



Standortsicherheitsnachweis des Oberflächenabdichtungssystems für  
die Deponieabschnitte DK 0 und DK I

## **Deponie Albstadt - Schönbuch**

### **Ausbau und Betrieb einer DK I, DK 0 und Restverfüllung der DK -0,5 Deponie**

**Vorhabensträger:**

**Landkreis Zollernalbkreis**

## **Impressum**

Antragsteller: **Landkreis Zollernalbkreis**

Hirschbergstraße 29  
72336 Balingen

Auftraggeber: **Landratsamt Zollernalbkreis - Abfallwirtschaftsamt**

Hirschbergstraße 29  
72336 Balingen

Auftragnehmer: **Sweco GmbH**

**Sweco GmbH**  
Jakob-Anstatt-Straße 2  
55130 Mainz

Bearbeitung: Heiko Töhne  
Vanessa Schmidt

Bearbeitungszeitraum: Mai 2019  
Überarbeitung Januar 2020

**Inhaltsverzeichnis**

1	Grundlagen	1
2	Anlagen	2
3	Veranlassung	3
4	Aufbau	3
5	Nachweis der Standsicherheit (GEO-3)	4
5.1	Erläuterungen zum Nachweis	4
5.2	Eingangswerte	7
5.3	Scherparameter	8
5.4	Kräfte	10
5.4.1	Einwirkungen	10
5.4.2	Widerstände	11
5.5	Ermittlung des Ausnutzungsgrades	11
6	Erbeben	12
7	Kurzzeichen	12
8	Ergebnisse	14
9	Zusammenfassung	14

## 1 Grundlagen

- [1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 4084:2009-1 Geländebruchberechnung, 2009.
- [2] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT, Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponiebauwerke", E 3-8 Reibungsverhalten von Geokunststoffen, 2005.
- [3] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT, Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponiebauwerke", E 2-7 Nachweis der Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen, 2015.
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN EN 1997-1:2014-03 : Eurocode 7 - Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln, 2014.
- [5] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN 1054:2010-12 Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, 2010.
- [6] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT, Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen, 2009.
- [7] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT, DIN EN 1998-1:2010-12, Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten, 2010.
- [8] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., DIN-EN 1991-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken, 2003.
- [9] K. J. Witt, Grundbau-Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren, 2009.
- [10] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT, DIN EN 1991-1-3 (2010-12), Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten, 2010.
- [11] Sweco, Deponie Schönbuch, Planungsunterlagen, Mai 2019.
- [12] Grett, H.D., Das Reibungsverhalten von Geotextilien in bindigem und nichtbindigem Boden, 1984.

## 2 Anlagen

- [A1] Standsicherheitsberechnungen für die Oberflächenabdichtung der Deponie Schönbuch DK 0: maximale Neigung 1:n = 1:3 ( $\beta=18,4^\circ$ ), Böschungslänge  $L \leq 135$  m, BS-T (Bauzustand)
- [A2] Standsicherheitsberechnungen für die Oberflächenabdichtung der Deponie Schönbuch DK 0: maximale Neigung 1:n = 1:3 ( $\beta=18,4^\circ$ ), Böschungslänge  $L \leq 135$  m, BS-P (Endzustand)
- [A3] Standsicherheitsberechnungen für die Oberflächenabdichtung der Deponie Schönbuch DK 0: maximale Neigung 1:n = 1:3 ( $\beta=18,4^\circ$ ), Böschungslänge  $L \leq 135$  m, BS-E (Erdbeben)
- [A4] Standsicherheitsberechnungen für die Oberflächenabdichtung der Deponie Schönbuch DK I: maximale Neigung 1:n = 1:3 ( $\beta=18,4^\circ$ ), Böschungslänge  $L \leq 135$  m, BS-T (Bauzustand)
- [A5] Standsicherheitsberechnungen für die Oberflächenabdichtung der Deponie Schönbuch DK I: maximale Neigung 1:n = 1:3 ( $\beta=18,4^\circ$ ), Böschungslänge  $L \leq 135$  m, BS-P (Endzustand)
- [A6] Standsicherheitsberechnungen für die Oberflächenabdichtung der Deponie Schönbuch DK I: maximale Neigung 1:n = 1:3 ( $\beta=18,4^\circ$ ), Böschungslänge  $L \leq 135$  m, BS-E (Erdbeben)

### 3 Veranlassung

Der Landkreis Zollernalbkreis beabsichtigt zur Sicherstellung der Entsorgung von Erdaushub und mineralischen Abfällen bereits vorhandene Deponien im Kreisgebiet zu übernehmen, auszubauen und weiter zu betreiben. Die Deponie soll für die Ablagerung von Abfällen, die die Zuordnungswerte für DK 0 und DK I gemäß DepV 2017 einhalten, ausgebaut und betrieben werden. Der Ausbau und Betrieb der zu errichtenden Deponie soll entsprechend den Vorgaben der Deponieverordnung DepV erfolgen.

Für die Herstellung der Oberflächenabdichtung ist ein Nachweis der Standsicherheit gegen Gleiten im Böschungsbereich unter Berücksichtigung der vorgesehenen Aufbauvariante nach [11] erforderlich.

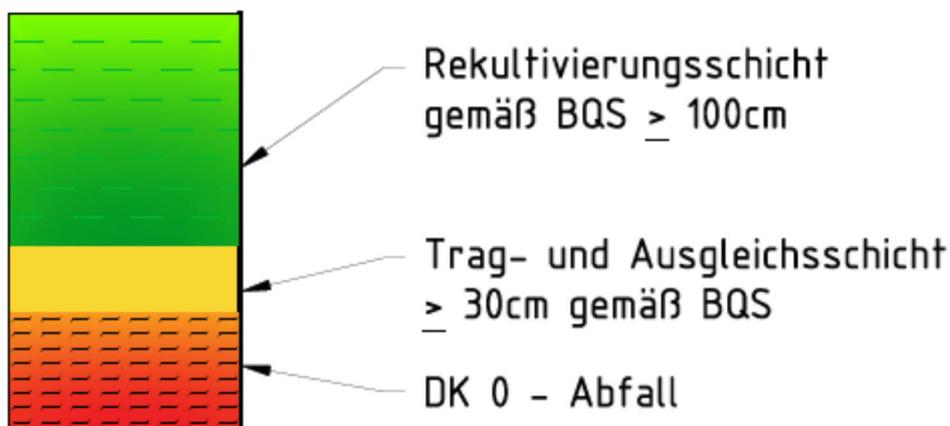
### 4 Aufbau

Die Standsicherheit ist gegen böschungsparalleles Gleiten in den Scherfugen des Dichtungssystems für den steilsten Böschungsbereich der Deponie Schönbuch unter der Berücksichtigung des vorgesehenen Dichtungssystems nachzuweisen.

Gemäß dem aktuellen Stand [11] sind für die Böschungsbereiche der Oberflächenabdichtung für die Deponie Schönbuch die nachfolgenden geometrischen Randbedingungen zu berücksichtigen:

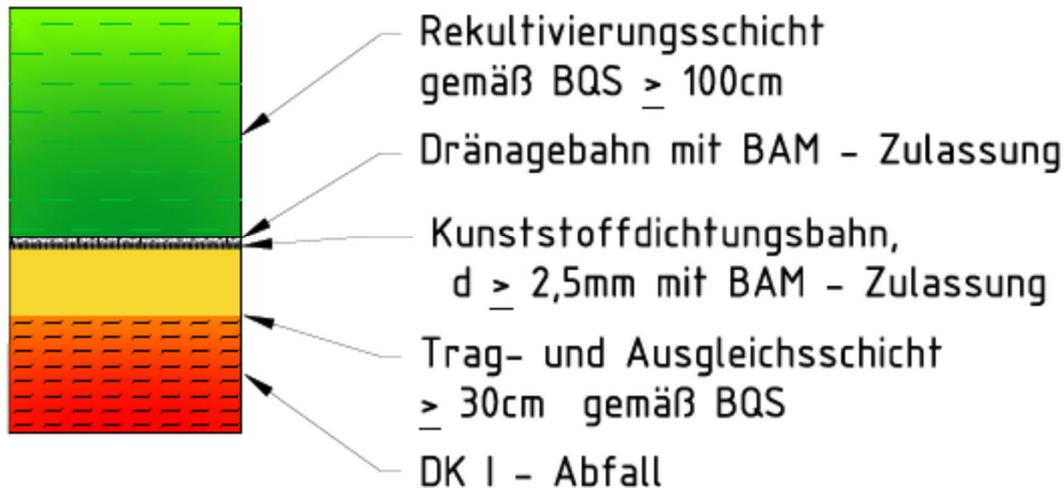
Böschungslänge im Regelbereich:  $L_{max} = 135 \text{ m}$ , maximale Böschungsneigung  $1:n = 1:3$  ( $\beta = 18,43^\circ$ ).

Für den DK 0-Bereich:



- Rekultivierungsschicht, Dicke  $d = 0,8 \text{ m}$
- Geosynthetisches Dränelement m. BAM-Zulassung
- Mineralische Schutzschicht (0/8 mm bzw. 2/8 mm), Dicke  $d \geq 0,15 \text{ m}$
- Gasgängige Trag und Ausgleichssicht (TAG), Dicke  $d \geq 0,30 \text{ m}$

Für den DK I-Bereich:



- Rekultivierungsschicht, Dicke  $d = 0,8$  m
- Geosynthetisches Dränelement m. BAM-Zulassung
- Kunststoffbahn (KDB) m. BAM-Zulassung
- Mineralische Schutzschicht (0/8 mm bzw. 2/8 mm), Dicke  $d \geq 0,15$  m
- Gasgängige Trag und Ausgleichssicht (TAG), Dicke  $d \geq 0,30$  m

## 5 Nachweis der Standsicherheit (GEO-3)

### 5.1 Erläuterungen zum Nachweis

Abdichtungen von Abfalldeponien sollen über sehr lange Zeiträume die Infiltration von Niederschlagswasser in den Abfallkörper kontrollieren. Es handelt sich um geschichtete Systeme aus verschiedenen Erdstoffen und Geokunststoffen. Auf den geeigneten Flächen und steilen Böschungen ist das Schichtsystem im nicht verfüllten Zustand auf Schub beansprucht. Mit der Planung des Abdichtungssystems ist die Standsicherheit für diesen Bau- und Betriebszustand nachzuweisen.

Für die Herstellung von Oberflächenabdichtung gilt BS-T für die vorübergehende Bemessungssituation für zeitlich begrenzte Zustände, im wesentlichen Bauzustand. Damit werden das Eigengewicht der Abdeckschichten, Einstau der Drainage und Baugeräte auf der Böschung berücksichtigt.

Die Standsicherheit von Abdichtungen auf der Deponieböschungen ist nach aktuellen nationalen und europäischen Normen mit dem Teilsicherheitskonzept zu führen. Der Nachweis wird in der Anlehnung

an den der Gesamtstandsicherheit im Grenzzustand GEO-3 nach EC7 geführt. Betrachtet wird der Böschungs-/Geländebruch nach DIN 4084 [1] – Nachweis der Gleitsicherheit in potenziellen Gleitflächen innerhalb des Abdichtungssystems (böschungspaaralles Gleiten). Das Abdichtungssystem wird hierbei nicht als Bauteil, sondern als ganzheitliches Bauwerk interpretiert, wodurch der Nachweis nach Grundzustand GEO-2/STR nach [5] nicht relevant ist. Untersucht wird der Lastfall BS-T mit den Teilsicherheiten nach [5].

Für das Dichtungssystem aus Geokunststoffen muss gewährleistet sein, dass die an der Oberseite auftretenden Schubkräfte aus dem Eigengewicht der Schutz- und Entwässerungsschicht oder aus Lasten im Bauzustand mit der geforderten Sicherheit über Reibung zwischen den verschiedenen Geokunststoffen und zwischen den Geokunststoffen und Erdstoffen wirksamen Reibungskräften werden auf der physikalischen Grundlage des Reibungsgesetzes von *Coulomb* bestimmt. Danach ist die Reibungskraft in der Ebene der Schichtgrenze proportional zu der Normalkraft, mit der die beiden Schichten gegeneinander gedrückt werden. Der Proportionalitätsfaktor  $\mu = \tan \delta$  wird als Reibungszahl bezeichnet.

Der Reibungswinkel  $\delta$  ist abhängig von den Materialien und deren Oberflächenbeschaffenheit. Wenn für den Fall ohne äußere Normalkraft eine „Reibungskraft“ vorhanden ist, so diese „spannungsunabhängige“ Kraft infolge andersartiger Kraftwirkung Adhäsion.

Für geotechnische Standsicherheitsbedingungen von geschichteten Systemen aus Geokunststoffen und Erdstoffen kann die Reibung zwischen zwei Schichten durch eine nach Spannungsbereichen aufgeteilte, abschnittsweise Anwendung der *Coulombschen* Grenzbedingung annäherungsweise beschrieben:

$$\tau = a + \sigma \cdot \tan \delta$$

Für den Fall, dass durch zu geringe Reibungskräfte der Schichtgrenzen die geforderte Sicherheit mit der die auftretenden Schubkräfte in den Untergrund abgetragen werden, nicht gewährleistet werden kann, ist an der Oberseite des Dichtungssystems eine Zugbewehrung anzuordnen. Diese ist nach den Vorgaben der EBGEO [6] zu bemessen. Die in die Zugbewehrung eingetragenen Schubkräfte müssen an der Böschungsoberkante als Zugkraft  $T_{G,d}$  durch einen Einbindegraben oder eine ausreichende Verankerungslänge sicher abgetragen werden können. Der Nachweis für eine ausreichende Verankerung des Geogitters erfolgt nach GEO-3 für „Bruch an der Böschungskrone“ und „Bruch im Verankerungsgraben“. Für das Geogitter ist der Nachweis gegen „Bruch der Bewehrung“ nach GEO-2/STR für die aus dem Standsicherheitsnachweis im Nachweisverfahren nach GEO-3 ermittelten Beanspruchungen zu führen.

Bei der Ausführung der Böschung mit der hier vorhandenen maximalen Neigung wird für diesen Nachweis die ausreichende Standsicherheit der Böschung gegen Geländebruch ebenso wie eine ausreichende Standsicherheit der mineralischen Schicht vorausgesetzt.

Damit wird eine für die vorgesehene Neigung ausreichende innere Scherfestigkeit der eingesetzten Böden vorausgesetzt.

Zum Nachweis der Sicherheit gegen Gleiten der Komponenten des Dichtungssystems untereinander muss die Grenzzustandsgleichung  $R_d - E_d \geq 0$  gelten. Beim Nachweis sind entsprechend der für den Grenzzustand gültigen Annahmen die Bemessungswerte der Einwirkungen  $E_d$  den Bemessungswerten der Widerstände  $R_d$  gegenüberzustellen. Aus der Gegenüberstellung ergibt sich für die ungünstigsten Randbedingungen der Ausnutzungsgrad  $\mu$  und es gilt:

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} \leq 1,0$$

Teilsicherheiten aus [5] für Einwirkungen:

**Tabelle A 2.1 — Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_F^{1)}$  bzw.  $\gamma_E^{2)}$  für Einwirkungen und Beanspruchungen**

Einwirkung bzw. Beanspruchung	Formelzeichen	Bemessungssituation		
		BS-P	BS-T	BS-A
<b>HYD und UPL: Grenzzustand des Versagens durch hydraulischen Grundbruch und Aufschwimmen</b>				
Destabilisierende ständige Einwirkungen <sup>a</sup>	$\gamma_{G,dst}$	1,05	1,05	1,00
Stabilisierende ständige Einwirkungen	$\gamma_{G,stb}$	0,95	0,95	0,95
Destabilisierende veränderliche Einwirkungen	$\gamma_{Q,dst}$	1,50	1,30	1,00
Stabilisierende veränderliche Einwirkungen	$\gamma_{Q,stb}$	0	0	0
Strömungskraft bei günstigem Untergrund	$\gamma_H$	1,35	1,30	1,20
Strömungskraft bei ungünstigem Untergrund	$\gamma_H$	1,80	1,60	1,35
<b>EQU: Grenzzustand des Verlusts der Lagesicherheit</b>				
Ungünstige ständige Einwirkungen	$\gamma_{G,dst}$	1,10	1,05	1,00
Günstige ständige Einwirkungen	$\gamma_{G,stb}$	0,90	0,90	0,95
Ungünstige veränderliche Einwirkungen	$\gamma_Q$	1,50	1,25	1,00
<b>STR und GEO-2: Grenzzustand des Versagens von Bauwerken, Bauteilen und Baugrund</b>				
Beanspruchungen aus ständigen Einwirkungen allgemein <sup>a</sup>	$\gamma_G$	1,35	1,20	1,10
Beanspruchungen aus günstigen ständigen Einwirkungen <sup>b</sup>	$\gamma_{G,inf}$	1,00	1,00	1,00
Beanspruchungen aus ständigen Einwirkungen aus Erdruehdruck	$\gamma_{G \cdot E0}$	1,20	1,10	1,00
Beanspruchungen aus ungünstigen veränderlichen Einwirkungen	$\gamma_Q$	1,50	1,30	1,10
Beanspruchungen aus günstigen veränderlichen Einwirkungen	$\gamma_Q$	0	0	0
<b>GEO-3: Grenzzustand des Versagens durch Verlusts der Gesamtstandsicherheit</b>				
Ständige Einwirkungen <sup>a</sup>	$\gamma_G$	1,00	1,00	1,00
Ungünstige veränderliche Einwirkungen	$\gamma_Q$	1,30	1,20	1,00
<b>SLS: Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit</b>				
$\gamma_G = 1,00$ für ständige Einwirkungen bzw. Beanspruchungen				
$\gamma_Q = 1,00$ für veränderliche Einwirkungen bzw. Beanspruchungen				
<sup>a</sup> einschließlich ständigem und veränderlichem Wasserdruck.				
<sup>b</sup> nur im Sonderfall nach 7.6.3.1 A (2).				

Teilsicherheiten aus [5] für Widerstände:

**Tabelle A 2.2 — Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_M^{(3)}$  für geotechnische Kenngrößen**

Bodenkenngröße	Formelzeichen	Bemessungssituation		
		BS-P	BS-T	BS-A
<b>HYD und UPL: Grenzzustand des Versagens durch hydraulischen Grundbruch und Aufschwimmen</b>				
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des dränierten Bodens und Reibungsbeiwert $\tan \varphi_U$ des undränierten Bodens	$\gamma_{\varphi'}, \gamma_{\varphi_U}$	1,00	1,00	1,00
Kohäsion $c'$ des dränierten Bodens und Scherfestigkeit $c_U$ des undränierten Bodens	$\gamma_{c'}, \gamma_{c_U}$	1,00	1,00	1,00
<b>GEO-2: Grenzzustand des Versagens von Bauwerken, Bauteilen und Baugrund</b>				
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des dränierten Bodens und Reibungsbeiwert $\tan \varphi_U$ des undränierten Bodens	$\gamma_{\varphi'}, \gamma_{\varphi_U}$	1,00	1,00	1,00
Kohäsion $c'$ des dränierten Bodens und Scherfestigkeit $c_U$ des undränierten Bodens	$\gamma_{c'}, \gamma_{c_U}$	1,00	1,00	1,00
<b>GEO-3: Grenzzustand des Versagens durch Verlust der Gesamtstandsicherheit</b>				
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des dränierten Bodens und Reibungsbeiwert $\tan \varphi_U$ des undränierten Bodens	$\gamma_{\varphi'}, \gamma_{\varphi_U}$	1,25	1,15	1,10
Kohäsion $c'$ des dränierten Bodens und Scherfestigkeit $c_U$ des undränierten Bodens	$\gamma_{c'}, \gamma_{c_U}$	1,25	1,15	1,10

## 5.2 Eingangswerte

Nach [11] liegen folgende Randbedingungen vor:

	Regelbereich	
Bodenwichte $\gamma$	19	kN/m <sup>3</sup>
Wasserwichte $\gamma_w$	10	kN/m <sup>3</sup>
Gesamtmächtigkeit der Überdeckung oberhalb der Abdichtung $d_{ges}$	0,8	m
Angenommener max. Aufstau der Dränschicht, im Verfüllzustand $h_w$	0,02	m
Böschungsneigung $\beta$	18,43	°
Böschungslänge $L_{max}$	135	m

**Einbau der mineralischen Schicht:** Es wird angenommen, dass die Überbauung des Dichtungssystems mit Rekultivierungsboden durch einen Bagger Caterpillar CAT 318 C im vor-Kopf-Verfahren erfolgt. Es wird für die Befahrung des Dichtungssystems eine Mindestmächtigkeit von  $d_1 = 0,4$  m unterhalb der Ketten des Einbaugerätes vorausgesetzt. Es werden dabei folgende Parameter angenommen:

**Caterpillar CAT 318 C**

Eigengewicht $G_R$	200	kN
Kettenbreite $b_R$	0,6	m
Kettenlänge $l_R$	3,26	m
Fahrgeschwindigkeit $v$	0,833	m/s
Bremsverzögerung $t$	2,0	s
Böschungslänge $L_{max}$	135/46	m

Lasten während des Endzustandes:

- Schneelast nach [10], Zone II  $s_k = 3,24$  kN/m<sup>2</sup>

**5.3 Scherparameter**

Im Rahmen der vorliegenden Berechnung sind charakteristische Kontaktreibungswinkel für die zu betrachtende Scherfuge anzusetzen.

In Ermangelung von konkreten Scherversuchergebnissen mit den in-situ Böden können im Vorfeld von Baumaßnahmen für den vorläufigen Nachweis der Standsicherheit gegen Gleiten des Dichtungssystems die Reibungsparameter für Scherfugen Boden vs. Vliesstoff kann der Kontaktreibungswinkel mit dem Ansatz nach *Grettl*[12] empirisch gemäß Formal abgeschätzt werden:

$$\tan \delta'_k = \tan \delta_k \cdot 0,9$$

Für die Scherfuge Rekultivierungsboden vs. Dränagematte ergibt sich bei Annahme eines inneren Reibungswinkels von  $\varphi_k = 27,5^\circ$  für einen vorwiegend schluffigen bis sandigen Rekultivierungsboden der Kontaktreibungswinkel  $\delta_k = 25,1^\circ$ .

Nach [3] wird der in Versuchen ermittelte Kontaktreibungswinkel entsprechend abgemindert:

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

$$c'_k = \frac{c}{1,3}$$

$$a'_k = \frac{a}{2,0}$$

Auch für die Scherfuge KDB vs. Mineralische Schutzschicht 0/8 mm - 2/8 mm kann erst im Zuge der Baumaßnahme der Scherversuch mit den im Rahmen der Ausschreibung vorher gesehenen Materialien durchgeführt werden. Für den vorläufigen Nachweis gegen Gleiten des Dichtungssystems werden in diesem Fall vergleichbare Scherversuche für die Scherfuge KDB vs. Mineralische Schutzschicht 0/8 mm – 2/8 mm herangezogen. Unter Berücksichtigung von den obengenannten Formalen werden diese Scherfugen üblicherweise Kontaktreibungswinkel  $\delta_k \geq 25,1^\circ$  im Reibungsversuch nachgewiesen.

Die angenommene Scherparameter für die Scherfugen Dränagematte vs. KDB und Boden vs. Geokunststoff sind auf Basis objektspezifischer Scherversuche mit den projektspezifischen vorgesehenen Böden zu verifizieren.

Es ergeben sich für die Scherfugen des Dichtungssystems die in der untenstehenden Tabelle zusammengefassten Scherparameter.

Für den DK-0-Bereich:

	<b>Durch den Schichtenaufbau vorgegebene böschung-parallele Scherfugen</b>	$\varphi_0$ [°]	$\delta_0$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\delta_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]
1	Rekultivierungsboden vs. Dränagematte	27,5	-	25,1
2	Dränagematte vs. Mineralische Schutzschicht 0/8 mm – 2/8 mm	-	33,4	22,5

Für den Nachweis gegen Gleiten des Dichtungssystems ist die Scherfuge mit dem jeweils geringsten mobilisierbaren Scherwiderständen in der entsprechenden Berechnung anzusetzen.

Somit kann die Scherfuge Dränagematten vs. Mineralische Schutzschicht mit dem charakteristischen Reibungswinkel  $\delta_k = 22,5^\circ$  als maßgebend angenommen werden für den vorläufigen Nachweis gegen Gleiten des Oberflächenabdichtungssystems.

Für den DK-I-Bereich:

	<b>Durch den Schichtenaufbau vorgegebene böschung-parallele Scherfugen</b>	$\varphi_0$ [°]	$\delta_0$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\delta_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]
1	Rekultivierungsboden vs. Dränagematte	27,5	-	25,1
2	Dränagematte vs. KDB	-	33,4	33,4
3	KDB vs. Mineralische Schutzschicht 0/8 mm – 2/8 mm	-	-	$\geq 25,1$

Für den Nachweis gegen Gleiten des Dichtungssystems ist die Scherfuge mit dem jeweils geringsten mobilisierbaren Scherwiderständen in der entsprechenden Berechnung anzusetzen.

Somit kann die Scherfuge Rekultivierungsboden vs. Dränagematte mit dem charakteristischen Reibungswinkel  $\delta_k = 25,1^\circ$  als maßgebend angenommen werden für den vorläufigen Nachweis gegen Gleiten des Oberflächenabdichtungssystems.

Für alle Scherfugen Boden vs. Geokunststoffe sind getroffene Annahmen vor der Bauausführung durch projektspezifische Scherversuche mit den vorgesehenen in-situ Materialien zu verifizieren.

## 5.4 Kräfte

### 5.4.1 Einwirkungen

Für den vorliegenden Nachweis ist es ausreichend 1 m breite böschungsparallele Scherebenen zu untersuchen.

#### Schubkraft $t_{B,d}$

Die aus dem Eigengewicht der Deckschicht resultierenden Schubkraft  $t_{B,d}$  pro laufenden Meter Böschungslänge in Böschungsfallrichtung berechnet sich nach:

$$t_{B,d} = (\gamma \cdot d) \cdot \gamma_G \cdot \sin \beta$$

#### Schneelast $t_{S,d}$

Für den Endzustand ist eine Schneelast  $s_k$  auf der Deckschicht als antreibende Kraft zu berücksichtigen. Pro laufenden Meter Böschungslänge in Böschungsfallrichtung ergibt sich:

$$t_{S,d} = s_k \cdot \gamma_Q \cdot \sin \beta$$

#### Strömungskraft $s_{w,d}$

Nach starken Niederschlagsereignissen kann es zu einem Aufstau in der Dränschicht kommen. Die infolge dessen auftretenden antreibenden Kräfte werden als Strömungskräfte bezeichnet. Nachfolgend wird bei dem Aufbau mit einem leistungsfähigem Dränsystem und nachgewiesenem Langzeitwasserableitvermögen angenommen, dass während der Verfüllphase eine mittlere Aufstauhöhe von  $h_w = 0,02$  m nicht überschritten wird. Pro laufenden Meter Böschungslänge in Böschungsfallrichtung ergibt sich:

$$s_{w,d} = \gamma_w \cdot h_w \cdot \gamma_Q \cdot \sin \beta$$

#### Zusätzliche Schubkräfte $t_{Rd,s}$ und $t_{Rd,d}$

Im Einbauzustand ist eine Befahrung des Dichtungssystems zu erwarten. Hierdurch treten zusätzliche Schubkräfte in der Scherfuge auf. Diese setzen sich nach [6] aus statischen und dynamischen Anteilen zusammen:

#### Schubkraft $t_{Rd,s}$ aus statischer Belastung:

Die Schubkraft aus dem Eigengewicht des Fahrzeuges im Böschungsfallrichtung ergibt sich zu:

$$t_{Rd,s} = (G_R/A) \cdot \gamma_Q \cdot \sin \beta$$

In Anlehnung an [8] darf bei Überschüttung ein Lastausbreitungswinkel von  $30^\circ$  gewählt werden. Es ergibt sich eine effektive Lastaufstandsfläche:

$$A = (2 \cdot l_R \cdot b_R) + [4 \cdot d_{ges.} \cdot \tan 30^\circ \cdot (l_R + b_R)]$$

### Schubkraft $t_{R,d}$ aus dynamischer Belastung:

Die auftretenden Schubkräfte aus einer Vollbremsung der Fahrzeuge ergeben sich nach:

$$t_{R,d} = \left( \left( \frac{Gr}{g} \right) \cdot a_v \right) \cdot \frac{\gamma_Q}{A}$$

Die Bremsverzögerung ergibt sich aus:

$$a_v = \frac{v}{t}$$

## 5.4.2 Widerstände

### Reibungskraft $t_{f,d}$

Die in der Scherfuge wirksame Reibungskraft  $t_{f,d}$  aus der Bodenauflast ergibt sich auf Grundlage des Coulombschen Schergesetz pro laufenden Meter:

$$t_{f,d} = \gamma \cdot d_{ges.} \cdot \cos \beta \cdot \frac{\tan \delta_k}{\gamma_\delta} + \frac{a_k}{\gamma_a}$$

### Schneelast $t_{s,h,d}$

Aus der im Endzustand zu berücksichtigen Schneelast  $s_k$  auf dem Oberboden ergibt sich:

$$t_{s,h,d} = s_k \cdot \cos \beta \cdot \left( \tan \frac{\delta_k}{\gamma_\delta} \right) + \frac{a_k}{\gamma_a}$$

### Zusätzliche Reibungskraft $t_{r,h,d}$ aus Eigengewicht des Fahrzeuges

Die haltenden Kraft aus dem Eigengewicht des Fahrzeuges ergibt sich nach [6] zu:

$$t_{Rd,h} = \left( \frac{G_r}{A} \right) \cdot \cos \beta \cdot \frac{\tan \delta_k}{\gamma_\delta} + \frac{a_k}{\gamma_a}$$

## 5.5 Ermittlung des Ausnutzungsgrades

Für den Einbau ergibt sich der Nachweis:

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} \leq 1,0$$

Der Reibungswiderstand des Dichtungssystems muss höher sein als die im Einbauzustand durch die Befahrung der Böschung zusätzlich auf das Dichtungssystem wirkende Belastung. Die Fahrzeuge fah-

ren dabei auf Schüttlagen mit der Dicke  $d$ . Die Berechnung ist hierbei für alle im Einbauzustand zu erwartende Schüttstärken  $d_i$  durchzuführen, im Wesentlichen der ersten Schüttstärke  $d_1$  und einer Gesamtmächtigkeit von  $d_{ges}$ .

Für die Berechnung ist weiterhin von Bedeutung, ob für das Dichtungssystem im Lastfall BS-T das Verhältnis  $\kappa$  der aus dem Eigengewicht der Bodenauflast wirkenden haltenden und antreibenden Kräfte größer oder kleiner 1,0 wird.

Das Verhältnis  $\kappa$  ergibt sich infolge der aus der Bodenauflast wirkenden Einzelkomponenten zu:

$$\kappa = \frac{\left( (t_{B,d} + s_{w,d}) \cdot l \right)}{\left( t_{f,d} \cdot l + T_{G,d} + T \right)}$$

Für den Fall einer Böschung, bei der der Reibungswiderstand geringer als die Beanspruchung ist, d.h.  $\kappa \geq 1,0$ , ergibt sich der Maximalbetrag einer von einer Zugbewehrung aufzunehmenden Kraft an der Böschungsoberkante. Die Kräfte  $t_{B,d}$ ,  $s_{w,d}$  und  $t_{f,d}$  sind über die gesamte Böschungslänge zu integrieren.

## 6 Erbeben

Als weitere Komponente bei der Ermittlung der Lasteinwirkung wird nach [9] die folgende Bodenbeschleunigung angesetzt:

$$a_{gR} = 0,8 \text{ m/s}^2$$

Nach [5] werden im Lastfall BS-E keine Teilsicherheiten eingerechnet. Die Erdbebenbeschleunigung wurde, auf der sicheren Seite liegend, hier vollständig in Böschungsfallrichtung angenommen.

## 7 Kurzzeichen

$A_k$	charakteristische Adhäsion [kN/m <sup>2</sup> ]
$d$	Dicke der Bodenschichten [m]
$d_i$	Dicke $d_1$ (bzw. $d_{ges}$ ) der Bodenschicht, auf der die Befahrung erfolgt [m]
$h_1$	mittlere Aufstauhöhe [m]
$l$	Böschungslänge [m]
$s_{w,s'}$	Strömungskraft [kN/m <sup>2</sup> ]
$t_{B,d'}$	Schubkraft in Böschungsrichtung [kN/m <sup>2</sup> ]
$t_{f,d}$	mobilisierte Reibungskraft in der kritischen Scherfuge [kN/m <sup>2</sup> ]

$T_{G,d}$	Zugkraft im Bewehrungselement [kN/m]
$S_{T,d}$	Stützkraft am Böschungsfuß [kN/m]
$\beta$	Böschungsneigung [°]
$\gamma$	Wichte des Bodes [kN/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_w$	Wichte des Wassers [kN/m <sup>3</sup> ]
$\delta_k$	charakteristischer Reibungswinkel der maßgebenden Kontaktfläche [°]
$\mu$	Ausnutzungsgrad [-]
$\gamma_G$	Teilsicherheitsbeiwert (ständige Einwirkung) [-]
$\gamma_Q$	Teilsicherheitsbeiwert (veränderliche Einwirkung) [-]
$\gamma_\delta$	Teilsicherheitsbeiwert Kontaktreibungswinkel (Widerstand) [-]
$\gamma_a$	Teilsicherheitsbeiwert Adhäsion (Widerstand) [-]
$\varphi_k$	charakteristischer Reibungswinkel (Boden) [°]
$A$	Effektive Aufstandsfläche des Fahrzeugs unter Lastausbreitung [m <sup>2</sup> ]
$a_v$	Bremsverzögerung [m/s <sup>2</sup> ]
$b_R$	Breite der Raupenkette [m]
$g$	Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
$G_R$	Eigengewicht des Fahrzeuges [kN]
$l_R$	Länge der Raupenkette [m]
$s_k$	Schneelast [kN/m <sup>2</sup> ]
$t_{S,d}$	Schubkraft aus Schneelast in Böschungsfallrichtung [kN/m <sup>2</sup> ]
$t_{S,h,d}$	Mobilisierte Reibungskraft aus Schneelast [kN/m <sup>2</sup> ]
$t_{Rd,d}$	Schubkraft infolge einer Vollbremsung des Fahrzeuges [kN]
$t_{Rd,S}$	Schubkraft aus Eigengewicht des Fahrzeuges [kN/m <sup>2</sup> ]
$t_{Rd,h}$	Reibungskraft in der kritischen Scherfuge aus Eigengewicht des Fahrzeuges [kN/m <sup>2</sup> ]
$t$	Zeit, die das Fahrzeug bis zum Stillstandes benötigt [s]
$v$	maximale Geschwindigkeit des Fahrzeuges [m/s]

## 8 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in der unten stehenden Tabelle zusammengefasst.

Ausnutzung		
Lastfall	DK 0	DK I
BS-T	1,19	1,05
BS-P	1,03	0,91
BS-E	0,79	0,70

## 9 Zusammenfassung

Für die Oberflächenabdichtung der Deponie Schönbuch wurde vorliegend der Nachweis der Standsicherheit des Dichtungssystems im Böschungsbereich der Randdämme untersucht.

Die Berechnungen zur Standsicherheit der Regelbereiche sind in Anlage [A1], [A4] BS-T (Bauzustand), [A2], [A5] BS-P (Endzustand) und [A3], [A6] BS-E (Lastfall Erdbeben) dargestellt. Der zulässige Ausnutzungsgrad  $\mu \leq 1,0$  wird dabei überschritten. Es wird bei gewählten Ansätzen ein Geogitter erforderlich.

Sollten die in dieser Stellungnahme berücksichtigten Projektrandbedingungen nicht maßgebend sein bzw. nicht mit den tatsächlichen Randbedingungen vor Ort übereinstimmen, wird eine neue Stellungnahme notwendig. Die getroffenen Annahmen sind vor Bauausführung zu bestätigen.

Die angenommenen inneren Reibungswinkel der in-situ-Böden und das Kontaktverhalten in den Grenzflächen des Oberflächenabdichtungssystems sind vor der Bauausführung durch objektbezogenen Scherversuche nachzuweisen

Wir weisen darauf hin, dass für alle mineralischen Schichten selbst eine für die vorgesehene Neigung ausreichende Scherfestigkeit und somit ausreichende Standsicherheit nachgewiesen werden muss. Konsolidierungsprozesse im Untergrund sowie die Gesamtstandsicherheit der Böschung bleiben vorliegend unberücksichtigt und müssen gesondert untersucht werden.