$  angedeutet. Diese Bemessungszugkraft, die durch Bewehrungslagen aus Geogittern realisiert wird, welche am Böschungskopf oder auf Bermen verankert werden, kann ebenfalls im Grenzzustand GEO-3 nach Gl. 16 und 17 ermittelt werden.

$$R_{B,d}^* = E_d - R_d \quad (16)$$

$$R_{B,d} = R_{B,d}^* \cdot l \quad (17)$$

$R_{B,d}^*$  Bemessungswert der auf das Böschungselement mit der Länge  $L = 1$  bezogenen Zugkraft,  $R_d$  und  $E_d$  nach Gl. 11 u, 12

$R_{B,d}$  Bemessungswert der Zugkraft für die gesamte Böschungslänge  $l$

Die charakteristische Zugkraft des Bewehrungselementes und der Nachweis der Verankerungslänge werden nach *EBGEO* ermittelt. Eine detaillierte Erläuterung und ein Anwendungsbeispiel zum Gleitsicherheitsnachweis einschließlich Bemessung einer Geokunststoff-Bewehrung geben *Wudtke et al. 2008*. Weitere Beispiele zur Bemessung von Geokunststoffen in Oberflächenabdichtungen und Hinweise zum Ansatz von Verkehrslasten finden sich in *Saathoff u. Werth 2005* behandelt.

Der Nachweis der Gleitsicherheit einer Oberflächen-, Zwischen- oder Basisdichtung erfordert neben dem statischen Nachweis eine objektspezifische Analyse der aus den eingetragenen Kräften resultierenden Verformungen. Dabei ist zu beachten, dass in jeder Schicht die Schubkräfte schadfrei in die darunter liegende übertragen werden. Dies gilt in besonderem Maße für Kunststoffdichtungsbahnen und geosynthetische Tondichtungsbahnen, bei denen eine Zugbeanspruchung vermieden werden muss. Die mobilisierten Scherparameter in den Trennflächen über einem solchen Dichtungselement müssen dazu so abgestimmt werden, dass an der Unterseite im Grenzzustand ein größerer Schubwiderstand als an deren Oberseite übertragbar ist. Dies gilt als erfüllt, wenn für die Winkel der Gesamtscherfestigkeit im relevanten Spannungsniveau nachgewiesen wird:

$$\tan \varphi_{u,k} \geq 1,1 \cdot \tan \varphi_{o,k} \quad (18)$$

$\varphi_{u,k}$  Charakteristischer Winkel der Gesamtscherfestigkeit unterhalb des Dichtungselementes, ermittelt aus abgeminderten Versuchswerten nach Gl. (13) und (14)

$\varphi_{o,k}$  Charakteristischer Winkel der Gesamtscherfestigkeit oberhalb des Dichtungselementes, ermittelt aus Versuchswerten ohne Abminderung nach Gl. (13) und (14)

Dieser Nachweis ist nicht erforderlich, wenn keine Zwangsverformungen erwartet werden und wenn für alle Bemessungssituationen eine hohe Gleitsicherheit bzw. Spreizsicherheit nachgewiesen werden kann. Im Falle von Zwangsverformungen, insbesondere bei Zwischendichtungen, aber auch bei einem hohen Ausnutzungsgrad der Gleitsicherheit in der Gleitfuge unterhalb eines synthetischen Dichtungselementes ( $\mu > 0,85$ ) wird der Nachweis der Verformungen generell empfohlen.

### 2.3 Gesamtstandsicherheit des Abfallkörpers

Die Gesamtstandsicherheit des Abfallkörpers wird mit den bekannten Nachweisverfahren als Versagen auf gekrümmten oder ebenen Gleitflächen nach *DIN 4084* nachgewiesen (Gleitkreis oder zusammengesetzte Starrkörpermechanismen). Zusätzlich ist die Spreizsicherheit nach *GDA E 2-21* bzw. nach *Brauns 1985* und die Grundbruchsicherheit nach *DIN 4017* zu untersuchen, das Versagen des Baugrundes infolge Überlagerungsdruck durch den Abfallkörper. Für die Abfälle werden mit der Mohr-Coulomb'schen Grenzbedingung bodenähnliche Eigenschaften vorausgesetzt, wobei für Raumgewicht und Scherfestigkeit Erfahrungswerte angenommen werden.

Da die Außenböschungen i. A. nicht steiler als  $1: n = 1 : 3$  profiliert werden, sind bei Siedlungsabfalldeponien auf ebener, söhligler Aufstandsfläche keine Standsicherheitsdefizite zu erwarten. Auf den Lebenszyklus betrachtet fällt die Scherfestigkeit durch die Zersetzung und den biologischen Abbau des Abfalls etwas ab, so dass sich die Gesamtstandsicherheit theoretisch in Abhängigkeit von der Höhe des Abfallkörpers mit der Zeit verringert. Die Änderung der Scherfestigkeit betrifft hauptsächlich die Kohäsion, deren Einfluss auf die Standsicherheit aber generell mit der Höhe der Böschung abnimmt. Somit ist der zersetzungsbedingte Verlust an Sicherheit bei hohen Deponien relative geringer, als bei flacheren. Mit den bis 2005 eingebauten verdichteten gemischten Siedlungsabfällen sind bei  $1: n = 1 : 3$  geneigten Außenböschungen bei Deponiehöhen bis zu 50 m i. A. keine kritischen Standsicherheitsverluste im Lebenszyklus zu erwarten. Höhere Deponien sollten im Detail analysiert werden. Eine Oberflächenabdichtung wirkt in dieser Hinsicht generell stabilisierend, da sie den Wassergehalt des Abfalls begrenzt. Steilere Böschungen, Zwischenbauzustände und spezielle Abfallzusammensetzungen bedürfen ebenfalls einer genaueren Analyse.

Die heute mit mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen (MBA) verfüllten Deponien unterscheiden sich in ihrem hydraulischen und mechanischen Verhalten von den früheren Abfallkörpern. Die mobilisierbaren Scherparameter werden sehr stark von der Korngröße der Absiebung und der Art der Vorbehandlung bestimmt. Das bodenmechanische Verhalten weicht von den an natürlichen Böden gewonnenen Erfahrungen deutlich ab, Wasserdurchlässigkeit, Scherfestigkeit und Steifigkeit werden in einem stärkeren Maße durch den Wassergehalt und die Wassersättigung beeinflusst. Unter Scherdeformation verhält sich MBA meist verfestigend. Generell ist gegenüber dem klassischen Siedlungsabfall mit höheren Raumgewichten ( $\gamma = 13-16 \text{ kN/m}^3$ ) und mit einer geringeren Scherfestigkeit für das frische Material zu rechnen ( $\varphi' = 20-25^\circ$ ;  $c' = 8-15 \text{ kN/m}^2$ ). Auch mit diesen Kenngrößen lässt sich ein Deponiekörper mit einer  $1: n = 1 : 3$  geneigten Außenböschung standsicherer herstellen.

Im Vergleich zum früheren Siedlungsabfall hat MBA jedoch einen höheren elastischen Anteil und eine geringere Steifigkeit. So wird eine Schüttung aus MBA mit zunehmender Schütthöhe in den unteren Lagen stark komprimiert. Dies führt zu zwei nachteiligen Effekten, zu einer starken Verringerung der Wasserdurchlässigkeit und zu einer Erhöhung des Sättigungsgrades. Eine Reduktion der Wasserdurchlässigkeit kann zu Stauhorizonten und zu Sickerströmungen führen, welche die Böschungsstandsicherheit mindern. Eine Erhöhung der Feuchte bzw. des Sättigungsgrades führt bei MBA nach eigenen unveröffentlichten Untersuchungen zu einer signifikanten Abnahme der Scherfestigkeit (vgl. auch *Bauer et al. 2007*). Insofern kann mit den derzeitigen Kenntnissen der Abfallmechanik nicht zuverlässig beurteilt werden, in welche Richtung sich über den Lebenszyklus betrachtet die Gesamtstandsicherheit von MBA-Deponien entwickelt. Da sich MBA in Abhängigkeit der Zusammensetzung des Abfalls und der Vorbehandlung in ihrem mechanischen Verhalten stark unterscheiden, müssen die Fragen nach der Anfangsstandsicherheit und der Langzeitprognose objektspezifisch nach bodenmechanischen Gesichtspunkten sorgfältig beurteilt werden. In Hinblick auf Oberflächenabdichtungen ist darüber hinaus eine Setzungs- und Verformungsprognose zweckmäßig.

### **3 Langzeitperspektive und Nachhaltigkeit**

In den Nachweis der Standsicherheit von Oberflächenabdichtungen und den der Gesamtstandsicherheit gehen als geometrische Größen Schichtmächtigkeiten, Böschungslängen und Böschungsneigungen ein, bodenphysikalische Größen sind das Raumgewicht  $\gamma$  und die Scherparameter  $\varphi'$  und  $c'$ , die im Gebrauchs- und Grenzzustand wirken. Auf der Seite der Einwirkungen sind dies die Bodenfeuchte und die Strömungskraft. Die geometrischen Größen sind klar bestimmbar und verändern sich im Laufe der Zeit nicht, die Böschungsneigung wird infolge Setzungen allenfalls flacher. Unsicher hinsichtlich einer Veränderung während des Lebenszyklus sind dagegen die Scherwiderstände und die Einwirkungen aus infiltrierendem Wasser mit den Folgen auf die Sättigungs- und Abflussverhältnisse in der Rekultivierungsschicht. Daneben sind im Laufe des Lebenszyklus nicht vorhersehbare Einwirkungen aus dem Bewuchs und Einwirkung von Menschen und Tieren aufzuführen, falls die Deponie ohne Pflege und Überwachung in den natürlichen Kreislauf zurückgeführt wird.

Eine eigene Analyse von Schadensfällen, die in den zurückliegenden Jahren in Zusammenhang mit Standsicherheitsdefiziten aufgetreten sind, führt auf die folgende Charakterisierung von Schadensursachen.

- (A) Rutschungen aufgrund ungeeignetem Aufbau des Abfallkörpers
- (B) Zerstörung und Hautrutschungen der Oberfläche durch unsachgemäße Ausführung
- (C) Für die Bauaufgabe ungeeigneter Systemaufbau der Oberflächenabdichtung
- (D) Schädliche Veränderung der mineralischen Materialien, i. e. Vernässung
- (E) Oberflächenerosion der Rekultivierungsschicht im Bau- oder Nutzungszustand

Rutschungen im Abfallkörper sind meist auf ungeeignete, mechanisch instabile Verfüllmaterialien, Gleitflächen im geologischen Untergrund oder auf Rutschungen der Deponiebasis zurückzuführen. Ungeeignete Verfüllmaterialien sind Schlämme oder sich als Stauschicht verdichtende Materialien. Dieses Risiko ist mit der klaren Definition zulässiger Verfüllmaterialien und der Überwachung des Einbaus im rutschgefährdeten Böschungsbereich zu beherrschen. Das Risiko von Rutschungen im geologischen Untergrund sollte bei der Standortwahl ausgeschlossen werden. Weiterhin muss sichergestellt werden, dass im Zuge von Deponieerweiterungen oder bei der Folgenutzung keine Abgrabungen im Vorfeld des Deponiekörpers durchgeführt werden, welche die Stützwirkung des Auflagers schwächt und einen Gelände- oder Grundbruch provozieren kann. Rutschungen des Abfallkörpers auf dessen Aufstandsfläche müssen durch eine geeignete Wahl der Materialien für die Basisdichtung und der geologischen Barriere vermieden werden. Eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften im Laufe der Alterung ist nach heutigem Stand des Wissens nicht zu befürchten. Alle drei hier aufgeführten Gefährdungen entstehen eher in der Betriebsphase als in der Zeit der Nachsorge.

Hautrutschungen beim Bau der Oberflächenabdichtung können bei Vernässung mineralischer Schichten, bei zu starker statischer und dynamischer Einwirkung von Baugeräten wie auch bei einer nicht sachgerechten Verlegung von Dichtungsbahnen und Bewehrungslagen entstehen. Diese Gefährdungen sind durch eine Qualitätsüberwachung und Beachtung der Einbauregeln zu beherrschen. Verlegefehler von Dichtungsbahnen Dränagematten und Geogittern führen nicht zwangsläufig zu sofortigen Rutschungen. Infolge Lastumlagerungen, Kriechvorgängen, späterer Temperatur- und Feuchteeinwirkungen zählen derartige Qualitätsmängel zu den Ursachen, die mittelfristig zu Hautrutschungen an Oberflächenabdichtung führen können.

Ungeeignete Materialien im Systemaufbau von Oberflächendichtungen können kurz- oder mittelfristig Rutschungen verursachen. Während polymere Materialien wie auch geosynthetische Dichtungsbahnen in ihrem Langzeitverhalten bezüglich Dichtigkeit, Beständigkeit und Scherverhalten sehr gründlich untersucht und in Zulassungsverfahren geprüft sind (*Thies et al. 2002, Müller 2004, Müller 2007*), können die Eigenschaften natürlicher mineralischer Ma-



Materialien in großen Bereichen streuen. Die in Eignungsuntersuchungen mit aufwändigen Laborversuchen nachgewiesenen Eigenschaften mineralischer Materialien, Auflagerschichten, Dichtungen, Dränagen und Rekultivierungsböden gelten nur für die untersuchten Randbedingungen. Im Feld liegen oft andere Spannungszustände und Verformungen vor, durch Feuchteänderungen, Quell- und Schrumpfvorgänge ändern sich die Porosität, die Steifigkeit und die Scherfestigkeit, durch Ionenaustausch die Wasserdurchlässigkeit. Eine gleichbleibende Qualität über einen Zeitraum von > 100 Jahren kann daher nicht a priori vorausgesetzt werden. Insbesondere mineralische Dichtungen mit quellfähigen Böden sind hinsichtlich Standsicherheitsrisiken außerordentlich kritisch zu bewerten.

Das aktuelle Regelwerk des Deponierechts geht davon aus, dass eine Oberflächendichtung für eine Deponie der Klasse II zwei voneinander unabhängige Dichtungselemente enthalten soll. Damit wird auf ein redundantes Parallel-System abgezielt, bei dem das zweite Element im Falle eines Ausfalles des ersten die Dichtfunktion übernimmt. Bei der Konzeption eines solchen Systems ist zu beachten, dass sich die Bedingungen mit Ausfall eines Systems ändern und dann neue Randbedingungen für das Materialverhalten vorliegen. Als Beispiel sei hier die klassische Kombinationsdichtung nach *TAS* aufgeführt, deren mineralische Komponente gerne aus möglichst fetten, plastischen Tonen gebaut wurde. Sollte die Kunststoffdichtungsbahn auch nur partiell durch Alterung perforiert werden und die mineralische Dichtung einen dominanten quellfähigen Mineralbestand haben, würde sich nach und nach eine Schmierschicht in der Kontaktfläche bilden und daraus folgend Hautrutschungen. Der gleiche Gedanke in Richtung Gebrauchstauglichkeit ausgerichtet führt zu der Erkenntnis, dass im Laufe des Lebenszyklus auftretende lokale Undichtigkeiten zu einer Reaktivierung des biologischen Abbaus in einer Deponie führen mit der Folge von Verformungen der Oberfläche. Die Verträglichkeit solcher Verformungen lässt sich bis heute nicht zuverlässig prognostizieren.

Die Morphologie unserer heutigen Landschaft ist maßgeblich durch Erosions- und Ablagerungsprozesse entstanden. Die gleichen Prozesse sind unter zwei unterschiedlichen Gesichtspunkten bei der Oberflächenabdichtung einer Deponie zu betrachten (*Witt u. Johannsen 2009*). Zum einen muss in der Anfangsphase des Bewuchses ein wirksamer Erosionsschutz vorhanden sein, da hier die größte Verletzbarkeit vorliegt. Dies lässt sich durch geeignete Böden, kleinparzellige Bauweise mit unmittelbarer Begrünung und durch ingenieurbiologische Erosionsschutzmaßnahmen wie Mulchen, Schutzmatten, Steinwälle und Pflanzungen erreichen. Zum anderen muss sichergestellt sein, dass sich auf den Rekultivierungsböden langfristig ein effektiver Erosionsschutz aus dem Bewuchs entwickeln und erhalten kann, der jedoch nicht die Funktion des Abdichtungssystems beeinträchtigt. Neben der Aus-

wahl des für den Standort optimalen Bewuchses und geeigneter Rekultivierungsböden ist es erforderlich, einen Bemessungsregen in Intensität und Dauer festzulegen, für den der Erosionsschutz zu planen und die Oberflächenentwässerung zu bemessen ist.

Unter Beachtung der Vorgaben für die Qualität der Rekultivierungsböden (*GDA E 2-31*) und für den Bewuchs (*GDA E 2-32*) kann davon ausgegangen werden, dass sich im Laufe einiger Jahre eine schützende und erosionsstabile Vegetation entwickelt, die einen schädlichen Oberflächenabfluss weitestgehend minimiert. Dies zeichnet sich zwischenzeitlich aus vielen Lysimetermessungen ab (*Melchior et al. 2006*). Ungewiss ist aber auch hier die weitere Entwicklung im langen Lebenszyklus einer Deponieoberfläche. Ohne Pflege und Überwachung kann nicht garantiert werden, dass die Oberfläche nicht durch Tierbefall geschwächt wird oder dass sich keine Bäume ansiedeln, so dass langfristig die Gefahr von Bodenabtrag und Windwurf entsteht. Solche unkontrollierte Windwurfereignisse geben Angriffspunkte für eine Erosion und Zerstörung der Dichtung. Diese Gefährdung mag unbedeutend und beherrschbar erscheinen, wenn man die derzeitigen Bedingungen und kurze Zeithorizonte im Auge hat. Die Hoffnung, dass sich der Bewuchs in der planmäßigen Weise ohne jegliche Pflege über einen Zeitraum von > 100 Jahren und unter ungewissen Klimaentwicklungen unschädlich für das Oberflächendichtungssystem entwickelt und sich im positiven Sinne selbst reguliert ist naiv. Die Natur hat andere Regeln als das Deponierecht.

Der letzte Punkt der Langzeitgefährdung der Standsicherheit betrifft die Entwässerung der Rekultivierungsschicht. Im Gleitsicherheitsnachweis wird vorausgesetzt, dass das infiltrierte Wasser in der Dränage gefasst und dort schadfrei abgeleitet wird. Bei einer mineralischen Dränage mit einer Stärke von 30 cm oder gar 50 cm kann die Funktion über lange Zeit vorausgesetzt werden. Bei geosynthetischen Dränage muss damit gerechnet werden, dass die Funktion infolge Durchwurzelung, bei ungeeigneten Rekultivierungsböden auch durch Ausfällung, im Laufe der Jahrzehnte reduziert wird. Beim Nachweis der Gleitsicherheit sollte daher auch die Bemessungssituation betrachtet werden, dass die Dränage ausfällt und die Rekultivierungsschicht teilweise eingestaut wird. Im Systemaufbau lässt sich dies dadurch berücksichtigen, dass im unteren Teil der Rekultivierungsschicht eher steinige Böden eingebaut werden, welche zum einen eine Dränagefunktion übernehmen können, zum andern das Tiefenwachstum der Wurzeln durch ungünstige Vegetationsbedingungen hemmen, wie dies in *GDA 2-32* empfohlen wird.

## 4 Schlussfolgerungen

Zum Nachweis der Standsicherheit und der Gleitsicherheit von Deponieböschungen können die seit Jahrzehnten bewährten statischen Methoden der Bodenmechanik angewendet werden. Das neue Teilsicherheitskonzept scheint zunächst mit den im Normenwerk vorgegebenen Teilsicherheitsfaktoren  $\gamma_{\phi} = \gamma_c$  ein geringeres Sicherheitsniveau zu haben, als die früher angewendete globale Sicherheitsbetrachtung. Tatsächlich verbleibt aber beim Aufsteller ein subjektiver Spielraum bei der Festlegung der charakteristischen Kennwerte der Scherfestigkeit. Die *GDA E 2-7* gibt hierzu klare Vorgaben. Unter der Voraussetzung, dass die im Labor ermittelten Scherparameter repräsentativ für die kritischen Gleitfugen sind, lässt sich die Anfangsstandsicherheit mit diesen Nachweismethoden zuverlässig quantifizieren.

Zur Prognose der Langzeit-Standsicherheit sind die langfristige Mobilisierbarkeit, die möglichen Veränderungen der Materialien und deren Scherparameter zu beurteilen. Dies betrifft besonders die mineralischen Baustoffe, deren mechanisches Verhalten stark von dem Wassergehalt und von Wassergehaltsänderungen abhängt. Noch schwieriger ist die Prognose der künftigen klimatischen Einwirkungen und der Entwicklung des Bewuchses auf der Deponieoberfläche. Hier liegt aus Sicht des Autors die eigentliche Unsicherheit in der Prognose der Standsicherheit einer Deponie über einen Zeithorizont bis hin zur Rückführung in den geologischen Kreislauf. Soweit die Dichtungselemente unter einer Mindestüberdeckung von nur einem Meter saisonalen Schwankungen der klimatischen Einwirkungen ausgesetzt sind, ist zumindest bei mineralischen Baustoffen eine Veränderung der Eigenschaften mit der Alterung zu erwarten. Dies kann sich sowohl auf die Funktion, als auch auf die Standsicherheit nachteilig auswirken. Ambivalenter Einflussfaktor bleibt der Bewuchs der Oberfläche mit seiner gegen Erosion stabilisierenden, bei allzu kräftiger Durchwurzelung aber gleichzeitig schädigenden Wirkung. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass ohne Pflege und Unterhaltung der Rekultivierungsschicht und des Bewuchses über derart lange Zeiträume die Funktion und die Standsicherheit einer Oberflächenabdichtung sich selbst regulierend erhalten bleiben.

## Literatur

- Abramson L. W., Lee, T. S., Sharma S. und Boyce G. M. 2002: Slope stability and stabilization methods, 2nd ed. John Wiley u. Sons, Inc. New York
- Bauer, J., Münnich, Kai u. Fricke, K. 2007: Influence of hydraulic conditions on mechanical waste properties. 2<sup>nd</sup> Int. Workshop Hydro-Physico-Mechanics of Waste, Southamton, 2007
- Blümel, W. u. Heinemann, M. 2004: Zur Berücksichtigung von Adhäsion in Standsicherheitsnachweisen für geneigte Oberflächenabdichtungen mit Geokunststoffen. 20. SKZ-Tagung „Die sichere Deponie“, Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg, 2005
- Bräcker, W. 2005: Eignungsbeurteilung von unter Verwendung von Abfällen hergestellten mineralischen Oberflächenabdichtungen, Teil A Allgemeine Grundsätze für die Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme. AbfallwirtschaftsFakten 11, Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim
- Brauns, J. 1980: Spreizsicherheit von Böschungen auf geneigtem Gelände. Bauingenieur (55) 1980, S. 43-436
- Deutscher Bundestag, 16. Wahlperiode: Verordnung zur Vereinfachung des Deponierechts, Drucksache 16/10330 vom 24. 9. 2008
- DIN 1054:2005-01: Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Ausgabe A1 12/2008
- DIN 1055-5:2005-07 : Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 5: Schnee- und Eislasten. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Ausgabe 07/2005
- DIN 4017:2006-03 Baugrund - Berechnung des Grundbruchwiderstands von Flachgründungen. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 4084:2009-01 Baugrund - Geländebruchberechnungen. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., ersetzt DIN 4084-100:1996-04
- DIN EN 1997-1:2008-10: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., aktualisierte Ausgabe der EN 1997-1:2004 (D)

- EBGEO – Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT) 1997: Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO). Verlag Ernst u. Sohn, 1997, 174 S., Berlin. Als Entwurf aktualisiert Januar 2009
- GDA Empfehlung E 2-21: Spreizsicherheitsnachweis und Verformungsabschätzung für die Deponiebasis. In DGGT (Hrsg): GDA-Empfehlungen Geotechnik der Deponien und Altlasten, 3. Auflage. Ernst und Sohn, 1997, S. 194-204. Siehe auch <http://www.gdaempfehlungen.de>
- GDA Empfehlung E 2-31: Rekultivierungsschichten. In Witt, K. J. u. Ramke, H.-G., 2006: Empfehlungen des Arbeitskreises 6.1 "Geotechnik der Deponiebauwerke" der DGGT, Bautechnik 83, H. 9, S. 585-596; Siehe auch <http://www.gdaempfehlungen.de>
- GDA Empfehlung E 2-32: Gestaltung des Bewuchses auf Abfalldeponien. In Gartung, E. u. Neff, H.: Empf. des Arbeitskreises 6.1 "Geotechnik der Deponiebauwerke" der DGGT, Bautechnik 77, H. 9, S. 627-629; Siehe auch <http://www.gdaempfehlungen.de>
- GDA Empfehlung E 2-7 Nachweis der Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen, Entwurf 2008. In Witt, K. J. u. Ramke, H.-G., 2008: Empfehlungen des Arbeitskreises 6.1 "Geotechnik der Deponiebauwerke" der DGGT, Bautechnik 84, H. 9, S. 573-577; Siehe auch <http://www.gdaempfehlungen.de>
- GDA Empfehlung E 3-8: Reibungsverhalten von Geokunststoffen. In Witt, K. J. u. Ramke, H.-G., 2005: Empfehlungen des Arbeitskreises 6.1 "Geotechnik der Deponiebauwerke" der DGGT, Bautechnik 82, H. 9, S. 575-592; Siehe auch <http://www.gdaempfehlungen.de>
- Genske, D. D. 2008: Massenbewegungen. In Witt, K. J. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch, 7. Auflage, Teil 1, Ernst u. Sohn, S. 719-794
- GRUSIBAU 1985: Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen von baulichen Anlagen. Deutsches Institut für Normung, e.V., Normausschuss Bauwesen, 1985:
- LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnische Vollzugsfragen“, 2005: Grundsätze für die Eignungsbeurteilung unter Verwendung von Abfällen hergestellter mineralischer Dichtungen in Oberflächenabdichtungssystemen von Deponien vom 19.04.2005; siehe auch Bräcker, W.: Eignungsbeurteilung von Abdichtungskomponenten der Deponieoberflächenabdichtungssysteme durch die LAGA. 21. Fachtagung „Die sichere Deponie“, SKZ Würzburg 2005
- Melchior, S., Steinert, B., Rettig, R. u. Raabe, S. 2006: Zwischenergebnisse der Versuchsfelder der MEAB zu alternativen Oberflächenabdichtungssystemen auf der Deponie Deetz. In: Henken-Mellies, U. (Hrsg.): 17. Nürnberger Deponieseminar 2006. Abdichtung, Stilllegung und Nachsorge von Deponien. Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Nürnberg, Heft 85, S. 105-128

- Müller, W. 2004: Eignungsnachweis für Kunststoff-Dränelemente in Oberflächenabdichtungen. In: Tagungsband der 20. Fachtagung "Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen. Knipschild, F. W. (Hrsg.). Würzburg: SKZ-ConSem GmbH 2004, S. G1- G12.
- Müller, W. 2007: HDPE Geomembranes in Geotechnics. Springer Berlin Heidelberg New York
- Saathoff, F. u. Werth, K.: Standsicherheitsnachweise für Oberflächenabdichtungssysteme - Anmerkungen zum Lastfall Einbau geschichteter Systeme mit Geokunststoffen. 21. SKZ-Tagung „Die sichere Deponie“, Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg, 2005
- TA Siedlungsabfall (TASI) 1993: Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. 3. AbfVwV, Technische Anleitung...., 14. 5. 1993
- Thies, M., Gerloff, C., Seeger, S. und Müller, W. 2002: Long-term shear testing of geosynthetic clay liners. In: Clay Geosynthetic Barriers. Zanzinger, H., Koerner, R. M., u. Gartung, E. (Hrsg.). Lisse, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers 2002, S. 97-104.
- Türke, H. 1998: Statik im Erdbau, 3. Auflage. Ernst u. Sohn, Berlin
- Witt, K. J. 2007a: Überlegungen zu geotechnischen Anforderungen an Oberflächenabdichtungssysteme. In Ramke, H.-G., Witt, K. J., Bräcker, W., Tied, M., Düllmann, H. u. Melchior, S. (Hrsg.): Anforderungen an Deponie-Oberflächenabdichtungssysteme. Höxteraner Berichte angew. Umweltwissenschaften, Band 6, 2007, S. 35-46
- Witt, K. J. 2007b. Bedingungen der Beständigkeit tonmineralischer Abdichtungskomponenten. Henken-Mellies W. U. (Ed). 18. Nürnberger Deponieseminar 2007, Veröffentlichungen LGA-Grundbauinstitut, Nürnberg, H. 86, S. 115-134
- Witt, K. J. u. Johannsen, R. 2009: Geotechnische und Ingenieurbiologische Maßnahmen zum Erosionsschutz von Rekultivierungsschichten. Leipziger Deponiefachtagung 2009
- Wudtke, R.-B., Werth, K. u. Witt, K. J. 2008: Standsicherheitsnachweis für Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien. Bautechnik 84, H. 9, S. 596-602