

**Standsicherheitsnachweis  
der  
Oberflächenabdichtung  
für die Deponie Gutenfurt**

Bauherr und Auftraggeber:

**Landratsamt Ravensburg**  
Amt für Finanzen; Beteiligungen und  
Kreislaufwirtschaft  
Friedensstraße 6  
88212 Ravensburg

Geotechnische Projektbearbeitung:

Prof. Dipl.-Ing. Rolf Schrodi

Erstattungsdatum:

03.November 2020

Aktenzeichen:

RVGUF 20 G01.docx

---

**Geschäftsführer:**

PROF. DIPL.-GEOL. MATTHIAS HILLER  
DIPL.-ING. (FH) MARKUS KATZ  
DIPL.-ING. (FH) THOMAS BENZ  
DIPL.-ING. CHRISTIAN RAUSER-HÄRLE  
DIPL.-GEOL. FALK WINTEROLL

**Hauptsitz Stuttgart**

PROF. DIPL.-GEOL. MATTHIAS HILLER  
Emilienstr. 2  
78056 Stuttgart  
Tel.: 0711.997 60 73-0  
Fax: 0711.73 56 298  
E-Mail: [kontakt@henkegeo.de](mailto:kontakt@henkegeo.de)

**Vertretung Kirchheim/Teck**

DIPL.-ING. (FH) THOMAS BENZ  
Blumenstr. 19  
73271 Holzmaden  
Tel.: 0177.71 61 678  
Fax: 0711.73 56 298  
E-Mail: [tb@henkegeo.de](mailto:tb@henkegeo.de)

**Vertretung Nagold**

DIPL.-ING. (FH) MARKUS KATZ  
Haydnweg 10/1  
72202 Nagold  
Tel.: 0177.71 61 682  
Fax: 0711.73 56 298  
E-Mail: [mk@henkegeo.de](mailto:mk@henkegeo.de)

**Vertretung Schwarzwald-Baar**

DIPL.-ING. (FH) ACHIM FÖRSTER  
Vor dem Hummelholz 4  
78056 VS-Schwenningen  
Tel.: 07720.95 86-92  
Fax: 07720.95 86-87  
E-Mail: [vs@henkegeo.de](mailto:vs@henkegeo.de)

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Auftrag	2
2. Unterlagen	2
3. Projektbeschreibung	2
4. Berechnungskennwerte	4
5. Bemessungssituationen und Teilsicherheitsbeiwerte	5
6. Belastungsansätze	6
6.1 Schneelast	6
6.2 Erdbaugeräte	6
6.3 Erdbeben	7
7. Berechnungsmodell	8
8. Standsicherheitsnachweis	10
8.1 Bemessungssituation BS-P	10
8.2 Bemessungssituation BS-T	12
8.3 Bemessungssituation BS-A	14
9. Betriebwege	16
10. Schlussbemerkungen	18

## 1. Auftrag

Das Ingenieurbüro für Geotechnik Henke und Partner GmbH (HUP), Vertretung Oberschwaben, wurde auf der Basis des Angebotes vom 17.08.2020, Az.: RVGUF 20 K01 vom Landratsamt Ravensburg beauftragt den Standsicherheitsnachweis für die geplante Deponieoberflächenabdichtung der Deponie Gutenfurt zu erstellen.

## 2. Unterlagen

Als Unterlagen zur Bearbeitung wurden uns zur Verfügung gestellt:

AU Consult GmbH

- [1] Schnitte Statik, M 1:500, Stand 06.08.20
- [2] Anpassung Oberflächenabdichtung / Deponievolumen: Lageplan Bestand 2018 mit Luftbild 03/2019, M 1:750, 05.06.20
- [3] Anpassung Oberflächenabdichtung / Deponievolumen: Lageplan OK KDB Oberfläche, M 1:750, 05.06.20
- [4] Anpassung Oberflächenabdichtung / Deponievolumen: Lageplan OK Rekultivierung (Standardrekultivierungsdicke), M 1:750, 05.06.20
- [5] Anpassung Oberflächenabdichtung / Deponievolumen: Regelschnitt Oberflächenabdichtung, M 1:25, M 1:10, 05.06.20
- [6] Anpassung Oberflächenabdichtung / Deponievolumen: Regelschnitt Betriebswege auf der DKI-Deponie, M 1:50, 05.06.20

## 3. Projektbeschreibung

Die Deponie Gutenfurt soll in den nächsten Jahren eine Oberflächenabdichtung erhalten. Der Bau dieser soll voraussichtlich in zwei Bauabschnitten erfolgen.

Nach [1] beträgt die maximale Neigung der Oberflächenabdichtung 1:2,75 im „Schnitt Statik 1“. Unterhalb der Betriebswege ist nach [6] auf einer Länge von ca. 10 - 12 m eine Versteilung der Geländeoberfläche auf 1:1,5 vorgesehen, die Neigung der unterhalb der Rekultivierungsschicht zu verlegenden Dichtungsschichten beträgt auch im Bereich der Betriebswege 1: 3, im kritischen Schnitt „Statik 1 1:2,75“.

Als geplanter Aufbau der Oberflächenabdichtung ist von, oben nach unten, vorgesehen:

- Rekultivierungsschicht (Oberboden), Dicke 0,30 m
- Rekultivierungsschicht (Rohboden), Dicke 2,0 m,  
unterhalb der Betriebswege Dicke bis zu ca. 3,80 m
- Rekultivierungsschicht (Schutz),  $k \geq 1 \times 10^{-4}$  m/s, Dicke 0,20 m
- Geotextiles Dränelement (Dränagematte mit BAM-Zulassung)
- Kunststoffdichtungsbahn, strukturiert (PEHD:Bahn mit BAM-Zulassung)
- Geotextile Tondichtungsbahn (Bentonitmatte )
- Trag- und Ausgleichschicht fein, Körnung < 20 mm,  $k \geq 1 \times 10^{-4}$  m/s, Dicke 0,10 m
- Trag- und Ausgleichschicht grob, Körnung 0/100 mm,  $k \geq 1 \times 10^{-4}$  m/s, Dicke 0,30 m
- Trag- und Ausgleichschicht erweitert, Dicke 0,60 m
- Deponat

**4. Berechnungskennwerte**

Für die einzelnen Schichten bzw. bei den Dichtungs- und Dränelementen für die Schichtfugen werden auf der Basis von Erfahrungswerten folgende Kennwerte angesetzt:

Schichten	Wichte $\gamma_k$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Wichte, gesättigt $\gamma_{r, k}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Reibungs- winkel $\varphi_k$ [°]	Kohäsion $c_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Deponat	16	19,0	25	5
Trag- und Ausgleichsschicht, erweitert	18	21,0	27,5	0
Trag- und Ausgleichsschicht, grob	19	22,0	32,5	0
Trag- und Ausgleichsschicht, fein	19	22,0	32,5	0
Rekultivierungsschicht (Schutz)	19	22,0	32,5	0
Rekultivierungsschicht (Rohboden)	19,5	22,5	25	3
Rekultivierungsschicht (Oberboden)	19,5	22,5	25	1

Schichtfugen	Reibungs- winkel $\delta_k$ [°]	Adhäsion $c_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Rekultivierungsschicht - Dränagematte	30	0
Dränagematte - KDB, strukturiert	33	0
KDB, strukturiert - Bentonitmatte	25	1
Bentonitmatte - Trag- und Ausgleichsschicht, fein	27	0

**5. Bemessungssituationen und Teilsicherheitsbeiwerte**

Es werden in den Standsicherheitsnachweisen folgende Bemessungssituationen unterschieden:

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

Die Standsicherheitsnachweise werden als Nachweise im Grenzzustand GEO-3 nach EC 7 geführt, es gelten folgende Teilsicherheitsbeiwerte:

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

## 6. Belastungsansätze

### 6.1 Schneelast

Die Deponie Gutenfurt liegt mit Ihrer höchsten Erhebung bei einer Geländehöhe  $A = 470$  mNN und nach DIN EN 1991-1-3 NA (2019-04-00) in der Schneelastzone 1.

Damit ergibt sich eine Schneelast auf dem Boden zu

$$s_k = 0,19 + 0,91 \times ((A + 140)/760)^2 = 0,19 + 0,91 \times ((470 + 140)/760)^2 = 0,78 \text{ KN/m}^2$$

### 6.2 Erdbaugeräte

Für die Baugeräte kann der Ansatz einer flächig begrenzten Einwirkung angesetzt werden. Es ergeben sich folgende kritische Beanspruchung:

Nach dem Einbau der Bentonitmatte, der KDB und der Drainmatte ist 20 cm Rekultivierungsschicht aufzubringen. Das Befahren der Rekultivierungsschicht (Schutz) von 20 cm Dicke ist nach deren Einbau mit einer Stärke von 20 cm nicht möglich, so dass im Folgenden von einer Einbaustärke von insgesamt 80 cm Material (20 cm Rekultivierungsschicht (Schutz) und mindestens 60 cm Rekultivierungsschicht (Rohboden) durch seitlich stehenden Bagger oder mit Langarmbagger vorausgesetzt wird.

Mit einer Überdeckung von mindestens 80 cm über der Dränageschicht wird der Einsatz einer Schubreue mit einem Einsatzgewicht von  $G = 9522$  kg (CAT D5 LPG) angenommen, bei einer Kettenbreite von  $b = 76,2$  cm und einer Kettenaufstandslänge von 2,31 m ergibt sich eine Bodenpressung in der Kettenaufstandsfläche von  $27,1 \text{ KN/m}^2$ . Diese verringert sich bei einer Lastausbreitung von  $30^\circ$  gegen die Vertikale in einer Tiefe von 80 cm (Mindesteinbaustärke vor der Überfahrt mit Reue) auf eine Spannung von  $12,3 \text{ kN/m}^2$ .

Die dynamische Wirkung (Bremsen, Anfahren, etc.) wird durch einen Schwingbeiwert berücksichtigt.

für direkt befahrene Bauteile: Schwingbeiwert  $\phi = 1,4$

für überschüttete Bauteile:  $\phi = 1,4 - 0,1 h_{\text{Ü}} \geq 1,0$  wobei  $h_{\text{Ü}}$  = Überschüttungshöhe im m

Für eine Überschüttungshöhe von 0,8 m ergibt sich somit ein

$$\text{Schwingbeiwert } \phi = 1,4 - (0,1 \times 0,8) = 1,32$$

Damit ergibt sich eine zu berücksichtigende Zusatzlast

bei direktem Befahren  $q_k = 27,1 \times 1,4 = 37,94 \text{ kN/m}^2$

bei Befahren auf einer Überschüttung von 80 cm Höhe:  $q_k = 12,3 \times 1,32 = 16,24 \text{ kN/m}^2$

### 6.3 Erdbeben

Die Deponie Gutenfurt liegt in der Erdbebenzone 1, der Bemessungswert der Erdbebenbeschleunigung beträgt  $a_g = 0,4 \text{ m/s}^2$ , die Deponie kann das Bauwerk der Bedeutungskategorie I zugeordnet werden, so dass sich eine Horizontalbeschleunigung von  $a_k = 0,4 \times 0,8 = 0,32 \text{ m/s}^2$  ergibt.

Vereinfachend wird beim Nachweis der Gleitsicherheit der Oberflächenabdichtung davon ausgegangen, dass die aus der Erdbebenbeschleunigung resultierende Kraft in Richtung der Hangabtriebskomponente wirkt, so dass eine Erdbebenersatzlast zu den Einwirkungen hinzugezählt wird. Die Erdbebenersatzlast errechnet sich zu  $E = \text{Vertikalkraft} \times a_k / g = \text{Vertikalkraft} \times 0,32 / 9,81 = \text{Vertikalkraft} \times 0,033$ .



## 7. Berechnungsmodell

Nach GDA E 2-7 ist die Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen auf der sicheren Seite liegend für schichtparalleles Gleiten zu führen. Die Resultierende der seitlich angreifenden Erddruck- und Stützkkräfte  $E_l$  und  $E_r$  wird vernachlässigt. Bei einer Breite von  $b = 1$  m ergeben sich:

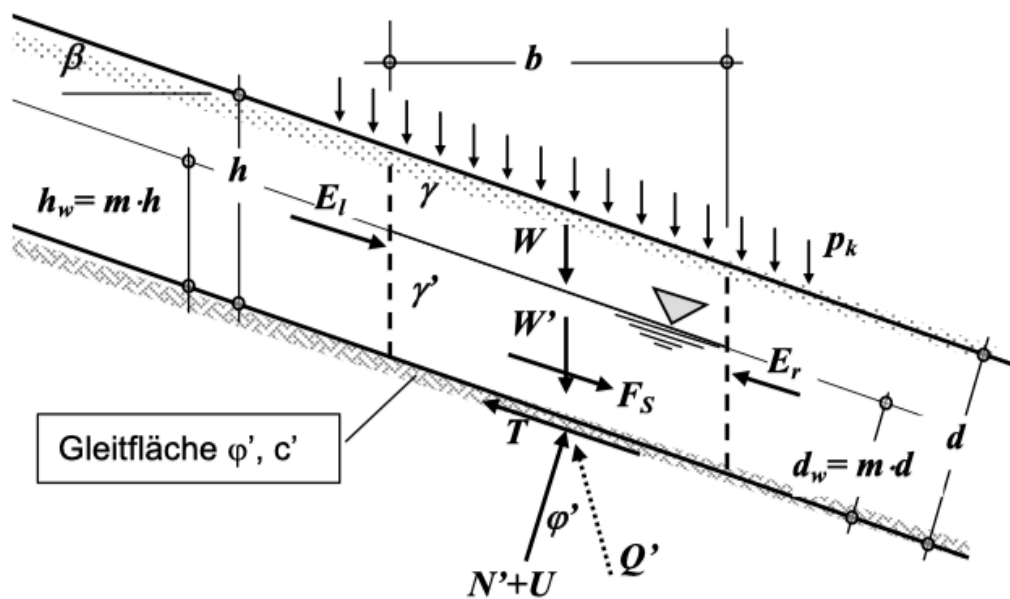


Bild 2-7.1: Schichtparalleles Gleiten eines teilweise durchströmten Abdichtungssystems. Definition der Schichthöhen und der Kräfte am Böschungselement der Breite  $b$

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

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

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

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

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

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

Somit ergibt sich folgende Auslastung:

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

## 8. Standsicherheitsnachweis

Die Nachweise werden für den steilsten Böschungsabschnitt geführt. Bei einer Neigung von 1:2,75 ergibt sich ein Neigungswinkel  $\beta = 19,98^\circ$ .

### 8.1 Bemessungssituation BS-P

Für die BS-P werden das Eigengewicht der Schichten, die Schneelast und der Einstau der Drainagematte und der darüberliegenden Rekultivierungsschicht (Schutz) angesetzt.

Es ergeben sich für die einzelnen Schichten folgende Auslastungen:

Rekultivierungsschicht (Oberboden)

$$\varphi_d = \arctan(\tan 25^\circ / 1,25) = 20,46^\circ, c_d = 1/1,25 = 0,8$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,3 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 0,78 \cdot 1,3]}{0,8 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 20,46^\circ [0,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,751 < 1,0$$

Rekultivierungsschicht (Rohboden)

$$\varphi_d = \arctan(\tan 25^\circ / 1,25) = 20,46^\circ, c_d = 3/1,25 = 2,4$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [2,3 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 0,78 \cdot 1,3]}{2,4 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 20,46^\circ [2,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,852 < 1,0$$

Rekultivierungsschicht (Schutz) mit komplettem Wassereinstau

$$\varphi_d = \arctan(\tan 32,5^\circ / 1,25) = 27,01^\circ$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 \cdot 1,0 + 2,30 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 0,78 \cdot 1,3]}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 27,01^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,746 < 1,0$$

Schichtfuge Dränagematte - Rekultivierungsschicht (Schutz) mit komplettem Wassereinstau

$$\varphi_d = \arctan(\tan 30^\circ / 1,25) = 24,79^\circ$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 \cdot 1,0 + 2,30 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 0,78 \cdot 1,3]}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 24,79^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,824 < 1,0$$

Schichtfuge Dränagematte - KDB, strukturiert, mit komplettem Wassereinstau Rekultivierungsschicht Schutz

$$\varphi_d = \arctan(\tan 33^\circ / 1,25) = 27,45^\circ$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 \cdot 1,0 + 2,30 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 0,78 \cdot 1,3]}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 27,45^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,732 < 1,0$$

Schichtfuge KDB, strukturiert - Bentonitmatte, mit komplettem Wassereinstau Rekultivierungsschicht Schutz

$$\varphi_d = \arctan(\tan 25^\circ / 1,25) = 20,46^\circ, c_d = 1/1,25 = 0,8$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 \cdot 1,0 + 2,30 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 0,78 \cdot 1,3]}{0,8 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 20,46^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,984 < 1,0$$

Schichtfuge Bentonitmatte - Trag- und Ausgleichsschicht, fein, mit komplettem Wassereinstau Rekultivierungsschicht Schutz

$$\varphi_d = \arctan(\tan 27^\circ / 1,25) = 22,18^\circ$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 \cdot 1,0 + 2,30 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 0,78 \cdot 1,3]}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 22,18^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,933 < 1,0$$

Trag- und Ausgleichsschicht fein, Rekultivierungsschicht (Schutz) mit komplettem Wassereinstau

$$\varphi_d = \arctan(\tan 32,5^\circ / 1,25) = 27,01^\circ$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 \cdot 1,0 + 2,30 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 0,10 \cdot 19,0 \cdot 1,0 + 0,78 \cdot 1,3]}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 27,01^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,10 \cdot 19,0 + 0,78]} = 0,745 < 1,0$$

Trag- und Ausgleichsschicht grob, Rekultivierungsschicht (Schutz) mit komplettem Wassereinstau

$$\varphi_d = \arctan(\tan 32,5^\circ / 1,25) = 27,01^\circ$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 \cdot 1,0 + 2,30 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 0,40 \cdot 19,0 \cdot 1,0 + 0,78 \cdot 1,3]}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 27,01^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,40 \cdot 19,0 + 0,78]} = 0,742 < 1,0$$

Trag- und Ausgleichsschicht erweitert, Rekultivierungsschicht (Schutz) mit komplettem Wassereinstau

$$\varphi_d = \arctan(\tan 27,5^\circ / 1,25) = 22,61^\circ$$

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 \cdot 1,0 + 2,30 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 0,40 \cdot 19,0 \cdot 1,0 + 0,60 \cdot 18,0 \cdot 1,0 + 0,78 \cdot 1,3]}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 22,61^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,40 \cdot 19,0 + 0,6 \cdot 18,0 + 0,78]} \\ &= 0,902 \end{aligned}$$

## 8.2 Bemessungssituation BS-T

Für die BS-T entfällt die Schneelast, es wird bei vollem Einstau der Dränagematte und der Rekultivierungsschicht (Schutz) zusätzlich noch die Last aus der Schubraupe als ungünstige Einwirkung angesetzt.

Es ergeben sich folgende Nachweise im Bauzustand:

Trag- und Ausgleichsschicht, erweitert, direkt befahren mit Schubraupe

$$\varphi_d = \arctan(\tan 27,5^\circ / 1,15) = 24,35^\circ$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,6 \cdot 18 \cdot 1,0 + 37,94 \cdot 1,2]}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 24,35^\circ [0,6 \cdot 18 + 37,94]} = 0,961 < 1,0$$

Trag- und Ausgleichsschicht, fein, direkt befahren mit Schubraupe

$$\varphi_d = \arctan(\tan 27,5^\circ / 1,15) = 24,35^\circ$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,1 \cdot 19 \cdot 1,0 + 37,94 \cdot 1,2]}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 24,35^\circ [0,1 \cdot 19 + 37,94]} = 0,956 < 1,0$$

Schichtfuge Bentonitmatte - Trag- und Ausgleichschicht nach Einbau von 80 cm Material auf Dränageschicht, Rekultivierungsschicht (Schutz) mit komplettem Wassereinstau, befahren mit Schubraupe

$$\varphi_d = \arctan(\tan 27,0^\circ / 1,15) = 23,90^\circ$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 \cdot 1,0 + 0,60 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 16,24 \cdot 1,2]}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 23,90^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 0,6 \cdot 19,5 + 16,24]} = 0,962 < 1,0$$

Schichtfuge KDB, strukturiert - Bentonitmatte nach Einbau von 80 cm Material auf Dränageschicht, Rekultivierungsschicht (Schutz) mit komplettem Wassereinstau, befahren mit Schubraupe

$$\varphi_d = \arctan(\tan 25,0^\circ / 1,15) = 22,07^\circ, c_d = 1/1,15 = 0,87$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 \cdot 1,0 + 0,60 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 16,24 \cdot 1,2]}{0,87 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 22,07^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 0,6 \cdot 19,5 + 16,24]} = 0,978 < 1,0$$

Die Schichtfugen Dränagematte - KDB strukturiert und Rekultivierungsschicht - Dränagematte wiesen einen höheren Reibungswinkel als die Schichtfuge Bentonitmatte - Trag- und Ausgleichschicht auf und sind somit unkritisch.

Schichtfuge Rekultivierungsschicht (Oberboden) direkt befahren mit Schubraupe

$$\varphi_d = \arctan(\tan 25,0^\circ / 1,15) = 22,07^\circ, c_d = 1/1,15 = 0,87$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 37,94 \cdot 1,2]}{0,87 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 22,07^\circ [0,20 \cdot 19,5 + 37,94]} = 0,947 < 1,0$$

Alle anderen Schichtfugen weisen höhere Reibungswinkel bzw. Kohäsionen auf, so dass sie unkritisch sind und nicht mehr nachgewiesen werden müssen.

### 8.3 Bemessungssituation BS-A

Für die BS-A wird das Eigengewicht, die Schneelast, der volle Einstau der Dränagematte und der Rekultivierungsschicht (Schutz) und zusätzlich die Erdbebenlast berücksichtigt.

Es ergeben sich folgende Nachweise in der außergewöhnlichen Bemessungssituation:

Rekultivierungsschicht (Oberboden)

$$\varphi_d = \arctan(\tan 25^\circ / 1,1) = 22,97^\circ, c_d = 1/1,1 = 0,91$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,3 \cdot 19,5 + 0,78] + [0,3 \cdot 19,5 + 0,78] 0,033}{0,91 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 22,97^\circ [0,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,700 < 1,0$$

Rekultivierungsschicht (Rohboden)

$$\varphi_d = \arctan(\tan 25^\circ / 1,1) = 22,97^\circ, c_d = 3/1,1 = 2,73$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [2,3 \cdot 19,5 + 0,78] + [2,3 \cdot 19,5 + 0,78] 0,033}{2,73 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 22,97^\circ [2,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,818 < 1,0$$

Rekultivierungsschicht (Schutz) mit komplettem Wassereinstau

$$\varphi_d = \arctan(\tan 32,5^\circ / 1,1) = 30,08^\circ$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,78] + [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,78] 0,033}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 30,08^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,717 < 1,0$$

Schichtfuge Dränagematte - Rekultivierungsschicht (Schutz) mit komplettem Wassereinstau

$$\varphi_d = \arctan(\tan 30^\circ / 1,1) = 27,69^\circ$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,78] + [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,78] 0,033}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 27,69^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,791 < 1,0$$

Schichtfuge Dränagematte - KDB, strukturiert, mit komplettem Wassereinstau Rekultivierungsschicht Schutz

$$\varphi_d = \arctan(\tan 33^\circ / 1,1) = 30,56^\circ$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,78] + [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,78] 0,033}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 30,56^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,703 < 1,0$$

Schichtfuge KDB, strukturiert - Bentonitmatte, mit komplettem Wassereinstau Rekultivierungsschicht Schutz

$$\varphi_d = \arctan(\tan 25^\circ / 1,1) = 22,97^\circ, c_d = 1/1,1 = 0,91$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,78] + [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,78] 0,033}{0,91 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 22,97^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,935 < 1,0$$

Schichtfuge Bentonitmatte - Trag- und Ausgleichsschicht, fein, mit komplettem Wassereinstau Rekultivierungsschicht Schutz

$$\varphi_d = \arctan(\tan 27^\circ / 1,1) = 24,85^\circ$$

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,78] + \sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,78] 0,033}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 24,85^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,78]} \\ &= 0,897 < 1,0 \end{aligned}$$

Trag- und Ausgleichsschicht fein, Rekultivierungsschicht (Schutz) mit komplettem Wassereinstau

$$\varphi_d = \arctan(\tan 32,5^\circ / 1,1) = 30,08^\circ$$

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,10 \cdot 19,0 + 0,78] + [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,10 \cdot 19,0 + 0,78] 0,033}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 30,08^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,10 \cdot 19,0 + 0,78]} \\ &= 0,715 < 1,0 \end{aligned}$$



Trag- und Ausgleichsschicht grob, Rekultivierungsschicht (Schutz) mit komplettem Wassereinstau

$$\varphi_d = \arctan(\tan 32,5^\circ / 1,1) = 30,08^\circ$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,40 \cdot 19,0 + 0,78] + \sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,40 \cdot 19,0 + 0,78] \cdot 0,033}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 30,08^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,40 \cdot 19,0 + 0,78]}$$

$$= 0,713 < 1,0$$

Trag- und Ausgleichsschicht erweitert, Rekultivierungsschicht (Schutz) mit komplettem Wassereinstau

$$\varphi_d = \arctan(\tan 27,5^\circ / 1,1) = 25,33^\circ$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,40 \cdot 19,0 + 0,60 \cdot 18,0 + 0,78] + 0,20 \cdot 22,0 + 2,30 \cdot 19,5 + 0,40 \cdot 19,0 + 0,60 \cdot 18,0 + 0,78 \cdot 0,033}{0 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 25,33^\circ [0,20 \cdot 12,0 + 2,3 \cdot 19,5 + 0,40 \cdot 19,0 + 0,6 \cdot 18,0 + 0,78]}$$

$$= 0,868 < 1,0$$

## 9. Betriebswege

Im Bereich der Betriebswege ergibt sich aus geometrischen Zwängen auf einen kurzen Böschungsabschnitt eine Versteilung der Oberfläche der Rekultivierungsschicht auf eine Neigung von 1:1,5, somit ergibt sich ein Neigungswinkel der Oberkante der Rekultivierungsschicht von  $\beta = 33,69^\circ$ .

In diesen Abschnitten der Böschungsversteilung sind erhöhte Anforderungen an mindestens vorhandene Kohäsion der Rekultivierungsschicht (Oberboden) und der Rekultivierungsschicht (Oberboden) einzuhalten:

Rekultivierungsschicht (Oberboden): erforderliche Kennwerte  $\varphi_k = 25^\circ$ ,  $c_k' = 3 \text{ kN/m}^2$

Rekultivierungsschicht (Rohboden): erforderliche Kennwerte  $\varphi_k = 30^\circ$ ,  $c_k' = 10 \text{ kN/m}^2$

Die Abdichtungsschichten (KDB, Benonitmatte) verlaufen mit einer Neigung von maximal 1:3, so dass die oben geführten Gleitsicherheitsnachweise für die Dichtungselemente bzw. Dichtungsschichten eingehalten sind (Kap. 8).

Für die Böschungsversteilung unterhalb der Betriebswege wird der Nachweis mit ebenen Gleitflächen für den Rekultivierungsboden (Oberboden) und Rekultivierungsboden (Rohboden) bei einer maximalen Mächtigkeit der Rohbodenschicht von 4,0 m geführt:

BS-P:

Rekultivierungsschicht (Oberboden)

$$\varphi_d = \arctan(\tan 25^\circ / 1,25) = 20,46^\circ, c_d = 3/1,25 = 2,4$$

$$\mu = \frac{\sin 33,69^\circ [0,3 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 0,78 \cdot 1,3]}{2,4 + \cos 33,69^\circ \cdot \tan 20,46^\circ [0,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,854 < 1,0$$

Rekultivierungsschicht (Rohboden)

$$\varphi_d = \arctan(\tan 32,5^\circ / 1,25) = 27,01^\circ, c_d = 14/1,25 = 11,2$$

$$\mu = \frac{\sin 33,69^\circ [4,3 \cdot 19,5 \cdot 1,0 + 0,78 \cdot 1,3]}{11,2 + \cos 33,69^\circ \cdot \tan 27,01^\circ [4,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,999 < 1,0$$

BS-T:

Der Einbau der Oberboden und Rohbodenschicht muss in diesem Steilbereich ohne Befahren durch die Schubraupe erfolgen, es sind hierzu leichtere Erdbaugeräte oder außerhalb des Steilböschungsbereiches stehende Geräte, z.B. Langarmbagger, einzusetzen.

BS-A:

Für die außergewöhnlichen Bemessungssituation ergeben sich folgende Auslastungen:

Rekultivierungsschicht (Oberboden)

$$\varphi_d = \arctan(\tan 25^\circ / 1,1) = 22,97^\circ, c_d = 3/1,1 = 2,73$$

$$\mu = \frac{\sin 33,69^\circ [0,3 \cdot 19,5 + 0,78] + [0,3 \cdot 19,5 + 0,78] 0,033}{2,73 + \cos 33,69^\circ \cdot \tan 22,97^\circ [0,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,769 < 1,0$$

Rekultivierungsschicht (Rohboden)

$$\varphi_d = \arctan(\tan 32,5^\circ / 1,1) = 30,08^\circ, c_d = 14/1,1 = 12,73$$

$$\mu = \frac{\sin 19,98^\circ [4,3 \cdot 19,5 + 0,78] + [4,3 \cdot 19,5 + 0,78] 0,033}{2,73 + \cos 19,98^\circ \cdot \tan 30,08^\circ [4,3 \cdot 19,5 + 0,78]} = 0,650 < 1,0$$

## 10. Schlussbemerkungen

Die Standsicherheitsnachweise der geplanten Oberflächenabdichtung wurden mit Erfahrungswerten für die einzelnen Elemente und einzubauenden Schichten geführt. Im Zuge der Ausschreibung sind Nachweise für die beim Bau zu verwendenden Elemente und Schichten zu verlangen, dass die in der vorliegenden Berechnung angesetzten Kennwerte mit Sicherheit erreicht werden.

Bei der Auswahl der Baugeräte und Arbeitsweise ist der Nachweis von der ausführenden Baufirma zu erbringen, dass die in der vorliegenden Berechnung angesetzten Belastungen nicht überschritten werden.

Die im Bereich unterhalb der Betriebswege einzubauenden Materialien für Oberboden und Rohboden müssen hohe Anforderungen an Reibungswinkel und Kohäsion erfüllen. Daher ist bei der Materialauswahl, dem Einbau der Materialien und der Überwachung der Arbeiten in diesem Bereich besonderes hohe Sorgfalt erforderlich und im Qualitätssicherungsplan zu berücksichtigen.



.....  
Prof. Dipl.-Ing. Rolf Schrodi



Von der Industrie- und Handelskammer  
Ulm öffentlich bestellter und  
vereidigter Sachverständiger für  
Erd- und Grundbau; Felsböschungen