M&S UMWELTPROJEKT GMBH

www.mus-umweltprojekt.de

Zentrale Plauen
Postanschrift: PF 400250 D-08502 Plauen
Hausanschrift: Pfortenstraße 7
D-08527 Plauen
Telefon (03741) 57219-0
Telefax (03741) 57219-40
email plauen@mus-umweltprojekt.de

Geschäftsstelle Salzwedel
Hausanschrift: Feldstraße 25a
D-29410 Salzwedel
Telefon (03901) 33 156
Telefax (03901) 33 156
email salzwedel@mus-umweltprojekt.de

Durch die DAkkS deutsche Akkreditierungsstelle GmbH nach DIN EN ISO / IEC 17025:2005 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.

Auf der Grundlage der Verwaltungsvereinbarung zwischen Der OFD-H und der BAM anerkanntes Ingenieurbüro für Probennahme und Analytik auf Bundesliegenschaften, BAM-Registrier-Nr. 204

Privatrechtliche Anerkennung von Prüfstellen für Baustoffe und Baustoffgemische im Straßenbau nach RAP Stra 10 [A1/ A3]

Objekt : **Deponie Luggendorf**

Vorhaben : **Errichtung einer Deponie gem. DepV DK I**

Standsicherheitsberechnung

Planungsphase : **Genehmigungsplanung**

Auftraggeber : **PS Bauschutt GmbH**
Reetzer Chaussee 1
19348 Perleberg

Auftragnehmer : **M&S Umweltprojekt GmbH**

Auftragsnummer : **13/09/893 PL**

Plauen, den 29.11.2017

bearbeitet:

Dipl.-Ing. J. Peter

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1. ALLGEMEINE ANGABEN 3

1.1 SITUATION UND AUFGABENSTELLUNG 3
1.2 AUFTRAGGEBER 3
1.3 VERFASSER 4
1.4 UNTERLAGENVERZEICHNIS 4

2. GEOTECHNISCHE VERHÄLTNISSE 5

2.1 REGIONALGEOLOGISCHE EINORDNUNG 5
2.2 LOKALE HYDROGEOLOGISCHE VERHÄLTNISSE 6

3. STANDSICHERHEITSBERECHNUNGEN 7

3.1 STABILITÄT DEPONIEKÖRPER (BÖSCHUNGSBRUCH) 7
3.1.1 VORBEMERKUNGEN 7
3.1.2 BODENMECHANISCHE KENNWERTE 10
3.1.3 NACHWEISE / ERGEBNISSE 12
3.1.4 ZUSAMMENFASSUNG DER BÖSCHUNGSBRUCHBERECHNUNGEN 26
3.2. GLEITSICHERHEITSNACHWEISE FÜR DIE OBERFLÄCHENABDICHTUNG 27
3.2.1 AUSGANGSWERTE 27
3.2.2 BERECHNUNGSGRUNDLAGEN 29
3.2.3 NACHWEISE 31
3.2.4 ZUSAMMENFASSUNG DER GLEITNACHWEISE 35

1. Allgemeine Angaben

1.1 Situation und Aufgabenstellung

Die PS Bauschutt GmbH beabsichtigt einen Teil der Kiesgrube Luggendorf entsprechend den gesetzlichen, ingenieurtechnischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für eine Mineralstoffdeponie gemäß Deponieklasse 1 nach Deponieverordnung (DepV) weiter zu nutzen. Dabei soll die neue Deponie im Restloch der ehemaligen Kiesgrube angelegt werden, ohne das äußere Erscheinungsbild wesentlich zu ändern. In der Deponie sollen mineralische Abfälle aus dem Landkreis Prignitz und aus dem Umkreis von mindestens 100 km abgelagert werden.

Der Standort liegt zentral im Landkreis Prignitz. Die im potentiellen Einzugsgebiet angrenzenden Landkreise sind der Landkreis Ostprignitz-Ruppin (BB), der Landkreis Ludwigslust-Parchim (MV), der Landkreis Lüchow-Dannenberg (NI), der Landkreis Stendal und der Altmarkkreis (ST).

Die baulichen Maßnahmen umfassen dabei eine dem Stand der Technik entsprechende Basisabdichtung sowie nach Erreichen der geplanten Verfüllhöhe die Herstellung einer Oberflächendichtung, verbunden mit allen hieraus resultierenden bautechnischen Anforderungen sowie unter Berücksichtigung der vorgesehenen Nachnutzung des Standortes.

Unter Zugrundelegung des in der Genehmigungsplanung [1] dargestellten Planungskonzeptes wird im vorliegenden Gutachten die Standsicherheit der Deponieböschungen für den geplanten Endzustand anhand von Böschungsbruchberechnungen in einem hierfür maßgebenden Profilschnitt überprüft. Gewählt wurde hierfür ein Querprofil im zentralen Deponiebereich (Schnittführung siehe Abbildung 1 auf Seite 9), da hiermit der insgesamt längste und höchste Böschungsabschnitt erfasst wird ($\Rightarrow$ Ostböschung). Die geplanten Böschungsneigungen betragen überwiegend 1 : 3. Des Weiteren erfolgen die Gleitsicherheitsnachweise für die mit der Schichtung des Oberflächenabdichtungssystems vorgezeichneten, böschungsparallelen Gleitfugen.

Mit den Ergebnissen der Standsicherheitsberechnungen sollen der Nachweis für die Ausführbarkeit des Planungskonzeptes erbracht sowie in die Planung aufzunehmende Materialparameter (bodenmechanisch erforderliche Mindestwerte) abgeleitet werden.

1.2 Auftraggeber

• Name / Firma / Institution	PS Bauschutt GmbH
• Postanschrift	Reetzer Chaussee 1, 19348 Perleberg
• Ansprechpartner	Herr Schmelzer
• Telefon	03876 / 300 830

1.3 Verfasser

- Name / Firma / Institution: M&S Umweltprojekt GmbH, Zentrale Plauen
- Postanschrift: Pfortenstraße 7, 08527 Plauen
- Telefon 03741 / 57 219 – 0
- Telefax 03741 / 57 219 – 40
- Ansprechpartner: Herr Peter (j.peter@mus-umweltprojekt.de)

1.4 Unterlagenverzeichnis

Planungen:

[1] Genehmigungsplanung Kiesgrube Luggendorf - Errichtung einer Deponie gemäß DepV, DK I; M&S Umweltprojekt GmbH, Plauen: 29.11.2017

Technische Normen, Richtlinien und Zulassungen

[2] DIN EN 1997-1 - Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009
[3] DIN 1055-2 – Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Bodenkenngrößen
[4] DIN EN 1991-1-3 - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-3:2003 + AC:2009
[5] DIN 4022 Teil 1 - Baugrund und Grundwasser: Benennen und Beschreiben von Boden und Fels
[6] DIN 4084 – Baugrund - Geländebruchberechnungen
[7] DIN 4085 – Baugrund - Berechnung des Erddrucks

Fachliteratur

[8] Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" GDA, 3. Auflage, Düsseldorf: Werner-Verlag, 1994
[9] Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen - EAU 1990, 8. Auflage, Hafenbautechnische Gesellschaft e.V. und Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Berlin: Ernst & Sohn, 1990

2. Geotechnische Verhältnisse

aus [1]

2.1 Regionalgeologische Einordnung

Der Standort befindet sich im Bereich des „Nordbrandenburgischen Platten- und Hügellandes“, einer saalezeitlich angelegten und später in der Weichsel- Kaltzeit überprägten glazialen Hochfläche nordöstlich des Elbe- Urstromtales. Innerhalb dieser Großeinheit liegt der Standort in der Haupteinheit Prignitz. In diesem Bereich des „Jüngeren Saale- Gürtels“ stehen weichselzeitlich überprägte Saale-Grundmoränen mit auflagernden Kiessanden des Saale- Nachschüttkomplexes und der Weichsel-Kaltzeit an. Die weichselzeitliche Überprägung zeigt sich besonders stark in den Kronsbergen, einem Endmoränenzug im Bereich der Brandenburger Hauptrandlage, an deren Nordrand sich der Kiessandtagebau befindet.

Die Basis, der für den ursprünglichen Kiesabbau relevanten Schichten, bildet eine Grundmoränenplatte der Saale- Kaltzeit, der Oberfläche zwischen 76 und 108 m ü. NN liegt, wobei die tieferen Bereiche im Nordwesten liegen, so dass ein Einfallen der Oberfläche von Südosten nach Nordwesten gegeben ist.

Über dem Geschiebelehm lagern Sande und Kiessande der Saale- und Weichsel-Kaltzeit. Diese Serie erreicht Mächtigkeiten von bis zu 30 m, wobei nur selten eine ungestörte Lagerung auftritt, da das Gebiet längerfristig von einer Eisrandlage beeinflusst wurde, so dass es zu einem stetigen Wechsel von Sedimentations- und Erosionsprozessen kam. Auf die Nähe zu einer Gletscherrandlage weisen auch verlehmte Bereiche innerhalb des Sandes sowie Schlufflagen zwischen den Sand- und Kiesschichten hin.
Aufgrund der Randlage des Kiessandtagebaus an der Endmoräne der Kronsberge kommt es zu einem Ansteigen des Geschiebelehms nach Süden bis Südosten, das zu einer Abnahme der Mächtigkeit des Kiessandes in dieser Richtung und teilweise auch zu einem Ausstreichen den Geschiebelehms an der Geländeoberfläche führt.

In Bezug auf die Mächtigkeit des liegenden Saale- Geschiebelehms liegen unterschiedliche Angaben vor, die zwischen 10 und 40 m betragen. Diese relativ große Schwankungsbreite ist aber vermutlich auch auf die Beeinflussung im Bereich der Stauchendmoräne und eine „Vermischung“ der Grundmoränenmächtigkeit sowie der Mächtigkeit der gestauchten Endmoräne zurückzuführen.

Unter der Saale- Grundmoräne folgen saalezeitliche Kiese und Sande, die mit dem GWL2 den obersten geschützten Grundwasserleiter am Standort bilden.

2.2 Lokale hydrogeologische Verhältnisse

Im Standortbereich ist oberflächennah ein lokal sowie saisonal wasserführender Grundwasserleiter (GWL1) in den weichsel- und saale- zeitlichen Kiessanden ausgebildet. Dieser Grundwasserleiter ist im Wesentlichen an Senken in der Grundmoräne gebunden. Innerhalb dieser Senken bildet sich schwebendes Grundwasser aus. Nach stärkeren Niederschlägen kann es zu einem „Überlaufen“ dieser Senken kommen. Die Fließrichtung im GWL1 ist entsprechend des Einfallens der Grundmoränenoberfläche nach Nordwesten gerichtet.

Der höchste Grundwasserstand ist lokal bei 74 m NN zu erwarten. Noch vor dem Abbaubetrieb vereinzelt gemessene höhere Schichtwasserstände (schwebendes Grundwasser) können im auflässigen Tagebau heute nicht mehr erreicht werden.

Im GWL2 steht durchgängig unter der Grundmoräne gespanntes Wasser an. Die Grundwasserdruckhöhe im GWL2 liegt bei ca. 70 m NN. Für diesen Grundwasserleiter ist ebenfalls eine nach Nordwesten gerichtete Grundwasserfließrichtung angegeben.

Im näheren Umfeld gibt es keine Oberflächengewässer. Als Vorfluter ist die ca. 1,5 km nördlich verlaufende ´Panke´ auf dem Höhenniveau von ca. 55 m NN zu betrachten.

3. Standsicherheitsberechnungen

3.1 Stabilität Deponiekörper (Böschungsbruch)

3.1.1 Vorbemerkungen

Die Standsicherheitsnachweise zur allgemeinen Stabilität des Deponiekörpers wurden entsprechend GDA-Empfehlung E 2-6 mittels Gelände- und Böschungsbruchberechnungen gemäß DIN 4084 geführt.

Ein *Gelände- oder Böschungsbruch* tritt ein, wenn sich in der Böschung ein Gleitkörper bildet, der unter Überwindung des Scherwiderstandes des Bodens (⇒ des Abfallinventars) auf einer geraden, polygonalen oder kreisförmigen Gleitfläche abrutscht. In der Regel verläuft diese Gleitfuge durch den Fußpunkt der jeweiligen Böschung. Weisen die Scherfestigkeiten des Untergrundes geringere Werte auf als die Böschung, kann jedoch auch ein Böschungsgrundbruch maßgebend für die Böschungsstandsicherheit werden, d.h. die Gleitfuge mit der geringsten Sicherheit würde in diesem Fall in den Untergrund einschneiden.

Die nachfolgenden Böschungsbruchberechnungen erfolgten EDV-gestützt mittels Lamellenverfahren gemäß DIN 4084. Das verwendete Programmsystem gestattet eine weitgehend detaillierte Simulation von beliebigen Profilschnitten unter verschiedensten Lasteinflüssen (z.B. Porenwasserdrücke / Grundwasserstände, Verkehrslasten) und ermöglicht die beliebige Wahl einer Vielzahl von Gleitkreismittelpunkten sowie eine schrittweise Variation der jeweilig zugehörigen Radien. Variationen der bodenmechanischen Kennwerte erfolgen manuell in mehreren Rechengängen. Die Anzahl der Lamellen wurde i.d.R. auf 30 begrenzt.

Entsprechend dem aktualisierten Planungskonzept wird die Untersuchung der Deponiestabilität anhand einer maßgebenden Schnittführung untersucht (siehe Abbildung 1), mit welcher alle am Standort vorhandenen und maßgebenden geometrischen Situationen erfasst werden (steilste, höchste und längste Böschung).

Folgende Versagensformen und Lastfälle wurden überprüft:

- Böschungsbruchberechnung am Gesamtsystem mit kreisförmigen Gleitflächen,
- dabei rechnerische Gleitkreisvariation mit jeweils ≥ 30 Lamellen über ein Gleitkreismittelpunktfeld,
- Variation der abfallmechanischen Parameter im Kennwertbereich gemäß Tabelle 3,
- Ansatz von Verkehrslasten p = 33,3 kN/m^2 (SLW 60) am oberen Böschungsrand (bauzeitliche Belastung).

Bei den Berechnungen werden unter Ansatz konservativer (d.h. auf der sicheren Seite liegender) Bodenkennwerte für den natürlichen Untergrund und die bei der Ausführung zur Anwendung kommenden Bodenmaterialien bei Variation der Scherfestigkeitskonstellationen für die Ablagerung und für das Abdeckmaterial die ungünstigsten Gleitkreisflächen mit den zugehörigen, vorhandenen Gleit-

sicherheiten ermittelt, die Tendenzen der Sicherheitswerte bei Variation der o.g. Scherfestigkeitskonstellationen untersucht und daraus die erforderlichen Mindestparameter bzw. Schlussfolgerungen abgeleitet.

Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt entsprechend der nach DIN 1054 vorzunehmenden Lastfallzuordnung. Bei der Berechnung mit Teilsicherheitswerten gemäß EC 7 ist nachzuweisen, dass

$$E_d / R_d = \mu \leq 1$$

mit E_d Bemessungswert der resultierenden Beanspruchung parallel zur Gleitfläche (Einwirkungen, geometrische Grunddaten wie Böschungswinkel β)

R_d Bemessungswert des Widerstandes parallel zur Gleitfläche (rückhaltende Kräfte; $\tan \varphi_d = \tan \varphi_K / \gamma_\varphi$)

Zur Berechnung der Ausnutzungsgrade μ sind gemäß DIN 1054 dementsprechend folgende Teilsicherheitswerte anzusetzen:

Tabelle 1: Teilsicherheitswerte für GEO-3 – Grenzzustand des Verlustes der Gesamtsicherheit

	Formelzeichen	Bemessungssituationen nach DIN 1054		
		BS-P	BS-T	BS-A
Teilsicherheitswerte für Einwirkungen und Beanspruchungen				
Ständige Einwirkungen	γ_G	1,00	1,00	1,00
Ungünstige veränderliche Einwirkungen	γ_Q	1,30	1,20	1,00
Teilsicherheitswerte für Widerstände / geotechnische Größen				
Reibungswert tan φ' des dränierten Bodens	γ_φ	1,25	1,15	1,10
Kohäsion c´ des dränierten Bodens	γ_c	1,25	1,15	1,10
Wichte des Bodens	γ_{Wichte}	1,00	1,00	1,00

Die Berechnung erfolgt für den Grenzzustand des Versagens durch Verlust der Gesamtstandsicherheit (GEO-3) für die Ständige Bemessungssituation (BS-P) gemäß DIN 1054 (siehe rot unterlegte Teilsicherheitswerte).

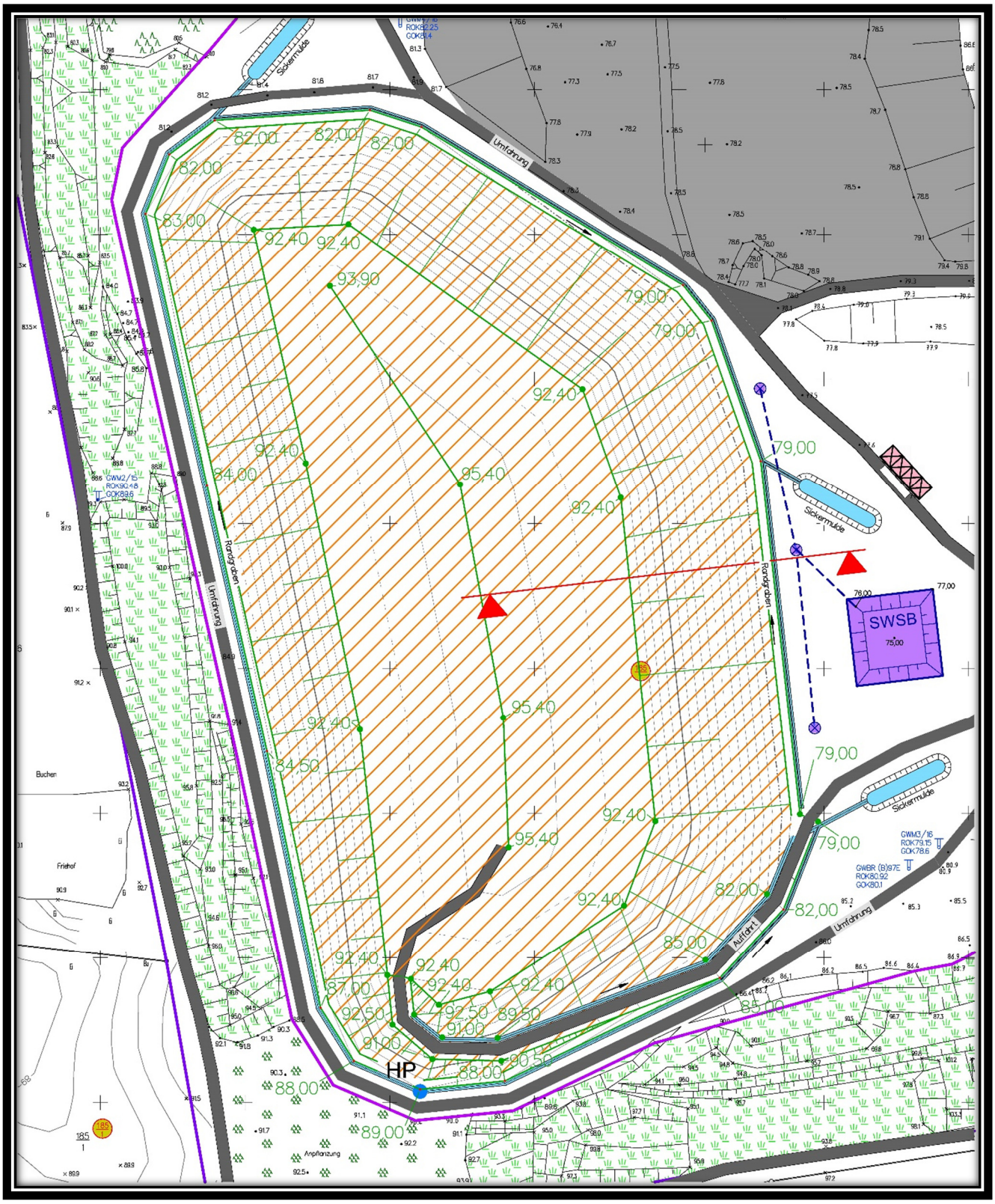


Abb. 1: Lage des Berechnungsschnittes

3.1.2 Bodenmechanische Kennwerte

3.1.2.1 Untergrund

Die Kennwerte für den natürlichen Untergrund werden unter Berücksichtigung der geologischen Situation (siehe Abschnitt 2) basierend auf Erfahrungswerten unter Berücksichtigung der in DIN 1055 angegebenen Werte auf der sicheren Seite liegend gewählt.

Tab. 2: Rechenwerte Untergrund

Schicht	Reibung ϕ' [°]	Kohäsion c´ [kN/m^2]	Feuchtwichte γ' [kN/m^3]	Bemerkungen
Mittel- bis Grobsande SW, GW	30,0 – 32,5	0	18,0 – 19,0	gemäß DIN 1055/2

3.1.2.2 Deponiekörper

Bei der geplanten Deponie der Klasse I handelt es sich um eine Deponie für mäßig belastete (nicht gefährliche) Abfälle. Bei der Deponieklasse I handelt es sich somit gemeinhin um die “Regeldeponie“ für mäßig belasteten Erdaushub und Bauschutt und vergleichbare mineralische gewerbliche Abfälle.

In der Genehmigungsplanung wurde diesbezüglich für den Deponiebetrieb ein Abfallannahmekatalog (Positivliste) definiert, welcher hinsichtlich der physikalischen Beschaffenheit der im Einzelnen zugelassenen Abfälle ein weitreichendes Spektrum an geotechnischen Eigenschaften für das künftige Deponieinventar erwarten lässt.

Die für den Einbau vorgesehenen mineralischen Abfälle fallen bei Erdbauarbeiten, beim Abbruch und Rückbau von Gebäuden und sonstigen Bauwerken, bei Sedimentberäumungen wie auch bei zahlreichen Prozessen der Rohstoff- und Veredelungsindustrie in Form von Recyclingmaterialien, Schlacken, Granulaten, Hüttensanden, Aschen oder Schlämmen als Materialien mit bodenähnlichen Eigenschaften an.

Die geotechnischen Nachweise unter Anwendung bodenmechanischer Berechnungsverfahren werden dementsprechend mit einem fiktiven Wertebereich der abfallmechanischen Eingangsparameter ϕ', c' und E_s geführt, so dass schlussfolgernd aus den Standsicherheitsberechnungen einzuhaltende Mindestwerte ableitbar sind. Für die zum Einbau kommenden Abfälle ist später im Zuge des Deponiebetriebs sicher zu stellen, dass die berechneten Mindestwerte in situ eingehalten werden. Bei Schlämmen sollte dementsprechend davon ausgegangen werden, dass Stabilisierungsmaßnahmen erforderlich werden (z.B. Entwässerung, Konditionierung durch Zugabe von geeigneten Bindemitteln, Vermischung mit Böden etc.) und diesbezügliche Ablagerungsbereiche im Deponiezentrum anzulegen sind.

Allgemein ist für die Stabilität der Böschungen ohne zusätzliche technische Stabilisierungsmaßnahmen das Verhältnis der Scherfestigkeit zum Böschungswinkel maßgeblich. Natürliche oder künstliche Böschungen aus nicht bindigen Bodenmaterialien (Sande, Kiese) ermöglichen diesbezüglich maximal eine Neigung, die dem Winkel der wirksamen inneren Reibung ϕ' entspricht. In diesem Fall ist das Grenzgleichgewicht ohne Sicherheitsreserve (d.h. eine 100 %-ige Auslastung des Böschungssystems) gegeben. Wird die Neigung weiter erhöht, führt dies zu einem Böschungsbruch auf einer hangparallelen oder kreisförmigen Gleitfläche. Bei bindigen Materialien hingegen wirkt aufgrund der Feinbestandteile (Ton, Schluff) zusätzlich zur Reibung eine Kohäsion, durch welche das Material zusammengehalten wird. Dadurch können Böschungen aus bindigen Materialien auch einen steileren Winkel haben. Da die Größe der Kohäsionswirkung jedoch in Abhängigkeit vom Wassergehalt des bindigen Bodens stark variiert (aufgeweichter Boden $\Rightarrow$ Kohäsion $c' = 0$), ist der Kohäsionsansatz in geotechnischen Berechnungen im Sinne von Sicherheitsnachweisen nicht grundsätzlich zielführend. Berechnungen unter Ansatz der Kohäsion können deshalb nur erfolgen, wenn deren stabilisierende Wirkung mit dem geotechnisch-konstruktiven Aufbau des Systems auch dauerhaft gewährleistet werden kann (Vermeidung sowohl von Durchnässungen als auch von Austrocknungen, Deckschicht / Bewuchs etc.).

Ausgehend von diesen Sachverhalten werden die nachfolgenden Berechnungen nur für einen (minimalen) Grenzreibungswinkel geführt, welcher nicht geringer ist, als es für eine 100 %-ige Ausnutzung der Standsicherheitsreserve zulässig ist; d.h. Böschungsneigung $\beta \leq \phi' = 18{,}43°$ (= Neigungsverhältnis von 1:3). Für den rechnerischen Nachweis der Böschungen wird diesbezüglich von einem inneren Mindestreibungswinkel von 18,5° ausgegangen.

Die Untersuchung erfolgt somit für folgenden Kennwert-Bereich:

Tab. 3 Rechenwerte Abfallkörper

Bezeichnung	Reibung ϕ' [°]	Kohäsion c' [kN/m^2]	Wichte γ' [kN/m^3]
gem. Abfallkatalog	18,5...27,5	0...10,0	15,0 – 21,0

Die Nachweisführung erfolgt jeweils mit Min./Max.-Werten bzw. unter Variation der Parameter.

3.1.3 Nachweise / Ergebnisse

Die ungünstigsten Gleitkreisverläufe und Gleitkörper mit den berechneten höchsten Ausnutzungsgraden μ sowie die zugehörigen Berechnungsprotokolle sind beispielhaft auf den nach der Ergebnistabelle 4 folgenden Seiten und Abbildungen 2 und 3 dargestellt.

Tabelle 4: Berechnungsergebnisse Gleitkreise Ostböschung

Variation	Scherfestigkeiten		Ausnutzungsgrade $\mu = E_d / R_d \leq 1$		
	Abfallkörper variiert				
	ϕ_k' [°]	c_k' [kN/m²]	ohne Verkehrslast μ	mit Verkehrslast (auf der Berme) μ	Bemerkungen / Hinweise
1	18,5	0	1,08	1,10	Nachweis nicht erfüllt
2		2,5	0,99	1,01	Nachweis nicht erfüllt
3		3,5	0,96	0,98	
4		5,0	0,91	0,94	---
5	20,0	0	1,00	1,02	Nachweis nicht erfüllt
6		2,5	0,92	0,94	---
7		3,5	0,89	0,91	---
8		5,0	0,85	0,88	---
9	22,5	0	0,89	0,91	**Abb. 2** Seite 25
10		2,5	0,81	0,84	---
11		3,5	0,79	0,81	---
12		5,0	0,76	0,78	---
13	25,0	0	0,79	0,81	---
14		2,5	0,73	0,75	---
15		3,5	0,71	0,73	---
16		5,0	0,69	0,71	---

Berechnungsprotokoll

Deponie-Parameterkonstellation 9: ϕ´ = 22,5° / c´ = 0 kN/m² mit Verkehrslast

Böschungsberechnung nach EC 7
mit Kreisgleitflächen

Parameterliste
phi [°] = Reibungswinkel
c [kN/m²] = Kohäsion
gamma [kN/m³] = Wichte
μ [-] = Ausnutzungsgrad
xm,ym [m] = x,y-Wert des Gleitkreismittelpunktes
rad [m] = Radius des Gleitkreises

Teilsicherheiten: (GEO-3)
- gam(phi)= 1.25
- gam(c') = 1.25
- gam(cu) = 1.25
- gam(Wichten) = 1.00
- gam(Ständige Einw.) = 1.00
- gam(Veränderliche Einw.) = 1.30

Bewegungsrichtung des Gleitkörpers nach rechts

Koordinaten der Geländepunkte

Nr. [-]	x [m]	y [m]
1	38.221	97.000
2	77.498	94.816
3	90.674	94.000
4	140.277	78.000
5	145.146	78.000
6	147.546	77.200
7	170.000	77.200

Charakteristische Bodenkennwerte

Boden [-]	phi,k [°]	c,k [kN/m²]	gamma,k [kN/m³]	Bezeichnung
1	25.00	1.00	19.55	OFA
2	22.50	0.00	17.00	Deponiekörper
3	30.00	0.00	18.00	Mittel-Grobsande

Bemessungs-Bodenkennwerte

Boden [-]	phi,d [°]	c,d [kN/m²]	gamma,d [kN/m³]	Bezeichnung
1	20.46	0.80	19.55	OFA
2	18.33	0.00	17.00	Deponiekörper
3	24.79	0.00	18.00	Mittel-Grobsande

Koordinaten der Schichten und Bodennummern

Nr.	x(links)	y(links)	x(rechts)	y(rechts)	Boden-Nr.
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	
1	38.221	95.450	77.498	93.266	1
2	77.498	93.266	90.674	92.450	1
3	90.674	92.450	138.802	77.145	1
4	138.802	77.145	140.277	78.000	1
5	38.221	77.740	134.490	74.801	2
6	134.490	74.801	138.802	77.145	2
7	38.221	65.000	170.000	65.000	3

Koordinaten des Porenwasserdruck-Polygonzuges

Nr.	x	y
[-]	[m]	[m]
1	38.221	65.000
2	170.000	65.000

Verkehrslasten
Verkehrslasten ungünstig

Nr.	Größe(links)	Größe(rechts)	x(links)	x(rechts)	y
[-]	[kN/m²]	[kN/m²]	[m]	[m]	[m]
1	33.30	33.30	87.67	90.67	94.00

Wasserstand vor der Böschung links [m] = 0.00
Wasserstand vor der Böschung rechts [m] = 0.00

gamma Wasser [kN/m³] = 10.000

Berechnung mit Berücksichtigung des passiven Erddruckkeils

Ergebnisse
Suchbereich
Art Suchradius
Anfangs- und Endradius
x / y (Anfang): 138.8020 77.1450
x / y (Ende): 96.1337 85.1594
Anzahl Radien = 30

Kreis	xm	ym	Radius	Lamellen	μ
[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]
1	140.1331	92.3567	15.2699	30	0.6249

Zähler = 1206.459 Nenner = 1930.773
M(Ti) = 1930.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 1206.5 / M(S) = 0.0

2	140.1331	85.2314	8.1953	30	0.5058

Zähler = 320.331 Nenner = 633.265
M(Ti) = 633.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 320.3 / M(S) = 0.0

3	147.2768	92.3567	23.1188	30	0.2449

Zähler = 11517.804 Nenner = 47037.319
M(Ti) = 47037.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 11517.8 / M(S) = 0.0

4	147.2768	85.2314	16.9710	32	0.2390

Zähler = 7790.436 Nenner = 32591.777
M(Ti) = 32591.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 7790.4 / M(S) = 0.0

```
  5     147.2768    213.4868   136.6049      30      0.8381
Zähler = 179752.885   Nenner = 214482.952
M(Ti) = 214483.0 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 179752.9 / M(S)  = 0.0
  6     147.2768    206.3615   129.4941      30      0.8570
Zähler = 160917.088   Nenner = 187760.942
M(Ti) = 187760.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 160917.1 / M(S)  = 0.0
  7     147.2768    199.2362   122.3850      30      0.8738
Zähler = 142106.353   Nenner = 162628.427
M(Ti) = 162628.4 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 142106.4 / M(S)  = 0.0
  8     147.2768    192.1109   115.2778      30      0.8822
Zähler = 123654.902   Nenner = 140158.768
M(Ti) = 140158.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 123654.9 / M(S)  = 0.0
  9     147.2768    184.9856   108.1731      30      0.8834
Zähler = 103182.821   Nenner = 116799.355
M(Ti) = 116799.4 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 103182.8 / M(S)  = 0.0
 10     147.2768    177.8603   101.0712      30      0.8570
Zähler = 79834.746   Nenner = 93159.986
M(Ti) = 93160.0 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 79834.7 / M(S)  = 0.0
 11     147.2768    170.7350    93.9729      30      0.8370
Zähler = 63360.815   Nenner = 75699.759
M(Ti) = 75699.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 63360.8 / M(S)  = 0.0
 12     147.2768    163.6097    86.8790      30      0.8217
Zähler = 49356.510   Nenner = 60067.149
M(Ti) = 60067.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 49356.5 / M(S)  = 0.0
 13     147.2768    156.4844    79.7907      30      0.7933
Zähler = 37710.117   Nenner = 47536.314
M(Ti) = 47536.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 37710.1 / M(S)  = 0.0
 14     147.2768    149.3591    72.7097      30      0.7621
Zähler = 28145.412   Nenner = 36931.197
M(Ti) = 36931.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 28145.4 / M(S)  = 0.0
 15     147.2768    142.2338    65.6382      30      0.7175
Zähler = 20460.383   Nenner = 28514.947
M(Ti) = 28514.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 20460.4 / M(S)  = 0.0
 16     147.2768    135.1085    58.5798      30      0.6693
Zähler = 14426.220   Nenner = 21554.013
M(Ti) = 21554.0 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 14426.2 / M(S)  = 0.0
 17     147.2768    120.8579    44.5269      30      0.5254
Zähler = 6475.895   Nenner = 12325.099
M(Ti) = 12325.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 6475.9 / M(S)  = 0.0
 18     147.2768     99.4820    24.8647      30      0.2755
Zähler = 3191.107   Nenner = 11584.827
M(Ti) = 11584.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 3191.1 / M(S)  = 0.0
 19     140.1331    135.1085    57.9788      30      0.8483
Zähler = 31096.996   Nenner = 36657.371
M(Ti) = 36657.4 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 31097.0 / M(S)  = 0.0
 20     140.1331    142.2338    65.1024      30      0.8660
Zähler = 42207.203   Nenner = 48737.220
M(Ti) = 48737.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 42207.2 / M(S)  = 0.0
 21     132.9895    184.9856   106.4125      30      0.8132
Zähler = 152104.664   Nenner = 187049.445
M(Ti) = 187049.4 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 152104.7 / M(S)  = 0.0
```

```
 22     132.9895    177.8603    99.7588      30      0.8281
Zähler = 148820.693   Nenner = 179708.940
M(Ti) = 179708.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 148820.7 / M(S)  = 0.0
 23     132.9895    170.7350    93.1748      30      0.8425
Zähler = 146006.110   Nenner = 173294.345
M(Ti) = 173294.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 146006.1 / M(S)  = 0.0
 24     132.9895    163.6097    86.6598      30      0.8453
Zähler = 142910.328   Nenner = 169070.787
M(Ti) = 169070.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 142910.3 / M(S)  = 0.0
 25     132.9895    156.4844    79.5520      30      0.8687
Zähler = 124102.641   Nenner = 142856.791
M(Ti) = 142856.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 124102.6 / M(S)  = 0.0
 26     132.9895    149.3591    72.4477      30      0.8907
Zähler = 105641.953   Nenner = 118606.040
M(Ti) = 118606.0 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 105642.0 / M(S)  = 0.0
 27     132.9895    142.2338    65.3478      30      0.8942
Zähler = 85369.762   Nenner = 95473.359
M(Ti) = 95473.4 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 85369.8 / M(S)  = 0.0
 28     132.9895    135.1085    58.2542      30      0.8721
Zähler = 64151.739   Nenner = 73563.105
M(Ti) = 73563.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 64151.7 / M(S)  = 0.0
 29     132.9895    127.9832    51.1694      30      0.8620
Zähler = 48685.647   Nenner = 56478.882
M(Ti) = 56478.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 48685.6 / M(S)  = 0.0
 30     132.9895    120.8579    44.0977      30      0.8521
Zähler = 35799.978   Nenner = 42013.092
M(Ti) = 42013.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 35800.0 / M(S)  = 0.0
 31     132.9895    113.7326    37.0464      30      0.8387
Zähler = 25281.402   Nenner = 30144.617
M(Ti) = 30144.6 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 25281.4 / M(S)  = 0.0
 32     132.9895    106.6073    30.0302      30      0.8191
Zähler = 16911.294   Nenner = 20645.914
M(Ti) = 20645.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 16911.3 / M(S)  = 0.0
 33     132.9895     99.4820    23.0809      30      0.7854
Zähler = 10461.863   Nenner = 13319.888
M(Ti) = 13319.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 10461.9 / M(S)  = 0.0
 34     132.9895     92.3567    16.2844      30      0.7221
Zähler = 5721.980   Nenner = 7924.198
M(Ti) = 7924.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 5722.0 / M(S)  = 0.0
 35     132.9895     85.2314     9.9587      31      0.5609
Zähler = 2555.157   Nenner = 4555.498
M(Ti) = 4555.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 2555.2 / M(S)  = 0.0
 36     140.1331    213.4868   135.6609      30      0.7993
Zähler = 201536.093   Nenner = 252129.996
M(Ti) = 252130.0 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 201536.1 / M(S)  = 0.0
 37     147.2768    127.9832    51.5397      30      0.6040
Zähler = 9842.458   Nenner = 16295.984
M(Ti) = 16296.0 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 9842.5 / M(S)  = 0.0
 38     140.1331     99.4820    22.3767      30      0.6999
Zähler = 2899.385   Nenner = 4142.486
M(Ti) = 4142.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 2899.4 / M(S)  = 0.0
```

```
 39     140.1331    127.9832    50.8556      30      0.8370
Zähler = 22096.106   Nenner = 26397.939
M(Ti) = 26397.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 22096.1 / M(S)  = 0.0
 40     140.1331    149.3591    72.2264      30      0.8722
Zähler = 55654.483   Nenner = 63811.492
M(Ti) = 63811.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 55654.5 / M(S)  = 0.0
 41     132.9895    206.3615   126.6819      30      0.7618
Zähler = 164099.544   Nenner = 215407.916
M(Ti) = 215407.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 164099.5 / M(S)  = 0.0
 42     132.9895    192.1109   113.1237      30      0.7971
Zähler = 155815.369   Nenner = 195481.761
M(Ti) = 195481.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 155815.4 / M(S)  = 0.0
 43      90.1275    199.2362   114.2348      30      0.3444
Zähler = 103095.562   Nenner = 299326.489
M(Ti) = 299326.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 103095.6 / M(S)  = 0.0
 44      90.1275    192.1109   108.3017      30      0.3535
Zähler = 116895.634   Nenner = 330651.861
M(Ti) = 330651.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 116895.6 / M(S)  = 0.0
 45      90.1275    184.9856   101.8377      30      0.3587
Zähler = 118729.993   Nenner = 331043.795
M(Ti) = 331043.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 118730.0 / M(S)  = 0.0
 46      90.1275    177.8603    96.0562      30      0.3651
Zähler = 131763.420   Nenner = 360847.957
M(Ti) = 360848.0 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 131763.4 / M(S)  = 0.0
 47      90.1275    170.7350    89.7271      30      0.3689
Zähler = 132345.012   Nenner = 358800.913
M(Ti) = 358800.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 132345.0 / M(S)  = 0.0
 48      90.1275    163.6097    84.1583      30      0.3723
Zähler = 144152.222   Nenner = 387203.442
M(Ti) = 387203.4 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 144152.2 / M(S)  = 0.0
 49      90.1275    156.4844    78.7451      30      0.3737
Zähler = 155399.912   Nenner = 415846.520
M(Ti) = 415846.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 155399.9 / M(S)  = 0.0
 50      90.1275    149.3591    69.7549      30      0.3736
Zähler = 108343.926   Nenner = 290014.834
M(Ti) = 290014.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 108343.9 / M(S)  = 0.0
 51      90.1275    142.2338    60.5744      30      0.3735
Zähler = 69942.662   Nenner = 187278.197
M(Ti) = 187278.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 69942.7 / M(S)  = 0.0
 52      90.1275    135.1085    52.0010      30      0.3733
Zähler = 46437.343   Nenner = 124385.766
M(Ti) = 124385.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 46437.3 / M(S)  = 0.0
 53      90.1275    127.9832    43.2430      30      0.3731
Zähler = 27845.954   Nenner = 74628.271
M(Ti) = 74628.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 27846.0 / M(S)  = 0.0
 54      90.1275    120.8579    36.2003      30      0.3707
Zähler = 21682.772   Nenner = 58494.175
M(Ti) = 58494.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 21682.8 / M(S)  = 0.0
 55      90.1275    113.7326    29.1977      30      0.3628
Zähler = 15883.385   Nenner = 43777.893
M(Ti) = 43777.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 15883.4 / M(S)  = 0.0
```

```
 56      90.1275    106.6073    23.4272      31      0.3518
Zähler = 13760.722   Nenner = 39114.968
M(Ti) = 39115.0 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 13760.7 / M(S)  = 0.0
 57      90.1275     99.4820    15.5310      31      0.3521
Zähler = 6751.092   Nenner = 19173.177
M(Ti) = 19173.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 6751.1 / M(S)  = 0.0
 58     140.1331    106.6073    29.4924      30      0.7503
Zähler = 5618.245   Nenner = 7487.870
M(Ti) = 7487.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 5618.2 / M(S)  = 0.0
 59     140.1331    120.8579    43.7332      30      0.8164
Zähler = 14997.458   Nenner = 18369.685
M(Ti) = 18369.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 14997.5 / M(S)  = 0.0
 60     140.1331    156.4844    79.3506      30      0.8838
Zähler = 71660.278   Nenner = 81080.229
M(Ti) = 81080.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 71660.3 / M(S)  = 0.0
 61     132.9895    199.2362   119.9609      30      0.7791
Zähler = 162324.987   Nenner = 208336.245
M(Ti) = 208336.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 162325.0 / M(S)  = 0.0
 62      97.2712    206.3615   124.1113      30      0.4103
Zähler = 178098.833   Nenner = 434105.196
M(Ti) = 434105.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 178098.8 / M(S)  = 0.0
 63      97.2712    199.2362   118.0502      30      0.4169
Zähler = 192483.165   Nenner = 461710.182
M(Ti) = 461710.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 192483.2 / M(S)  = 0.0
 64      97.2712    192.1109   111.5415      30      0.4224
Zähler = 193001.958   Nenner = 456882.619
M(Ti) = 456882.6 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 193002.0 / M(S)  = 0.0
 65      97.2712    184.9856   104.5513      30      0.4278
Zähler = 180157.246   Nenner = 421153.683
M(Ti) = 421153.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 180157.2 / M(S)  = 0.0
 66      97.2712    177.8603    95.4136      30      0.4339
Zähler = 123105.333   Nenner = 283694.497
M(Ti) = 283694.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 123105.3 / M(S)  = 0.0
 67      97.2712    170.7350    86.7037      30      0.4420
Zähler = 85497.767   Nenner = 193416.925
M(Ti) = 193416.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 85497.8 / M(S)  = 0.0
 68      97.2712    163.6097    79.6228      30      0.4506
Zähler = 77151.056   Nenner = 171218.435
M(Ti) = 171218.4 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 77151.1 / M(S)  = 0.0
 69      97.2712    156.4844    71.3341      30      0.4609
Zähler = 54799.262   Nenner = 118903.659
M(Ti) = 118903.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 54799.3 / M(S)  = 0.0
 70      97.2712    149.3591    64.2098      30      0.4730
Zähler = 47923.836   Nenner = 101316.372
M(Ti) = 101316.4 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 47923.8 / M(S)  = 0.0
 71      97.2712    142.2338    57.0858      30      0.4862
Zähler = 41240.448   Nenner = 84823.876
M(Ti) = 84823.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 41240.4 / M(S)  = 0.0
 72      97.2712    135.1085    49.9621      30      0.5012
Zähler = 34764.537   Nenner = 69359.201
M(Ti) = 69359.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 34764.5 / M(S)  = 0.0
```

```
 73      97.2712    127.9832    42.8389      30      0.5181
Zähler = 28520.912   Nenner = 55049.738
M(Ti) = 55049.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 28520.9 / M(S)  = 0.0
 74      97.2712    120.8579    35.7167      30      0.5386
Zähler = 22531.944   Nenner = 41834.328
M(Ti) = 41834.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 22531.9 / M(S)  = 0.0
 75      97.2712    113.7326    28.5959      30      0.5572
Zähler = 16839.341   Nenner = 30221.334
M(Ti) = 30221.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 16839.3 / M(S)  = 0.0
 76      97.2712    106.6073    21.4781      30      0.5631
Zähler = 11485.981   Nenner = 20397.040
M(Ti) = 20397.0 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 11486.0 / M(S)  = 0.0
 77      97.2712     99.4820    14.3677      31      0.5808
Zähler = 6690.109   Nenner = 11519.233
M(Ti) = 11519.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 6690.1 / M(S)  = 0.0
 78     147.2768    113.7326    37.5563      30      0.4376
Zähler = 4118.273   Nenner = 9410.050
M(Ti) = 9410.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 4118.3 / M(S)  = 0.0
 79     140.1331    113.7326    36.6118      30      0.7889
Zähler = 9579.840   Nenner = 12142.888
M(Ti) = 12142.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 9579.8 / M(S)  = 0.0
 80     140.1331    163.6097    86.4749      30      0.9068
Zähler = 93987.092   Nenner = 103642.812
M(Ti) = 103642.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 93987.1 / M(S)  = 0.0
 81     104.4148    213.4868   130.5972      30      0.4663
Zähler = 168623.566   Nenner = 361596.404
M(Ti) = 361596.4 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 168623.6 / M(S)  = 0.0
 82     104.4148    206.3615   123.5229      30      0.4748
Zähler = 158417.217   Nenner = 333649.505
M(Ti) = 333649.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 158417.2 / M(S)  = 0.0
 83     104.4148    199.2362   114.3770      30      0.4852
Zähler = 100884.293   Nenner = 207942.275
M(Ti) = 207942.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 100884.3 / M(S)  = 0.0
 84     104.4148    192.1109   107.2716      30      0.4969
Zähler = 93448.498   Nenner = 188065.704
M(Ti) = 188065.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 93448.5 / M(S)  = 0.0
 85     104.4148    184.9856   100.1691      30      0.5094
Zähler = 86132.757   Nenner = 169102.159
M(Ti) = 169102.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 86132.8 / M(S)  = 0.0
 86     104.4148    177.8603    93.0701      30      0.5235
Zähler = 78969.324   Nenner = 150850.053
M(Ti) = 150850.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 78969.3 / M(S)  = 0.0
 87     104.4148    170.7350    85.9754      30      0.5386
Zähler = 71934.426   Nenner = 133546.168
M(Ti) = 133546.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 71934.4 / M(S)  = 0.0
 88     104.4148    163.6097    78.8862      30      0.5559
Zähler = 65065.356   Nenner = 117050.571
M(Ti) = 117050.6 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 65065.4 / M(S)  = 0.0
 89     104.4148    156.4844    71.8042      30      0.5748
Zähler = 58345.550   Nenner = 101510.744
M(Ti) = 101510.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 58345.5 / M(S)  = 0.0
```

```
 90     104.4148    149.3591    64.7316      30      0.5961
Zähler = 51755.083   Nenner = 86826.033
M(Ti) = 86826.0 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 51755.1 / M(S)  = 0.0
 91     104.4148    142.2338    57.6721      30      0.6202
Zähler = 45344.409   Nenner = 73111.336
M(Ti) = 73111.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 45344.4 / M(S)  = 0.0
 92     104.4148    135.1085    50.6310      30      0.6364
Zähler = 39096.282   Nenner = 61429.626
M(Ti) = 61429.6 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 39096.3 / M(S)  = 0.0
 93     104.4148    127.9832    43.6172      30      0.6531
Zähler = 33034.349   Nenner = 50583.757
M(Ti) = 50583.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 33034.3 / M(S)  = 0.0
 94     104.4148    120.8579    36.6465      30      0.6849
Zähler = 27147.862   Nenner = 39639.436
M(Ti) = 39639.4 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 27147.9 / M(S)  = 0.0
 95     104.4148    113.7326    29.7491      30      0.7168
Zähler = 21477.069   Nenner = 29960.914
M(Ti) = 29960.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 21477.1 / M(S)  = 0.0
 96     104.4148    106.6073    22.9911      30      0.7409
Zähler = 16044.977   Nenner = 21656.686
M(Ti) = 21656.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 16045.0 / M(S)  = 0.0
 97     104.4148     99.4820    16.5444      31      0.6841
Zähler = 10148.188   Nenner = 14833.746
M(Ti) = 14833.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 10148.2 / M(S)  = 0.0
 98     104.4148     92.3567    16.2977      32      0.4926
Zähler = 17715.300   Nenner = 35960.537
M(Ti) = 35960.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 17715.3 / M(S)  = 0.0
 99     140.1331    177.8603   100.7241      30      0.8810
Zähler = 132822.847   Nenner = 150764.823
M(Ti) = 150764.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 132822.8 / M(S)  = 0.0
100     140.1331    170.7350    93.5995      30      0.9017
Zähler = 114361.121   Nenner = 126830.957
M(Ti) = 126831.0 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 114361.1 / M(S)  = 0.0
101     111.5585    213.4868   129.2511      30      0.5411
Zähler = 120836.115   Nenner = 223298.134
M(Ti) = 223298.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 120836.1 / M(S)  = 0.0
102     111.5585    206.3615   122.1797      30      0.5546
Zähler = 113605.231   Nenner = 204825.748
M(Ti) = 204825.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 113605.2 / M(S)  = 0.0
103     111.5585    199.2362   115.1149      30      0.5696
Zähler = 106502.428   Nenner = 186991.087
M(Ti) = 186991.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 106502.4 / M(S)  = 0.0
104     111.5585    192.1109   108.0581      30      0.5853
Zähler = 99533.451   Nenner = 170045.500
M(Ti) = 170045.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 99533.5 / M(S)  = 0.0
105     111.5585    184.9856   101.0109      30      0.6029
Zähler = 92672.191   Nenner = 153722.675
M(Ti) = 153722.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 92672.2 / M(S)  = 0.0
106     111.5585    177.8603    93.9754      30      0.6216
Zähler = 85960.676   Nenner = 138290.451
M(Ti) = 138290.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 85960.7 / M(S)  = 0.0
```

```
107     111.5585    170.7350    86.9547      30      0.6421
Zähler = 79356.213   Nenner = 123585.317
M(Ti) = 123585.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 79356.2 / M(S)  = 0.0
108     111.5585    163.6097    79.9523      30      0.6646
Zähler = 72919.077   Nenner = 109715.142
M(Ti) = 109715.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 72919.1 / M(S)  = 0.0
109     111.5585    156.4844    72.9739      30      0.6830
Zähler = 66620.734   Nenner = 97543.880
M(Ti) = 97543.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 66620.7 / M(S)  = 0.0
110     111.5585    149.3591    66.0267      30      0.6912
Zähler = 60469.365   Nenner = 87485.464
M(Ti) = 87485.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 60469.4 / M(S)  = 0.0
111     111.5585    142.2338    59.1220      30      0.7173
Zähler = 54451.609   Nenner = 75916.727
M(Ti) = 75916.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 54451.6 / M(S)  = 0.0
112     111.5585    135.1085    52.2766      30      0.7459
Zähler = 48597.004   Nenner = 65151.179
M(Ti) = 65151.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 48597.0 / M(S)  = 0.0
113     111.5585    127.9832    45.5171      30      0.7717
Zähler = 42886.666   Nenner = 55577.077
M(Ti) = 55577.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 42886.7 / M(S)  = 0.0
114     111.5585    120.8579    38.8884      30      0.7929
Zähler = 37396.766   Nenner = 47167.222
M(Ti) = 47167.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 37396.8 / M(S)  = 0.0
115     111.5585    113.7326    32.4708      30      0.8002
Zähler = 32104.213   Nenner = 40121.455
M(Ti) = 40121.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 32104.2 / M(S)  = 0.0
116     111.5585    106.6073    26.4185      30      0.7636
Zähler = 26430.146   Nenner = 34612.082
M(Ti) = 34612.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 26430.1 / M(S)  = 0.0
117     111.5585     99.4820    21.0491      31      0.6291
Zähler = 19405.866   Nenner = 30847.272
M(Ti) = 30847.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 19405.9 / M(S)  = 0.0
118     111.5585     92.3567    17.0214      32      0.4793
Zähler = 16503.993   Nenner = 34434.405
M(Ti) = 34434.4 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 16504.0 / M(S)  = 0.0
119     140.1331    184.9856   107.8488      30      0.8589
Zähler = 151585.962   Nenner = 176479.573
M(Ti) = 176479.6 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 151586.0 / M(S)  = 0.0
120     140.1331    192.1109   114.9736      30      0.8371
Zähler = 170658.442   Nenner = 203868.982
M(Ti) = 203869.0 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 170658.4 / M(S)  = 0.0
121     118.7021    213.4868   130.2968      30      0.6205
Zähler = 130377.400   Nenner = 210131.387
M(Ti) = 210131.4 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 130377.4 / M(S)  = 0.0
122     118.7021    206.3615   123.2854      30      0.6372
Zähler = 123712.573   Nenner = 194159.066
M(Ti) = 194159.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 123712.6 / M(S)  = 0.0
123     118.7021    199.2362   116.2878      30      0.6547
Zähler = 117204.093   Nenner = 179012.220
M(Ti) = 179012.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 117204.1 / M(S)  = 0.0
```

```
124     118.7021    192.1109   109.3067      30      0.6738
Zähler = 110820.531   Nenner = 164476.685
M(Ti) = 164476.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 110820.5 / M(S)  = 0.0
125     118.7021    184.9856   102.3455      30      0.6937
Zähler = 104601.200   Nenner = 150784.272
M(Ti) = 150784.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 104601.2 / M(S)  = 0.0
126     118.7021    177.8603    95.4086      30      0.7032
Zähler = 98499.022   Nenner = 140078.535
M(Ti) = 140078.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 98499.0 / M(S)  = 0.0
127     118.7021    170.7350    88.5015      30      0.7155
Zähler = 92585.370   Nenner = 129392.405
M(Ti) = 129392.4 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 92585.4 / M(S)  = 0.0
128     118.7021    163.6097    81.6320      30      0.7368
Zähler = 86840.092   Nenner = 117854.277
M(Ti) = 117854.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 86840.1 / M(S)  = 0.0
129     118.7021    156.4844    74.8104      30      0.7593
Zähler = 81288.309   Nenner = 107057.270
M(Ti) = 107057.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 81288.3 / M(S)  = 0.0
130     118.7021    149.3591    68.0510      30      0.7832
Zähler = 75890.841   Nenner = 96901.626
M(Ti) = 96901.6 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 75890.8 / M(S)  = 0.0
131     118.7021    142.2338    61.3745      30      0.8036
Zähler = 70719.525   Nenner = 87998.322
M(Ti) = 87998.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 70719.5 / M(S)  = 0.0
132     118.7021    135.1085    54.8111      30      0.8204
Zähler = 65809.112   Nenner = 80212.135
M(Ti) = 80212.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 65809.1 / M(S)  = 0.0
133     118.7021    127.9832    48.4068      30      0.8297
Zähler = 61156.019   Nenner = 73704.505
M(Ti) = 73704.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 61156.0 / M(S)  = 0.0
134     118.7021    120.8579    42.2341      30      0.8277
Zähler = 56804.861   Nenner = 68625.654
M(Ti) = 68625.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 56804.9 / M(S)  = 0.0
135     118.7021    113.7326    36.4111      30      0.7963
Zähler = 52394.671   Nenner = 65799.549
M(Ti) = 65799.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 52394.7 / M(S)  = 0.0
136     118.7021    106.6073    31.1344      30      0.7088
Zähler = 45994.452   Nenner = 64888.292
M(Ti) = 64888.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 45994.5 / M(S)  = 0.0
137     118.7021     99.4820    26.7297      31      0.4924
Zähler = 42798.881   Nenner = 86920.682
M(Ti) = 86920.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 42798.9 / M(S)  = 0.0
138     118.7021     92.3567    23.6883      32      0.4019
Zähler = 45787.302   Nenner = 113924.463
M(Ti) = 113924.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 45787.3 / M(S)  = 0.0
139     147.2768    106.6073    31.4837      30      0.3442
Zähler = 4725.143   Nenner = 13728.533
M(Ti) = 13728.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 4725.1 / M(S)  = 0.0
140     140.1331    199.2362   122.0984      30      0.8159
Zähler = 190058.078   Nenner = 232928.852
M(Ti) = 232928.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 190058.1 / M(S)  = 0.0
```

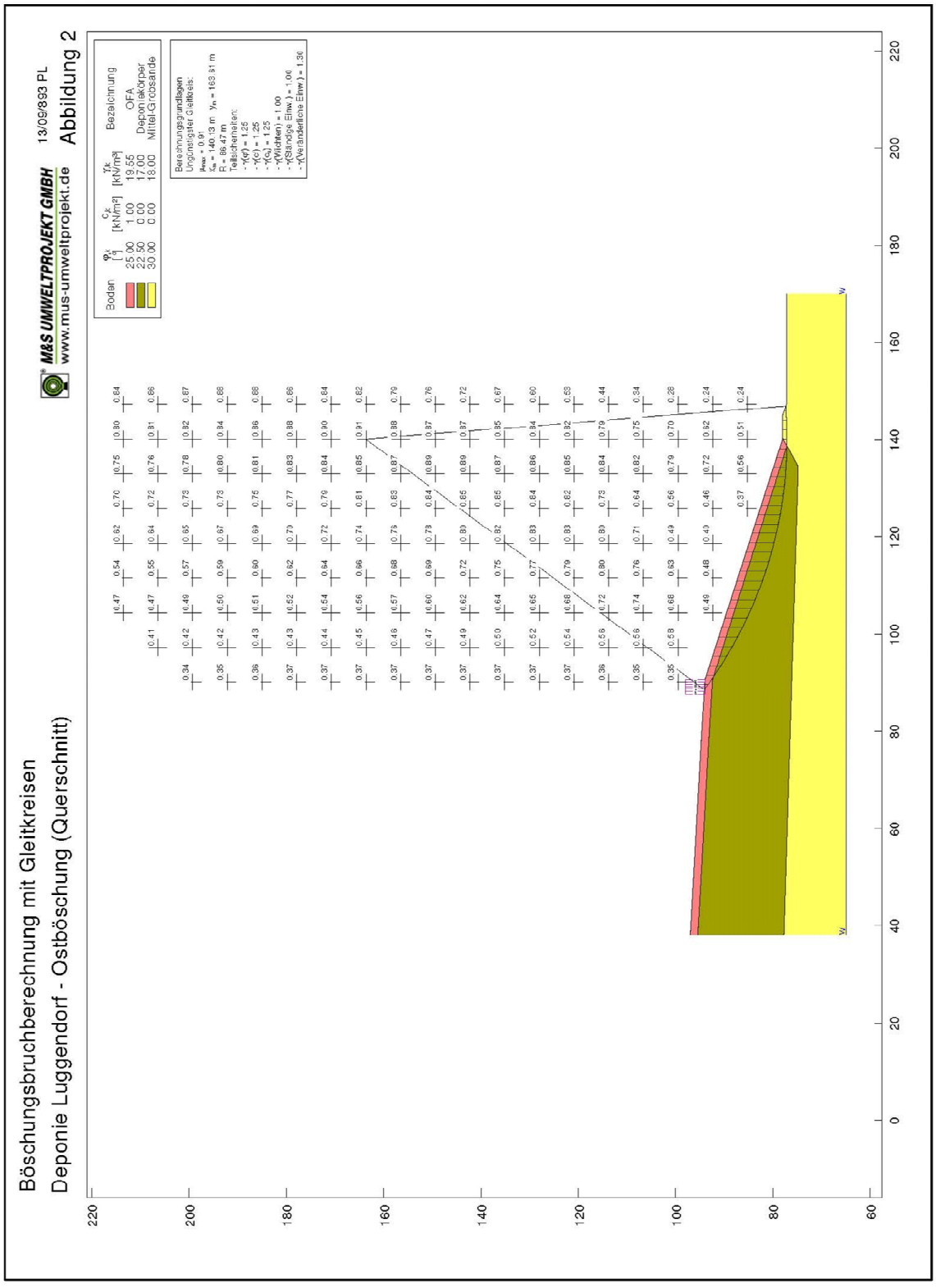
```
141     125.8458    213.4868   131.7222      30      0.6971
Zähler = 145771.320   Nenner = 209121.755
M(Ti) = 209121.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 145771.3 / M(S)  = 0.0
142     125.8458    206.3615   124.7909      30      0.7151
Zähler = 139917.663   Nenner = 195667.264
M(Ti) = 195667.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 139917.7 / M(S)  = 0.0
143     125.8458    199.2362   117.8827      30      0.7301
Zähler = 134266.157   Nenner = 183888.929
M(Ti) = 183888.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 134266.2 / M(S)  = 0.0
144     125.8458    192.1109   111.0020      30      0.7318
Zähler = 128807.512   Nenner = 176017.577
M(Ti) = 176017.6 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 128807.5 / M(S)  = 0.0
145     125.8458    184.9856   104.1541      30      0.7509
Zähler = 123548.269   Nenner = 164535.062
M(Ti) = 164535.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 123548.3 / M(S)  = 0.0
146     125.8458    177.8603    97.3461      30      0.7700
Zähler = 118534.096   Nenner = 153939.919
M(Ti) = 153939.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 118534.1 / M(S)  = 0.0
147     125.8458    170.7350    90.5870      30      0.7908
Zähler = 113740.375   Nenner = 143833.064
M(Ti) = 143833.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 113740.4 / M(S)  = 0.0
148     125.8458    163.6097    83.8884      30      0.8090
Zähler = 109205.411   Nenner = 134994.665
M(Ti) = 134994.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 109205.4 / M(S)  = 0.0
149     125.8458    156.4844    77.2662      30      0.8254
Zähler = 105001.994   Nenner = 127213.833
M(Ti) = 127213.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 105002.0 / M(S)  = 0.0
150     125.8458    149.3591    70.7419      30      0.8388
Zähler = 101153.542   Nenner = 120597.496
M(Ti) = 120597.5 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 101153.5 / M(S)  = 0.0
151     125.8458    142.2338    64.3452      30      0.8474
Zähler = 97712.852   Nenner = 115310.663
M(Ti) = 115310.7 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 97712.9 / M(S)  = 0.0
152     125.8458    135.1085    58.1182      30      0.8507
Zähler = 94728.648   Nenner = 111350.325
M(Ti) = 111350.3 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 94728.6 / M(S)  = 0.0
153     125.8458    127.9832    52.1219      30      0.8413
Zähler = 92245.005   Nenner = 109642.241
M(Ti) = 109642.2 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 92245.0 / M(S)  = 0.0
154     125.8458    120.8579    45.5926      30      0.8203
Zähler = 77100.077   Nenner = 93986.779
M(Ti) = 93986.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 77100.1 / M(S)  = 0.0
155     125.8458    113.7326    38.8139      30      0.7306
Zähler = 56976.695   Nenner = 77991.114
M(Ti) = 77991.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 56976.7 / M(S)  = 0.0
156     125.8458    106.6073    32.1853      30      0.6437
Zähler = 42038.979   Nenner = 65306.759
M(Ti) = 65306.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 42039.0 / M(S)  = 0.0
157     125.8458     99.4820    25.8226      30      0.5556
Zähler = 29739.257   Nenner = 53530.869
M(Ti) = 53530.9 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 29739.3 / M(S)  = 0.0
```

```
158     125.8458     92.3567    19.9815      31      0.4559
Zähler = 20569.677   Nenner = 45120.086
M(Ti) = 45120.1 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 20569.7 / M(S)  = 0.0
159     125.8458     85.2314    15.2726      34      0.3681
Zähler = 14465.567   Nenner = 39299.837
M(Ti) = 39299.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 14465.6 / M(S)  = 0.0
160     140.1331    206.3615   128.9415      30      0.8062
Zähler = 198836.592   Nenner = 246627.806
M(Ti) = 246627.8 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 198836.6 / M(S)  = 0.0
161     132.9895    213.4868   133.5151      30      0.7492
Zähler = 168686.133   Nenner = 225142.000
M(Ti) = 225142.0 / M(R) = 0.0 / M(Gi) = 168686.1 / M(S)  = 0.0
```

Ungünstigster Gleitkreis

Kreis	xm [m]	ym [m]	Radius [m]	Lamellen [-]	μ [-]
80	140.1331	163.6097	86.4749	30	**0.9068**

Zähler = 93987.092 Nenner = 103642.812


Böschungsbruchberechnung mit Gleitkreisen
Deponie Luggendorf - Ostböschung (Querschnitt)
M&S UMWELTPROJEKT GMBH
www.mus-umweltprojekt.de
13/09/893 PL
Abbildung 2
Boden
Bezeichnung
OFA
Deponiekörper
Mittel-Grobsande
Berechnungsgrundlagen
Ungünstigster Gleitkreis:
Teilsicherheiten:
- γ(φ') = 1.25
- γ(c') = 1.25
- γ(Cu) = 1.25
- γ(Wichten) = 1.00
- γ(Standige Einw.) = 1.00
- γ(Veränderliche Einw.) = 1.30

3.1.4 Zusammenfassung der Böschungsbruchberechnungen

Für die DK I- Deponie Luggendorf wurden Berechnungen zur Böschungsstandsicherheit für das in der Genehmigungsplanung dargestellte Planungskonzept durchgeführt. Ziel für die Auswertung der berechneten Ergebnisse ist es, die grundsätzliche Ausführbarkeit des Planungskonzeptes zu überprüfen und bestätigen zu können bzw. Schlussfolgerungen für die Planungsbearbeitung und für die Vorgabe von konstruktiven Details sowie Mindestwerte für bodenmechanische Materialkenngrößen aus den Berechnungsergebnissen abzuleiten.

Die Ergebnisse der ***Böschungsbruchberechnungen*** weisen aus, dass bei einer Böschungsneigung von 1 : 3 die erforderlichen Stabilitätsreserven ausnahmslos erreicht werden, wenn

a) im Abfallkörper Scherfestigkeitskonstellationen Reibungswinkel ϕ' / Kohäsion c´
   - ϕ' / c´ ´ $\geq$ 18,5° / $\geq$ 3,5 kN/m^2,

   bzw.
   - ϕ' / c´ ´ $\geq$ 20,0° / $\geq$ 2,5 kN/m^2,

   bzw.
   - ϕ' / c´ ´ $\geq$ 22,5° / $\geq$ 0 kN/m^2,

b) in den Mineralböden und Fugen des Abdichtungssystems eine mittlere Scherfestigkeitskonstellation Reibungswinkel ϕ' / Kohäsion c´
   - ϕ' / c´ ´ $\geq$ 25,0° / $\geq$ 0 kN/m^2 mobilisiert wird und

c) die Verkehrslast auf den Böschungen sowie auf der Plateaufläche maximal 33,3 kN/m^2 (= SLW 60) beträgt.

Aus dem Vergleich der ermittelten Mindest-Scherparameter für den Abfallkörper mit den bekannten Ausgangsdaten zur geplanten Deponie und zum geologischen Untergrund am Standort kann damit unter Einbeziehung von Erfahrungswerten und den in DIN 1045 und 1055 angegebenen Kennwerten insgesamt eine ausreichende Sicherheit gegen Böschungs- und Geländebruch im Berechnungsschnitt der Deponie Luggendorf eingeschätzt werden.

Die o.g. Mindestwerte für die Scherfestigkeitskonstellationen sind im Zuge des Deponiebetriebes und bei der Endabdichtung der Deponie zu gewährleisten. Besonders hingewiesen wird auf den Sachverhalt, dass Abfälle ohne wirksame Kohäsion (d.h. c´ = 0 kN/m^2) einen inneren Mindestreibungswinkel von 22,5° aufweisen müssen, um die Stabilität des Deponiekörpers ausnahmslos zu gewährleisten.

3.2. Gleitsicherheitsnachweise für die Oberflächenabdichtung

3.2.1 Ausgangswerte

Die Berechnung der Gleitsicherheiten für das Abdichtungssystem wurde basierend auf DIN 4084 und GDA-Empfehlung E 2-7 vorgenommen. Der Ansatz eines passiven Erddruckes am Böschungsfuß erfolgte dabei nicht; d.h. auf der sicheren Seite liegend wird der Nachweis für schichtparalleles Gleiten einer unbegrenzten Böschung betrachtet. Die möglichen Versagensmechanismen in diesen Bereichen sind somit für die Gleitsicherheiten in den Einzelfugen des Abdichtungssystems nicht relevant und bleiben im Folgenden unberücksichtigt.

Wesentliches Kriterium ist der Ansatz der Scherfestigkeiten in den Gleitfugen. Während zwischen den mineralischen Schichten das Scherverhalten in der Fuge über die Kennwerte ϕ' und c' der homogenen Schichten beschrieben werden kann (niedrigere Werte maßgebend), müssen den Trennflächen zwischen mineralischen Schichten und Geotextilien die Verbundparameter δ' und a' zugeordnet werden. Diese Kennwerte sind materialspezifisch und demzufolge je nach Fabrikat und Einbaubedingung sehr unterschiedlich. Die Eignung der Anwendung kommenden Geokunststoffe muss vom Hersteller nachgewiesen werden (Prüfung durch unabhängiges Institut ⇒ Bestandteil des Qualitätsmanagements im Rahmen der Ausführung).

Für die Nachweise der Gleitsicherheiten im Rahmen dieser Berechnungen wurden in Anlehnung an Literaturwerte, Firmenschriften, Prüfungszeugnisse und Laborberichte die o.g. Parameter unter Zugrundelegung planerischer Leitprodukte aus anderen Bauvorhaben gewählt, um bauvorbereitend die grundsätzliche Realisierbarkeit des Planungskonzeptes bestätigen zu können. Daraus schlussfolgernd werden aus den Berechnungen bauseits zu gewährleistende Mindestparameter abgeleitet, welche bei der Bauausführung für die zum Einsatz kommenden Produkte und Materialien gleichermaßen nachzuweisen sind. Im Zuge der Maßnahmen zur Qualitätssicherung (Eignungsuntersuchungen ⇒ Festlegung der bautechnisch und bautechnologisch erforderlichen Maßnahmen) ist sicherzustellen, dass diese Parameter in situ sicher erreicht werden.

Untersucht wird in den folgenden Berechnungen das geplante Abdichtungssystem für die planerisch im Endzustand steilsten Böschungsbereiche mit einem Neigungsverhältnis von 1:3,0 (β = 18,43°).

Die folgenden Nachweise werden für die einzelnen Trennflächen (⇒ vorgezeichnete Gleitfugen) mit den gemäß Tabelle 5 zu erwartenden Verbundparametern geführt. Gemäß der Parameterzusammenstellung sind in den Trennflächen 2 und 3 die geringsten Verbundparameter zu erwarten, da in diesen Fugen die geringsten Verbundreibungen ohne zusätzlich ansetzbare Kohäsions- bzw. Adhäsionskräfte wirken. Die v.g. Trennflächen stellen dementsprechend das maßgebende Kriterium für die Gleitsicherheit des geplanten Oberflächenabdichtungssystems dar.

Da über die Trennflächen 1 – 5 jeweils die gleichen Schubkräfte zu übertragen sind (wirkende Auflasten sind jeweils gleich), ist es für den Standsicherheitsnachweis und die daraus folgende Ableitung von Mindest-Verbundparametern im vorliegenden Fall ausreichend, einen Gleitnachweis zu führen (d.h. *Nachweis* mit ⇒ 1,30 m Bodenauflast und minimalem Verbundreibungswinkel von δ_k' = 25°).

Tabelle 5: Trennflächen (Gleitfugen), Scher- und Verbundparameter, Wichten

Fuge	Schicht	ϕ_k' bzw. δ_k' [°]	c_k' bzw. a_k' [kN/m²]	γ_k' [kN/m³]	Hinweis
-	Rekultivierungsschicht (20 cm Oberboden + 110 cm Unterboden)	27,5 – 30,0	2,5 – 5,0	20,0	DIN 1055
1	Rekultivierungsschicht – Dränmatte (Deckvlies)	23,4…25,5 [1)] 28,8 [2)]	1,0 – 2,0 [1)] 1,8 [2)]	---	[2)] abgemindert gem. EAU
2	Dränmatte intern	25,0	0	---	Produkt-Datenblätter; (Langzeit-Ersatz-Reibungswinkel)
3a	Dränmatte – Kunststoff-dichtungsbahn (KDB)	26,1 [2)]	3,3	---	[2)] abgemindert gem. EAU
3b	Dränmatte – Bentonit-matte (GTD) [3)]	25,0 [2)]	0	---	[2)] abgemindert gem. EAU
4	Bentonitmatte (GTD) intern [3)]	37,2	---	---	Produktblätter; (Langzeit-Ersatz-Reibungswinkel)
5a	Kunststoffdichtungsbahn (KDB) – Auflagerschicht	27,5 [1)]	0	---	[2)] abgemindert gem. EAU
5b	Bentonitmatte (GTD) – Auflagerschicht [3)]	27,5 [1)]	0	---	[2)] abgemindert gem. EAU
-	Auflagerschicht	32,5	0	19,0	DIN 1055

1) $\mu_{\phi'} = \tan \delta_k' / \tan \phi_k' = 0{,}85$; $\mu_c = a_k' / c_k' = 0{,}4$

2) vorliegende Versuchsauswertungen aus anderen Bauvorhaben,
Zur Ermittlung der charakteristischen Scherparameter wurden die Laborwerte zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bezüglich der Repräsentativität und der Streuung der Versuchstechnik wie folgt abgemindert.

$$\tan \varphi'_k = \frac{\tan \varphi'}{1{,}1} \qquad \tan \delta'_k = \frac{\tan \delta'}{1{,}1} \qquad c'_k = \frac{c'}{1{,}3} \qquad a'_k = \frac{a'}{2{,}0}$$

3) Betonitmatte (GTD) alternativ bzw. zum Vergleich

3.2.2 Berechnungsgrundlagen

Bei der Berechnung mit Teilsicherheitswerten gemäß EC 7 ist nachzuweisen, dass

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

mit E_d Bemessungswert der resultierenden Beanspruchung parallel zur Gleitfläche (***Einwirkungen***, geometrische Grunddaten wie Böschungswinkel β)

R_d Bemessungswert des ***Widerstandes*** parallel zur Gleitfläche (rückhaltende Kräfte; $\tan \varphi_d = \tan \varphi_K / \gamma_\varphi$)

Die Berechnung erfolgt für schichtparalleles Gleiten (ebene Gleitflächen) und wird dem Grenzzustand des Versagens durch Verlust der Gesamtstandsicherheit (GEO-3) gemäß DIN 1054 zugeordnet.

Auf der sicheren Seite liegend, werden für alle Schichten und Gleitfugen im Abdichtungssystem die geringsten Scher- und Verbundparameter aus der Tabelle 5 angesetzt.

Zur Berechnung der Ausnutzungsgrade μ sind gemäß DIN 1054 dementsprechend folgende Teilsicherheitswerte anzusetzen:

Tabelle 6: Teilsicherheitswerte für GEO-3 – Grenzzustand des Verlustes der Gesamtsicherheit

	Formelzeichen	Lastfall nach DIN 1054 Bemessungssituation EC 7		
		1 BS-P	2 BS-T	3 BS-A
Teilsicherheitswerte für Einwirkungen und Beanspruchungen				
Ständige Einwirkungen	γ_G	1,00	1,00	1,00
Ungünstige veränderliche Einwirkungen	γ_Q	1,30	1,20	1,00
Teilsicherheitswerte für Widerstände				
Reibungswert tan φ' des dränierten Bodens	γ_φ	1,25	1,15	1,10
Reibungswert tan δ' zu Geokunststoffen	γ_δ	1,25	1,15	1,10
Kohäsion c´ des dränierten Bodens	γ_c	1,25	1,15	1,10
Adhäsion a´ zu Geokunststoffen	γ_a	1,25	1,15	1,10
Wichte des Bodens	γ_{Wichte}	1,00	1,00	1,00

Bemessungswert der Beanspruchung E_d:

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

bzw.

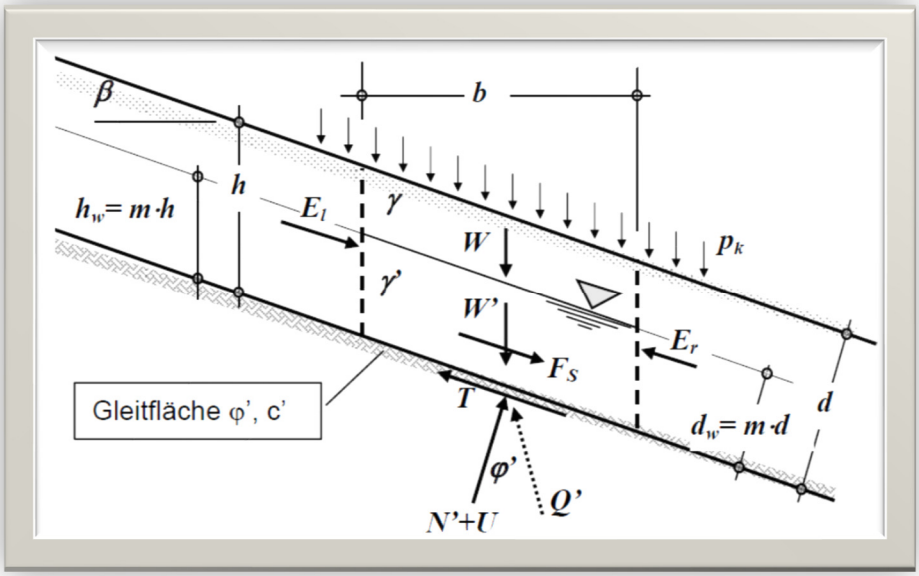
$$\boldsymbol{E_d = tan\,\beta * \left[(1-m) * d * \gamma_k * \gamma_G + m * d * \gamma_{r,k} + p_k * \gamma_Q\right]}$$

Bemessungswert des Gleitwiderstandes R_d:

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

bzw.

$$\boldsymbol{R_d = \frac{c'_d}{cos\,\beta} + tan\,\varphi_d[(1-m) * d * \gamma_k + m * d * \gamma'_k + p_k]}$$



Systemübersicht (übernommen aus E 2-7 der LAGA)

⇒ <u>Folgende objektbezogene Bemessungsfälle werden jeweils untersucht:</u>

- Bemessungsfall 1 (BS-P): Ständige Lasten (nur Eigengewicht Reku-Boden)
- Bemessungsfall 2 (BS-P): Ständige Lasten (wie BF1)
  + 15 cm Wassereinstau über der Dränschicht
- Bemessungsfall 3 (BS-T): Ständige Lasten
  + Verkehr (Eigengewicht + Baustellenverkehr)
- Bemessungsfall 4 (BS-A): Ständige Lasten + Verkehr (wie BF 3)
  + 15 cm Wassereinstau über der Dränschicht

3.2.3 Nachweise

Bemessungsfall 1: Ständige Lasten (nur Eigengewicht Reku-Schicht)

⇒ Planmäßige Bemessungssituation BS-P

Einwirkungen aus Eigengewicht: Rekultivierungsschicht
d = 1,30 m; γ_k = 20 kN/m³
max. Böschungsneigung 1 : 3 ⇒ β = 18,43°

Maßgeb. Mindestverbundparameter: Fugen 2 / 3, da hier die geringsten Verbundparameter zu erwarten sind.

Charakteristische Werte und Bemessungswerte planmäßige Bemessungssituation (BS-P):

	Charakteristischer Wert	Teilsicherheitswert	Bemessungswert
Einwirkungen			
Bodenwichte	γ_k = 20 kN/m³	γ_G = 1,00	γ_d = 20 kN/m³
Widerstände			
Reibungswinkel	φ'_k bzw. δ'_k = 25°	$\gamma_\varphi = \gamma_\delta$ = 1,25	φ'_d bzw. δ'_d = 20°
Kohäsion / Adhäsion	c'_k bzw. a'_k 0 = kN/m²	$\gamma_c = \gamma_a$ = 1,25	c'_k bzw. a'_k 0 = kN/m²

$$E_d = tan\ 18{,}43° * \left[1{,}30\ m * 20\frac{kN}{m^3} * 1{,}0\right] = 8{,}66\ \frac{kN}{m^2}$$

$$R_d = tan\ 20° * \left[1{,}30\ m * 20\frac{kN}{m^3}\right] = 9{,}46\ \frac{kN}{m^2}$$

$\mu = \frac{E_d}{R_d} = \frac{8{,}66}{9{,}46} = 0{,}915 \leq 1{,}00$ ⇒ Nachweis erfüllt.

⇒ Auslastung der kritischen Gleitfuge in BS-P = 91,5 %).

Bemessungsfall 2: Ständige Lasten (Eigengewicht) + 15 cm Wassereinstau über der Dränschicht

⇒ Planmäßige Bemessungssituation BS-P

Einwirkungen aus Eigengewicht: Rekultivierungsschicht
d = 1,30 m; γ_k = 20 kN/m³

davon
- nicht eingestaut 115 cm ⇒ γ_k = 20 kN/m³ (erdfeucht)
- eingestaut 15 cm ⇒ $\gamma_{r,k}$ = 22 kN/m³ (wassergesättigt)
⇒ γ'_k = 10 kN/m³ (unter Auftrieb)

max. Böschungsneigung 1 : 3 ⇒ β = 18,43°

Maßgeb. Mindestverbundparameter: Fugen 2 / 3

Charakteristische Werte und Bemessungswerte planmäßige Bemessungssituation (BS-P):

	Charakteristischer Wert	Teilsicherheitswert	Bemessungswert
Einwirkungen			
Bodenwichte Rekultivierungsschicht	γ_k = 20 kN/m³	γ_G = 1,00	γ_d = 20 kN/m³
	$\gamma_{r,k}$ = 22 kN/m³	γ_G = 1,00	$\gamma_{r,d}$ = 22 kN/m³
	γ'_k = 10 kN/m³	γ_G = 1,00	γ'_d = 10 kN/m³
Widerstände			
Reibungswinkel	φ'_k bzw. δ'_k = 25°	$\gamma_\varphi = \gamma_\delta$ = 1,25	φ'_d bzw. δ'_d = 20°
Kohäsion / Adhäsion	c´k bzw. a´k 0 = kN/m²	$\gamma_c = \gamma_a$ = 1,25	c´k bzw. a´k 0 = kN/m²

$$E_d = tan\ 18{,}43° * \left[1{,}15 * 20\frac{kN}{m^3} * 1{,}0 + 0{,}15\ m * 22\frac{kN}{m^3} * 1{,}0\right] = 8{,}76\frac{kN}{m^2}$$

$$R_d = tan\ 20° * \left[1{,}15 * \ 20\frac{kN}{m^3} + \ 0{,}15\ m * 10\frac{kN}{m^3}\right] = 8{,}92\frac{kN}{m^2}$$

$\mu = \frac{E_d}{R_d} = \frac{8{,}76}{8{,}92} = 0{,}982 \ \leq 1{,}00$ ⇒ Nachweis erfüllt.

⇒ Auslastung der kritischen Gleitfuge in BS-P = 98,2 %).

Bemessungsfall 3: ***Ständige Lasten + Verkehr (Eigengewicht + Baustellenverkehr)***
= Vorübergehende Beanspruchung (Eigengewicht + Baustellenverkehr)
⇒ temporäre Bemessungssituation BS-T

Einwirkungen aus Eigengewicht: Rekultivierungsschicht
d = 1,30 m; γ_k = 20 kN/m³
Verkehrsbelastung SLW 30 ⇒ Ersatzflächenlast
p'_k = 16,7 kN/m²
dyn. Faktor 1,2 für anfahren und bremsen
max. Böschungsneigung 1 : 3 ⇒ β = 18,43°

Maßgeb. Mindestverbundparameter: Fugen 2 /3

Charakteristische Werte und Bemessungswerte temporäre Bemessungssituation (BS-T):

	Charakteristischer Wert	Teilsicherheitswert	Bemessungswert
Einwirkungen			
Bodenwichte	γ_k = 20 kN/m³	γ_G = 1,00	γ_d = 20 kN/m³
Verkehrsbelastung	p'_k = 16,7 kN/m²	γ_Q = 1,20	p'_d = 20,04 kN/m²
Widerstände			
Reibungswinkel	φ'_k bzw. δ'_k = 25°	$\gamma_\varphi = \gamma_\delta$ = 1,15	φ'_d bzw. δ'_d = 21,7°
Kohäsion / Adhäsion	c'_k bzw. a'_k 0 = kN/m²	$\gamma_c = \gamma_a$ = 1,15	c'_k bzw. a'_k 0 = kN/m²

$$E_d = tan\ 18{,}43° * \left[1{,}30\ m * 20\frac{kN}{m^3} * 1{,}0 + 1{,}20 * 1{,}2 * 16{,}7\frac{kN}{m^2}\right] = 16{,}68\frac{kN}{m^2}$$

$$R_d = tan\ 21{,}7° * \left[1{,}30\ m * 20\frac{kN}{m^3} + 16{,}7\frac{kN}{m^2}\right] = 16{,}99\frac{kN}{m^2}$$

$\mu = \frac{E_d}{R_d} = \frac{16{,}68}{16{,}99} = 0{,}982 \leq 1{,}00$ ⇒ Nachweis erfüllt.

⇒ Auslastung der kritischen Gleitfuge in BS-T = 98,2 %).

Bemessungsfall 4: Ständige Lasten + Verkehr (Eigengewicht + Baustellenverkehr)
+ 15 cm Wassereinstau über der Dränschicht

= außergewöhnliche Beanspruchung
⇒ außergewöhnliche Bemessungssituation BS-A

Einwirkungen aus Eigengewicht: Rekultivierungsschicht
d = 1,30 m; γ_k = 20 kN/m³

davon
- nicht eingestaut 115 cm ⇒ γ_k = 20 kN/m³ (erdfeucht)
- eingestaut 15 cm ⇒ $\gamma_{r,k}$ = 22 kN/m³ (wassergesättigt)
⇒ γ'_k = 10 kN/m³ (unter Auftrieb)

Verkehrsbelastung SLW 30 ⇒ Ersatzflächenlast
p'_k = 16,7 kN/m²
dyn. Faktor 1,2 für anfahren und bremsen

max. Böschungsneigung 1 : 3 ⇒ β = 18,43°

Maßgeb. Mindestverbundparameter: Fugen 2 / 3

Charakteristische Werte und Bemessungswerte außergewöhnliche Bemessungssituation (BS-A):

	Charakteristischer Wert	Teilsicherheitswert	Bemessungswert
Einwirkungen			
Bodenwichte Rekultivierungsschicht	γ_k = 20 kN/m³	γ_G = 1,00	γ_d = 20 kN/m³
	$\gamma_{r,k}$ = 22 kN/m³	γ_G = 1,00	$\gamma_{r,d}$ = 22 kN/m³
	γ'_k = 10 kN/m³	γ_G = 1,00	γ'_d = 10 kN/m³
Verkehrsbelastung	p'_k = 16,7 kN/m²	γ_Q = 1,00	p'_d = 16,7 kN/m²
Widerstände			
Reibungswinkel	φ'_k bzw. δ'_k = 25°	$\gamma_\varphi = \gamma_\delta$ = 1,10	φ'_d bzw. δ'_d = 22,7°
Kohäsion / Adhäsion	c'_k bzw. a'_k 0 = kN/m²	$\gamma_c = \gamma_a$ = 1,10	c'_k bzw. a'_k 0 = kN/m²

$$E_d = tan\ 18{,}43° * \left[1{,}15 * 20\frac{kN}{m^3} * 1{,}0 + 0{,}15\ m * 22\frac{kN}{m^3} * 1{,}0 + 1{,}00 * 1{,}2 * 16{,}7\frac{kN}{m^2}\right] = 15{,}44\frac{kN}{m^2}$$

$$R_d = tan\ 22{,}7° * \left[1{,}15 * \ 20\frac{kN}{m^3} + \ 0{,}15\ m * 10\frac{kN}{m^3} + 16{,}7\frac{kN}{m^2}\right] = 17{,}23\frac{kN}{m^2}$$

$\mu = \frac{E_d}{R_d} = \frac{15{,}44}{17{,}23} = 0{,}896\ \leq 1{,}00 \Rightarrow$ Nachweis erfüllt.

$\Rightarrow$ Auslastung der kritischen Gleitfuge in BS-A = 89,6 %).

3.2.4 Zusammenfassung der Gleitnachweise

Die Berechnungsergebnisse weisen in den relevanten Belastungs-/ Bemessungsfällen für die geplante maximale Böschungsneigung von 1:3 ausreichende Gleitsicherheiten auf.

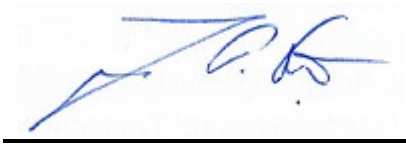
Zugrunde gelegt wurde bei den Berechnungen ein für die maßgebenden Fugen charakteristischer Verbundreibungswinkel von 25° (ohne Kohäsions- bzw. Adhäsionswirkung), welcher aus der Parametergegenüberstellung in Tabelle 5 für die kritischsten Trennflächen (Fugen 2 + 3) resultiert. Der maximale Ausnutzungsgrad wurde für die kritischste Gleitfuge 3 im Bemessungsfall 3 mit μ = 0,982 (d.h. 98,2 %) berechnet. Damit wird die Realisierbarkeit des Oberflächenabdichtungssystems mit den zugrunde gelegten Parametern von Leitprodukten bestätigt. Entsprechend den Berechnungsergebnissen ist der gemäß den Fugen 2 und 3 mit **δ'_k = 25°** angesetzte Verbundreibungswinkel als abzusichernder **Mindest-Verbundreibungswinkel** einzustufen.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Ergebnisse (Ausnutzungsgrade hangparalleles Gleiten)

Verbundreibung Fuge δ' [°]	Sickerwasser-einstau [cm]	maximaler Ausnutzungsgrad $\mu = E_d / R_d \leq 1$ in der maßgebenden Gleitfuge ohne Verkehrslast		mit Verkehrslast	
alle Fugen					
25,0	0	0,915	BS-P	0,982	BS-T
	15,0	0,982	BS-P	0,896	BS-A

Der berechnete **Mindest-Verbundreibungswinkel δ'_k = 25°** ist planerisch als Mindestwert für alle Materialien und Trennflächen des Oberflächenabdichtungssystems zu fordern. Eine Unterschreitung der Mindestreibung bzw. Mindestverbundreibung ist nur möglich, wenn dazu für die jeweilige Schicht bzw. Trennfläche nachweislich auch eine Kohäsion bzw. Adhäsion ansetzbar ist (⇒ Ergebnisse der Eignungsprüfungen und des Versuchsfeldes). Hierfür in Betracht gezogen sollten allerdings grundsätzlich nur die Schichten bzw. Trennflächen, welcher keiner hydraulischen Beanspruchung unterliegen (d.h. nur oberhalb der Dränschicht).

Berechnungen aufgestellt: 29.11.2017



Dipl.-Ing. J. Peter