

Mobilisierbare Scherwiderstände in geneigten Schichtgrenzen

K. J. Witt

Bauhaus-Universität Weimar

K. Werth

BBG Bauberatung Geokunststoffe GmbH & Co. KG

1 Einführung

Böschungparalleles Gleiten, Scherversagen in oberflächennahen Schichtgrenzen, gehört zu den harmlosesten aber häufigsten Formen von Rutschungen. Gleitflächen können konkrete Schichtgrenzen in Böden, Schwächezonen innerhalb von Schichten, Trennflächen zwischen Boden und Geokunststoffen oder zwischen verschiedenen Geokunststoffen eines Verbundsystems sein, die für Abdichtungs-, Drän- oder Bewehrungszwecken in Damm- und Einschnittsböschungen eingebaut werden. Solche Systeme kommen vor allem zum Einsatz bei Oberflächenabdichtungen von Deponien und Altlasten [WITT, 2009], bei der Abdichtung von Damm- und Einschnittsböschungen in Wasserschutzgebieten [FGSV, RiStWag 2002] und bei technischen Sicherungsmaßnahmen für Bauweisen mit umweltrelevant verunreinigten Böden [FGSV M TS E 2009].

Die physikalische Ursache dieser Versagensform ist eine Überbeanspruchung der im Boden oder in einer Schichtgrenze übertragbaren Schubspannung. Der auslösende Faktor steht meist in unmittelbarem Zusammenhang mit infiltriertem Niederschlagswasser, das einerseits die Einwirkungen in Form von Gewicht- oder Strömungskräften erhöht, andererseits durch Quell- und Sättigungseffekte in bindigen Böden den Scherwiderstand abmindert.

Die bodenphysikalischen Grundlagen und die statischen Gleichgewichtsbedingungen des böschungparallelen Gleitens lassen sich für ebene, zweidimensionale Verhältnisse klar formulieren. Komplexer werden die Gleichgewichtsbedingungen allerdings, wenn die Spannungsverteilung uneinheitlich ist, Widerstände verformungsabhängig sind, die Materialien viskose Eigenschaften haben oder sich bei Schwankungen der Temperatur oder Feuchte ändern.

Zentrale Fragen der Planung und der Standsicherheitsanalyse zielen auf zwei grundlegende Unsicherheiten: (i) die ungünstigste temporäre klimatische Einwirkung und (ii) die im Feld mobilisierbaren Scherwiderstände im Bruch- oder Residualzustand. In diesem Zusammenhang steht vor allem die Einschätzung der Kohäsion im Vordergrund, die unter Berücksichtigung von klimatischen Extremeinwirkungen und langfristigen Veränderungen der Materialeigenschaften im Bruchzustand im Boden oder in der Schichtgrenze mobilisiert werden kann.

Der Beitrag behandelt die statischen Grenzbedingungen des ebenen böschungparallelen Gleitens und die Bestimmung der materialspezifisch in Schichtgrenzen zwischen Boden und Geokunststoffen mobilisierbaren Scherwiderstände. Es folgen Hinweise zur Bewertung der Scherwiderstände bei Sicherheitsnachweisen.

Der früher gebräuchliche globale Sicherheitsfaktor η ist dagegen definiert:

$$\eta = \frac{R_k}{E_k} \geq 1,4 \quad (3)$$

mit

R_k = charakteristischer Widerstand

E_k = charakteristische Einwirkung

Bild 1 zeigte die auf die Gleitfläche wirkenden Kräfte für einen Böschungsabschnitt mit der Einheitslänge $L = 1$. Bei der Ermittlung der charakteristischen Gewichtskraft der Überlagerung nach dem Prinzip der effektiven Spannungen werden nach Gl (4) Zonen oberhalb und unterhalb eines böschungsparell angenommenen Wasserspiegels unterschieden. Bei mehreren Schichten setzt sich G_k aus der Summe der Schichtgewichte nach Gl (5) zusammen.

$$G_k = (\gamma_k \cdot (1 - m) + \gamma'_k \cdot m) \cdot d \cdot L \quad (4)$$

$$G_k = L \cdot \sum \gamma_{k,i} \cdot d_i \quad (5)$$

Hierbei sind:

γ_k, γ'_k charakteristische Wichte des Bodens (erdfeucht und unter Auftrieb)

m relative Einstauhöhe $m = d_w/d$

d, d_i Dicke der Überlagerungsschicht bzw. der Schicht i (normal zur Oberfläche, vgl. Bild 1)

d_w Dicke der durchströmten Schichten (normal zur Oberfläche, vgl. Bild 1)

L Länge des betrachteten Böschungselements (parallel zur Oberfläche)

Die charakteristische Strömungskraft S_k ergibt sich nach Gl (6), eventuell zusätzlich wirkende Verkehrslasten auf der Böschungsoberfläche P_k nach Gl (7)

$$S_k = d_w \cdot L \cdot \gamma_w \cdot \sin \beta \quad (6)$$

$$P_k = p_k \cdot L \quad (7)$$

mit

γ_w charakteristische Wichte des Wassers

β Neigung der Böschung relativ zur Horizontalen

p_k charakteristischer Wert der Verkehrslast (Ersatzlast eines Fahrzeugs, Schnee, etc.)

Der Sicherheitsnachweis wird nach EC 7 im Grenzzustand GEO-3 geführt (siehe auch DIN Normenhandbuch Eurocode 7, 2011). Hierbei werden für die Ermittlung der Bemessungsbeanspruchung in der permanenten Bemessungssituation BS-P die charakteristischen Gewichtseinwirkungen G_k wie auch die Strömungskraft S_k mit einem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_G = 1$ und die ungünstigen Verkehrslasten P_k mit $\gamma_Q = 1,3$ nach Gl (7) faktorisiert.

$$E_d = (G_k \cdot \gamma_G + P_k \cdot \gamma_Q) \cdot \sin \beta + S_k \cdot \gamma_G \quad (8)$$

Zur Ermittlung des Widerstandes werden im Grenzzustand GEO-3 die Bemessungswerte der Scherfestigkeit in der Gleitfläche angesetzt. Reibungswinkel $\tan \varphi'_k$ und Kohäsion c_k werden mit den Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_\varphi = \gamma_c = 1,25$ in Bemessungswerte übergeführt. Der in der Gleitfläche berücksichtigte Bemessungswert des Widerstandes beträgt dann

$$R_d = (G_k + P_k) \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi_d + c_d \cdot L \quad (9)$$

mit

φ_d Bemessungswert des Reibungswinkels/Kontaktreibungswinkel; $\tan \varphi_d = \tan \varphi_k / \gamma_\phi$

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

Bei dem Standsicherheitsnachweis einer Kontaktfuge zwischen Boden und Geokunststoff sind die Scherparameter als Kontaktreibungswinkel δ_d und Adhäsion a_d definiert. Die Bemessungswerte werden wie oben für Boden beschrieben ermittelt.

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 böschungparalleler Durchströmung mit Gl (10) ermittelt werden.

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} = \frac{[(\gamma \cdot (1-m) + \gamma_r \cdot m) \cdot d + p_k \cdot \gamma_Q] \cdot \sin \beta}{[(\gamma \cdot (1-m) + \gamma' \cdot m) \cdot d + p_k] \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi_d + c_d} \quad (10)$$

Hierbei sind

γ, γ' Wichte des feuchten Bodens und Wichte unter Auftrieb

γ_r Wichte des wassergesättigten Bodens ($\gamma_r = \gamma' + \gamma_w$)

γ_Q Teilsicherheitsbeiwert ungünstig wirkender Verkehrslasten ($\gamma_Q = 1,3$ für BS-P)

Details, Erläuterungen und ein Beispiel zur Nachweisführung der Gleitsicherheit von Schichtsystemen im Deponiebau finden sich bei WUDTKE ET AL. 2008. Die Vorgehensweise orientiert sich an der Empfehlung GDA E 2-7.

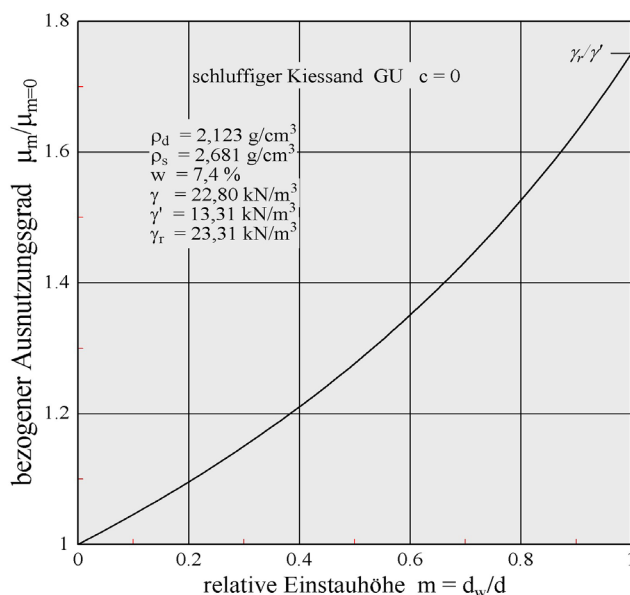


Bild 2: Beispiel zum sicherheitsmindernden Einfluss eines böschungparallelen Abflusses

Bild 2 zeigt ein Beispiel zum Einfluss eines Teileinstaus oberhalb der potentiellen Gleitfläche einer Böschung aus einem nichtbindigen Boden. Dargestellt ist das Verhältnis des nach Gl (10) ermittelten Ausnutzungsgrades mit und ohne Einstau (Erhöhungsfaktor infolge Einstau) über der relativen Einstauhöhe m . In der gesättigten 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. Je geringer die Wichte des

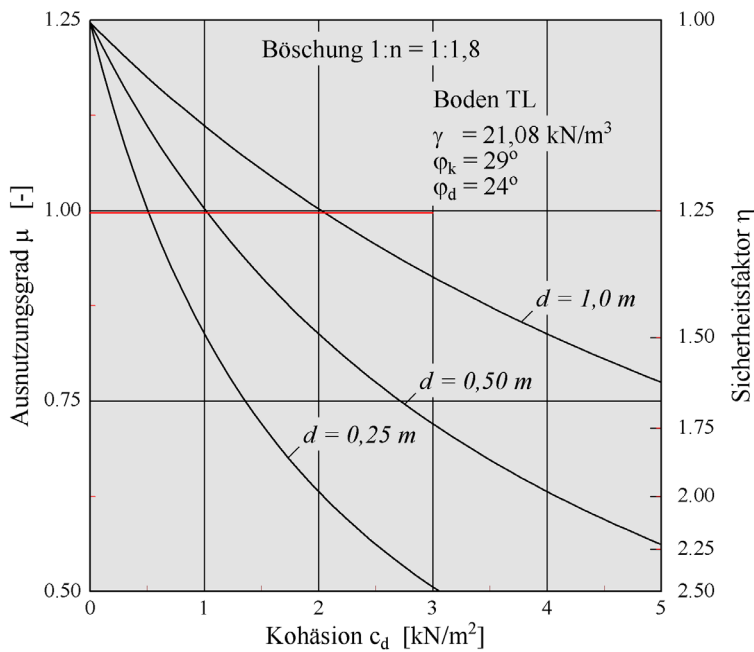


Bild 3: Einfluss der Kohäsion auf den Ausnutzungsgrad μ der Standsicherheit und auf den Sicherheitsfaktor η einer dränierten Böschung 1:n = 1:1,8. Boden der Gruppe GU; Tiefenlage der Gleitfuge d

Bodens, desto stärker der negative Effekt eines Einstaus. Der durch Kohäsion erzeugte Anteil am Gleitwiderstand wird durch einen Einstau nicht verändert. Jedoch mindert eine ständige Benetzung bei geringer Überlagerungsspannung i. A. die mobilisierbare Kohäsion oder Adhäsion infolge Quell- und Vernässungseffekte stark ab.

Der Einfluss einer in der Gleitfläche mobilisierbaren Kohäsion auf den Ausnutzungsgrad μ bzw. auf den globalen Sicherheitsfaktor η ist in Bild 3 für dränierte Verhältnisse ($m = 0$) und eine 1:n = 1:1,8 geneigte Böschung exemplarisch dargestellt. Insbesondere bei einer flach unter der Oberfläche verlaufenden potentiellen Gleitfläche, wie dies bei den eingangs erwähnten Abdichtungsmaßnahmen der Fall ist, erhöht selbst eine geringe Kohäsion die Standsicherheit bzw. mindert den Ausnutzungsgrad ab.

Das Beispiel zeigt auch, dass für die angenommenen Verhältnisse ohne die Mobilisierung einer Kohäsion keine Standsicherheit nachgewiesen werden kann. Je tiefer die Gleitfläche unter der Böschungsoberfläche verläuft, desto höher muss die Kohäsion sein. Aufgrund von Überlegungen zur Dauerhaftigkeit fordert GDA E 2-7 jedoch, dass bei folgenden Reibpartnern zum Nachweis der Gleitsicherheit keine Kohäsion bzw. Adhäsion angesetzt werden darf:

- In Gleitflächen mit einer glatten Kunststoffdichtungsbahn
- In Gleitflächen zwischen Geotextilien (Trenn- und Schutzvliese, Deck- oder Trägergewebe geosynthetischer Tondichtungsbahnen (GTD) und geosynthetischer Dränsysteme) und tonmineralischen Abdichtungsschichten.
- In Gleitflächen zwischen Geotextilien (Trenn- und Schutzvliese, Deck- oder Trägergewebe von geosynthetischen Dränsystemen) und Rekultivierungsböden/Oberboden.

Somit bleibt bei vielen Anwendungen von Geokunststoffen bei Abdichtungsmaßnahmen im Deponie- und Verkehrswegebau lediglich ein Aufbau mit einer möglichst hohen Reibung in den potentiellen Gleitflächen, bei kurzen Böschungen die Berücksichtigung von Stützkraften am Böschungsfuß und bei langen Böschungen eine Bewehrung mit Geogittern, die nach EBGeo [DGGT 2010] zu bemessen ist.

3 Kompensation eines Gleitsicherheitsdefizits

Wird der Gleitsicherheitsnachweis in einer der potentiellen Gleitflächen nach Gl (1) oder (9) nicht erfüllt, kann entweder geprüft werden, ob eine Stützkraft E_p am Böschungsfuß aktivierbar ist oder ob das Gleitsicherheitsdefizit durch eine Zugbewehrung des Schichtsystems oberhalb der kritischen Gleitfläche kompensiert wird. Beide Effekte einer solchen Kompensationskraft bewirken eine Erhöhung des Widerstandes.

$$R_d = (G_k + P_d) \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi_d + c_d \cdot L + E_{p,d} + R_{B,d} \quad (11)$$

mit

$E_{p,d}$ = Bemessungswert der aktivierbaren Stützkraft

$R_{B,d}$ = Bemessungswert der erforderlichen Zugkraft einer Bewehrung

Der Ausnutungsgrad einer oberhalb der Gleitfläche teilweise wassergesättigten Böschung lässt sich auch für diesen Fall geschlossen ermitteln:

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} = \frac{[(\gamma \cdot (1-m) + \gamma_r \cdot m) \cdot d + p_k \cdot \gamma_Q] \cdot \sin \beta}{[(\gamma \cdot (1-m) + \gamma' \cdot m) \cdot d + p_k] \cdot \cos \beta \cdot \tan \varphi_d + c_d + \frac{E_{p,d} + R_{B,d}}{L}} \quad (12)$$

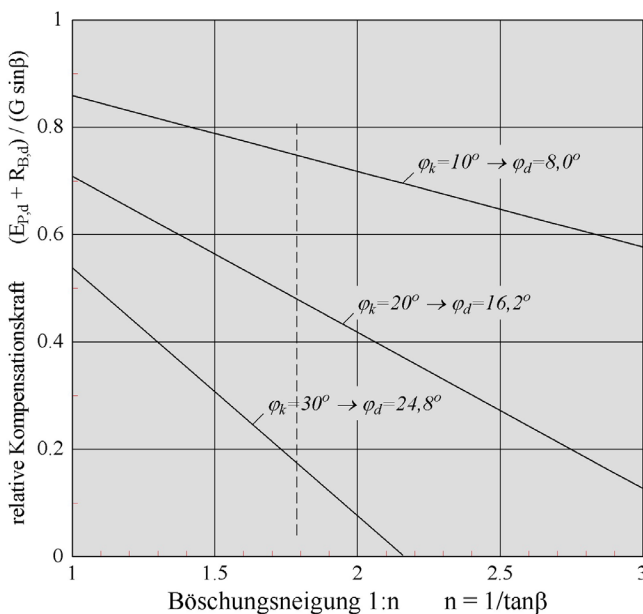


Bild 4: Auf die Hangabtriebskraft bezogene Kompensationskraft in Abhängigkeit von Böschungsneigung und Scherfestigkeit

Aus Gl (12) ist ersichtlich, dass bei einem gegebenen Ausnutungsgrad der Bemessungswert der Kompensationskraft, der Summe aus Stützkraft am Böschungsfuß und Zugkraft einer Bewehrung, $E_{p,d} + R_{B,d}$, proportional mit der Länge der Böschung zunimmt.

Bild 4 veranschaulicht für eine dränierete kohäsionslose Gleitfläche, welcher Anteil der treibenden Kraft (Hangabtriebskraft) in Abhängigkeit vom Neigungswinkel β der Gleitfläche und vom Reibungswinkel φ durch eine Zugbewehrung und/oder durch eine Stützkraft am Böschungsfuß zu kompensieren ist. Das Beispiel zielt auf eine besonders im Verkehrswegebau häufig anzutreffende Einschnittsböschung mit einer Neigung $1:n = 1:1,5$ bis $1:1,8$. In Wasser-

schutzgebieten wird hierfür vorzugsweise eine Kunststoffdichtungsbahn im unteren Böschungsteil als Abdichtungselement eingesetzt. Bei Verwendung einer profilierten, mit einem Schutzvlies geschützten Dichtungsbahn, bei der bei benachbarten sandigen Böden durchaus ein charakteristischer Reibungswinkel von $\varphi_k > 25^\circ$ in den potentiellen Gleitflächen mobilisiert werden kann, müssen bis zu 50% der Hangabtriebskraft zur Sicherstellung eines ausreichenden Sicherheitsniveaus kompensiert werden. Bei Einsatz einer glatten Dichtungsbahn oder einer mit einem Vlies geschützten mineralischen Dichtung

als Abdichtungskomponente kann in der Gleitfläche lediglich ein Reibungswinkel im Bereich von $\varphi_k \approx 15^\circ$ mobilisiert werden. In diesem Fall liegt der Anteil der zu kompensierenden Hangabtriebskraft in der Größenordnung von 70% bis 80%. Diese Überlegung veranschaulicht die Rolle, die der Bemessung, dem Gleitsicherheitsnachweis und der Kenntnis der im Bauwerk langfristig mobilisierbaren Scherfestigkeit zukommt.

Soweit das Defizit der Gleitsicherheit durch die Stützwirkung am Böschungsfuß kompensiert werden soll, muss nachgewiesen werden, dass vor dem Böschungsfuß auf Höhe des Planums diese Kraft als Erdwiderstand aufgenommen werden kann. Als Nachweisverfahren ist eine Standsicherheitsanalyse mit einem zusammengesetzten Bruchmechanismus (Blockgleiten) angemessen, wie dies in Bild 5 vereinfacht dargestellt ist. Als Sicherheitsdefinition kann beispielsweise das Verhältnis aus in der Hauptgleitfläche mobilisierten Reibungswinkel und dem Bemessungswert des mobilisierbaren Reibungswinkels definiert werden:

$$\text{Ausnutzungsgrad } \mu = \frac{\tan \varphi_{mob}}{\tan \varphi_d} \quad (13)$$

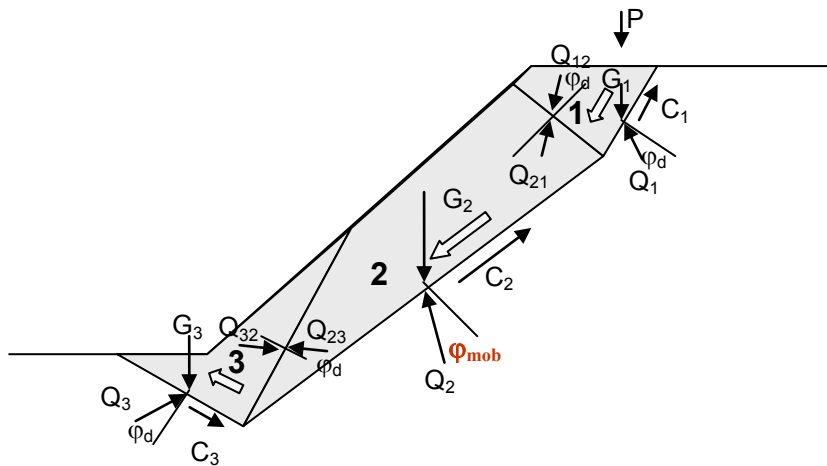


Bild 5: Nachweis der Stützwirkung des Böschungsfußes mit dem Blockgleitverfahren

Der Regelfall der Kompensation eines Gleitsicherheitsdefizits ist der Einsatz eines am Böschungskopf oder auf Bermen verankerten Geogitters als Zugbewehrung. Der Bemessungswert der Zugkraft wird aus Gl (11) oder (12) ermittelt, die erforderliche Kurzzeit-Zugfestigkeit mit Abminderungsfaktoren gem. Zulassung des Produktes nach EB GEO berechnet.

Mit der Aktivierung einer Zugkraft in der Bewehrung sind Dehnungen verbunden, die auch Scherdehnungen in der potentiellen Gleitfläche bedeuten können, soweit dies nicht durch Schubverzerrungen aufgezehrt wird. Mit solchen Relativverschiebungen in den Gleitflächen des Schichtsystems können auch Grenzzustände einhergehen, ein Verlust einer eventuell vorhandenen Restkohäsion oder eine Abminderung des Reibungswinkels bis zur geringeren Restscherfestigkeit. Derartige bodenmechanische Überlegungen sind bei der Bemessung, insbesondere bei der Festlegung der dauerhaft mobilisierbaren Scherparameter, aber auch bei der Bauausführung zu berücksichtigen. Bei der Bauausführung wird diesem Effekt der Verformung qualitativ dadurch begegnet, dass die am Kopf fixierte Bewehrung auf der Böschung steigend überschüttet wird, so dass eine Art Vorspannung erzeugt und ein Teil der durch die Zugkraft bedingten Dehnungen im oberen Böschungsbereich so vorweggenom-

men werden. Bei der Planung solcher Schichtsysteme sollte mit der Auswahl der Materialien angestrebt werden, dass das System ohne zusätzliche Kompensation in der Lage ist, den Grenzzustand zu vermeiden. Die Zugbewehrung hätte dann lediglich die Aufgabe, die Gleitsicherheit zu erhöhen, also die nach den Regelwerken erforderliche Sicherheitsreserve zu garantieren. Ausgedrückt im Konzept der Teilsicherheiten bedeutend dies, dass das Schichtsystem ohne Bewehrung einen Ausnutzungsgrad $\mu < 1,25$ haben sollte und lediglich die Erhöhung der Gleitsicherheit bis auf einen Ausnutzungsgrad $\mu \leq 1,0$ der Bewehrung zugeordnet wird. Mit Blick auf das früher verwendete globale Sicherheitskonzept bedeutet diese Empfehlung, dass das unbewehrte System bereits eine Sicherheit $\eta > 1$ aufweisen sollte, während die Bewehrung die Gleitsicherheit bis zu dem geforderten Sicherheitsfaktor $\eta \geq 1,4$ anhebt.

4 Scherwiderstände in Schichtgrenzen

Kernfrage des Nachweises der Gleitsicherheit geeigneter Schichtsysteme ist die Ermittlung und Festlegung langfristig mobilisierbarer Scherparameter. Üblicherweise werden der Reibungswinkel φ' und die Kohäsion c' , bei Gleitflächen mit Geokunststoffen der Reibungswert δ' und die Adhäsion a' , experimentell mit Rahmenscherversuchen ermittelt. Der Versuch und die Randbedingungen sind in GDA E 3-8 beschrieben. Zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bezüglich der Repräsentativität und der Streuung der Versuchstechnik werden die charakteristischen Werte als abgeminderte Laborwerte ermittelt:

$$\tan \varphi'_k = \frac{\tan \varphi'}{1,1}; \quad \tan \delta'_k = \frac{\tan \delta'}{1,1} \quad (14)$$

$$c'_k = \frac{c'}{1,3}; \quad a'_k = \frac{a'}{2,0} \quad (15)$$

Tabelle1: Orientierungswerte für Reibungswerte zwischen Boden und Geokunststoffen

<i>Schichtgrenzen mit Geokunststoffen</i>	<i>Charakteristischer Reibbeiwert</i>
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')	$\delta_k \geq 25^\circ$

Liegen mehrere abgesicherte Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Proben vor, kann auf die Abminderung nach Gl (14) und (15) verzichtet werden. Der charakteristische Wert wird dann im Sinne DIN EN 1997-1 aus den Einzelergebnissen als vorsichtige Schätzung des Mittelwertes festgelegt. Bei

Reibungspartnern mit Geokunststoffen darf der Abminderungsfaktor zur Ermittlung der charakteristischen Adhäsion a_k aus dem Mittelwert der Versuchsergebnisse jedoch nicht kleiner als 1,5 sein.

Empirisch ermittelte Orientierungswerte für Scherparameter in typischen Gleitflächen mit Geokunststoffen sind in Tabelle 1 angegeben.

Zugkraftverluste aufgrund von Kriechen und Alterung von Geokunststoffen werden produktspezifisch in Spezialversuchen ermittelt, schlagen sich in der in der Zulassung angegebenen Kurzzeitzugfestigkeit wieder oder sind im Sicherheitsfaktor A_1 zur Berechnung des Bemessungswertes der Zugfestigkeit berücksichtigt.

Die Beurteilung einer Änderung der Bodeneigenschaften infolge Verwitterung oder Wasserzutritt ist einer der schwierigsten Punkte des geotechnischen Entwurfs und der Bemessung von Schichtsystemen. Jeder un- oder gering belastete bindige Boden quillt bei Wasserzutritt auf und verliert dadurch einen Großteil seiner Festigkeit i. e. seiner Kohäsion. Der Zusammenhang zwischen Konsistenz und mobilisierbarer Kohäsion ist exemplarisch (und im Verlauf geglättet) in Bild 6 dargestellt.

Die Kohäsion eines Bodens hängt in erster Linie vom Mineralbestand, der Korngrößenverteilung und der Konsolidationsspannung ab. Infolge Wasseraufnahme nach dem Einbau, wie dies durch Infiltration von Niederschlagswasser auftreten kann, weicht der Boden insgesamt oder in permanent benetzten Schichtgrenzen unter einer geringen Überlagerungsspannung auf. Folge des Verlustes der Scherfestigkeit können Böschungsversagen oder verstärkte Kriechbewegungen sein. Besonders kritisch sind hierbei ausgeprägt plastische Böden ($w_L > 50\%$), Lößlehm und vergleichbare feinsandige, gering – bis mittelplastische Böden.

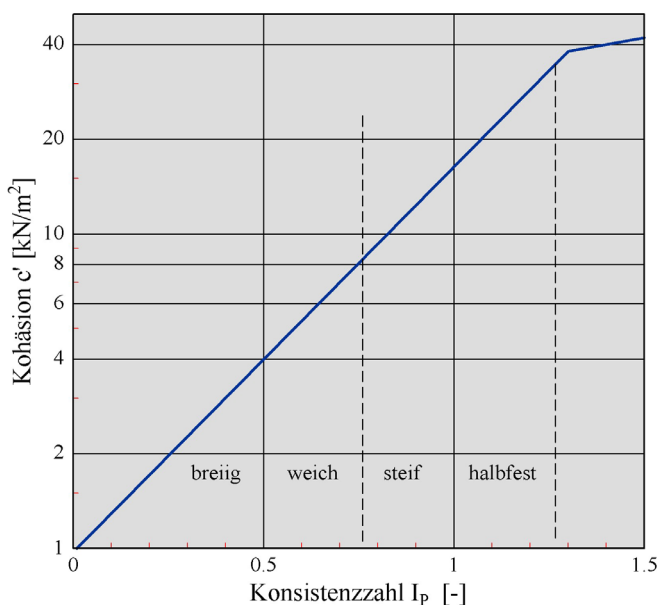


Bild 6: Qualitativer Zusammenhang zwischen Konsistenz und mobilisierbarer Kohäsion eines bindigen Bodens

Bei einer regelmäßigen Einsickerung von Niederschlagswasser in das Schichtsystem einer Böschung, bei dem es zu einem Aufstau und einer böschungsparellen Sickerströmung kommt, überlagern sich zwei die Sicherheit mindernde Effekte in Hinblick auf die Gleitsicherheit. Zum einen entsteht mit dem böschungsparellen Abfluss eine Strömungskraft, die destabilisierend wirkt (vgl. Bild 2). Zum andern ist bei Ansatz einer Kohäsion in dem Nachweis der Gleitsicherheit ein signifikanter Verlust des Scherwiderstandes verbunden (Bild 6). Eine sorgfältige Planung muss daher beides, die im Lebenszyklus zu erwartenden klimatischen Einwirkungen und die Verletzlichkeit des Schichtsystems berücksichtigen.

5 Zusammenfassung

Abdichtungssysteme aus mineralischen und geosynthetischen Materialien werden im Deponiebau als Oberflächenabdichtung, in Erdbauwerken des Verkehrswegebau bei Abdichtungen in Wasserschutzgebieten und bei anderen technischen Sicherungsmaßnahmen eingesetzt. Böschungsrutschungen treten in solchen Schichtsystemen meist in Form von schichtparallelem Gleiten auf.

Die Grenzbedingungen der Standsicherheit lassen sich für diesen Versagensmodus hinreichend genau beschreiben. Es handelt sich um Scherversagen in ebenen Gleitflächen des Schichtsystems, häufig in Kontaktflächen zwischen Boden und Geokunststoffen. Etwas komplizierter wird die Gleitsicherheitsanalyse, wenn zusätzlich zu den Gewicht- und Scherkräften im Schichtsystem Stützkräfte am Böschungsfuß oder eine Zugbewehrung zur Kompensation eines Sicherheitsdefizits berücksichtigt wird. Aber auch hierfür liegen abgesicherte Berechnungsmethoden vor, die in den Regelwerken beschrieben und in diesem Beitrag erläutert sind.

Quelle der Unschärfe ist nicht die mechanische Modellierung des Tragsystems oder die Nachweismethode an sich, sondern die Unkenntnis der im Lebenszyklus zu erwartenden Einwirkungen infolge Infiltration von Niederschlagswasser einerseits und der damit verbundenen Änderung der mobilisierbaren Scherwiderstände andererseits. In der Anfangsphase, bis zur Entwicklung einer geschlossenen Vegetation auf der Böschungsoberfläche, betrifft dies insbesondere die Abschätzung der zu erwartenden Infiltration von Niederschlagswasser, die zu einem böschungsp parallelen Abfluss im Schichtsystem und dem damit verbundenen destabilisierenden Effekt führen kann. Hier muss die Strategie der Planung und Bemessung auf Maßnahmen zum Erosionsschutz zielen [Witt u. Johannsen 2009]. Langfristig können sich infolge klimatischer Einwirkungen bei regelmäßiger Benetzung kohäsiver/adhäsiver Grenzflächen signifikante Abminderungen der Scherwiderstände ergeben. Der Fokus liegt hierbei in dem realitätsnahen Ansatz einer unter den vorherrschenden Randbedingungen mobilisierbaren Kohäsion/Adhäsion. In beiden Fällen ist die zentrale Frage die Einschätzung der Wirkung des infiltrierten Niederschlagswassers, einmal quantitativ im Sinne eines Aufstaus, einmal als Einfluss auf die langfristige Veränderung der Bodeneigenschaften.

Für den Bau von Oberflächenabdichtungen von Deponien hat sich mit den GDA-Empfehlungen, zwischenzeitlich auch mit anderen umfangreichen Regelwerken der Länder, ein Qualitätsstandard etabliert, der die Einflüsse aus Vegetation, Erosion, Infiltration und Temperaturschwankungen in der Planung und Bemessung berücksichtigt. Im Verkehrswegebau zeigen dagegen die häufig vorkommenden Böschungsrutschungen infolge Erosion, Infiltration von Niederschlagswasser und Aufweichen bindiger Böden, dass auch hier für Abdichtungsmaßnahmen in Schichtsystemen bei der Planung und Bemessung des Schichtsystems Maßnahmen zur Dränung und Bewehrung mit einbezogen werden.

6 Literatur

- DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (HRSG) 2011: *Handbuch Eurocode 7 Geotechnische Bemessung Band 1: Allgemeine Regeln*. Beuth Verlag
- ABRAMSON, L. W., LEE, T. S., SHARMA, S., BOYCE, G. M. 2002: *Slope Stability and Stabilization Methods*. John Wiley & Sons, New York, 2. Ed. 2002

- 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
- EUROCODE 7: DIN EN 1997-1:2009-09: *Sicherheitsnachweise in der Geotechnik*
- FGSV M TS E 2009: *Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen*
- FGSV, RiStWag 2002: *Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten*
- GDA E 2-7: *Nachweis der Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen*. in: WITT, K. J. RAMKE, H.-G. 2008: Empfehlungen des Arbeitskreises 6.1 "Geotechnik der Deponiebauwerke" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik DGGT. Bautechnik 82/9 (2008). 575 – 592
- GDA E 3-8: *Reibungsverhalten von Geokunststoffen* in: WITT, K. J. RAMKE, H.-G. 2005: Empfehlungen des Arbeitskreises 6.1 "Geotechnik der Deponiebauwerke" der DGGT, Bautechnik 82, Heft 9, S. 575-592
- 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 Ingenieurbiologische Maßnahmen zum Erosionsschutz von Rekultivierungsschichten*. Geotechnik, 32 (2009) Nr. 2, S. 71-79
- WUDTKE, R.-B., WERTH, K., WITT, K. J. 2008: *Standsicherheitsnachweis für Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien*. Bautechnik 84, Heft 9, S. 596-602

Anschrift der Autoren

*Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt,
Professur Grundbau
Bauhaus-Universität Weimar,
Coudraystraße 11c,
99423 Weimar.*

kj.witt@uni-weimar.de

*Dipl.-Ing. Katja Werth
BBG Bauberatung Geokunststoffe GmbH & Co. KG
Gewerbestrasse 2
D-32339 Espelkamp*

kwerth@bbgeo.com

ZITAT:

WITT, K. J., WERTH, K., 2013: *Mobilisierbare Scherwiderstände in geneigten Schichtgrenzen*. 8. Naue Geokunststoff-Kolloquium, Rostock