


**Vorläufiger Nachweis zur  
Standicherheit eines  
Oberflächendichtungssystems  
(LF1 und LF2) – Rev. 01**


Bauvorhaben: Verfüllung und Renaturierung Steinbruch Laubenheim –  
Oberflächenabdichtung

Auftraggeber: wat Ingenieurgesellschaft GmbH  
Herr Daniel Kehrer  
Flugplatzstraße 33a  
D – 55126 Mainz  
Telefon: 06131 – 9583 – 0  
Telefax: 06131 – 95833 – 0  
Email: d.kehrer@wat.de

Nachweisverfasser: BBG Bauberatung Geokunststoffe GmbH & Co. KG  
Gewerbestraße 2  
D-32339 Espelkamp  
Telefon: 05743 – 9320 – 560  
Telefax: 05743 – 9320 – 566  
Email: contact@bbgeo.com

Espekkamp, 26. März 2013

  
i. V. Dipl.-Ing. K. Werth

  
i. A. Dipl.-Ing. C. Niehues

## Inhalt

1	Grundlagen zum Nachweis und Schrifttum.....	2
2	Anlagen.....	3
3	Veranlassung.....	3
4	Aufbau .....	3
5	Nachweis der Standsicherheit (GZ1C) .....	4
5.1	Erläuterungen zum Nachweis.....	4
5.2	Eingangswerte.....	6
5.3	Scherparameter.....	6
5.4	Kräfte .....	8
5.4.1	Einwirkungen.....	8
5.4.2	Widerstände .....	9
5.5	Ermittlung des Auslastungsgrades im LF1 (mit Schneelast) .....	10
5.6	Ermittlung des Auslastungsgrades im LF2 (Bauzustand mit Befahrung).....	10
5.7	Kurzzeichen .....	12
6	Ergebnisse.....	13
7	Zusammenfassung.....	14

### 1 Grundlagen zum Nachweis und Schrifttum

- [U1] DIN 1054:2005-1: Zulässige Belastung des Baugrundes, 2005
- [U2] DIN 4084:2009-1 Geländebruchberechnungen, 2009
- [U3] Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponiebauwerke“ der DGGT e.V.: E 3-8 „Reibungsverhalten von Geokunststoffen“, Bautechnik 82 (2005), Heft 9, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [U4] Empfehlungen des Arbeitskreises „Geotechnik der Deponiebauwerke“ der DGGT e.V.: E 2-7 „Standsicherheit von Dichtungssystemen“, Entwurf, Bautechnik 9/2008
- [U5] Saathoff, F., Werth, K. (2005): Standsicherheitsnachweise für Oberflächenabdichtungssysteme - Anmerkungen zum Lastfall Einbau geschichteter Systeme mit Geokunststoffen, Fachtagung "Die sichere Deponie", SKZ, Würzburg
- [U6] DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken, Lastannahmen
- [U7] Grett, H.D. (1984): Das Reibungsverhalten von Geotextilien in bindigem und nichtbindigem Boden, Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 59/1984
- [U8] Verfüllung und Renaturierung Steinbruch Laubenheim: Planungsrandbedingungen, übersandt durch Herrn Joachim Gering, Fa. NAUE GmbH & Co. KG, 26. Februar 2013

## 2 Anlagen

[A1] Berechnungen zur Standsicherheit gegen Gleiten des Oberflächendichtungssystems Verfüllung und Renaturierung Steinbruch Laubenheim, Bereich DK I & Bereich DK II (LF1 & LF2):  $1:n = 1 : 3,0$ ;  $L \leq 150,0$  m;  $d_1 = 0,70$  m;  $d_{\text{ges}} = 1,00$  m

## 3 Veranlassung

BBG Bauberatung Geokunststoffe GmbH & Co. KG wurde durch Herrn Daniel Kehrer, wat Ingenieurgesellschaft mbH, gebeten, für die Herstellung der Oberflächenabdichtung zur Verfüllung und Renaturierung Steinbruch Laubenheim den vorläufigen Nachweis zur Standsicherheit des Oberflächendichtungssystems gegen Gleiten im Böschungsbereich unter Berücksichtigung des vorgesehenen Aufbaus zu führen.

## 4 Aufbau

Nach aktuellem Sachstand [U8] ist die Standsicherheit für die Böschungen im Bereich DK I und im Bereich DK II unter Berücksichtigung des jeweiligen Aufbaus des Dichtungssystems nachzuweisen.

Die Standsicherheit gegen Gleiten im Böschungsbereich wird nach den übermittelten Planungsrandbedingungen [U8] für maximal  $1:n = 1:3,0$  geneigte und  $L \leq 150,0$  m lange Böschungsbereiche unter Berücksichtigung des folgenden Aufbau gemäß [U8] untersucht:

### Bereich DK I:

- Oberboden / Rekultivierungsschicht,  $d_{\text{Reku}} = 1,00$  m
- Geosynthetisches Dränelement m. BAM-Zulassung
- Kunststoffdichtungsbahn (KDB) Carbofol® 509 BAM MF/MF
- Stütz- und Ausgleichsschicht,  $d \geq 0,30$  m
- Verfüllmaterial (min. Abfälle)

### Bereich DK II:

- Oberboden / Rekultivierungsschicht,  $d_{\text{Reku}} = 1,00$  m
- Geosynthetisches Dränelement m. BAM-Zulassung
- Kunststoffdichtungsbahn (KDB) Carbofol® 509 BAM MF/MF
- Geosynthetische Tondichtungsbahn (GTD) Bentofix® NSP 4900 LAGA
- Stütz- und Ausgleichsschicht,  $d \geq 0,30$  m
- Verfüllmaterial (min. Abfälle)

Die berücksichtigten Einbaurandbedingungen werden in Kapitel 5.2 beschrieben.

## 5 Nachweis der Standsicherheit (GZ1C)

### 5.1 Erläuterungen zum Nachweis

Oberflächenabdichtungen von Abfalldeponien sollen über sehr lange Zeiträume die Infiltration von Niederschlagswasser in den Abfallkörper und/oder den Austritt von Deponiegas aus dem Abfallkörper kontrollieren. Es handelt sich um geschichtete Systeme aus verschiedenen Erdstoffen und Geokunststoffen. Auf den geneigten Flächen und steilen Böschungen ist das Schichtsystem permanent auf Schub beansprucht. Mit der Planung des Abdichtungssystems ist die Standsicherheit für den Bauzustand, den Betriebszustand und für den Endzustand nachzuweisen.

Die Standsicherheit von Oberflächenabdichtungen auf Deponieböschungen ist nach aktuellen nationalen und europäischen Normen mit dem Teilsicherheitskonzept zu führen. Der Nachweis wird in Anlehnung an den der Gesamtstandsicherheit im Grenzzustand GZ 1C geführt. Betrachtet wird der Nachweis gegen Böschungs- oder Geländebruch nach DIN 4084 – hier Nachweis der Gleitsicherheit in potentiellen Gleitflächen innerhalb des Abdichtungssystems (böschungsparalleles Gleiten). Das Abdichtungssystem wird hierbei nicht als Bauteil sondern vielmehr als ganzheitliches Bauwerk interpretiert, wodurch ein Nachweis nach Grenzzustand GZ 1B nach [U1] nicht relevant ist. Untersucht wird der Lastfall 1 und 2 mit den Teilsicherheitsbeiwerten nach [U1].

Für das Dichtungssystem aus Geokunststoffen muss gewährleistet werden, 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 Komponenten in den Untergrund abgetragen werden können. Die in den Schichtgrenzen zwischen den verschiedenen Geokunststoffen und zwischen den Geokunststoffen und Erdstoffen wirksamen Reibungskräfte 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  $\mu = \tan \delta$  heißt Reibungszahl oder Reibungskoeffizient.

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

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

$$\tau = a + \sigma \cdot \tan \delta \quad (1)$$

Für den Fall, dass durch zu geringe Reibungswinkel 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. 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 GZ 1C für "Bruch an der Böschungskrone" und "Bruch im Verankerungsgraben". Für das Geogitter ist der Nachweis gegen "Bruch der Bewehrung" (GZ1B) für die aus dem Standsicherheitsnachweis im GZ1C ermittelte Beanspruchung zu führen.

Bei einer Ausführung der Böschung mit der hier vorgegebenen maximalen Neigung wird für diesen Nachweis die ausreichende Standsicherheit der Böschung gegen Geländebruch ebenso wie eine ausreichende Standsicherheit der mineralischen Schichten 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  $E_d$  (hangabwärtsgerichtete Kräfte) den Bemessungswerten der Widerstände  $R_d$  (Reibungskräfte in den Schichtgrenzen) gegenüberzustellen. Aus der Gegenüberstellung ergibt sich für die ungünstigsten Randbedingungen der Auslastungsgrad  $\mu$  und es gilt:

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} \leq 1,0 \quad (1b)$$

Die für den vorliegenden Nachweis relevanten Teilsicherheitsbeiwerte nach [U1] sind in Tabelle 1 angegeben:

*Tabelle 1: Teilsicherheitsbeiwerte GZ1C für Einwirkungen und Widerstände nach [U1]*

Teilsicherheitsbeiwerte nach DIN 1054:2005-1	LF 1	LF 2
<b>Einwirkungen</b>		
ständige Einwirkungen $\gamma_G$	1,0	
ungünstige veränderliche Einwirkungen $\gamma_Q$	1,30	1,20
<b>Widerstände</b>		
Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$ des Bodens $\gamma_\varphi$	1,25	1,15
Reibungsbeiwert $\tan \delta'$ in Kontaktfuge zu Geokunststoffen $\gamma_\delta$		
Kohäsion $c'$ des Bodens $\gamma_c$		
Adhäsion $a'$ in Kontaktfuge zu Geokunststoff $\gamma_a$		

## 5.2 Eingangswerte

Gemäß [U8] werden folgende Randbedingungen zugrunde gelegt, die vor Ort auf Übereinstimmung zu prüfen sind:

Bodenwichten:	$\gamma$	=	19 kN/m <sup>3</sup>
Wasserwichte:	$\gamma_w$	=	10 kN/m <sup>3</sup>
Aufstauhöhe in der Dränschicht:	$h_w$	=	0,02 m (LF1 & 2)
Neigung:	$\beta$	=	18,4° (1:3,0)
Länge:	$L_{\max}$	≤	150,0 m
Gesamtmächtigkeit Bodenabdeckung	$d_{\text{ges}}$	=	1,00 m

### **Einbau der mineralischen Schichten**

Es wird davon ausgegangen, dass der Rekultivierungsbodens mit einer Kettenraupe **Caterpillar CAT D6 LGP** im vor-Kopf-Verfahren böschungsaufwärts eingeschoben wird. Es wird für die Befahrung des Dichtungssystems eine Mindestmächtigkeit des vor Kopf eingebauten Rekultivierungsbodens von  $d_1 = 0,70$  m unter den Ketten des Baugeräts vorausgesetzt. Es werden dabei folgende Fahrparameter zu Grunde gelegt:

- Kettenraupe **Caterpillar CAT D6 LGP** mit folgenden Kennwerten:

Eigengewicht	$G_R$	=	17,7 t (177 kN)
Kettenbreite	$b_R$	=	0,86 m
Kettenlänge	$l_R$	=	3,10 m
Fahrgeschwindigkeit	$v$	=	1,0 m/s (3,6 km/h)
Bremsverzögerung	$t$	=	2,0 s

### **Lasten im Endzustand**

- Schneelast nach DIN 1055, Zone 1  $s_k = 0,65$  kN/m<sup>2</sup>

## 5.3 Scherparameter

Im Rahmen der vorliegenden Berechnung sind die charakteristischen Kontaktreibungswinkel für die zu betrachtenden Scherfugen anzusetzen.

Zur Ermittlung des Kontaktreibungsverhaltens der Scherfuge Rekultivierungsboden vs. geosynthetisches Dränelement mit BAM-Zulassung (OS: Vliesstoff) kann für Vorbemessungen der Ansatz nach GRETT (1984) für Scherfugen Boden vs. mechanisch verfestigter Vliesstoff herangezogen werden. Dabei gilt Gleichung (2) für Schichtgrenzen Boden vs. mechanisch verfestigter Vliesstoff:

$$\tan \delta_k' = 0,90 \cdot \tan \varphi_k' \quad (2)$$

Es ergibt sich unter Annahme eines typischen Rekultivierungsbodens (Schluff / schluffiger Sand,  $\varphi_k = 27,5^\circ$ ) für die Scherfuge Rekultivierungsboden vs. geosynthetisches Dränelement mit BAM-Zulassung (OS: Vliesstoff) nach Gleichung (2) ein charakteristischer Kontaktreibungswinkel  $\delta_k = 25,1^\circ$ .

Für die übrigen Scherfugen können Ergebnisse von produktspezifischen oder vergleichbaren Scherversuchen zur Beurteilung des Reibungsverhaltens herangezogen werden.

Nach GDA-Empfehlung E 2-7 (2008) [U4] sind die Laborwerte aus Scherversuchen entsprechend Gleichung (3) abzumindern:

$$\tan \delta_k' = \tan \delta_0 / 1,1 \quad (3)$$

Es ergeben sich für die gegebenen Scherfugen der Böschung des Deponiebereiches DK I die in Tabelle 2 und für die gegebenen Scherfugen der Böschung des Deponiebereiches DK II die in Tabelle 3 zusammengefassten Scherparameter.

*Tabelle 2: Zusammenstellung der Scherparameter, Aufbau Böschungsbereich*

	<b>durch den Schichtenaufbau vorgegebene böschungsparelle Scherfugen</b>	$\varphi_k$ [°]	$\delta_0$ [°]	$\delta_k$ [°]
1	Rekultivierungsschicht vs. Geosynthetisches Dränelement (OS: Vliesstoff)	<u>27,5</u>	-	<u>25,1<sup>1</sup></u>
2	Geosynthetisches Dränelement (US: Vliesstoff) vs. KDB Carbofol® MF/MF 2,5 mm BAM	-	29,7 <sup>2</sup>	27,4
3	KDB Carbofol® MF/MF 2,5 mm BAM vs. Stütz- und Ausgleichsschicht	-	31,1 <sup>13</sup>	28,7

*Tabelle 3: Zusammenstellung der Scherparameter, Aufbau Böschungsbereich*

	<b>durch den Schichtenaufbau vorgegebene böschungsparelle Scherfugen</b>	$\varphi_k$ [°]	$\delta_0$ [°]	$\delta_k$ [°]
1	Rekultivierungsschicht vs. Geosynthetisches Dränelement (OS: Vliesstoff)	<u>27,5</u>	-	<u>25,1<sup>1</sup></u>
2	Geosynthetisches Dränelement (US: Vliesstoff) vs. KDB Carbofol® MF/MF 2,5 mm BAM	-	29,7 <sup>2</sup>	27,4
3	KDB Carbofol® MF/MF 2,5 mm BAM vs. GTD Bentofix® NSP 4900 LAGA (OS: Vliesstoff)	-	38,3 <sup>4</sup>	35,7
4	GTD Bentofix® NSP 4900 LAGA (OS: Vliesstoff) vs. Stütz- und Ausgleichsschicht		31,5 <sup>5</sup>	29,1

<sup>1</sup> Nach GRETT (1984)

<sup>2</sup> Bericht zum Scherversuch 045a-12: Secudrain® RZ201 WDZ601 RZ201 (US: Vliesstoff) vs. KDB Carbofol MF/MF der Fa. NAUE GmbH & Co. KG

<sup>3</sup> Bericht zum Scherversuch 060-11: KDB Carbofol MF/MF vs. Auflagerschicht (Sand) der Fa. NAUE GmbH & Co. KG

<sup>4</sup> Bericht zum Scherversuch 073-09: KDB Carbofol MF/MF vs. GTD Bentofix NSP 4900 LAGA (OS: Vliesstoff) der Fa. NAUE GmbH & Co. KG

<sup>5</sup> Bericht zum Scherversuch 053-12: GTD Bentofix NSP 4900 LAGA (US: Gewebe m. Thermo-Lock) vs. Auflagerschicht (MV-Schlacke) der Fa. NAUE GmbH & Co. KG

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

Sowohl für den Bereich DK I als auch für den Bereich DK II kann die Scherfuge Rekultivierungsschicht vs. Geosynthetisches Dränelement (OS: Vliesstoff) mit einem charakteristischen Reibungswinkel  $\delta_k = 25,1^\circ$  als maßgebend für den Nachweis gegen Gleiten im Böschungsbereich angenommen werden. Die Berechnung der Standsicherheit gegen Gleiten in Anlage [A1] ist somit für beide Bereiche gültig.

## 5.4 Kräfte

Für den hier behandelten Nachweis ist es ausreichend, 1 m breite, böschungsparelle Scherebenen (potentielle Gleitflächen) zu untersuchen. Die in der Berechnung angesetzten Kräfte sind Abbildung 1 zu entnehmen.

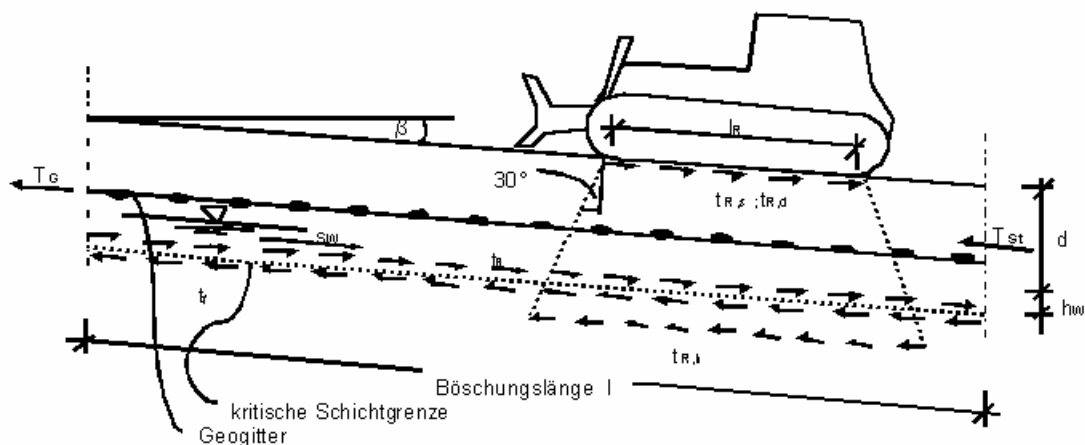


Abb. 1: Kräfteansatz zum Nachweis der Oberflächendichtung

### 5.4.1 Einwirkungen

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

Die aus dem Eigengewicht der Deckschichten resultierende Schubkraft  $t_{B,d}$  pro lfd. Meter Böschungslänge in Böschungsfallrichtung lässt sich berechnen zu:

$$t_{B,d} = (\gamma \cdot d) \cdot \gamma_G \cdot \sin \beta \quad (4)$$

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

Für den Endzustand ist eine Schneelast  $s_k$  (kN/m<sup>2</sup>) auf der Deckschicht als treibende Kraft zu berücksichtigen (haltender Kraftanteil aus Schneelast vgl. Abschnitt 5.4.2). Pro lfd. Meter Böschungslänge in Böschungsfallrichtung ergibt sich:

$$t_{s,d} = s_k \cdot \gamma_Q \cdot \sin \beta \quad (5)$$



**Strömungskraft  $s_{w,d}$** 

Nach einem starken Niederschlagsereignis kann es zu einem Aufstau in der Dränschicht kommen. Die infolge dessen auftretenden zusätzlich treibenden Kräfte werden als Strömungskraft bezeichnet. Nachfolgend wird bei dem Aufbau mit einem leistungsfähigem Dränsystem und nachgewiesenem Langzeitwasserableitvermögen angenommen, dass eine mittlere Aufstauhöhe von  $h_W = 0,02$  m in der Dränschicht nicht überschritten wird. Die Strömungskraft pro lfd. Meter Böschungslänge berechnet sich zu:

$$s_{w,d} = \gamma_w \cdot h_W \cdot \gamma_Q \cdot \sin \beta \quad (6)$$

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

Im Einbauzustand ist eine Befahrung des Dichtungssystems zu erwarten. Hierdurch treten zusätzliche aufzunehmende Schubkräfte in der kritischen Scherfuge auf. Diese setzen sich nach [U5] aus statischen ( $t_{Rd,s}$ ) und dynamischen ( $t_{Rd,d}$ ) Anteilen zusammen:

**Schubkraft  $t_{Rd,s}$  aus statischer Belastung**

Die Schubkraft aus dem Eigengewicht des Fahrzeuges in Böschungsfallrichtung ergibt sich:

$$t_{Rd,s} = (G_R/A) \cdot \gamma_Q \cdot \sin \beta \quad (7)$$

In Anlehnung an [U6], Abschnitt 4.4 (6), darf bei Überschüttung ein Lastausbreitungswinkel von  $30^\circ$  gewählt werden. Es ergibt sich daraus für die effektive Aufstandsfläche A:

$$A = (2 \cdot l_R \cdot b_R) + (4 \cdot (l_R + b_R) \cdot d_i \cdot \tan 30^\circ) \quad (7.1)$$

**Schubkraft  $t_{Rd,d}$  aus dynamischer Belastung**

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

$$t_{Rd,d} = ((G_R/g) \cdot a_v) \cdot \gamma_Q / A \quad (8)$$

Die Bremsverzögerung ergibt sich aus:

$$a_v = v / t \quad (8.1)$$

**5.4.2 Widerstände****Reibungskraft  $t_{f,d}$** 

Die in der kritischen Scherfuge wirksam werdende Reibungskraft  $t_{f,d}$  aus der Bodenauflast ergibt sich auf Grundlage der Gleichung 1 im Lastfall 1 pro lfd. Meter Böschungslänge zu:

$$t_f = (\gamma \cdot d_i) \cdot \cos \beta \cdot (\tan \delta_k) / \gamma_\delta + a_k / \gamma_a \quad (9)$$

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

Aus der im Endzustand zu berücksichtigenden Schneelast  $s_k$  (kN/m<sup>2</sup>) auf dem Oberboden ergibt sich eine Erhöhung der haltenden Kräfte in der Schichtgrenze pro lfd. Meter Böschungslänge in Böschungsfallrichtung zu:

$$t_{s,h,d} = s_k \cdot \cos \beta \cdot (\tan \delta_k) / \gamma_\delta \quad (10)$$

**Stützkraft  $S_{T,d}$  im Böschungsfußbereich**

Für kurze Böschungen und bei einem Einbau des Bodens von unten nach oben (nicht gegeben bei der Anordnung von Bewehrungselementen!) kann eine haltende Kraft aus dem im Böschungsfußbereich eingebauten Boden als Stützkraft  $S_{T,d}$  in die Berechnung eingehen. Im vorliegenden Fall wird diese nicht berücksichtigt.

$$S_{T,d} = 0,5 \cdot \gamma \cdot h_S^2 \cdot K_{ph,d} \cdot \cos \beta \quad (11)$$

**Zusätzliche Reibungskraft  $t_{R,h,d}$  aus Eigengewicht des Fahrzeuges**

Die haltende Kraft aus dem Eigengewicht des Fahrzeuges ergibt sich nach [U5] zu:

$$t_{R,h,d} = (G_R / A) \cdot \cos \beta \cdot (\tan \delta_k) / \gamma_\delta \quad (12)$$

**5.5 Ermittlung des Auslastungsgrades im LF1 (mit Schneelast)**

Die haltenden Kräfte einer eventuell erforderlich werdenden Zugbewehrung  $T_{G,d}$  werden zunächst zu Null gesetzt. Für den Endzustand ergibt sich aus der Integration der treibenden und haltenden Kräfte über die Böschungslänge der Nachweis:

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} = \frac{t_{B,d} \times l + t_{s,d} \times l + s_{W,d} \times l}{t_{f,d} \times l + t_{s,h,d} \times l + T_{G,d} + S_{T,d}} \leq 1,0 \quad (13)$$

**5.6 Ermittlung des Auslastungsgrades im LF2 (Bauzustand mit Befahrung)**

Für den Einbauzustand ergibt sich aus der Integration der treibenden und haltenden Kräfte über die Böschungslänge der Nachweis:

$$\mu = \frac{E_d}{R_d} \leq 1,0 \quad (14)$$

Der Reibungswiderstand des Dichtungssystems muss höher sein als die im Einbauzustand 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 Einbauzustand zu erwartenden Schüttstärken  $d_i$  durchzuführen, im Wesentlichen der ersten Schüttstärke  $d_1$  und einer Gesamtmächtigkeit von  $d_{ges}$ .

Für die Berechnung ist weiterhin von entscheidender Bedeutung, ob für das Dichtungssystem im Lastfall 2 (d.h. unter Berücksichtigung der Schütthöhen) das Verhältnis  $\kappa$  der aus dem Eigengewicht der Bodenauflast wirkenden haltenden und treibenden Kräfte größer oder kleiner 1,0 wird. Für die Berechnung werden die haltenden Kräfte des Stützfußes  $T_{St,d}$  und einer eventuell erforderlich werdenden Zugbewehrung  $T_{G,d}$  zu Null gesetzt, um die Auslastung  $\kappa$  (treibende Kräfte / haltende Kräfte) zu ermitteln.

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

$$\kappa = ((t_{B,d} + s_{W,d}) \cdot l) / (t_{f,d} \cdot l + T_{G,d} + T_{St,d}) \quad (15)$$

Für den Fall einer Böschung, bei der der Reibungswiderstand geringer als die Beanspruchung ist, d.h.  $\kappa > 1,0$ , ergibt sich der Maximalbetrag einer von einer Zugbewehrung aufzunehmenden Kraft nach Abb. 2 an der Böschungsoberkante. Die Kräfte  $t_{B,d}$ ,  $s_{W,d}$  und  $t_{f,d}$  sind daher über die gesamte Böschungslänge zu integrieren (Gl. 16).

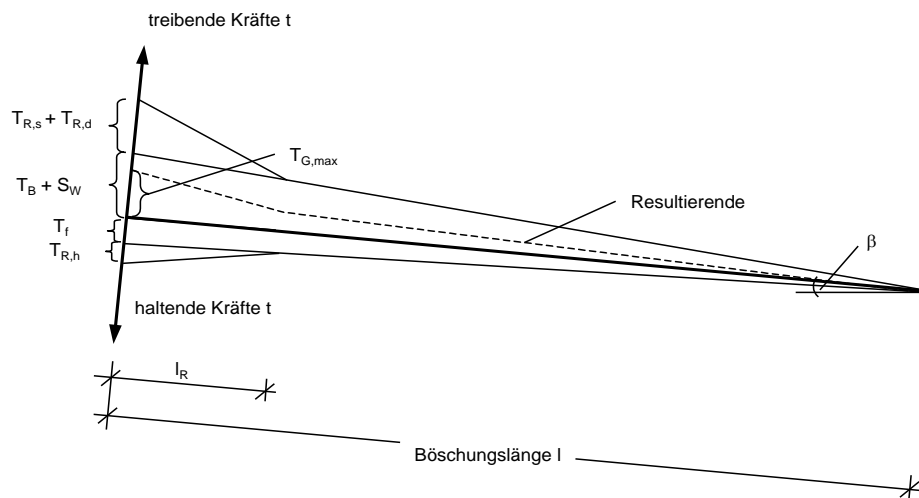


Abb. 2: Maximal von einer Zugbewehrung aufzunehmende Kraft  $T_G$  für  $\kappa > 1,0$

Ist der Reibungswiderstand höher als die Beanspruchungen aus den treibenden Kräften, d.h.  $\kappa < 1,0$  ergibt sich der ungünstigste Standpunkt des Fahrzeuges am Böschungsfuß, bzw. die Betrachtung des Böschungsabschnittes im Bereich des Fahrzeuges wird kritisch. Die maßgebende Böschungslänge zur Ermittlung der maximal durch eine Zugbewehrung aufzunehmenden Kraft wird nach Abb. 3 die Länge der Raupenkette  $l_R$  des Fahrzeuges (Gl. 17).

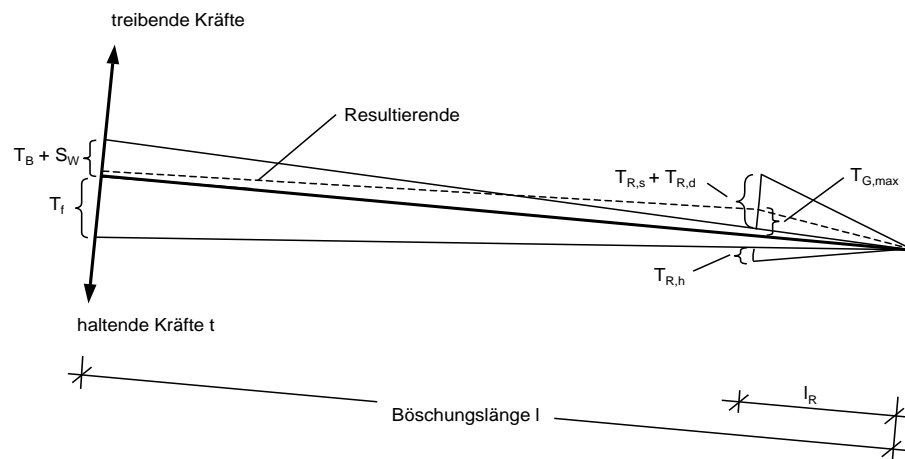


Abb. 3: Maximal von einer Zugbewehrung aufzunehmende Kraft  $T_G$  für  $\kappa < 1,0$

Je nach Fallunterscheidung wird der Auslastungsgrad  $\mu$  im LF2 durch Addition der zusätzlichen Belastung aus dem Fahrzeug wie folgt ermittelt:

$$\kappa > 1,0: \quad \mu = \frac{(t_{B,d} + S_{w,d}) \times l + (t_{Rd,s} + t_{Rd,d}) \times l_R}{t_{f,d} \times l + t_{Rd,h} \times l_R + T_{G,d} + S_{t,d}} \quad (16)$$

$$\kappa < 1,0: \quad \mu = \frac{(t_{B,d} + S_{w,d}) \times l_R + (t_{Rd,s} + t_{Rd,d}) \times l_R}{t_{f,d} \times l_R + t_{Rd,h} \times l_R + T_{G,d} + S_{t,d}} \quad (17)$$

## 5.7 Kurzzeichen

$a_k$	charakteristische Adhäsion ( $\text{kN/m}^2$ ), wird sicherheitshalber zu Null gesetzt
$d$	Dicke der Bodenschichten (m)
$d_i$	Dicke $d_1$ (bzw. $d_{\text{ges}}$ ) der Bodenschicht, auf der die Befahrung erfolgt (m)
$h_W$	mittlere Aufstauhöhe (m)
$h_S$	Höhe des Stützfußes (m)
$K_{\text{ph},d}$	Erddruckbeiwert (-)
$l$	Böschungslänge (m)
$S_{W,s}$	Strömungskraft ( $\text{kN/m}^2$ )
$t_{B,d}$	Schubkraft in Böschungsfallrichtung ( $\text{kN/m}^2$ )
$t_{f,d}$	mobilisierte Reibungskraft in der kritischen Scherfuge ( $\text{kN/m}^2$ )
$T_{G,d}$	Zugkraft im Bewehrungselement ( $\text{kN/m}$ )
$S_{T,d}$	Stützkraft am Böschungsfuß ( $\text{kN/m}$ )
$\beta$	Böschungsneigung ( $^\circ$ )
$\gamma$	Wichte des Bodens ( $\text{kN/m}^3$ )
$\gamma_W$	Wichte des Wassers ( $10 \text{ kN/m}^3$ )
$\delta_k$	charakteristischer Reibungswinkel der maßgebenden Kontaktfläche ( $^\circ$ )

$\mu$	Auslastungsgrad (-)
$\gamma_G$	Teilsicherheitsbeiwert (ständige Einwirkungen)
$\gamma_Q$	Teilsicherheitsbeiwert (veränderliche Einwirkungen)
$\gamma_\delta$	Teilsicherheitsbeiwert Kontaktreibungswinkel (Widerstand)
$\gamma_a$	Teilsicherheitsbeiwert Adhäsion (Widerstand)
$\varphi_k$	charakteristischer Reibungswinkel (Boden)
A	effektive Aufstandsfläche des Fahrzeuges unter Lastausbreitung
$a_v$	Bremsverzögerung (m/s <sup>2</sup> )
$b_R$	Breite der Raupenkette (m)
g	Erdbeschleunigung (10 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> )
$t_{R,d,d}$	Schubkräfte infolge einer Vollbremsung des Fahrzeuges (kN)
$t_{R,d,s}$	Schubkraft aus Eigengewicht des Fahrzeuges (kN/m <sup>2</sup> )
$t_{R,d,h}$	Reibungskraft in der kritischen Scherfuge aus Eigengewicht des Fahrzeuges (kN/m <sup>2</sup> )
t	Zeit, die das Fahrzeug bis zum Stillstand benötigt (s)
v	maximale Geschwindigkeit des Fahrzeuges (m/s)

## 6 Ergebnisse

Die Berechnungen zur Standsicherheit im Grenzzustand der Tragfähigkeit sowohl für den Bereich DK I als auch für den Bereich DK II der Verfüllung und Renaturierung Steinbruch Laubenheim unter Berücksichtigung der Eingangsparameter nach Kap. 5.2 sind in Anlage [A1] (LF1 & LF2) aufgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Zusammenstellung der Ergebnisse

Lastfall	Geometrie		Kennwerte Baugerät					Schneelast	Schichtdicke		Ergebnisse Auslastung $\mu$ für		
	l	1:n	$G_R$	$l_R$	$b_R$	v	t		$s_k$	$d_1$	$d_{ges}$	(LF2) $d_1$	(LF2) $d_{ges}$
	(m)	-	(kN)	(m)	(m)	(m/s)	(s)	(kN/m <sup>2</sup> )	(m)	(m)	(-)	(-)	(-)
LF2	150	1:3,0	177,0	3,10	0,86	1,0	2,0	-	0,70	1,0	0,99	0,95	-
LF1	150	1:3,0	-	-	-	-	-	0,65	-	1,0	-	-	0,91

## 7 Zusammenfassung

Für die Oberflächenabdichtung der Verfüllung und Renaturierung Steinbruch Laubenheim wurde vorliegend der vorläufige Nachweis gegen Gleiten im Einbau- und Endzustand untersucht. Der Aufbau mit einer  $d_{\text{Reku}} = 1,00$  m mächtigen Rekultivierungsschicht (konsolidierter Zustand) ist in Abschnitt 4 beschrieben.

Der Einbau der Rekultivierungsschicht erfolgt durch eine Kettenraupe **Caterpillar CAT D6 LGP** (Fahrzeugkennwerte und dynamische Fahrzeuglasten vgl. Kapitel 5.2) im vor-Kopf-Verfahren böschungsaufwärts. Die Standsicherheit gegen Gleiten des Dichtungssystems für diesen Bauzustand wird in Anlage [A1a] nachgewiesen.

Der vorläufige Nachweis gegen Gleiten des Dichtungssystems im Endzustand wird in Anlage [A1b] geführt. Der zulässige Auslastungsgrad  $\mu \leq 1,0$  wird jeweils eingehalten.

Vor Bauausführung sind die angenommenen Kontaktreibungswinkel durch in objektbezogenen Reibungsversuchen für alle Scherfugen Boden vs. Geokunststoff mit den vorgesehenen in-Situ-Böden zu bestätigen.

Bitte beachten Sie, dass es sich in dieser Ausarbeitung um eine produktspezifische Nachweisführung handelt, die nicht auf andere Geokunststoffe übertragen werden kann.

Sollten die in dieser Stellungnahme berücksichtigten Projektrandbedingungen nicht maßgebend sein bzw. nicht mit den tatsächlichen Randbedingungen vor Ort übereinstimmen, wird eine erneute Stellungnahme notwendig.

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.

*Die in dieser Ausarbeitung enthaltenen Angaben, Annahmen und Berechnungen entsprechen dem neuesten technischen Wissen des Herausgebers; diese sind nicht auf andere Geokunststoffe übertragbar. Alle Rechte dieses Nachweises vorbehalten. Die spezialgrundbaulich / erdstatisch richtige Weiterverwendung der Ergebnisse bzw. die Überprüfung auf deren Vollständigkeit obliegt dem vor Ort zuständigen Sachverständigen unter richtiger Würdigung und Interpretation aller Belange des geplanten Bauwerks und des Untergrundes. Das Copyright® liegt bei der BBG Bauberatung Geokunststoffe GmbH & Co. KG, Espelkamp.*