

E 2-7 Nachweis der Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen

August 2015

1 Allgemeines

Die Basis-, Zwischen-, und Oberflächenabdichtungssysteme sind aus Schichten verschiedenartiger Materialien zusammengesetzt. Die Gleitsicherheit in den potenziellen Gleitflächen des Abdichtungssystems wird für die im Entwurf festgelegten Neigungen durch die Scherfestigkeit der Materialien bestimmt.

Für die Beanspruchungen aus Eigengewicht, Porenwasserdruck, Verkehrslasten und sonstigen Einwirkungen muss die Gleitsicherheit in allen Trenn- und Grenzflächen des Abdichtungssystems sowie in möglichen Gleitflächen innerhalb der Schichten für den Bauzustand, den Betrieb und für die Zeit nach Schließung der Deponie nachgewiesen werden. Dabei sind auch ungünstige Veränderungen im Scherverhalten der Materialien und der Schichtfugen zu berücksichtigen.

In den einzelnen Komponenten dürfen keine unverträglichen Schub- und Zugspannungen auftreten. Die mechanischen Einwirkungen aus zu erwartenden Zwangsverformungen des Abdichtungssystems müssen einzelfallbezogen betrachtet werden. Abdichtungssysteme von Deponien werden nach Eurocode 7 (EC 7) und DIN 1054 [Handbuch Eurocode 7] in der Regel der Geotechnischen Kategorie 2 zugeordnet. Für erdstatische Berechnungen, so auch für den Nachweis der Gleitsicherheit, wird eine unabhängige geotechnische Prüfung durch einen Sachverständigen für Erd- und Grundbau nach Bauordnungsrecht empfohlen.

2 Nachweis der Gleitsicherheit

Maßgebend für den Nachweis der Gleitsicherheit in den Trennflächen eines Schichtsystems sind DIN EN 1997-1 (EC 7), DIN 1054 und DIN 4084. Als Grenzzustand wird schichtparalleles Gleiten (ebene Gleitflächen) betrachtet, was nach DIN 1054 dem Grenzzustand GEO-3 zugeordnet werden kann. Die erforderliche Zugkraft von Bewehrungselementen kann ebenfalls im Grenzzustand GEO-3 mit faktorisierten Bodenwiderständen ermittelt werden. Näheres hierzu wird in EBGEO ausgeführt.

Die Spreizsicherheit einer Basisdichtung ist erfüllt, wenn in allen Schichtfugen der Bemessungswert des im Grenzzustand mobilisierbaren Reibungswinkels φ'_d größer ist, als der zur Schubkraftübertragung erforderliche charakteristische Sohlreibungswinkel δ_k . Der charakteristische Wert des erforderlichen Sohlreibungswinkels wird nach GDA E 2-21 ermittelt.

Bild 2-7.1 zeigt eine Prinzipskizze eines teilweise durchströmten Abdichtungssystems mit den geometrischen Definitionen. Auf der sicheren Seite liegend wird der Nachweis für schichtparalleles Gleiten einer unbegrenzten Böschung betrachtet, was homogene Schichtung mit gleichmäßiger Belastung voraussetzt. Die Resultierende

der seitlich angreifenden Erddruck- und Stützkräfte E_l und E_r wird vernachlässigt. Mit den Teilsicherheitsbeiwerten für Einwirkungen und Bodenwiderstände nach Tabelle 2-7.1 [DIN 1054] ergeben sich die auf ein durchströmtes Böschungselement mit der Breite $b = 1$ m bezogenen stabilisierenden und destabilisierenden Bemessungswerte der Kräfte zu

a) Bemessungswert der Beanspruchung, destabilisierend, nach Gl. (1) oder (2)

$$E_d = \sin \beta \left[(1-m) \cdot h \cdot \gamma_k \cdot \gamma_G + m \cdot h \cdot \gamma_{r,k} \cdot \gamma_G \right] + p_k \cdot \gamma_Q \cdot \tan \beta \quad (1)$$

$$= \tan \beta \left[(1-m) \cdot d \cdot \gamma_k \cdot \gamma_G + m \cdot d \cdot \gamma_{r,k} \cdot \gamma_G + p_k \cdot \gamma_Q \right] \quad (2)$$

b) Bemessungswert des Gleitwiderstandes (Beanspruchbarkeit), stabilisierend, nach Gl. (3) oder (4)

$$R_d = \frac{c'_d}{\cos \beta} + \cos \beta \cdot \tan \varphi'_d \left[(1-m) \cdot h \cdot \gamma_k + m \cdot h \cdot \gamma'_k + \frac{p_k}{\cos \beta} \right] \quad (3)$$

$$= \frac{c'_d}{\cos \beta} + \tan \varphi'_d \left[(1-m) \cdot d \cdot \gamma_k + m \cdot d \cdot \gamma'_k + p_k \right] \quad (4)$$

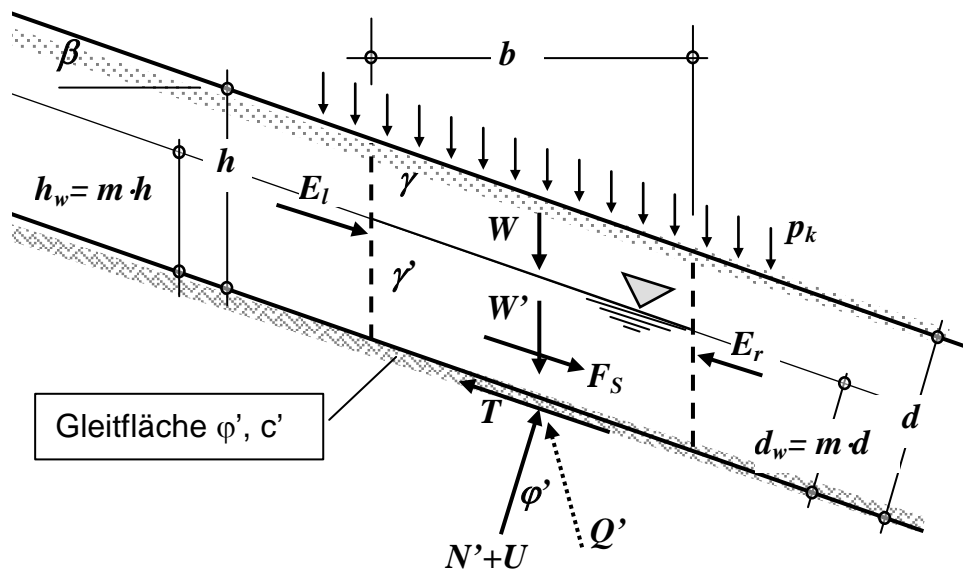


Bild 2-7.1: Schichtparalleles Gleiten eines teilweise durchströmten Abdichtungssystems. Definition der Schichthöhen und der Kräfte am Böschungselement der Breite b

Dabei sind

β Neigungswinkel der Gleitfuge

γ_k Charakteristische Wichte des Bodens bzw. der Bodenschichten

γ'_k	Charakteristisches Wichte der durchströmten Bodenschichten unter Auftrieb
$\gamma_{r,k}$	Charakteristische Wichte der wassergesättigten Bodenschichten
p_k	Charakteristische Verkehrslast, schichtparallele Verkehrslast
φ'_d	Bemessungswert des wirksamen Reibungswinkels in der Gleitfuge mit: $\tan \varphi'_d = (\tan \varphi'_k) / \gamma_\varphi$; sinngemäß δ_d bei geosynthetischen Reibungspartnern
φ'_k	Charakteristischer Wert des wirksamen Reibungswinkels in der Gleitfuge; sinngemäß δ_k bei geosynthetischen Reibungspartnern
c'_d	Bemessungswert der wirksamen Kohäsion in der Gleitfuge mit $c_d = c_k / \gamma_c$; Sinngemäß Adhäsion a'_d bei geosynthetischen Reibungspartnern.
c'_k	Charakteristischer Wert der wirksamen Kohäsion in der Gleitfuge; sinngemäß Adhäsion a'_k bei geosynthetischen Reibungspartnern.
d	Mächtigkeit der Schichten normal zur Gleitfuge; $d = h \cdot \cos \beta$
h	Lotrechte Mächtigkeit der Schichten
m	Durchströmter Anteil der Mächtigkeit der Schichten
γ_G	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Beanspruchungen im Grenzzustand GEO-3
γ_Q	Teilsicherheitsbeiwert für ungünstige veränderliche Einwirkungen im Grenzzustand GEO-3
γ_φ	Teilsicherheitsbeiwert für den Reibungsbeiwert φ , Grenzzustand GEO-3
γ_δ	Teilsicherheitsbeiwert für den Reibungsbeiwert δ , Grenzzustand GEO-3
γ_c	Teilsicherheitsbeiwert für Kohäsion im Grenzzustand GEO-3
γ_a	Teilsicherheitsbeiwert für Adhäsion im Grenzzustand GEO-3

Bei inhomogenem Aufbau der Schichtung, einer Durchströmung mit sich entlang der Böschungslänge verändernder Abflusshöhe, bei lokalen Einwirkungen aus Verkehrslasten oder bei Berücksichtigung von Stützkräften am Böschungsfuß können die Beanspruchung E_d und der Widerstand R_d für die gesamte Böschungslänge ermittelt werden. Beispiele hierzu finden sich in SAATHOFF U. WERTH, 2005. Für kurze Böschungsabschnitte kann der Grenzzustand auch mit Starrkörper-Bruchmechanismen modelliert werden. Bei Innenböschungen von Randdämmen lassen sich damit Stützkräfte am Böschungsfuß berücksichtigen.

Ausreichende Gleitsicherheit ist gegeben, wenn für alle Bemessungssituationen gilt:

$$E_d \leq R_d \quad (5)$$

Das Maß der Sicherheit lässt sich als Ausnutzungsgrad μ , als Verhältnis der Bemessungswerte der Beanspruchung und der Beanspruchbarkeit darstellen:

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} = \frac{\sin \beta \left[(1-m) \cdot d \cdot \gamma_k \cdot \gamma_G + m \cdot d \cdot \gamma_{r,k} \cdot \gamma_G + p_k \cdot \gamma_Q \right]}{c'_d + \cos \beta \cdot \tan \varphi'_d \left[(1-m) \cdot d \cdot \gamma_k + m \cdot d \cdot \gamma'_k + p_k \right]} \quad (6)$$

Das im Handbuch Eurocode 7 geforderte Sicherheitsniveau ist eingehalten, wenn ein Ausnutzungsgrad $\mu < 1$ nachgewiesen wird.

Bei Gleitsicherheitsnachweisen für Schichtfugen unterhalb von Abdichtungskomponenten, sind die tatsächlichen Porenwasserdrücke in der Gleitfuge zu berücksichtigen. Wirkt bei abgeschlossener Konsolidation kein Porenwasserüberdruck in der Gleitfuge unterhalb der Abdichtungskomponente, werden die absoluten Spannungen aus der Überlagerung angesetzt. Beim Nachweis mit Gl. (3) und (6) wird dann die Wichte unter Auftrieb γ'_k durch die Wichte des wassergesättigten Bodens $\gamma_{r,k}$ ersetzt. Ist der Nachweis der Gleitsicherheit in einer Bemessungssituation allein mit Bodenwiderständen nicht zu führen, können Bewehrungslagen aus Geokunststoffen eingebaut werden. Die erforderliche Bemessungszugkraft $F_{B,d}$ kann ebenfalls im Grenzzustand GEO-3 ermittelt werden.

$$F_{B,d}^* = R_d - E_d \quad (7)$$

$$F_{B,d} = F_{B,d}^* \cdot l \cdot \cos \beta \quad (8)$$

mit

$F_{B,d}^*$ Bemessungswert der auf das Böschungselement mit $b = 1$ bezogenen Zugkraft, R_d und E_d nach Gl. (1) bis (4)

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

l Böschungslänge

Die charakteristische Zugkraft des Bewehrungselementes und der Nachweis der Verankerungslänge werden nach EBGEO [DGGT, 2010] ermittelt. Beispiele finden sich in [WUDTKE, R.-B., WERTH, K. U. WITT, K. J. 2008]. Bei ungünstig wirkender räumlichen Situation wie z. B. bei einer ausgerundete Böschung, bei denen sich die Zugkräfte überlagernd am Kopf konzentrieren, muss die Lastkonzentration beim Nachweis berücksichtigt werden.

Die Teilsicherheitsbeiwerte für die unterschiedlichen Bemessungssituationen sind in Tabelle 2-7.1 angegeben.

Die wirksamen Scherparameter φ' und c' der Bodenschichten werden für das vorherrschende Spannungsniveau im Rahmen der Eignungsprüfung gemäß GDA E 3-1 im direkten Scherversuch (DIN 18 137, Teil 3), ggf. auch im Triaxialversuch (DIN 18 137, Teil 2) ermittelt (vgl. GDA 3-8).

Für nichtbindigen Boden wie z. B. Dränkies oder Auflagerschichten, können auch abgesicherte Erfahrungswerte angesetzt werden. Die Scherwiderstände zwischen Boden und Geokunststoffen sowie zwischen zwei Geokunststoffen werden nach GDA E 3-8 experimentell ermittelt. Anstelle des Reibungswinkels φ tritt bei Gleitfugen mit Geokunststoffen der Reibungswert δ , anstelle der Kohäsion c' tritt die Adhäsion a' .

Tabelle 2-7.1: Teilsicherheitsbeiwerte für den Nachweis der Gleitsicherheit nach Gl. 3 u. 4

Teilsicherheitsbeiwerte		Bemessungssituationen		
		BS-P	BS-T	BS-A
Ständige Einwirkungen	γ_G	1,00	1,00	1,00
Ungünstige veränderliche Einwirkungen	γ_Q	1,30	1,20	1,00
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ in der dränierten Scherfuge und Reibungsbeiwert $\tan \delta$ in Scherfugen mit geosynthetischen Reibungspartnern	$\gamma_{\varphi'}$ γ_{δ}	1,25	1,15	1,10
Kohäsion in der dränierten Scherfuge und Adhäsion in Scherfugen mit geosynthetischen Reibungspartnern	γ_c γ_a	1,25	1,15	1,10

Zur Ermittlung der charakteristischen Scherparameter φ_k , δ_k , c_k und a_k aus einzelnen Laborversuchen werden die Laborwerte zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bezüglich der Repräsentativität und der Streuung der Versuchstechnik abgemindert.

$$\tan \varphi'_k = \frac{\tan \varphi'}{1,1}; \quad \tan \delta'_k = \frac{\tan \delta'}{1,1} \quad (9)$$

$$c'_k = \frac{c'}{1,3} \quad (10)$$

$$a'_k = \frac{a'}{2,0} \quad (11)$$

Liegen für Schichtflächen aus geosynthetischen Reibungspartnern mindestens drei abgesicherte Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Proben vor, darf auf die pauschale Abminderung nach Gl. (9) und (11) verzichtet werden. Der charakteristische Wert wird dann im Sinne DIN EN 1997-1 aus den Einzelergebnissen als vorsichtige Schätzung des Mittelwertes festgelegt. Zur Ermittlung der charakteristischen Adhäsion a_k aus dem Mittelwert der Versuchsergebnisse darf die Abminderung jedoch nicht kleiner als 1,5 sein.

Eine Kohäsion oder Adhäsion darf in Kontaktflächen mit bindigen Böden nur dann angesetzt werden, wenn die Mobilisierbarkeit im Laborversuch nachgewiesen und im Feld im Bau- und Endzustand sichergestellt ist. Dies ist dann der Fall, wenn ein flächiger, rauher Verbund vorhanden ist, keine Kriech- oder Zwangsverformungen zu erwarten sind und Effekte des Aufweichens aufgrund von Schichtwasser, Kondensat oder Konsolidation ausgeschlossen werden können.

Bei folgenden Reibpartnern darf generell zum Nachweis der Gleitsicherheit keine Adhäsion angesetzt werden:

- In Schichtflächen mit einer glatten Kunststoffdichtungsbahn
- In Schichtflächen zwischen Geotextilien (Trenn- und Schutzvliese, Deck- o-

der Trärgewebe geosynthetischer Tondichtungsbahnen und geosynthetischer Dränsysteme) und tonmineralischen Abdichtungsschichten.

- In Schichtflächen zwischen Geotextilien (Trenn- und Schutzvliese, Deck- oder Trärgewebe von geosynthetischen Dränsystemen) und Rekultivierungsschichten.

3 Bemessungssituationen

Die Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen ist für die folgenden Bemessungssituationen (früher Lastfälle) nachzuweisen.

- BS-P Planmäßige Nutzung, regelmäßig auftretende Einwirkungen.
- BS-T Vorübergehende Einwirkungen aus Bauzuständen oder zeitlich begrenzter Nutzung
- BS-A Außergewöhnliche Bedingungen, Sonderlasten, teilweiser Ausfall oder Ermüdung von Tragelementen oder Teilausfall von Bodenwiderständen wie Adhäsion/Kohäsion in Schichtfugen bei Kriechen oder Zwangsverformungen

Typische Einwirkungen auf Abdichtungssysteme sind in Tab. 2-7.2 zusammengestellt. Die zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte sind in Tab. 2-7.1 angegeben.

Tabelle 2-7.2: Einwirkungen der Bemessungssituationen zum Nachweis der Gleitsicherheit

Bemessungssituation	Einwirkungen
BS-P ständig	Eigengewicht der Abdichtung und der Überlagerung incl. tolerierbarem Überprofil Einstau der Dränage Schneelast
BS-T vorübergehend	Eigengewicht der Abdichtung und der Überlagerung Einstau Dränage Verkehrslasten aus Baustellenverkehr
BS-A außergewöhnlich	Eigengewicht Abdichtung und Überlagerung Einstau Dränage, ggf. Teileinstau Rekultivierungsschicht Standortspezifische Schneelast Verkehrslasten Zusatzlasten, z. B. Erdbeben

Die standortspezifische Schneelast ist nach DIN 1055 [DIN 1055-5:2005-07] bzw. EC 1 [DIN EN 1991-1-3: 2012-10] festzulegen. Zur Ermittlung der Einstauhöhe der Dränage kann GDA E 2-20 herangezogen werden. Die Verkehrslast kann als statische Ersatzlast oder mit den Kennwerten der vorgesehenen Geräte als flächig begrenzte Einwirkung angesetzt werden.

4 Verformungen

Der Nachweis der Gleitsicherheit erfordert eine objektspezifische Analyse der eingetragenen Kräfte und der daraus resultierenden Verformungen. Bestehen Unsicherheiten in der Bewertung und der rechnerischen Abschätzung der langfristig in eine Abdichtungskomponente eingetragenen Kräfte und Zwangsverformungen und deren Auswirkung auf deren Beständigkeit, so muss zusätzlich nachgewiesen werden, dass die Abdichtungskomponente langfristig die Schubkräfte schadfrei übertragen kann. Die Scherparameter in den Trennflächen über der Abdichtungskomponente müssen dazu so abgestimmt werden, dass die Schubkraft im Grenzzustand dort kleiner ist als in Gleitflächen innerhalb und unterhalb der Abdichtungskomponente. Insbesondere sollte an der Unterseite einer Kunststoffdichtungsbahnen im Grenzzustand ein größerer Schubwiderstand als an deren Oberseite übertragbar sein. Dies gilt als erfüllt, wenn für die Winkel der Gesamtscherfestigkeit im relevanten Spannungsniveau nachgewiesen wird:

$$\tan \delta_{u,k} \geq 1,1 \cdot \tan \delta_{o,k} \quad (12)$$

$\delta_{u,k}$ Charakteristischer Winkel der Gesamtscherfestigkeit unterhalb des Dichtungselementes, ermittelt aus abgeminderten Versuchswerten nach Gl. (9) bis (11)

$\delta_{o,k}$ Charakteristischer Winkel der Gesamtscherfestigkeit oberhalb der Abdichtungskomponente, ermittelt aus Versuchswerten ohne Abminderung nach Gl. (9) bis (11)

Dieser Nachweis ist nicht erforderlich, wenn keine Zwangsverformungen erwartet werden und für alle Bemessungssituationen die hohe Gleitsicherheit bzw. Spreizsicherheit nachgewiesen werden kann. Im Falle von zu erwartenden Zwangsverformungen, insbesondere bei innenliegenden Abdichtungen (Zwischendichtungen), aber auch bei einem hohen Ausnutzungsgrad der Gleitsicherheit in der Gleitfuge unterhalb der Abdichtungskomponente ($\mu > 0,85$) wird der Nachweis der unschädlichen Übertragung von Schubkräften generell empfohlen. Erforderlichenfalls sind über einer gefährdeten Abdichtungskomponente spezielle Gleitschichten vorzusehen.

Literatur zu E 2-7:

DIN EN 1997-1:2014-03 : Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln

DIN 1054:2010-12: Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau

DIN 1055-5:2005-07 Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 5: Schnee- und Eislasten

DIN 4084:2009-01: Baugrund – Geländebruchberechnungen

Handbuch Eurocode 7 Geotechnische Bemessung Band 1: Allgemeine Regeln, 1. Auflage 2011, Beuth Verlag GmbH

- DIN 18137-1:2010-07: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit, Teil 1: Begriffe u. grunds. Versuchsbedingungen
- DIN 18137-2:2011-04: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit, Teil 2: Triaxialversuch
- DIN 18137-3:2002-09: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit, Teil 3: Direkter Scherversuch
- DIN EN 1991-1-3:2012-10: Eurocode 1 - Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2-3: Einwirkungen auf Tragwerke; Schneelasten
- EBGEO, 2010: Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen, 2., Auflage - April 2010, Verlag Ernst & Sohn
- SAATHOFF, F., WERTH, K., 2005: Standsicherheitsnachweise für Oberflächenabdichtungssysteme - Anmerkungen zum Lastfall Einbau geschichteter Systeme mit Geokunststoffen. 21. SKZ-Tagung „Die sichere Deponie“, Süddeutsches Kunststoffzentrum, Würzburg
- WUDTKE, R.-B., WERTH, K., WITT, K. J. 2008: Gleitsicherheitsnachweis für Oberflächenabdichtungssysteme von Deponien. Bautechnik 85, Heft 9, S. 596-602

Zitierte GDA-Empfehlungen

- GDA E 2-20: Entwässerungsschichten in Oberflächenabdichtungssystemen.
- GDA E 2-21: Spreizsicherheitsnachweis und Verformungsabschätzung für die Deponiebasis.
- GDA E 3-1: Eignungsprüfung mineralischer Oberflächen- und Basisabdichtungen.
- GDA E 3-8: Reibungsverhalten von Geokunststoffen.

Ansprechpartner: Univ. Prof. Dr. Ing. Karl Josef Witt
Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystr. 11c
99425 Weimar
e-mail: kj.witt@uni-weimar.de

Bearbeiter: K. J. Witt, Weimar, K. Werth, Bremen