

PROF. AST  
INGENIEURGESELLSCHAFT  
FÜR GEOTECHNIK UND  
PROJEKTSTEUERUNG mbH

GLUCKSTRASSE 6  
70195 STUTTGART - BOTNANG

Prof. Ast Ing.-Ges. mbH, Gluckstr.6, 70195 Stuttgart

**Landratsamt Alb-Donau-Kreis**  
Fachdienst Abfallwirtschaft  
Schillerstraße 30  
**89077 Ulm**

TELEFON (0711) 99 603-0  
FAX (0711) 99 603-12  
MOBIL (0172) 79 11 947  
eMail [Prof.Ast-Stuttgart@t-online.de](mailto:Prof.Ast-Stuttgart@t-online.de)

Ihr Zeichen/Ihre Nachricht vom

Herr Nägele/ 23.11.2018

Unser Zeichen

2018-02-05.docx

Datum

30.11.2018

**Deponie „Unter Kaltenbuch“ in Laichingen – Suppingen**

## **Standssicherheitsberechnungen**

auf der Basis geotechnischer Feststellungen und Angaben

zum

Planfeststellungsantrag

Umwidmung DK 0 Bereiche in DK I –Bereiche  
einschließlich

Neumodellierung Deponieoberfläche

Hier:

**Rekultivierungsschicht für Waldbereiche:**

## **Standssicherheit im Bauzustand**

- Bemessungssituation BS-T -

## Rekultivierungsschicht für Waldböden Standssicherheit im Bauzustand

### (1) Anforderungen an die Standssicherheit der Rekultivierungsschicht

„Die Rekultivierungsschicht muss in allen Bauzuständen und im Endzustand mechanisch stabil sein. Hierzu darf ihre Stand- und Gleitsicherheit nicht durch Abgleiten ...gefährdet sein, darf sie nicht so weit aufweichen oder Strömungskräften ausgesetzt sein, daß sie ihre Stabilität verliert ..., muss sie frühzeitig vor Abtrag durch Wind- oder Wassererosion geschützt werden oder gegen diese beständig sein“ [2].

Die Standssicherheit der Rekultivierungsschicht auf der unterlagernden geotextilen Trennschicht gemäß der vorliegenden Planung zum Planfeststellungsantrag wurde sowohl hinsichtlich der Gesamtstandssicherheit im Grenzzustand GEO-3 als auch hinsichtlich der Gleitsicherheit (Spreizsicherheit) im Grenzzustand GEO-2 – jeweils für den Bemessungszustand BS-P (Endzustand der Deponie)- im Bericht vom 25.04.2018 [1] nachgewiesen.

Nachfolgend werden die Berechnungen für die Standssicherheit für den Vorgang des böschungsparellen Abgleitens als Scherbruch ausschließlich im Boden im Bemessungszustand BS-T („Bauzustand“) durchgeführt. Wie im Bericht vom 25.04.2018 wird sowohl die Gesamtstandssicherheit im Grenzzustand GEO-3 wie auch die Gleitsicherheit im Grenzzustand GEO-2 nachgewiesen. Hierzu werden vorab im Abschnitt (3) die angenommenen Bodenkenngrößen bzw. die erforderliche undrained Scherfestigkeit für die Berechnungen begründet.

### (2) Aufbau der Rekultivierungsschicht für Waldbereiche

Die Rekultivierungsschicht besteht aus Böden entsprechend BQS 7-1 und ist zweischichtig aufgebaut mit Dicken von

- 0,30 m Oberboden
- 1,70 m Rohboden.

Sie wird unterlagert von

- einer geotextilen filterstabilen Trennschicht
- zur darunter angeordneten mineralischen Flächendränage.

Das Gefälle der Unterlage der Rekultivierungsschicht beträgt sowie das der Oberfläche beträgt 1 : 3 bzw. der Neigungswinkel  $\beta = 18,48^\circ$ .

## Rekultivierungsschicht für Waldböden Standicherheit im Bauzustand

### (3) Einwirkungen auf und Widerstände in der Rekultivierungsschicht bei der Herstellung (Bemessungszustand BS-T)

#### (3.1) Einwirkungen für den Nachweis der Gesamtstand- und Gleitsicherheit:

Für die Rekultivierungsschicht gelten folgende Annahmen:

- Bodenart: Lehmboden aus der Seitenablagerung des Baufeldes
- Bodenzustand des Rohbodens für die Bemessungssituation BS-T:
  - im für die Stand- und Gleitsicherheit erforderlichen Maß verdichtet,
  - wassergesättigt infolge von Niederschlägen.
- aktivierte Schubspannungen in Gleitflächen:
  - nur infolge Eigenlast der Rekultivierungsschicht
  - ohne und mit Belastung durch Baumaschinen (Verkehrslast)
  - keine Strömungskräfte in der gesamten Rekultivierungsschicht.

#### (3.2) Bodenkennwerte – Abschätzung für den Einbau

Die die Gleitvoränge bewirkende Bodeneigenlast wird mit folgenden Annahmen abgeschätzt (vgl. hierzu auch Tabelle 1: charakteristische Bodenkenngrößen im Bericht vom 25.04.2018 [1]):

##### (3.2.1) Wichte des Rohbodens in der Rekultivierungsschicht bei Wassersättigung

Trockendichte des Rohbodens  $\rho_d$

mit der Proctodichte  $\rho_{Pr}$  Bezugsgröße:

$$\rho_d = 0,92 \times \rho_{Pr} = 0,92 \times 1,70 = 1,56 \text{ t/m}^3$$

Porenanteil  $n$

$$n = 1 - (\rho_d / \rho_s) = 1 - (1,56/2,70) = 0,42 \text{ (42\%)}$$

Dichte bei Sättigung  $\rho_{sat}$

$$\rho_{sat} = n \times \rho_w + \rho_d = 0,42 \times 1,0 + 1,56 = 1,98 \text{ t/m}^3$$

$$\text{Bodenwichte, gesättigt: } \gamma_{sat} = 19,5 \text{ kN/m}^3$$

## Rekultivierungsschicht für Waldböden Standssicherheit im Bauzustand

### (3.2.2) Scherfestigkeit des undrÄnirten Rohbodens der Rekultivierungsschicht

- (a) Mit der Konsistenzzahl  $I_C$  kann nach von Soos u. Engel [L2] die undrÄnirte Scherfestigkeit, die undrÄnirte Kohäsion  $c_u$ , mit folgender empirischen Beziehung abgeschätzt werden:

$$\ln c_u = m + 4,61 I_C$$

mit  $m = -0,63$  für völlig gestörte Sedimente und  
 $I_C = 0,75$  für die Konsistenz „steif bis weich“ ist

$$\ln c_u = -0,63 + 4,61 \cdot 0,75 = 2,83 \quad \text{bzw.}$$

$$c_u = e^{2,83}$$

$$c_u = 17 \text{ kN/m}^2$$

- (b) Mit dem Plastizitätsindex  $I_P$  des normal konsolidierten Bodens kann nach von Soos u. Engel [L2] die undrÄnirte Scherfestigkeit  $c_u$ , mit folgender empirischen Beziehung abgeschätzt werden:

$$c_u = (0,11 + 0,37 I_P) \cdot (\gamma \cdot z)$$

Mit  $I_P = 0,10$

und

- einer statischen Auflast auf der bÖschungspArallelen GleitflÄche infolge der Eigenlast von  $(\gamma \cdot z) = 2\text{m} \times 19,5 \text{ kN/m}^3 = 39 \text{ kN/m}^2$  ergibt

$$c_u = (0,11 + 0,37 \cdot 0,10) \cdot 39 \text{ kN/m}^2$$

$$c_u = 5,7 \text{ kN/m}^2$$

- einer statisch wirksamen Auflast infolge Verdichtung von  $(\gamma \cdot z) = 100 \text{ kN/m}^2$  ergibt

$$c_u = (0,11 + 0,37 \cdot 0,10) \cdot 100 \text{ kN/m}^2$$

$$c_u = 15 \text{ kN/m}^2$$

- c) Der Reibungswinkel betrÄgt im undrÄnirten Zustand  $\varphi_u = 0^\circ$ .

## Rekultivierungsschicht für Waldböden Standssicherheit im Bauzustand

### (4) **Standssicherheit der Rekultivierungsschicht**

– Scherfugen ausschließlich im Rohboden -

#### (4.1) Gesamtstandssicherheit (böschungsparalleles Abgleiten) im Grenzzustand GEO-3

In Berechnungen vom 25.04.2018 [1] wurde für den Schnitt E2 die geringste Gleitsicherheit bzw. der größte Ausnutzungsgrad von  $\mu = 0,94$  ermittelt ([2], Tabelle 4). Die Geometrie dieses Schnittes wird daher für die nachfolgenden Berechnungen übernommen.

Die Bedingungen beim Einbau der gesamten Rekultivierungsschicht werden durch Ansatz einer Verkehrslast über die gesamte Böschungsoberfläche berücksichtigt,

von  $p = 10 \text{ kN/m}^2$

- Die Berechnung ist im einzelnen aus dem Protokoll und der Abbildung in Anlage 1 ersichtlich. -

Die erforderliche Standssicherheit bzw. der erforderliche Ausnutzungsgrad von  $\mu < 0$  kann nur nachgewiesen werden, wenn für die undrained Kohäsion Werte von  $c_u \gg 5,7 \text{ kN/m}^2$  angesetzt werden können.

Mit einer gewählten Größe von  $c_u = 15 \text{ kN/m}^2$  beträgt der Ausnutzungsgrad bei der Bemessungssituation BS-P für das Profil E2

$\mu = 0,91 < 1,0$

und erfüllt damit die Grenzzustandsbedingung.

**Hieraus folgt, eine undrained Kohäsion in der für die Standssicherheit erforderlichen Größe<sup>1)</sup> durch Verdichten beim Einbau der Rekultivierungsschicht erzielt werden muß !**

<sup>1)</sup> Hierbei sind auch die Anforderungen an die sog. Spreizsicherheit gemäß dem nachfolgendem Abschnitt mit zu berücksichtigen.

## Rekultivierungsschicht für Waldböden Standsicherheit im Bauzustand

### (4.2) Gleichsicherheit der Rekultivierungsschicht im Grenzzustand GEO-2 (böschungparalleler Scherbruch in einer Bodenfuge - Spreizsicherheit)

In Abbildung 1 ist ein Ausschnitt aus einer unbegrenzt langen Böschung dargestellt, bei welcher keine sowohl günstig wirkende seitliche Stützkkräfte wie auch ungünstig wirkende Strömungskräfte einer Sickerströmung oder eine Verkehrsbelastung angenommen werden.

An der Basis der Rekultivierungsschicht wird eine potenzielle Gleitfläche (Scherbruch) im Rohboden betrachtet, bei welcher kein Kontakt zur unterlagernden geotextilen Trennschicht zur mineralischen Flächendränage besteht.

Im aktiv plastifizierten Rankineschen Zustand sind die Erddruckkräfte böschungsparell, sodaß sich in böschungsparellen Schnittflächen der Spannungszustand einfach angeben läßt (nach [L1]):

Normalspannung auf der Gleitfläche:	$\sigma_s = \gamma \cdot z \cdot \cos^2 \beta$
Tangentialspannung in der Gleitfläche:	$\tau_s = \gamma \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta$
	$\sigma_s / \tau_s = \tan \beta$

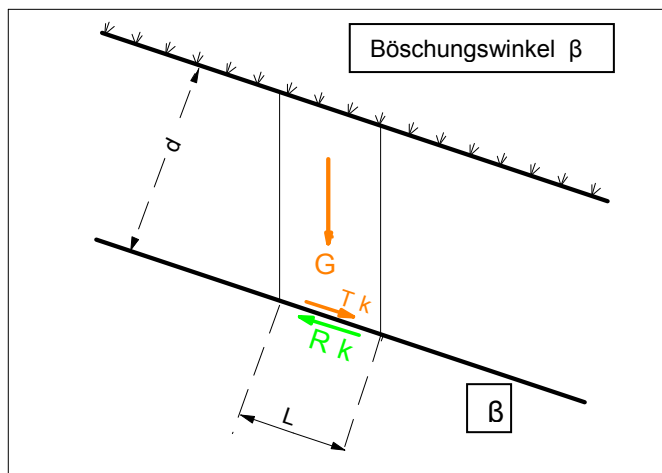


Abbildung 1: Kräfte in einer Lamelle der Rekultivierungsschicht

Zum Nachweis der Gleitsicherheit im Grenzzustand des ebenen, böschungsparellen Gleitens werden die Bemessungswerte der Beanspruchung  $E_d$  und der Reanspruchbarkeit  $R_d$  gegenübergestellt.

Die Grenzzustandsbedingung lautet  $R_d - E_d \geq 0$ .  
Im vorliegenden System kann auch der Ausnutzungsgrad  $\mu$  der Beanspruchung für den Sicherheitsnachweis formuliert werden  $\mu = E_d / R_d \leq 1$

## Rekultivierungsschicht für Waldböden Standstabilität im Bauzustand

Die Größen  $R_d$  und  $E_d$  werden durch Faktorisierung mit den Teilsicherheitsbeiwerten aus den charakteristischen  $R_k$  und  $E_k$  ermittelt (siehe Abbildung 1).

$$\begin{aligned} E_k &= T_k = G \times \sin \beta \\ &= L \times d \times \gamma_{\text{sat}} \times \sin \beta = 1,0 \times 2,0 \times 19,5 \times \sin 18,43^\circ \\ &= 12,33 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$R_k = c_u \times L$$

$$\begin{aligned} &\text{mit } c_u = 15 \text{ kN/m}^2 \text{ wird} \\ R_k &= 15 \times 1,0 \\ &= 15 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Mit den Teilsicherheitsbeiwerten für die Grenzzustandsbedingung GEO-2 und den Bemessungszustand BS-T

$$\gamma_{G,Eo} = 1,10 \quad \text{und} \quad \gamma_{R,h} = 1,10$$

werden die Bemessungswerte  $R_d$  und  $E_d$

$$\begin{aligned} E_d &= T_k \times \gamma_{G,Eo} \\ &= 12,33 \times 1,10 \\ &= 13,56 \text{ kN/m} \\ R_d &= R_k / \gamma_{R,h} \\ &= 15 / 1,10 \\ &= 13,64 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Die Grenzzustandsbedingung

$$R_d - E_d = 13,64 - 13,56 = 0,08 \geq 0 \quad \text{wird knapp erfüllt.}$$

Der Ausnutzungsgrad der Beanspruchung beträgt

$$\begin{aligned} \mu &= E_d / R_d \\ &= 13,56 / 13,64 \\ &= 0,99 < 1 \quad \text{Bedingung erfüllt !} \end{aligned}$$

### (5) Zusammenfassung

Die ausgeführten Berechnungen zeigen, daß ein wassergesättigter Rekultivierungsboden nur dann im eingebauten Zustand standstabil ist, wenn beim Einbau eine ausreichende große undrainingierte Scherfestigkeit erzielt ist.

## Rekultivierungsschicht für Waldböden Standssicherheit im Bauzustand

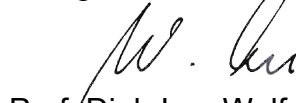
Hierfür reicht die Auflast aus dem Eigengewicht der Schicht nicht aus! Vielmehr muß die erforderliche Größe durch Verdichten mit geeigneten Baugeräten hergestellt werden.

Vor der Bauausführung ist der für die undrainede Scherfestigkeit erforderliche Verdichtungsgrad in der Eignungsprüfungen im Labor zu ermitteln. Bei den vorliegenden Berechnungen wurde ein Verdichtungsgrad von 92% der einfachen Proctodichte angenommen.

Sollte sich nach dem Einbau des Rohbodens eine für die Aufforstung zu große Verdichtung bzw. eine zu geringe Feldkapazität festgestellt werden kann nach dem Vorschlag des Fachdienstes Abfallwirtschaft des Landratsamtes Alb-Donau-Kreis eine Tiefenlockerung bis in Tiefen von 80 cm durchgeführt werden. Als Baugerät kommt hierfür z.B. eine Planierdraupe mit Heckaufreißer auf Gleisketten für den Mooreinsatz infrage.

Aufgestellt:

Stuttgart, 30. November 2018



Prof. Dipl.-Ing. Wolfgang Ast  
Reg.-Baumeister

### Bezugsdokumente und Literatur:

- [1] Prof. Ast Ingenieures. f. Geotechnik u. Projektsteuerung mbH:  
Standssicherheitsberechnungen vom 25.04.2018, Az. 2018-02-Bericht.docx
- [2] LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“, Bundeseinheitliche Qualitätsstandard BQ 7-1 „Rekultivierungsschichten in Deponieoberflächenabdichtungssystemen“, 13.04.2016
- [L1] Brauns, H., 1980:  
Spreizsicherheit von Böschungen auf geneigtem Gelände. Bauingenieur (55) 1980, S. 443-436
- [L2] Paul von Soos und Jens Engel:  
Eigenschaften von Boden und Fels- Ihre Ermittlung im Labor  
in Grundbau-Taschenbuch, Teil 1, 8. Aufl. , 2017 Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.  
Abschnitt 7.1.2 Scherparameter der Bodenarten



Rekultivierungsschicht für Waldböden  
Standssicherheit im Bauzustand

Anlage 1 zum Bericht vom 30.11.2018

**Protokoll der Berechnungen**

für den Nachweis der Gesamtstandssicherheit der Rekultivierungsschicht für  
Waldbereiche im Bauzustand – BS-T - im Schnitt E2:

- Seiten 1 bis 3
- Profildarstellung mit Angabe der Bodenkenngößen und Verkehrslast

GGU-STABILITY / Version 11.10 / 07.01.2016

Böschungsberechnung nach EC 7  
mit polygonalen Gleitflächen

2018-02 Profil E2, differenzierter Schichtaufbau mit Gleitzonen  
Bauzustand BS-T. undräßnierte Scherfestigkeit u.Baubetrieb  
Datei: E2-Rekusch-cu+p JB.boe

Datum: 29.11.2018

#### Parameterliste

$\phi$  [°] = Reibungswinkel  
 $c$  [kN/m<sup>2</sup>] = Kohäsion  
 $\gamma$  [kN/m<sup>3</sup>] = Wichte  
 $\mu$  [-] = Ausnutzungsgrad

#### Teilsicherheiten: (GEO-3)

- gam(phi) = 1.15
- gam(c') = 1.15
- gam(cu) = 1.15
- gam(Wichten) = 1.00
- gam(Ständige Einw.) = 1.00
- gam(Veränderliche Einw.) = 1.20

Bewegungsrichtung des Gleitkörpers nach rechts

#### Koordinaten der Geländepunkte

Nr.	x	y	Nr.	x	y	Nr.	x	y	Nr.	x	y	Nr.	x	y
[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]
1	32.000	757.500	2	89.000	776.000	3	200.000	738.400	4	205.000	736.000	5	220.000	735.000

#### Charakteristische Bodenkennwerte

Boden	$\phi_k$	$c_k$	$\gamma_k$	Bezeichnung
[-]	[°]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]	
1	0.00	15.00	19.50	Rekultivierungsschicht
2	0.00	15.00	19.50	Gleitzone Basis Rekult.sch...
3	22.50	10.00	20.00	Deponie DK I
4	25.00	0.00	20.00	Gleitzone Basis KDB
5	25.00	20.00	20.00	Technische Barriere
6	40.00	0.00	23.00	Blöcke + Lehm

#### Bemessungs-Bodenkennwerte

Boden	$\phi_d$	$c_d$	$\gamma_d$	Bezeichnung
[-]	[°]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>3</sup> ]	
1	0.00	13.04	19.50	Rekultivierungsschicht
2	0.00	13.04	19.50	Gleitzone Basis Rekult.sch...
3	19.81	8.70	20.00	Deponie DK I
4	22.07	0.00	20.00	Gleitzone Basis KDB
5	22.07	17.39	20.00	Technische Barriere
6	36.12	0.00	23.00	Blöcke + Lehm

Koordinaten der Schichten und Bodennummern

Nr.	x(links)	y(links)	x(rechts)	y(rechts)	Boden-Nr.
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	
1	32.000	755.300	90.000	774.200	1
2	90.000	774.200	200.000	737.200	1
3	200.000	737.200	202.000	736.000	1
4	32.000	755.000	90.000	773.900	2
5	90.000	773.900	200.000	736.900	2
6	200.000	736.900	202.000	736.000	2
7	202.000	736.000	205.000	736.000	1
8	32.000	750.000	60.000	743.500	3
9	60.000	743.500	100.000	740.800	3
10	100.000	740.800	122.000	739.100	3
11	122.000	739.100	144.000	737.300	3
12	144.000	737.300	193.000	735.300	3
13	193.000	735.300	202.000	736.000	3
14	32.000	749.500	60.000	743.200	4
15	60.000	743.200	100.000	740.500	4
16	100.000	740.500	122.000	738.600	4
17	122.000	738.600	144.000	736.800	4
18	144.000	736.800	193.000	734.800	4
19	193.000	734.800	202.000	736.000	4
20	32.000	748.500	60.000	742.200	5
21	60.000	742.200	100.000	739.500	5
22	100.000	739.500	122.000	737.600	5
23	122.000	737.600	144.000	735.800	5
24	144.000	735.800	193.000	733.800	5
25	193.000	733.800	202.000	736.000	5
26	32.000	720.000	220.000	720.000	6

Koordinaten des Porenwasserdruck-Polygonzuges

Nr.	x	y	Nr.	x	y	Nr.	x	y
[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]
1	32.000	750.000	2	60.000	743.500	3	205.000	736.000

Verkehrslasten

Nr.	Größe(links)	Größe(rechts)	x(links)	x(rechts)	y
[-]	[kN/m²]	[kN/m²]	[m]	[m]	[m]
1	10.00	10.00	90.00	200.00	780.00

Wasserstand vor der Böschung links [m] = 0.00

Wasserstand vor der Böschung rechts [m] = 0.00

$\gamma$  Wasser [kN/m³] = 10.000

Ergebnisse

Nr	$\mu$	Zähler	Nenner	H(Ti)	H(R)	H(Gi)	H(S)	Lamellen
[-]	[-]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[-]
1	0.907	1531.843	1688.893	1688.893	0.000	1531.843	0.000	150

Ungünstigster Gleitkörper 1

Nr	$\mu$	Zähler	Nenner	H(Ti)	H(R)	H(Gi)	H(S)	Lamellen
[-]	[-]	[kN*m/m]	[kN*m/m]	[kN*m/m]	[kN*m/m]	[kN*m/m]	[kN*m/m]	[-]
1	0.907	1531.843	1688.893	1688.893	0.000	1531.843	0.000	150

Koordinaten (Gleitkörper 1)

Nr	x[m]	y[m]	Nr	x[m]	y[m]	Nr	x[m]	y[m]	Nr	x[m]	y[m]
1	89.000	776.000	2	90.000	773.900	3	200.000	737.200	4	201.746	737.562

