

30 Jahre Erfahrung mit der Beurteilung der 100-jährigen Standsicherheit von Deponieböschungen

Karl Josef Witt

1. Einleitung

Unter einer geneigten Bodenoberfläche wirkt aufgrund gedrehter Hauptspannungen eine Gewichtskomponente in Richtung einer Abwärtsbewegung, die in der einfachen Analogie zur schiefen Ebene der Hangabtriebskraft entspricht. Wenn entlang einer potentiellen Gleitfläche unterhalb der Böschung die durch Gewichtskräfte oder durch andere Einwirkungen hervorgerufene Scherspannung die Scherfestigkeit übersteigt, kann ein Bruch oder zumindest eine Plastifizierung auftreten. Die über der Gleitfläche liegende Bodenmasse bewegt sich talwärts. Eine der grundlegenden geotechnischen Aufgaben der Planung, Bemessung und Beurteilung jeder Art von Böschung, so auch einer Deponieböschung, ist die Standsicherheitsanalyse, die für eine Vielzahl gedachter Gleitflächen einen statischen Vergleich der Scherbeanspruchung mit dem Scherwiderstand beinhaltet.

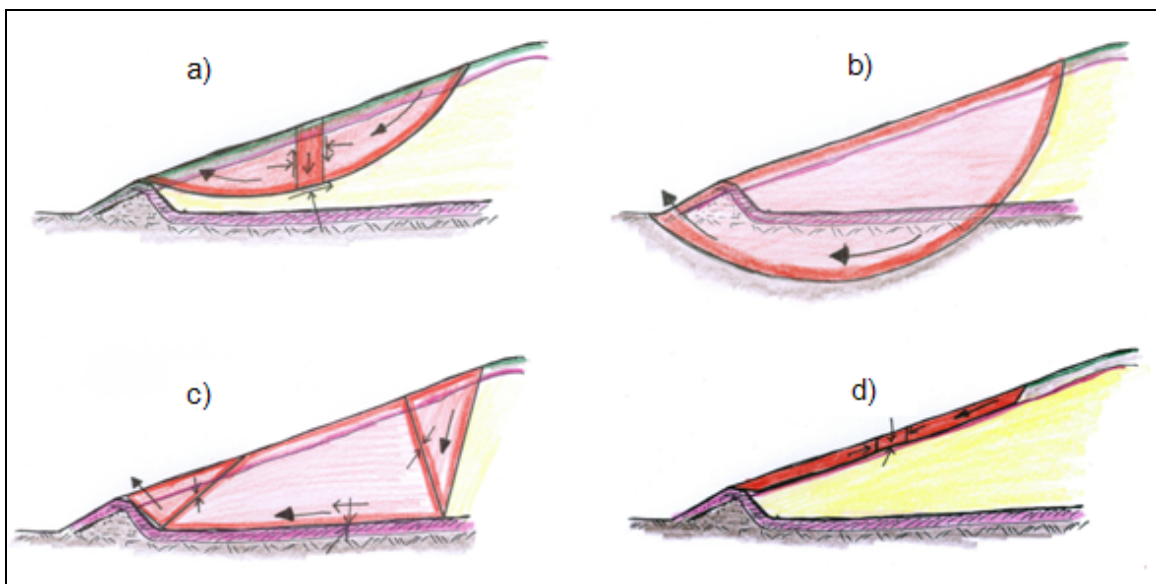


Bild 1: Versagensmechanismen der Böschung. a) Gleitkreisversagen Abfallkörper, b) Böschunggrundbruch, c) Starrkörperversagen (Spreizen) und d) Gleitversagen der Böschungsoberfläche

Die Gleitflächen können eben, gekrümmt oder aus mehreren geradlinig begrenzten Bodenkörpern zusammengesetzt sein, wie das in Bild 1 skizziert ist. Weitergehende Verformungsbetrachtungen sind mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) möglich, erfordern aber angemessene Stoffgesetze für die beteiligten Bodenschichten, was für die Ingenieurpraxis von Abfalldeponien noch nicht befriedigend erschlossen ist.

Während in der Pionierphase der geordneten Deponierung von Siedlungsabfällen ganz allgemein die mechanische Stabilität des Deponiekörpers gefordert wurde, wurde mit der DEPONIEVERORDNUNG (DEPV) die Sicherheitsanforderung qualitativ formuliert und auf den Lebenszyklus des Bauwerks erweitert. In Anhang 5 zur DEPv wird in Nummer 4 Ziffer 7 explizit ein Nachweis gefordert, der die Dauerhaftigkeit der Standsicherheit erkennen lässt. Handelt es sich bei den Komponenten um Bauprodukte, wird der Nachweis der Dauerhaftigkeit über ein Zulassungsverfahren geregelt. Die in der Berechnung der Standsicherheit angenommenen Kennwerte des Abfalls, die sich mit der Alterung verändern, sind gem. DEPv regelmäßig zu überprüfen. Die dauerhafte Standsicherheit ist Voraussetzung für den Abschluss der Nachsorge (DepV, Anhang 5 Nummer 10 Ziffer 5).

In der Auslegung der Verordnung wird der Begriff „dauerhaft“ als ein Zeitraum interpretiert, der deutlich über 100 Jahre liegt. Diese Forderung einer über 100-jährigen Funktions- und Lebensdauer ohne planmäßige Ertüchtigungsmaßnahmen ist im Baugeschehen unüblich. EC-7 und DIN 1054 gehen auch für Sicherheitsnachweise von einer Lebensdauer von maximal 50 Jahren aus [HANDBUCH EUROCODE 7]. Der Nachweis einer 100-jährigen Standsicherheit, der eine zuverlässige Prognose von Einwirkungen und Widerständen über diesen Zeitraum erfordert, ist nach Ansicht des Verfassers nur genehmigungsrhetorisch zu erbringen.

Der Beitrag behandelt die Versagensformen und die seit vielen Jahren bewährten Methoden eines Standsicherheitsnachweises für Deponieböschungen. Die Entwicklung und die dabei gewonnene Erfahrung werden dargestellt. Mit Blick auf die dauerhafte Standsicherheit lassen sich zwei signifikante und noch nicht abschließend zu beurteilende Unschärfen eingrenzen: (i) die hydrologischen Einwirkungen auf die Gleitsicherheit von Oberflächenabdichtungen und (ii) das langfristige mechanische Verhalten von vorbehandeltem Siedlungsabfall. Der letzte Fragenkomplex betrifft gleichermaßen eine Vielzahl von industriellen Abfällen.

2. Historiographie zur Standsicherheit von Deponieböschungen

Die quantitative Analyse der Standsicherheit von natürlichen Hängen und künstlich hergestellten Böschungen ist seit über 150 Jahren ein Themenfeld der Ingenieurgeologie und der Geotechnik. Besonders in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden mit der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Bodenmechanik verschiedene graphische, analytische und numerische Methoden zur Beurteilung der Böschungsstabilität unter statischer, hydraulischer und dynamischer Einwirkung für natürliche Böschungen, Dämme und Einschnitte in Boden und Fels entwickelt. Eine erschöpfende Übersicht über die Berechnungsverfahren und deren Anwendungsgrenzen geben ABRAMSON ET AL., 2002.

Mit der geordneten Ablagerung von Abfällen und dem Anspruch an eine Deponie als sicheres Bauwerk wurden die Berechnungsverfahren des Erdbaus auch im Deponiebau angewendet. Die Böschungsstandsicherheit eines Abfallkörpers wurde wie bei Dämmen mit dem Gleitkreisverfahren analysiert und nachgewiesen. Der Abfall wurde damit mechanisch als bodenähnlich betrachtet. Aus der Rückrechnung von augenscheinlich stabilen Kippenböschungen wurden Scherparameter geschätzt. Mit der Zunahme von organischen Anteilen im Siedlungsabfall hat man sich hinsichtlich der Langzeitstandsicherheit an den Scherparametern und Dichten von Torf orientiert. Die damit optimierten Böschungsneigungen lagen bei ca. 23° ($1 : n = 1 : 2,3$) und waren gegenüber den bis dahin unverdichtet verkippten Halden deutlich flacher.

Eine erste wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Frage der Standsicherheit von Deponien fand durch mehrere kleinere Forschungsprojekte und mit der Erarbeitung der ersten Merkblätter in der damaligen Bundesrepublik Deutschland ab etwa 1980 statt. In der DDR orientierte man sich an den Erfahrungen der Kippenböden des Tagebaus. Forschungsergebnisse und Erfahrungen wurden von GAY U. HENKE, 1981 bei einer Tagung am Institut für Siedlungswasserbau und Wassergütwirtschaft der Universität Stuttgart erstmals publiziert. Von ALYANAK ET AL. wurden auf dieser Tagung erste experimentell ermittelte mechanische Kenngrößen von Abfall mitgeteilt. Diese Untersuchungen und Standsicherheitsbetrachtungen waren aber noch stark auf den gleichzeitigen Einbau von Siedlungsabfall und Klärschlamm ausgerichtet. WIEMER präziserte 1982 diese Werte, besonders die Dichte von im Dünnschichteinbau maschinell verdichtetem Siedlungsabfall auf der Grundlage von Feldmessungen. Eine systematische Zusammenstellung der bodenmechanischen Kennwerte der Abfälle dieser Zeit findet sich als Zusammenfassung einzelner Untersuchungen in DRESCHER, 1997.

Die Notwendigkeit von Standsicherheitsnachweisen wurde mit der TA Abfall 1990 und der TA Siedlungsabfall 1993 bekräftigt [vgl. STIEF U. ENGELMANN, 1992]. Die ersten konkreten Hinweise zu den Anforderungen an Standsicherheitsuntersuchungen und die möglichen Versagensformen wurden 1990 im ersten Entwurf der GDA E 2-6 zusammengetragen. In den folgenden Auflagen der neuen GDA E-2-6 mit dem Titel „Abfallmechanik“ wurde der Böschungsbruch als Äußere Standsicherheit bezeichnet und im Weiteren Grundbruch und große Verformungen als Versagen unterschieden. Hinzu kam ab der 3. Auflage 1997 mit der GDA E 2-7 eine getrennte Behandlung der Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen mit einer grundlegenden Aktualisierung in 2008 [WUTTKE ET AL, 2008; WITT, 2009].

Mit der mechanisch biologischen Vorbehandlung von Abfällen (MBA) wurden ab 2005 die bis dahin empirisch abgesicherten bodenmechanischen Kennwerte teilweise obsolet. Obwohl sich das Materialverhalten von MBA oder von aufbereiteten Schlämmen immer mehr von dem von natürlichem Boden entfernt, wird in der Ingenieurpraxis und in den neueren Regelwerken an der statischen Nachweismethode auf der Grundlage von Gleichgewichtsbetrachtungen an Bruchkörpern festgehalten. Über die in der stark variierenden Charakteristik von MBA mobilisierbaren Scherwiderstände liegen nur wenige Erfahrungen vor. Anhaltwerte aus experimentellen Untersuchungen werden in MÜNNICH ET AL., 2005, 2006; WURZLER, 2006 und in KAMEL U. ENGEL, 2008 mitgeteilt.

Verformungsanalysen mit verfeinerten Stoffgesetzen, die den Alterungsprozess infolge biologischem Abbau, Gasproduktion, Veränderungen der hydraulischen Randbedingung und die dadurch mit der Alterung variablen Festigkeits- und Verformungseigenschaften der Ablagerung berücksichtigen, sind zwar wissenschaftlich erschlossen [MC DOUGALL, 2007; CHEN ET AL., 2012], werden aber in der Ingenieurpraxis wegen ihrer Komplexität und wegen fehlender oder schwierig bestimmbarer Kennwerte nicht angewendet. Für den Nachweis der Standsicherheit der relativ flach geneigten Endböschungen von Abfallkörpern sind derartige Analysen zwar nicht zwingend erforderlich, wohl aber für eine Langzeitprognose der Verformungen.

3. Praxis der Standsicherheitsanalyse von Deponieböschungen

3.1 Globale Standsicherheit des Abfallkörpers

Unter dem Begriff *Globale Standsicherheit* wird die Stabilität des gesamten Abfallkörpers zusammengefasst, der aufgrund der mit der Zeit veränderten Abfallzusammensetzung, Ein-

baubedingungen und der Zersetzung schichtweise unterschiedliche mechanische und hydraulische Eigenschaften hat. Mögliche Versagensmechanismen sind Rotation von Gleitkörpern und Translation von zusammengesetzten Bruchkörpern. Zur globalen Standsicherheit zählen aber auch extensive Verformungen eines Abfallkörpers, die sich als Kriechen oder gar Fließen des Materials beschreiben lassen. Die Bilder 1a und 1b veranschaulichen die Mechanismen Gleitkreisversagen des Abfallkörpers und Böschungsgrundbruch. In Bild 1c ist ein zusammengesetzter Starrkörpermechanismus skizziert, wie er bei einer ungünstigen Schichtung oder bei Schichten mit geringen Scherwiderständen auftreten kann.

Für einen Abfallkörper ohne bevorzugte Gleitflächen, dem die mobilisierbaren Scherparameter Reibung und Kohäsion zugeordnet werden können, wird die globale Standsicherheit mit den bekannten Verfahren als Versagen auf gekrümmten oder ebenen Gleitflächen nach *DIN 4084* nachgewiesen. Ein Böschungsgrundbruch, das Versagen des Baugrundes infolge Überlagerungsdruck durch den Abfallkörper, ist nur für tiefreichend geringtragfähigen Baugrund relevant. Die Standsicherheit wird hierzu für einen Gleitkreis untersucht. Es gelten jedoch gegenüber der Böschungsstandsicherheit die höheren Sicherheitsanforderungen für Grundbruch nach *DIN 1054*.

Liegen im Abfallkörper bevorzugte Gleitflächen infolge Schichtung, Einbau von geringscherfestem Material oder Zwischenabdichtungen vor, wird der Nachweis mit kinematisch sinnvollen Starrkörpern geführt. Dies gilt auch für den Nachweis der Spreizsicherheit nach *GDA E 2-21* bzw. nach *Brauns 1985*, der bei ebener Aufstandsfläche meist unproblematisch ist, aber bereits bei schwach geneigter Basisfläche maßgebend sein kann. Alle bisher publizierten großen Deponierutschungen haben ihre Ursachen entweder in unverantwortlich steilen Böschungen oder in Schichtgleiten größerer Blöcke. Bei ungünstiger Kubatur muss die Standsicherheit von Starrkörpern daher auch dreidimensional betrachtet werden.

In den Standsicherheitsanalysen der Ingenieurpraxis werden dem Abfall mit der Mohr-Coulomb'schen Grenzbedingung bodenähnliche Eigenschaften zugeordnet, wobei für Raumgewicht und Scherfestigkeit oft nur Erfahrungswerte angenommen werden. Ein Reibungsanteil aufgrund einer gewissen Faserbewehrung des Abfalls wird nicht angesetzt. Eigene überschlägige Werte sind in Tab. 1 angegeben. Es handelt sich um charakteristische Werte im Sinne *DIN 1054*, die mit Blick auf die zeitliche Veränderung infolge Zersetzung vorsichtig geschätzt sind. Insbesondere für MBA können je nach Zusammensetzung, Absiebgröße, Einbautechnik und Überlagerungsdruck stark abweichende Werte gelten, so dass hier eine standortspezifische Untersuchung anzuraten ist [MÖNNICH, 2006; KAMMEL U. ENGEL,

2008]. Die Spalte *MBA der Zukunft* berücksichtigt lediglich ein höheres Sicherheitsniveau wegen möglicher Unschärfen der Prognosen.

Tabelle 1: Charakteristische Kennwerte für die Analyse der globalen Standsicherheit

<i>Material</i>	<i>Raumgewicht</i>	<i>Scherparameter</i>	
	γ [kN/m ³]	φ_k [°]	c_k [kN/m ²]
Siedlungsabfall, unverdichtet	8,0	22,0	10,0
	10,0	27,0	15,0
Siedlungsabfall bis 2005	10,5	25,0	20,0
	13,0	30,0	5,0
Aktueller MBA	13,0	25,0	15,0
	16,0	30,0	8,0
MBA der Zukunft	17,0	22,0	5,0
Schlacken der thermischen Verwertung	20,0	30,0	10,0
	22,0	40,0	0,0

Bei allen Untersuchungen zur Scherfestigkeit von Siedlungsabfällen und besonders bei mechanisch-biologisch vorbehandeltem Abfall (MBA), zeigt sich ein verfestigendes Verhalten ohne ausgeprägtem Peak-Wert. Die Scherfestigkeit nimmt mit der Scherverformung bis zum kritischen Wert zu, so dass eine Duktilität vorausgesetzt werden kann.

Da die Endböschungen von Deponien heute i. A. nicht steiler als 1:n = 1:3 ($\beta = 18,3^\circ$) profiliert werden, sind bei Deponien auf quasi ebener, söhlicher Aufstandsfläche mit den bis 2005 verdichtet eingebauten gemischten Siedlungsabfällen keine kritischen Standsicherheitsverluste im Lebenszyklus zu erwarten. Eine Oberflächenabdichtung wirkt in dieser Hinsicht generell stabilisierend, da sie den Wassergehalt des Abfalls begrenzt und die Verformungen verlangsamt. Steilere Böschungen, Zwischenbauzustände und spezielle Abfallzusammensetzungen bedürfen eine genauere Untersuchung.

Die heute und künftig mit MBA aufgesetzten Deponien unterscheiden sich in ihrem mechanischen und hydraulischen Verhalten von den früheren Abfallkörpern. Die mobilisierbaren Scherparameter werden sehr stark von der Korngröße der Absiebung und der Art der Vorbehandlung bestimmt. Die Dichte, der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert und die Steifigkeit hängen vom Spannungsniveau und damit von der Deponiehöhe ab. Zur Basis hin sind im Kern der Deponie höhere Dichten, höhere Scherfestigkeiten und Steifigkeiten, aber eine geringere Wasserdurchlässigkeit zu erwarten. Die Erhöhung der ersten beiden Kenngrößen wirken

stabilisierend, die Verringerung der Wasserdurchlässigkeit kann zu Problemen der Anfangsstandsicherheit und zu destabilisierenden Porenwasserdrücken führen. Da der verdichtende Effekt der Überlagerung im Bereich der Deponieböschung nur abgeschwächt auftritt, wird die Auswirkung dieser Phänomene auf die Standsicherheit nach Ansicht des Verfassers überschätzt. Die Schüttraten sind i. A. so langsam, dass eine Konsolidation unter dem zunehmenden Überlagerungsdruck zu erwarten ist. Den Nachweis der hinreichenden Entwässerung kann man nicht rechnerisch erbringen. Hier liefern nur Felduntersuchungen verlässliche Ergebnisse.

Mit der Spannweite der in Tab. 1 angegebenen Kennwerte lassen sich auch mit MBA Deponiekörper mit einer $1:n = 1:3$ geneigten Außenböschung nahezu unabhängig von der Verfüllhöhe standsicher herstellen, soweit der Abfall wie oben beschrieben mit der Überlagerung drainiert. Temporär werden mit den meisten MBA auch bei bis zu $1:n = 1:2$ geneigten Böschungen die Anforderung an die Standsicherheit erfüllt. ENTENMANN, 2010 erlaubt für das von ihm untersuchte Material sogar eine mit den Sicherheitsanforderungen verträgliche Böschungsneigung von $1:n = 1:1,5$.

In Hinblick auf den sicheren Betrieb und den Abschluss der Nachsorgephase von MBA-Deponien sind jedoch die Folgen der Kompression der unteren Schichten mit zunehmender Schütthöhe standortspezifisch zu untersuchen. Eine Verringerung der Wasserdurchlässigkeit kann zu Sperrschichten und damit zu einem Aufstau mit nach außen gerichteten Strömungskräften führen, welche die Böschungsstandsicherheit signifikant mindern. Bei Porenwasserüberdruck kann in einer Gleitfuge keine Reibung mobilisiert werden. Als Scherwiderstand verbleibt bei gleicher Einwirkung nur die undrainierte Kohäsion. Die Reserven der globalen Standsicherheit sind dann schnell erschöpft. Aus diesen Überlegungen heraus ist ergänzend zu dem nach DEP V geforderten Standsicherheitsnachweis auch die Frage eines möglichen Porenwasserüberdrucks zu betrachten. Einflussparameter sind die Kubatur des Deponiekörpers, die Schüttfolge sowie das hydraulische und mechanische Verhalten des MBA-Materials, das ohnehin standortspezifisch nach GDA E 3-6 und E 3-11 zu untersuchen ist. Für den Betrieb und die Nachsorge einer Deponie folgen daraus Messungen der Wasserstände und die Beobachtung eventueller Sickerwasseraustritte.

3.2 Gleitsicherheit von Schichtsystemen

Bei der Analyse der Standsicherheit einer Böschung liefert der Nachweis des böschungsp parallelen Gleitens die kleinste Sicherheit bzw. den höchsten Ausnutzungsgrad, da bei dieser ebenen Betrachtung einer unbegrenzt langen Böschung günstig wirkende Seitenkräfte auf

den Bruchkörper vernachlässigt werden. Werden in einer potentiellen Gleitschicht die Gleichgewichtsbedingungen nicht erfüllt, erübrigen sich alle weiteren Analysen. Die Böschung versagt, wenn sich die angenommenen Einwirkungen und Widerständen verwirklichen. Dieser Versagensmechanismus ist für das Schichtsystem einer Oberflächenabdichtung bei langen Böschungen zutreffend. Bei kurzen Böschungen kann ein Erdwiderstand am Böschungsfuß als Stützkraft berücksichtigt werden (siehe unten).

Der Grenzzustand des ebenen böschungsp parallelen Gleitens, ein Scherbruch in oder zwischen oberflächennahen Schichten des Abdichtungssystems, liegt dem Standsicherheitsnachweis nach GDA E 2-7 zugrunde. Die aktivierenden und widerstehenden Kräfte in einer potentiellen Gleitfläche werden wie in Bild 2 dargestellt bilanziert. Auf der Widerstandsseite wird für Schichten die innere Scherfestigkeit, für Schichtgrenzen zwischen Boden und Geokunststoffen oder zwischen zwei Reibpartnern aus Geokunststoffen die Kontaktscherfestigkeit angesetzt. Physikalische Einzelheiten der Nachweisführung sind in WUTTKE ET AL, 2008 und in WITT U. WERTH, 2009 erläutert.

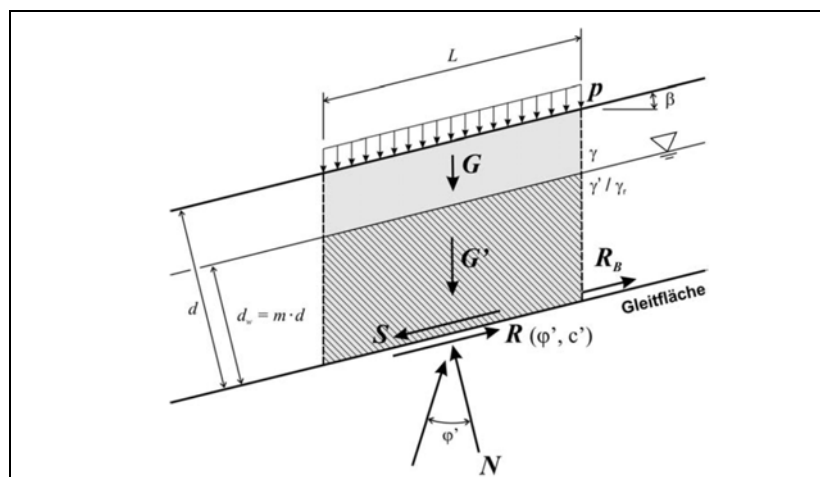


Bild 2: Böschungsp paralleles Gleiten eines durchströmten Schichtsystems [Wudtke et al. 2008]

Soweit homogene Verhältnisse vorliegen oder eine Wichtung der Gewichtskräfte durchgeführt wird, keine Einzellasten wirken und Stützkkräfte am Böschungsfuß vernachlässigt werden, kann der Ausnutzungsgrad μ für ein Schichtsystem mit böschungsp paralleler Durchströmung mit Gl. (1) ermittelt werden. Für alle potenziellen Gleitflächen wird der Bemessungswert der Einwirkung (Beanspruchung) E_d dem Bemessungswerte des Widerstandes (Beanspruchbarkeit) R_d ins Verhältnis gesetzt.

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} = \frac{[(\gamma \cdot (1-m) + \gamma_r \cdot m) \cdot d + p_k \cdot \gamma_Q] \cdot \sin \beta}{[(\gamma \cdot (1-m) + \gamma' \cdot m) \cdot d + p_k] \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi_d + c_d} \quad (1)$$

Hierbei sind

- γ, γ' Wichte des feuchten Bodens und Wichte unter Auftrieb
- γ_r Wichte des wassergesättigten Bodens ($\gamma_r = \gamma' + \gamma_w$)
- γ_w charakteristische Wichte des Wassers
- m relative Einstauhöhe $m = d_w/d$
- d Dicke der Überlagerungsschicht (normal zur Oberfläche, vgl. Bild 2)
- d_w Dicke der durchströmten Schichten (normal zur Oberfläche, vgl. Bild 2)
- γ_Q Teilsicherheitsbeiwert ungünstig wirkender Verkehrslasten ($\gamma_Q = 1,3$ für BS-P)
- β Neigung der Böschung relativ zur Horizontalen
- p_k charakteristischer Wert der Verkehrslast (Ersatzlast eines Fahrzeugs, Schnee, etc.)
- φ_d Bemessungswert des Reibungswinkels/Kontaktreibungswinkel; $\tan \varphi_d = \tan \varphi_k / \gamma_\varphi$
- c_d Bemessungswert der Kohäsion/Adhäsion; $c_d = c_k / \gamma_c$

Bei mehreren Schichten mit unterschiedlicher Wichte wird in Gl. (1) die Gewichtskomponente $d \cdot \gamma$ mit $\sum d_i \cdot \gamma_i$ über die Schichten summiert ermittelt [WITT, 2009].

Da die DEPV eine dauerhafte Standsicherheit fordert, ist aufgrund der Unschärfe künftiger hydrologischer Bedingungen die Frage nach einem Standsicherheitsverlust infolge Teileinstau der Rekultivierungsschicht zu stellen. In Bild 3 ist der Einfluss eines Teileinstaus oberhalb der potentiellen Gleitfläche einer Böschung dargestellt. Das Diagramm zeigt das Verhältnis des nach Gl. (1) ermittelten Ausnutzungsgrades mit und ohne Einstau (Erhöhungsfaktor des Ausnutzungsgrades infolge Einstau) über der relativen Einstauhöhe m für eine Gleitfuge, in der lediglich Reibung und keine Kohäsion wirkt. In der wassergesättigten Zone oberhalb der potentiellen Gleitfläche wirkt die destabilisierende Strömungskraft, die den Ausnutzungsgrad unter sonst gleichen Verhältnissen überproportional mit der relativen Einstauhöhe m ansteigen lässt. Ist die gesamte Böschung wassergesättigt ($m = 1$), beträgt der Erhöhungsfaktor gegenüber dem dränierten Fall γ_r/γ' , hier 1,75. Ausgedrückt in globalen Sicherheiten entspricht dies einer Reduktion des Sicherheitsfaktors η um den Faktor 0,57.

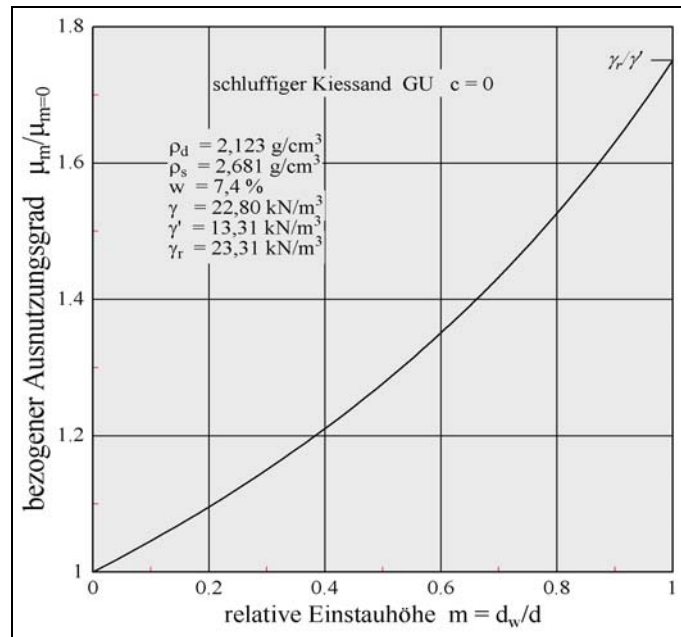


Bild 3: Beispiel zum sicherheitsmindernden Einfluss eines böschungparallelen Abflusses

Der durch Kohäsion erzeugte Anteil am Gleitwiderstand wird durch einen Einstau nicht verändert. Jedoch wird nach GDA E 2-7 in allen Gleitflächen mit einer glatten Kunststoffdichtungsbahn, in Gleitflächen zwischen Geotextilien und tonmineralischen Abdichtungsschichten sowie in Gleitflächen zwischen Geotextilien und Rekultivierungsböden ohnehin keine Kohäsion angesetzt.

Der Scherwiderstand der aktuellen geosynthetischen Baustoffe für Abdichtungs- und Dränmaterialien sind auf die Standsicherheit einer $1:n = 1:3$ geneigten Deponieböschung ausgelegt. Dennoch kommt es insbesondere bei geringfügig steiler geneigten Böschungsabschnitten in den Kontaktflächen zwischen den geosynthetischen Materialien und Boden oft zu rechnerischen Standsicherheitsdefiziten. Die Gleichung zur Ermittlung des Ausnutzungsgrades wird dann um die Komponenten Stützkraft am Böschungsfuß (Bemessungswert des Erdwiderstandes $E_{p,d}$) und um eine durch Bewehrung aufzubringende Haltekraft $R_{B,d}$ erweitert. Als Einflussparameter kommt nun die Böschungslänge L hinzu, da sich ein Defizit der haltenden Kräfte über die Länge der Böschung aufsummiert.

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} = \frac{[(\gamma \cdot (1-m) + \gamma_r \cdot m) \cdot d + p_k \cdot \gamma_Q] \cdot \sin \beta}{[(\gamma \cdot (1-m) + \gamma' \cdot m) \cdot d + p_k] \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi_d + c_d + \frac{E_{p,d} + R_{B,d}}{L}} \quad (2)$$

Die Anwendung von Geokunststoffen in Oberflächenabdichtungen zielt auf einen Aufbau mit einer möglichst hohen Reibung in den potentiellen Gleitflächen. Kommt es dennoch zu einem Defizit der haltenden Kräfte, ist eine Zugbewehrung mit Geogittern das Mittel der Wahl, deren Bemessungswert nach Gl. (3) ermittelt wird. Zur weiteren Bemessung dieser Bewehrung und zu deren Verankerung gilt EBGEO [DGGT 2010].

$$R_{B,d} \geq \left[(\gamma \cdot (1-m) + \gamma_r \cdot m) \cdot d + p_k \cdot \gamma_Q \right] \cdot L \cdot \sin \beta - \left[(\gamma \cdot (1-m) + \gamma' \cdot m) \cdot d + p_k \right] \cdot L \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi_d - c_d \cdot L - E_{p,d} \quad (3)$$

Erfahrungswerte für die Scherparameter in Schichtfugen zwischen Boden und Geokunststoffen und zwischen Kombinationen von Geokunststoffen sind in Tab.2 angegeben. Diese Richtwerte können für eine Vorbemessung herangezogen werden. Objektspezifisch sind dann nach GDA 3-8 in Laborversuchen die Bruchwerte der Scherparameter zu ermitteln, die nach GDA E 2-7 in charakteristische Werte überführt werden.

Der Verfasser ist von der Dauerhaftigkeit einer Zugbewehrungen mit zugelassenen Geogittern als Maßnahmen bei einer zu geringen Gleitsicherheit von Schichtsystemen überzeugt. Dennoch vertritt er mit Blick auf die Dauer der Prognose die Ansicht, dass eine Zugbewehrung eines Schichtaufbaus nur zur Erhöhung des Sicherheitsniveaus eines an sich noch nicht im Grenzzustand befindlichen Systems ($\eta > 1$ bzw. Ausnutzungsgrad $\mu < 1,25$) mit den üblichen Nachweisen eingebaut werden sollte. Wird das Gleichgewicht dagegen allein durch die Bewehrung sichergestellt, widerspricht dies dem Grundsatz der Redundanz und der Duktilität der Sicherheitsphilosophie. In diesem Fall ist zumindest eine genauere Analyse erforderlich, welche auch die durch die Verformung mobilisierten Scherwiderstände betrachtet, oder aber ein a priori erhöhtes Sicherheitsniveau. Beispiele zur Empfindlichkeit solcher Systeme finden sich in WITT U. WERTH, 2013.

Tabelle 2: Orientierungswerte für Reibungswerte zwischen Boden und Geokunststoffen [WITT U. WERTH, 2013]

Schichtgrenzen mit Geokunststoffen	Charakteristischer Reibbeiwert
Boden / Oberboden (φ') vs. Bentonitmatte (GTD)	$\tan \delta_k \approx 0,90 \times \tan \varphi'$
GTD vs. Untergrund / Auflager (φ')	$\tan \delta_k \approx 0,80 \times \tan \varphi'$
Boden / Oberboden (φ') vs. Schutzvliesstoff	$\tan \delta_k \approx 0,90 \times \tan \varphi'$
Schutzvliesstoff vs. Kunststoffdichtungsbahn (KDB) (glatt)	$\delta_k \approx 10^\circ$
Schutzvliesstoff vs. KDB (strukturiert)	$\delta_k \geq 33^\circ$
KDB (glatt) vs. Sandschutz-/Auflagerschicht (φ')	$\delta_k \approx 18^\circ$
KDB (strukturiert) vs. Sandschutz-/Auflagerschicht (φ')	$\delta_k \geq 25^\circ$

3.3 Erosion der Deponieoberfläche

Mit dem Bau von Oberflächenabdichtungen, Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten ist auch die Gefährdung einer Deponieböschung mit noch nicht entwickeltem Bewuchs durch Oberflächenerosion ins Blickfeld geraten. Bei gut entwickeltem Bewuchs und einer zuverlässig funktionierenden Entwässerung der Oberfläche, die eine Überströmung der Böschungen auch bei Starkniederschlägen verhindert, besteht bei den derzeitigen hydrologischen Verhältnissen an den meisten Standorten keine Gefahr einer Schädigung. Zahlreiche Schadensfälle haben aber die Notwendigkeit und Bedeutung eines anfänglichen Erosionsschutzes in der Initialphase des Bewuchses gezeigt, der bei der Auswahl geeigneter Böden nach der Empfehlung GDA E 3-31 beginnt.

Das Erosionsrisiko ist bei der Planung der Entwässerung zu bewerten. Zentrale Fragen sind die Bemessungseinwirkung, das maßgebende Niederschlagsereignis und die darauf aufbauende vertragliche Regelung der Zuständigkeit und Verantwortlichkeit eines temporären Schutzes sowie der anschließenden Pflege. Insbesondere bei langen Böschungen können ingenieurbio-logische und technische Maßnahmen erforderlich werden. Die bodenphysikalischen Grundlagen und die Mechanismen einer Oberflächenerosion werden in WITT U. JOHANNSEN, 2009 behandelt, geeignete Maßnahmen zum temporären und dauerhaften Erosionsschutz von Rekultivierungsschichten werden dort erläutert.

4. Zusammenfassung

Standortsicherheitsdefizite können im Lebenszyklus einer Deponie global in Form von großräumigen Rutschungen des Abfallkörpers oder lokal als Rutschung im Schichtsystem der Oberflächenabdichtung auftreten. Beide Szenarien lassen sich mit den bewährten Methoden der Bodenmechanik modellieren und quantifizieren. Die Unschärfe einer Prognose auf den ungewöhnlich langen Zeitraum von über 100 Jahren liegt im Ansatz der angemessenen Einwirkungen und Widerstände, in der realitätsnahen Festlegung der maßgebenden Kennwerte und der hydraulischen Belastung.

Für den Nachweis der globalen Standsicherheit liegt vergleichsweise wenig Erfahrung mit dem Langzeitverhalten mechanisch-biologisch vorbehandeltem Abfall vor. Bei hohen, schnell aufgeschütteten Abfallkörpern können Konsolidierungsverzug und damit Porenwasserüberdrücke im Sohlbereich nicht ausgeschlossen werden. Die Folge wäre ein Verlust der inneren Reibung. Die zweite mögliche Gefährdung ergibt sich in der Betriebsphase durch einen Aufstau über geringdurchlässigen Zonen. Beide Phänomene können zu globalem Versagen des Deponiekörpers, zu großräumigen Rutschungen führen. In Hinblick auf die Dauerhaftigkeit sind beide Effekte von nachrangiger Bedeutung. Es handelt sich bei beiden um ein Phänomen der Anfangsstandsicherheit, das jenseits der Nachsorgephase nicht mehr akut ist. In der Betriebs- und Nachsorgephase hält der Verfasser jedoch eine quantitative Beschreibung des Materials auf der Grundlage von Labor- und Feldversuchen, eine systematische Beobachtung der Wasserstände im Deponiekörper sowie eine darauf aufbauende quantitative Beurteilung möglicher Gefährdungen der globalen Standsicherheit für angemessen.

Der Nachweis der Gleitsicherheit von Oberflächenabdichtungssystemen wird durch eine einfache Bilanzierung der haltenden und treibenden Kräfte in den Schichten und Schichtflächen des Abdichtungssystems erbracht. Die Unschärfe liegt hier in der Festlegung der im Lebenszyklus zu erwartenden Niederschlagsereignisse, in der damit verbundenen Änderung der Bodeneigenschaften und in den bei Alterung der geosynthetischen Materialien veränderlichen Scherwiderständen. Diesen Unsicherheiten kann einerseits durch geeignete Materialien und andererseits durch eine möglichst robuste Bauweise begegnet werden. Es verbleibt als kritischer Punkt im Lebenszyklus einer Oberflächenabdichtung der Einflussfaktor Bewuchs, dessen Entwicklung langfristig die Funktion und die Standsicherheit der Abdichtung mit bestimmt.

Nicht konform mit der Forderung der DEPv, jedoch aus Sicht des Verfassers vernünftig, wäre ein Akzeptieren verbleibender Standsicherheitsrisiken, die ernst zu nehmende Feststellung, dass ein Bauwerk mit einer pflege- und unterhaltungsfreien Lebenszeit von über 100 Jahren nicht planbar ist und das Eingeständnis, dass ein Nachweis der 100-jährigen Standsicherheit neben plausiblen Argumenten auch immer einen genehmigungsrhetorischen Teil enthält.

Literatur

- ABRAMSON L. W., LEE, T. S., SHARMA S., BOYCE G. M., 2002: *Slope stability and stabilization methods*, 2nd ed. John Wiley u. Sons, Inc. New York
- ALYANAK, I., GAY, G. CH. W., HENKE, F. K., RETTENBERGER, G., TABASARAN, O., 1981: *Schlammkenwerte*. In : GAY, G. CH. W., HENKE, F. K., RETTENBERGER, G. , TABASARAN, O.: *Standsicherheit von Deponien für Hausmüll und Klärschlamm*. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 14, S. 65-120
- BAUER, J., MÜNNICH, K., FRICKE, K., 2008: *Bestimmung von Festigkeitskenngrößen für MBA-Reststoffe*. Müll und Abfall, Heft 3, 2008, S. 122 - 127
- BRAUNS, J. 1980: *Spreizsicherheit von Böschungen auf geneigtem Gelände*. Bauingenieur (55) 1980, S. 43-436
- CHEN, Y., XU, X.B., ZHAN, L. T., 2012: *Analysis of solid-liquid-gas interactions in landfilled municipal solid waste by a bio-hydro-mechanical coupled model*. Science China Technological Sciences, Vol.55 No.1, pp 81–89
- DEPONIEVERORDNUNG (DEPV), 2009: *Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV)* vom 27. April 2009, BGBl I, S. 900 zuletzt geändert am 2. Mai 2013 (BGBl. I S.973)
- DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK DGGT (Hrsg.) 2010: *Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO)*. Verlag Ernst&Sohn, Berlin
- DRESCHER, J., 1997: *Deponiebau*. Verlag Ernst & Sohn
- Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponien und Altlasten“: GDA, 1. Auflage, 1990. Hrsg: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Verlag Ernst & Sohn,
- Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponien und Altlasten“: GDA, 3. Auflage, 1997. Hrsg: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Verlag Ernst & Sohn. Später herausgegebene und aktualisierte Empfehlungen sind verfügbar unter: <http://www.gdaonline.de>
- ENTENMANN, W., 2010: *Betrieb, Verdichtungskontrolle und Standsicherheit von MBA-Deponien*. Müll und Abfall, Heft 11, 2010, S. 544-550

- GAY, G. CH. W., HENKE, F. K., 1981: *Standsicherheitsberechnungen*. In : GAY, G. CH. W., HENKE, F. K., RETTENBERGER, G., TABASARAN, O., 1981: *Standsicherheit von Deponien für Hausmüll und Klärschlamm*. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 14, S. 121-158
- HANDBUCH EUROCODE 7: Geotechnische Bemessung. Band 1: Allgemeine Regeln. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1. Auflage 2011
- KAMMEL, E., ENGEL, J., 2008: *Geotechnical models for waste processed mechanical biological treated waste*. Abfallforschungstage 2008, www.wastconsult.de
- MCDUGALL J. R., 2007: *A hydro-bio-mechanical model for settlement and other behaviour in landfilled waste*. J Comput Geotech, 2007, 34, pp 229–246
- MÜNNICH, K., BAUER, J., BAHR, T., FRICKE, K., 2005: *Landfilling of pre-treated waste – consequences for the construction and operation of landfills*. Proc. Conf. "The future of residual waste in Europe", Centre de Recherche Public Henri Tudor, Luxemburg 2005, http://www.compost.it/biblio/2005_luxembourg/startit.htm; siehe auch: *Ablagerung von MBA-Material – Konsequenzen für Bau und Betrieb der Deponie*. In: Stegmann et al. (Hrsg.) *Deponietechnik 2006*. Hamburger Berichte 29, Verlag Abfall aktuell Hamburg
- MÜNNICH, K., BAUER, J., FRICKE, K., 2006: *Ablagerung von MBA-Material - Konsequenzen für Bau und Betrieb der Deponie*. Deponietechnik 2006. Hamburger Berichte 29. S 143 - 158
- STIEF, K., ENGELMANN, B., 1992: *Die Bedeutung der Stabilität einer Deponie in der TA Abfall*. In Rodatz (Hrsg.): *Standsicherheiten im Deponiebau*. Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig, Heft Nr. 37, S. 1-9
- WIEMER, K., 1982: *Qualitative und quantitative Kriterien zur Bestimmung der Dichte von Abfällen in geordneten Deponien*. Dissertation – Abfallwirtschaft an der TU Berlin
- WITT. K. J., 2009: *Die Standsicherheit im Lebenszyklus von Oberflächenabdichtungssystemen*. 25. Fachtagung Die sichere Deponie 2009, SKZ Würzburg. Vortrag B
- WITT. K. J., JOHANNSEN, R., 2009: *Geotechnische und Ingenieurbio-logische Maßnahmen zum Erosionsschutz von Rekultivierungsschichten*. Geotechnik, 32 (2009) Nr. 4, S. 71-79
- WITT. K. J., WERTH, K., 2013: *Mobilisierbare Scherwiderstände in geneigten Schichtgrenzen*. 8. Naue Geokunststoff-Kolloquium, Rostock. <http://www.wittundpartner.de>
- WUDTKE, R.-B., WERTH, K., WITT, K. J., 2008: *Standsicherheitsnachweis für Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien*. Bautechnik 84, Heft 9, S. 596-602
- WURZLER, S., 2006: *Mechanisches Verhalten und Einbaubedingungen von MBA*. Diplomarbeit, Professur Grundbau, Bauhaus-Universität Weimar.

Verfasser

*Univ. Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt,
Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Grundbau,
Bauhaus-Universität Weimar,
Coudraystr. 11c, D-99423 Weimar.
E-Mail: kj.witt@uni-weimar.de*