



Standortsicherheitsnachweis des Oberflächenabdichtungssystems für
die Deponieabschnitte DK 0 und DK I

Deponie Balingen - Hölderle

Ausbau und Betrieb einer DK I - und DK 0 - Deponie und Weiterbetrieb 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**

Jakob-Anstatt-Straße 2
55130 Mainz

Bearbeitung: Heiko Töhne
Vanessa Schmidt

Bearbeitungszeitraum: Mai 2019
Überarbeitung Januar 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	1
2	Anlagen	1
3	Veranlassung	2
4	Aufbau	2
5	Nachweis der Standsicherheit (GEO-3)	3
5.1	Erläuterungen zum Nachweis	3
5.2	Eingangswerte	6
5.3	Scherparameter	7
5.4	Kräfte	9
5.4.1	Einwirkungen	9
5.4.2	Widerstände	10
5.5	Ermittlung des Ausnutzungsgrades	10
6	Erbeben	11
7	Kurzzeichen	11
8	Ergebnisse	13
9	Zusammenfassung	13

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 Hölderle, 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 Hölderle im Breich DK 0: maximale Neigung 1:n = 1:3 ($\beta=18,4^\circ$), Böschungslänge $L \leq 82$ m, BS-T (Bauzustand)
- [A2] Standsicherheitsberechnungen für die Oberflächenabdichtung der Deponie Hölderle im Breich DK 0: maximale Neigung 1:n = 1:3 ($\beta=18,4^\circ$), Böschungslänge $L \leq 82$ m, BS-P (Endzustand)
- [A3] Standsicherheitsberechnungen für die Oberflächenabdichtung der Deponie Hölderle im Breich DK 0: maximale Neigung 1:n = 1:3 ($\beta=18,4^\circ$), Böschungslänge $L \leq 82$ m, BS-E (Erdbeben)
- [A4] Standsicherheitsberechnungen für die Oberflächenabdichtung der Deponie Hölderle im Breich DK I: maximale Neigung 1:n = 1:3 ($\beta=18,4^\circ$), Böschungslänge $L \leq 82$ m, BS-T (Bauzustand)
- [A5] Standsicherheitsberechnungen für die Oberflächenabdichtung der Deponie Hölderle im Breich DK I: maximale Neigung 1:n = 1:3 ($\beta=18,4^\circ$), Böschungslänge $L \leq 82$ m, BS-P (Endzustand)
- [A6] Standsicherheitsberechnungen für die Oberflächenabdichtung der Deponie Hölderle im Breich DK I: maximale Neigung 1:n = 1:3 ($\beta=18,4^\circ$), Böschungslänge $L \leq 82$ 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.

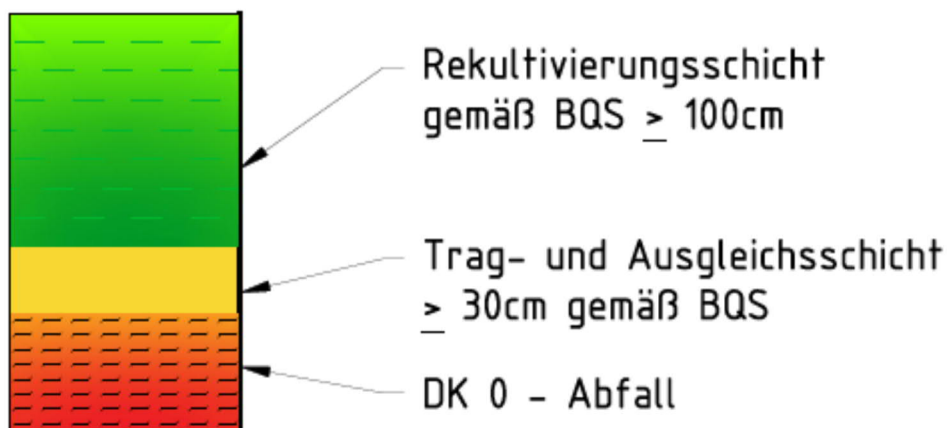
4 Aufbau

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

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

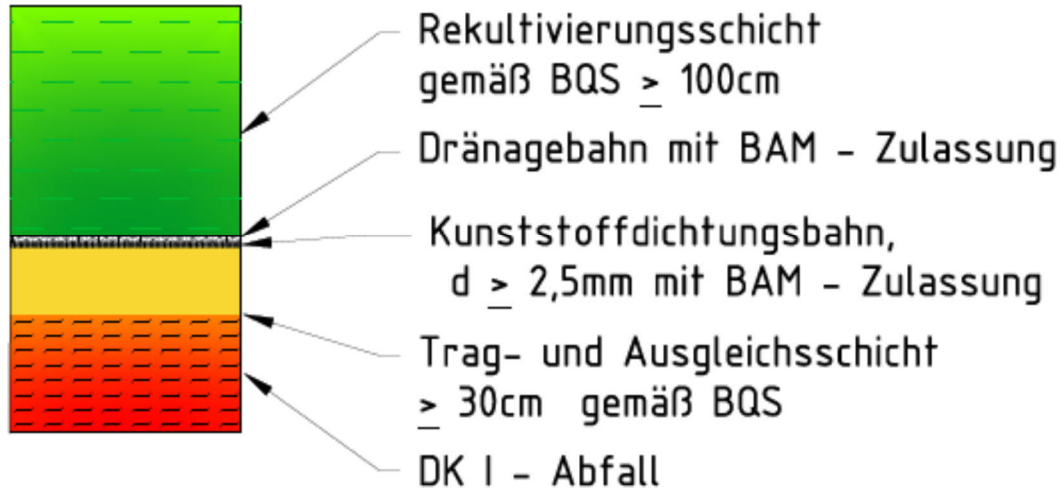
Böschungslänge: $L_{\max} = 82 \text{ m}$, maximale Böschungsneigung $1:n = 1:3$ ($\beta = 18,43^\circ$).

Für den DK 0-Bereich:



- Planum auf dem Deponiekörper
- $\geq 0,30 \text{ m}$ Trag- und Ausgleichsschicht
- $\geq 1,00 \text{ m}$ Rekultivierungsschicht im Bereich des Oberflächenabdichtungssystems
- Rekultivierung entsprechend dem Landschaftspflegerischen Begleitplans

Für den DK I-Bereich:



- Planum auf dem Deponiekörper
- $\geq 0,30\text{ m}$ Trag- und Ausgleichsschicht
- $\geq 0,15\text{ m}$ mineralische Schutzschicht, ggf. Verzicht bei entsprechender Eignung der Trag- und Ausgleichsschicht
- KDB mit BAM – Zulassung oder gleichwertiges Dichtungssystem
- Drainagebahn mit BAM - Zulassung oder gleichwertige Entwässerungsschicht
- $\geq 1,0\text{ m}$ Rekultivierungsschicht im Bereich des Oberflächenabdichtungssystems
- Rekultivierung entsprechend dem Landschaftspflegerischen Begleitplans

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 geneigten 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 der Oberflächenabdichtung gilt BS-T für die vorübergehende Bemessungssituation für zeitlich begrenzte Zustände, im Wesentlichen der Bauzustand. Damit werden das Eigengewicht der Abdeckschichten, der 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 die 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 (böschungsparalleles Gleiten). Das Abdichtungssystem wird hierbei nicht als Bauteil, sondern als ganzheitliches Bauwerk interpretiert, wodurch der Nachweis nach dem Grundzustand GEO-2/STR nach [5] nicht relevant ist. Untersucht wird der Lastfall BS-T mit den Teilsicherheiten nach [5].

Für das Dichtungssystem bestehend aus Geokunststoffen muss gewährleistet sein, dass die an der Oberseite auftretenden Schubkräfte aus dem Eigengewicht der Schutz- und Entwässerungsschicht oder aus den Lasten im Bauzustand mit der geforderten Sicherheit ausreichend standsicher sind. Über Reibung zwischen den verschiedenen Geokunststoffen und zwischen den Geokunststoffen und Erdstoffen wirksamen Reibungskräften wird die physikalische 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 δ ist abhängig von den Materialien und deren Oberflächenbeschaffenheit. Wenn für den Fall ohne äußere Normalkraft eine „Reibungskraft“ vorhanden ist, so ist diese eine „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 werden

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

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 μ 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
HYD und UPL: Grenzzustand des Versagens durch hydraulischen Grundbruch und Aufschwimmen				
Destabilisierende ständige Einwirkungen ^a	$\gamma_{G,dst}$	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	γ_H	1,35	1,30	1,20
Strömungskraft bei ungünstigem Untergrund	γ_H	1,80	1,60	1,35
EQU: Grenzzustand des Verlusts der Lagesicherheit				
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	γ_Q	1,50	1,25	1,00
STR und GEO-2: Grenzzustand des Versagens von Bauwerken, Bauteilen und Baugrund				
Beanspruchungen aus ständigen Einwirkungen allgemein ^a	γ_G	1,35	1,20	1,10
Beanspruchungen aus günstigen ständigen Einwirkungen ^b	$\gamma_{G,inf}$	1,00	1,00	1,00
Beanspruchungen aus ständigen Einwirkungen aus Erdruchedruck	$\gamma_{G \cdot E0}$	1,20	1,10	1,00
Beanspruchungen aus ungünstigen veränderlichen Einwirkungen	γ_Q	1,50	1,30	1,10
Beanspruchungen aus günstigen veränderlichen Einwirkungen	γ_Q	0	0	0
GEO-3: Grenzzustand des Versagens durch Verlusts der Gesamtstandsicherheit				
Ständige Einwirkungen ^a	γ_G	1,00	1,00	1,00
Ungünstige veränderliche Einwirkungen	γ_Q	1,30	1,20	1,00
SLS: Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit				
$\gamma_G = 1,00$ für ständige Einwirkungen bzw. Beanspruchungen				
$\gamma_Q = 1,00$ für veränderliche Einwirkungen bzw. Beanspruchungen				
^a einschließlich ständigem und veränderlichem Wasserdruck.				
^b 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
HYD und UPL: Grenzzustand des Versagens durch hydraulischen Grundbruch und Aufschwimmen				
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
GEO-2: Grenzzustand des Versagens von Bauwerken, Bauteilen und Baugrund				
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
GEO-3: Grenzzustand des Versagens durch Verlust der Gesamtstandsicherheit				
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:

Bodenwichte γ	19	kN/m ³
Wasserwichte γ_w	10	kN/m ³
Gesamtmächtigkeit der Überdeckung oberhalb der Abdichtung d_{ges}	0,8	m
Angenommener max. Aufstau der Dränschicht, im Verfüllzustand h_w	0,02	m
Böschungsneigung β	18,43	°
Böschungslänge L_{max}	82	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}	93,23	m

Lasten während des Endzustandes:

- Schneelast nach [10], Zone II $s_k = 1,68 \text{ kN/m}^2$

5.3 Scherparameter

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

In Ermangelung von konkreten Scherversuchsergebnissen 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 und der Kontaktreibungswinkel mit dem Ansatz nach *Grett* empirisch gemäß Formal abgeschätzt werden:

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

Für die Scherfuge Rekultivierungsboden vs. Drängematte 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:

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

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

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

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 vorhergesehenen 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 angenommenen Scherparameter für die Scherfugen Boden vs. Geokunststoff sind auf Basis objekt-spezifischer 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:

	Durch den Schichtenaufbau vorgegebene böschung-parallele Scherfugen	$\varphi_0 [^\circ]$	δ_0 [kN/m ²]	δ_k [kN/m ²]
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 Rekultivierungsboden vs. Mineralische Schutzschicht mit dem charakteristischen Reibungswinkel $\delta_k = 22,5^\circ$ als maßgebend für den vorläufigen Nachweis gegen Gleiten des Oberflächenabdichtungssystems angenommen werden.

Für den DK-I Bereich:

	Durch den Schichtenaufbau vorgegebene böschung-parallele Scherfugen	$\varphi_0 [^\circ]$	δ_0 [kN/m ²]	δ_k [kN/m ²]
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 für den vorläufigen Nachweis gegen Gleiten des Oberflächenabdichtungssystems angenommen werden.

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 böschungsparelle Scherebenen zu untersuchen.

Schubkraft $t_{B,d}$

Die aus dem Eigengewicht der Deckschicht resultierende 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 Einbauszustand 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 in 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° 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 Schergesetzes 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 haltende 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 Einbauszustand durch die Befahrung der Böschung zusätzlich auf das Dichtungssystem wirkende Belastung. Die Fahrzeuge fahren dabei auf Schüttlagen mit der Dicke d . Die Berechnung ist hierbei für alle im Einbauszustand 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 κ der aus dem Eigengewicht der Bodenauflast wirkenden haltenden und antreibenden Kräfte größer oder kleiner 1,0 wird.

Das Verhältnis κ ergibt sich infolge der aus der Bodenauflast wirkenden Einzelkomponenten zu:

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

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 ²]
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 ²]
$t_{B,d'}$	Schubkraft in Böschungsrichtung [kN/m ²]
$t_{f,d}$	mobilisierte Reibungskraft in der kritischen Scherfuge [kN/m ²]

$T_{G,d}$	Zugkraft im Bewehrungselement [kN/m]
$S_{T,d}$	Stützkraft am Böschungsfuß [kN/m]
β	Böschungsneigung [°]
γ	Wichte des Bodes [kN/m³]
γ_w	Wichte des Wassers [kN/m³]
δ_k	charakteristischer Reibungswinkel der maßgebenden Kontaktfläche [°]
μ	Ausnutzungsgrad [-]
γ_G	Teilsicherheitsbeiwert (ständige Einwirkung) [-]
γ_Q	Teilsicherheitsbeiwert (veränderliche Einwirkung) [-]
γ_δ	Teilsicherheitsbeiwert Kontaktreibungswinkel (Widerstand) [-]
γ_a	Teilsicherheitsbeiwert Adhäsion (Widerstand) [-]
φ_k	charakteristischer Reibungswinkel (Boden) [°]
A	Effektive Aufstandsfläche des Fahrzeugs unter Lastausbreitung [m²]
a_v	Bremsverzögerung [m/s²]
b_R	Breite der Raupenkette [m]
g	Erdbeschleunigung [m/s²]
G_R	Eigengewicht des Fahrzeuges [kN]
l_R	Länge der Raupenkette [m]
s_k	Schneelast [kN/m²]
$t_{S,d}$	Schubkraft aus Schneelast in Böschungsfallrichtung [kN/m²]
$t_{S,h,d}$	Mobilisierte Reibungskraft aus Schneelast [kN/m²]
$t_{Rd,d}$	Schubkraft infolge einer Vollbremsung des Fahrzeuges [kN]
$t_{Rd,S}$	Schubkraft aus Eigengewicht des Fahrzeuges [kN/m²]
$t_{Rd,h}$	Reibungskraft in der kritischen Scherfuge aus Eigengewicht des Fahrzeuges [kN/m²]
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. Der zulässige Auslastungsgrad $\mu = 1,0$ wird im Bauzustand (BS-T) im Bereich DK0 und DK I sowie im Endzustand (BS-P) im Bereich DK I überschritten.

Lastfall	Ausnutzung	
	DK 0	DK I
BS-T	1,19	1,05
BS-P	1,03	0,91
BS-E	0,81	0,72

9 Zusammenfassung

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

Die Berechnungen zur Standsicherheit sind in Anlage [A1], [A4] BS-T (Bauzustand), [A2], [A5] BS-P (Endzustand) und [A3], [A6] BS-E (Lastfall Erdbeben) dargestellt. Der zulässige Auslastungsgrad $\mu \leq 1,0$ wird Bauzustand (BS-T) im Bereich DK0 und DK I sowie im Endzustand (BS-P) im Bereich DK I überschritten. Es wird bei gewählten Ansätzen ein Geogitter erforderlich.

Sollten die in dieser Stellungnahme berücksichtigen Projektrandbedingungen nicht maßgebend sein bzw. nicht mit den tatsächlichen Randbedingungen vor Ort übereinstimmen, wird eine neue Stellungnahme mit den tatsächlich zum Einsatz kommenden Baustoffen und Baumaterialien 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 objektbezogene 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.