



Landeshauptstadt Magdeburg  
Eigenbetrieb  
Städtischer Abfallwirtschaftsbetrieb

**Deponie Hängelsberge, Magdeburg  
Deponieerweiterung nach DK II**

**Standortsicherheitsuntersuchungen  
und Setzungsabschätzung**

Projekt-Nr.: **248783**

Erstellt im Auftrag von:  
**Landeshauptstadt Magdeburg  
Eigenbetrieb  
Städtischer Abfallwirtschaftsbetrieb  
Sternstraße 13  
39104 Magdeburg**

Dipl.-Ing. Grit Renker,  
Martin Lehmann M.Sc.,  
Dipl.-Ing. Sabine Metzker

2022-02-14 (Überarbeitung August 2023)

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
<b>1</b>	<b>VORBEMERKUNG ..... 5</b>
<b>2</b>	<b>UNTERLAGEN ..... 6</b>
<b>3</b>	<b>AUFGABENSTELLUNG ..... 8</b>
<b>4</b>	<b>BEARBEITUNGSGEBIET ..... 9</b>
<b>5</b>	<b>GEOTECHNISCHE UND HYDROLOGISCHE SITUATION ..... 10</b>
5.1	Baugrundsichtung..... 10
5.2	Hydrologische Situation..... 12
<b>6</b>	<b>BERECHNUNGSRANDBEDINGUNGEN..... 13</b>
6.1	Anforderungen an die Nachweisführung..... 13
6.2	Sicherheitskonzept ..... 14
6.3	Bemessungssituationen und Teilsicherheitsbeiwerte..... 14
6.4	Berechnungskennwerte..... 14
6.4.1	Kennwerte gewachsener Schichten..... 14
6.4.2	Kennwerte der geplanten Deponieelemente..... 16
6.5	Lastannahmen ..... 17
<b>7</b>	<b>BÖSCHUNGSBRUCHUNTERSUCHUNGEN ..... 19</b>
7.1	Berechnungsprogramm und -verfahren ..... 19
7.2	Berechnungsschnitte..... 19
7.3	Berechnungsergebnisse..... 21
<b>8</b>	<b>SPREIZ- UND GLEITNACHWEISE ..... 23</b>
8.1	Oberflächenabdichtung ..... 23
8.2	Basisabdichtung ..... 24
8.3	Maßgebende Anforderungen an die Scherfestigkeit ..... 25
<b>9</b>	<b>SETZUNGSABSCHÄTZUNG BASISABDICHTUNG ..... 26</b>
9.1	Berechnungsverfahren ..... 26
9.2	Berechnungsrandbedingungen (System)..... 26
9.2.3	Steifigkeitsprofil ..... 26
9.2.4	Auflast..... 27
9.3	Berechnungsergebnisse..... 27
<b>10</b>	<b>SETZUNGSABSCHÄTZUNG OBERFLÄCHENABDICHTUNG..... 30</b>
<b>11</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG ..... 32</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

	Seite
Abbildung 6.1	Skizze Systemaufbau Basisabdichtungssystem [U1] ..... 16
Abbildung 6.2	Skizze Systemaufbau Oberflächenabdichtungssystem [U1]..... 16
Abbildung 8.1	Schichtparalleles Gleiten eines teilweise durchströmten Abdichtungssystems nach [U9] ..... 23
Abbildung 9.1	In der Setzungsabschätzung berücksichtigte Schichtenfolge ..... 27
Abbildung 9.2	Ermittelte Krümmungsradien der Basisabdichtung ..... 28
Abbildung 10.1	Lage der für die Krümmung der Oberflächenabdichtung untersuchten Profilschnitte ..... 31

## TABELLENVERZEICHNIS

	Seite
Tabelle 5.1	Generelle Schichtenfolge im Bearbeitungsgebiet ..... 10
Tabelle 5.2	Charakterisierung der im Bearbeitungsgebiet vorhandenen Grundwasserleiter ..... 12
Tabelle 6.1	Teilsicherheitsbeiwerte für geotechnische Kenngrößen und Einwirkungen (Grenzzustand GEO-3 gemäß EC 7 [U5]) ..... 14
Tabelle 6.2	Charakteristische Berechnungskennwerte des Baugrunds ..... 15
Tabelle 6.3	Charakteristische Berechnungskennwerte der Abdichtungskomponenten und des Deponats ..... 17
Tabelle 7.1	Geometrische Randbedingungen der berechneten Böschungen ..... 19
Tabelle 7.2	Berechnungsschnitte und -szenarien ..... 20
Tabelle 7.3	Maßgebende Ausnutzungsgrade $\mu$ der Böschungsbruchberechnungen ..... 21
Tabelle 8.1	Erforderliche Reibungswinkel gemäß Gleitsicherheitsnachweis ..... 23
Tabelle 9.1	Setzungen und Setzungsdifferenzen im Bereich der Sickerwasserdränagen oberhalb der Deponiebasisabdichtung ..... 29

## ANLAGENVERZEICHNIS

### **Anlage 1** Lagepläne

- Anlage 1.1 Übersichtslageplan
- Anlage 1.2 Lageplan mit Aufschlüssen und Berechnungsschnitten
- Anlage 1.3 Lageplan mit geplanter Deponieoberfläche
- Anlage 1.4 Lageplan mit geplanter Oberfläche der Basisabdichtung

### **Anlage 2** Ergebnisse der Böschungsbruchuntersuchungen

### **Anlage 3** Gleit- und Spreizsicherheitsnachweise

- Anlage 3.1 Gleitsicherheitsnachweise der Oberflächenabdichtung
- Anlage 3.2 Spreizsicherheitsnachweis der Deponiebasis

### **Anlage 4** Setzungsabschätzung der Basisabdichtung

- Anlage 4.1 System (Knotenpunkte für Schichtung und Auflast)
- Anlage 4.2 Flächige Verteilung der zu erwartenden Setzungen
- Anlage 4.3 Zu erwartende Setzungsmulden

### **Anlage 5** Setzungsabschätzung der Oberflächenabdichtung

## 1 VORBEMERKUNG

Das Entsorgungszentrum Hängelsberge wird vom Städtischen Abfallwirtschaftsbetrieb (SAB), einem Eigenbetrieb der Stadt Magdeburg, betrieben. In der Deponie der Deponieklasse (DK) II werden Abfälle aus privaten Haushaltungen und Abfälle zur Beseitigung aus anderen Herkunftsbereichen eingebaut, die nicht zur weiteren Verwertung geeignet sind. Der überwiegende Teil des Abfalls stammt aus der Stadt Magdeburg.

Die aktuellen Einlagerungskapazitäten sind kurzfristig erschöpft. Um die Entsorgungssicherheit zu gewährleisten, wird eine Erweiterung der Ablagerungsfläche nach DK II angestrebt.

Das Planungskonzept für die Erweiterung der Deponie Hängelsberge sieht einen stufenweisen Ausbau in 3 Deponieabschnitte und ggf. 4 Phasen auf einer Gesamtfläche von ca. 10,8 ha vor. Auf der dafür vorgesehenen Fläche wird zurzeit Bodenaushub aus den vorangegangenen Deponieabschnitten gelagert (Bodenlager).

Die CDM Smith Consult GmbH wurde mit der Planung der Deponieerweiterung, den geotechnischen Beratungsleistungen und Untersuchungen zur Standsicherheit und den zu erwartenden Setzungen beauftragt.

## 2 UNTERLAGEN

- [U1] CDM Smith Consult GmbH: Deponie Hängelsberge Magdeburg. Planung Erweiterung nach DK II. Bericht zur Vorplanung (LPH 2). Leipzig, 28.10.2021.
- [U2] CDM Smith Consult GmbH: Deponie Hängelsberge Magdeburg. Planung Erweiterung nach DK II. Geotechnischer Bericht (Baugrundgutachten). Leipzig, 17.02.2022 (Überarbeitung August 2023).
- [U3] CDM Smith Consult GmbH: Deponie Hängelsberge Magdeburg. Planung Erweiterung nach DK II. Kapazitätsoptimierung durch Überschüttung/Überhöhung der Südböschung. Erläuterungsbericht zum Antrag gemäß § 35 Abs. 3 KrWG. Leipzig, 08.01.2021.
- [U4] DIN 1055-2: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Bodenkenngrößen. Beuth Verlag, 11/2010.
- [U5] DIN EN 1997-1: 2014-03 (Eurocode 7). Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln. Deutsche Fassung EN 1997-1:2004 + AC:2009 + A1:2013.
- [U6] DIN 4019: Baugrund und Setzungsberechnungen. Beuth Verlag, 05/2015.
- [U7] GDA E 2-1: Geotechnische Aspekte der Deponieplanung. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT. November 2020.
- [U8] GDA E 2-6: Grundsätze der Abfallmechanik. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT. 1997.
- [U9] GDA E 2-7: Nachweis der Gleitsicherheit von Abdichtungssystemen. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT. 1997.
- [U10] GDA E 2-13: Verformungsnachweis für mineralische Abdichtungsschichten. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT. 05/2010.
- [U11] GDA E 2-19: Abfallmechanische Berechnungen für nicht bodenähnliche Abfälle. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT. 1997.
- [U12] GDA E 2-21: Spreizsicherheitsnachweis und Verformungsabschätzung für die Deponiebasis. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT. August 2015.
- [U13] GDA E 2-23: Scherparameter nicht bodenähnlicher Abfälle. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT. 1997.
- [U14] GDA E 2-24: Setzungsprognosen für nicht bodenähnliche Abfälle. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT. 1997.
- [U15] GDA E 2-25: Einwirkungen auf vertikale Schächte im Abfallkörper. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT. 1997.

- [U16] GDA E 2-26: Einwirkungen auf Baugrubenverbaue im Abfallkörper. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT. 1997.
- [U17] GDA E 2-29: Standsicherheitsnachweis für Deponiekörper mit anisotropen Eigenschaften. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT. Bautechnik 1998.
- [U18] GDA E 2-35: Geotechnische Kennwerte für Siedlungsabfälle. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. DGGT. Bautechnik 09/2000.
- [U19] Bundeseinheitlicher Qualitätsstandard 2-0 „Mineralische Basisabdichtungskomponenten - übergreifende Anforderungen“. LAGA Ad-hoc-AG „Deponietechnik“. 04.12.2014.

### 3 AUFGABENSTELLUNG

Auf einer Grundfläche von ca. 10,8 ha wird eine Erweiterung der aktiven Ablagerungsfläche der Deponie Hängelsberge in Form einer Grubendeponie mit Überhöhung über OK-Gelände geplant, siehe [U1]. Das Konzept sieht eine Absenkung der Deponiebasis zwischen ca. 7 und 20 m unter das bestehende Gelände vor. Es ist eine Endhöhe von 142 m HN einschließlich Oberflächenabdichtung vorgesehen. Die Oberfläche des profilierten Abfalls ist auf ein Maß von 140 m HN zu begrenzen. Es werden maximale Ablagerungsmächtigkeiten von ca. 40 m erreicht. Der Deponiekörper der Erweiterung lehnt sich an die Südböschung des aktiven Ablagerungsbereiches an. Zusätzlich erfolgt eine Überschüttung, so dass die Endhöhe der Abfallablagerung für diesen Teilbereich von 125 m HN auf 132 m HN angehoben wird. Die Deponieaußenböschungen werden mit einer Böschungsneigung von 1:3 und mit umlaufenden Bermen ausgebildet. Die Erweiterungsfläche wird mit einer geologischen Barriere und einer Basisabdichtung für Deponien der Deponieklasse DKII (DepV) ausgestattet. Nach Abschluss der Deponierung ist eine Sicherung mit einer Oberflächenabdichtung der Deponieklasse DK II vorgesehen.

Details zur geplanten geometrischen Gestaltung und den geplanten Abdichtungssystemen sind der Vorplanung [U1] zu entnehmen. Insgesamt 10 Schnitte durch den geplanten Deponiekörper mit Darstellung der vorhandenen Baugrundschichtung sind im Baugrundgutachten [U2] enthalten.

In Vorbereitung der Weiterführung der Planungen in der Entwurfs-/Genehmigungsplanung sind Standsicherheitsuntersuchungen und eine Setzungsprognose für die Deponiebasis mit folgenden Zielstellungen durchzuführen:

- Nachweis der Standsicherheit für den geplanten Deponiekörper und die Abdichtungssysteme im Bau-, Betriebs- und Endzustand,
- Prognose der im Untergrund aus der Deponie resultierenden Setzungen als Grundlage für eine Überprüfung der Notwendigkeit einer Überhöhung der in [U1] vorgesehenen Basisprofilierung zur dauerhaften Gewährleistung der Basisentwässerung der Deponie,
- Nachweis, dass die zu erwartenden Setzungen keine Schäden am Basisabdichtungssystem verursachen.

## 4 BEARBEITUNGSGEBIET

Die Deponie Hängelsberge liegt im Land Sachsen-Anhalt unmittelbar östlich der Autobahn A14 im Magdeburger Stadtteil Ottersleben. Detaillierte Angaben zur Lage der Deponie, ihres Aufbaus sowie der geplanten Baumaßnahmen enthält [U1]. Nachfolgend sind die für die hier gegenständlichen Untersuchungen und Abschätzungen relevanten Angaben kurz wiedergegeben:

- Die geplante Erweiterungsfläche der Deponie schließt südlich an den derzeitigen aktiven Ablagerungsbereich an.
- Die geplante Erweiterungsfläche wird derzeit als Bodenlager für Aushub aus vorangegangenen Deponiebaumaßnahmen genutzt.
- Das bestehende Gelände fällt im Bereich der Erweiterungsfläche in Richtung Osten und Norden flach ein (N-S: 112 m HN ... 117 m HN, W-O: 117 m HN ... 107 m HN).
- Die Deponieerweiterung erfolgt in 3 Teilfeldern (Deponieabschnitte DA 3 bis DA 5), die von Nord nach Süd hergestellt werden, wobei der DA 4 noch einmal in 2 Bauabschnitte unterteilt werden kann.
- Die Oberfläche des geplanten Deponiekörpers einschließlich der Oberflächenabdichtung und Rekultivierungsschicht befindet sich im Niveau +136 ... 142 m HN.
- Die Unterkante des Basisabdichtungssystems (Planum Barriere) ist bei einem Regelaufbau (0,5 ... 0,6 m mächtige Basisabdichtung über 1,0 m mächtiger geologischer Barriere) im Höhenniveau zwischen ca. +95,9 und +102,9 m HN zu erwarten.
- Die maximale Deponiehöhe beträgt ca. 40 m.
- Dynamische Einwirkungen infolge Erdbeben sind vernachlässigbar.

## 5 GEOTECHNISCHE UND HYDROLOGISCHE SITUATION

### 5.1 Baugrundsichtung

Die geotechnische und hydrologische Situation ist durch direkte und indirekte Aufschlüsse sowie bodenmechanische Laborversuche hinreichend erkundet und im Geotechnischen Bericht (Baugrundgutachten) [U2] umfassend beschrieben worden. Die in [U2] abgeleitete generelle Schichtenfolge ist in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1 Generelle Schichtenfolge im Bearbeitungsgebiet

Schichtnummer	Kurzbezeichnung	Charakteristik
S1.1	Mutterboden	stark durchwurzeltes, humoses Material
S1.2	Auffüllung	umgelagertes Bodenmaterial (Bodenlager): bindiges und rolliges Material, inhomogen zusammengesetzt
S2.1	Löss, Feinsand	kalkhaltige Schluffe, Feinsande, teilweise mit tonigen Zwischenlagen
S2.2	sandige Tone / Schluffe	bindiges Material mit variablem Anteil rolligen Materials (überwiegend Fein- und Mittelsand, bereichsweise auch gröber)
S2.3	Sand, schluffig	Sande (überwiegend Mittelsand, teils fein- und teils grobsandig) mit variablem Anteil bindigen Materials (Schluff)
S3.1	Schluff, sandig	Schluffe, teilweise tonig, mit variablem Anteil rolligen Materials (Feinsand bis Feinkies)
S3.2	Sand	Sande feiner bis grober Körnung, teilweise mit kiesigen Beimengungen, teilweise (schwach) schluffig
S3.3	Geschiebemergel (Saale)	Schluffe und Tone, sandig, kiesig, tlw. steinige Beimengungen, sehr fest, nahezu trocken
S3.4	Sande / Kiese (GWL 3)	Sande und Kiese mit auffälliger gradierter Schichtung (Fein- / Mittelsande im Hangenden, Grobsand / Kies im Liegenden), Hauptgrundwasserleiter im Bearbeitungsgebiet
S4	Geschiebemergel (Elster)	Schluffe und Tone, sandig, kiesig, tlw. steinige Beimengungen
S5	Grünsand	Basisschichten der ansonsten erodierten Rupelfolge, im Bearbeitungsgebiet als Lockergestein angetroffen, stark schluffige Feinsande von meist auffällig dunkelgrüner Farbe, lokale Bezeichnung „Magdeburger Sande“
S6	Festgestein	Ansprache aus Bohrgut nicht möglich, vermutlich Ton-, Mergel- bzw. Sandstein der Trias

Bezüglich der Verbreitung / Mächtigkeit der einzelnen Schichten wurde mit [U2] festgestellt:

- Die Schicht S1.1 (Mutterboden) wurde nur lokal begrenzt in den Randbereichen des Bearbeitungsgebiets angetroffen. Es ist davon auszugehen, dass der Bewuchs und der Oberboden vor der Anlage des derzeit existenten Bodenlagers abgetragen wurden.

- Die Schicht 1.2 (Auffüllung) umfasst im Wesentlichen das auf der Erweiterungsfläche angelegte Bodenlager aus den Aushubmassen vorangegangener Baumaßnahmen. Das Material ist inhomogen zusammengesetzt. Wechsel zwischen grobkörnigeren und feinkörnigeren Bereichen finden sowohl innerhalb einzelner Bohrungen als auch großflächig (zwischen unterschiedlichen Bohrungen) statt. Die Mächtigkeit der Schicht ist mit etwa 6 m im zentralen Teil der Erweiterungsfläche am größten.
- Die Schicht 2.1 beinhaltet vor allem den für die Magdeburger Börde und das Harzvorland charakteristischen Löss sowie Feinsande (Dünensande), in Wechsellagerung mit Tonen und Schluffen. Die Schicht ist bis auf wenige baulich bedingte Fehlstellen an der nördlichen und südlichen Grenze der Erweiterungsfläche flächendeckend verbreitet. Ihre Mächtigkeit variiert von wenigen Dezimetern bis zu 4 m.
- Die Schicht S2.2 wird aus bindigem Material (Schluffe und Tone) gebildet, die einen variablen Anteil rolligen Materials, vor allem Fein- und Mittelsand, vereinzelt auch gröbere Körnungen, aufweisen. Werden sie direkt von saalezeitlichem Geschiebemergel (S3.3) unterlagert, ist eine stratigraphische Trennung der Schichten teilweise schwierig. Durch ihre weichselzeitliche Genese weisen sie stark schwankende Mächtigkeiten, Wechsellagerungen vor allem mit der Schicht S2.3 und auch Verbreitungslücken auf. Die größte Mächtigkeit wird im zentralen Bereich der Erweiterungsfläche mit etwa 8 m (mit Zwischenlagen) erreicht.
- Die Schicht 2.3 sind Sande, vor allem Mittelsande, teilweise stark feinsandig, teilweise mit grobsandigen Anteilen. Sie weisen einen variablen schluffigen Anteil auf, sind aber i. A. eher schwach schluffig ausgebildet. Sie weisen vor allem an der westlichen Grenze im zentralen und südlichen Teil der Erweiterungsfläche große Mächtigkeiten von bis zu 12 m auf und haben dort großen Anteil am GWL 2. Ihre Mächtigkeit nimmt nach Norden und Osten i. A. schnell ab.
- Die Schicht S3.1 (Schluff, sandig) wurde im nordwestlichen Bereich der Erweiterungsfläche erkundet und weist eine abnehmende Mächtigkeit bis zum Auskeilen der Schicht Richtung Osten und Süden auf und ist dementsprechend nicht im gesamten Bearbeitungsgebiet vorhanden.
- In Schicht 3.2 sind schwach schluffige bis reine Sande, vor allen Fein- und Mittelsande zusammengefasst, die im Bearbeitungsgebiet zusammen mit den Schichten S2.2 und S2.3 im Wesentlichen den Grundwasserleiter GWL 2 bilden. Teilweise tritt die Schicht S3.2 nur als Linsen im Geschiebemergel S3.3 auf. Größere zusammenhängende Mächtigkeit von bis zu 12 m besitzt die Schicht vor allem im Nordwesten der Erweiterungsfläche.
- Die Schicht S3.3 (saalezeitlicher Geschiebemergel) enthält Zwischenlagen aus Sanden und besitzt variable Mächtigkeiten von 2 ... > 10 m. Die Oberfläche des Geschiebemergels wurde im Niveau von etwa +96 ... +106 m NHN erkundet. Seine Basis ist nahezu söhlig im Niveau +93 ... +97 m NHN ausgebildet.

- Schicht S3.4 (Sande / Kiese des GWL 3) weist eine konstante Mächtigkeit von etwa 14 ... 16 m auf.
- Die Schicht S4 (elsterzeitlicher Geschiebemergel) ist im Vergleich zu S3.3 etwas sandiger ausgebildet. Die Schicht weist eine relativ einheitliche Mächtigkeit von etwa 10 ... 14 m und nahezu horizontale Lagerung auf.
- Die Schicht S5 (Grünsand) ist mit etwa 0,7...1,4 m nur geringmächtig ausgebildet. Ihre Basis befindet sich etwa im Niveau +65 ... +68 m NHN.

## 5.2 Hydrologische Situation

Basierend auf den in [U2] realisierten Erkundungen sind die in Tabelle 5.2 charakterisierten Grundwasserleiter GWL 2 und GWL 3 im Bearbeitungsgebiet vorhanden.

Tabelle 5.2 Charakterisierung der im Bearbeitungsgebiet vorhandenen Grundwasserleiter

Grundwasserleiter	Zugehörige Baugrundsichten	Eigenschaften	Wasserstand [m NHN]	Innerjährliche Schwankungsbreite [m]
GWL 2	S2.2, S2.3, S3.1, S3.2	gemischtkörniges Material, geringe Durchlässigkeit, nicht flächig verbreitet	lediglich temporär und lokal wasserführend („Sandlin-sen“)	-
GWL 3	S3.4	Hauptgrundwasserleiter, gradierte Schichtung, Strömung NW-SO-gerichtet	ca. +86,7 ... +87,8 (Pegelganglinien Frühjahr 2015 bis Herbst 2021, [U1])	ca. 0,5 m

## 6 BERECHNUNGSRANDBEDINGUNGEN

### 6.1 Anforderungen an die Nachweisführung

Die im Rahmen von geotechnischen Planungen für Deponien zu erbringenden Nachweise zur Standsicherheit und zu den Verformungen sind in der GDA-Empfehlung E 2-1 - Geotechnische Planung für Deponien [U7] geregelt. Danach ist in Abhängigkeit vom Planungskonzept das Erfordernis der Nachweisführung unter Berücksichtigung der GDA-Empfehlungen E 2-6, E 2-7, E 2-13, E 2-19, E 2-21, E 2-23, E 2-24, E 2-25, E 2-26, E 2-29 und E 2-35 [U8] bis [U18] zu prüfen und umzusetzen.

Gemäß Vorgaben in E 2-6, E 2-7 und E 2-21 sind Standsicherheitsuntersuchungen zum Böschungs- und Grundbruch, zur Gleitsicherheit und zur Spreizsicherheit durchzuführen.

Es sind Setzungsberechnungen für die Deponiebasis und Setzungsabschätzungen für den Deponiekörper in Anlehnung an die Anforderungen in E 2-24 durchzuführen. Da im Erweiterungsabschnitt der Deponie Hängelsberge gemäß Vorgaben der DepV nur noch bodenähnliche Abfälle abgelagert werden dürfen, können Setzungsanteile aus chemisch-biologischen Umsetzungsprozessen vernachlässigt werden.

Der Verformungsnachweis für die mineralischen Abdichtungsschichten ist nach E 2-13 zu führen. Da die tatsächlich zum Einsatz kommenden Produkte bzw. min. Dichtungsmaterialien erst bei Ausführung feststehen wurden alternativ die Einwirkungen von Setzungen auf die Abdichtungsschichten durch Analyse und Bewertung von Krümmungsradien nach [U19] beurteilt.

Die Empfehlungen E 2-19, E 2-23, E 2-29 und E 2-35 befassen sich mit nicht bodenähnlichen Abfällen und sind für die Erweiterung der Deponie Hängelsberge nicht relevant. Für die Bewertung der, in den aktiven Deponiefeldern 1b, 2a und 2b vor 2005 abgelagerten nicht bodenähnlichen Abfälle, wurden in früheren Phasen verwendete projektspezifische Berechnungskennwerte genutzt.

Die Empfehlungen E 2-25 und E 2-26 waren nicht zu berücksichtigen, da keine Baugruben bzw. Schächte im Abfallkörper geplant sind.

Über die GDA-Empfehlungen hinaus wurden für die Standsicherheitsuntersuchungen und Verformungsprognosen die Normen DIN 1055 [U4], DIN-EN 1997-1 (EC 7) [U5] berücksichtigt. Die Setzungsberechnungen für die Deponiebasis und die Setzungsabschätzung für den Deponiekörper erfolgten mit numerischen Berechnungsverfahren. Die DIN 4019 [U6] zu analytischen Berechnungsverfahren war deshalb nicht anzuwenden.

## 6.2 Sicherheitskonzept

Vor dem Hintergrund der öffentlichen Nutzung der geplanten Deponieerweiterung erfolgen sämtliche Standsicherheitsuntersuchungen entsprechend der aktuell gültigen Normung, d.h. sämtliche Berechnungen werden nach dem Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte entsprechend EC 7 [U5] durchgeführt.

Die geotechnischen Kenngrößen (Reibungswinkel  $\varphi'$  und Kohäsion  $c'$ ) werden dabei mit Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_{\varphi'}$  bzw.  $\gamma_{c'}$  abgemindert. Gleichzeitig werden die äußeren Einwirkungen (ständige und veränderliche Lasten) durch entsprechende Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_G$  bzw.  $\gamma_Q$  erhöht. Das Ergebnis der geotechnischen Berechnung des Boden-Bauwerk-Systems ist als Ausnutzungsgrad  $\mu$  definiert. Die Standsicherheit ist gegeben bei Ausnutzungsgraden  $\mu_{max} \leq 1,00$ .

## 6.3 Bemessungssituationen und Teilsicherheitsbeiwerte

Gemäß EC 7 [U5] sind die geotechnischen Kenngrößen und Einwirkungen bei Böschungsbruchuntersuchungen im Grenzzustand GEO-3 (Verlust der Gesamtstandsicherheit) mit den in Tabelle 6.1 zusammengestellten Teilsicherheitsbeiwerten abzumindern bzw. zu erhöhen.

Tabelle 6.1 Teilsicherheitsbeiwerte für geotechnische Kenngrößen und Einwirkungen (Grenzzustand GEO-3 gemäß EC 7 [U5])

Teilsicherheitsbeiwert		Bemessungssituation (BS)		
		BS-P (ständig)	BS-T (vorübergehend)	BS-A (außergewöhnlich)
für Reibungsbeiwert $\tan \varphi'$	$\gamma_{\varphi'}$ [-]	1,25	1,15	1,10
für Kohäsion $c'$	$\gamma_{c'}$ [-]	1,25	1,15	1,10
für ständige Einwirkungen	$\gamma_G$ [-]	1,00	1,00	1,00
für ungünstige veränderliche Einwirkungen	$\gamma_Q$ [-]	1,30	1,20	1,00

## 6.4 Berechnungskennwerte

### 6.4.1 Kennwerte gewachsener Schichten

In Tabelle 6.2 sind die aus dem Baugrundgutachten [U2] und Erfahrungswerten abgeleiteten charakteristischen Werte der erkundeten Schichten zusammengefasst. Die Kennwerte des Festgesteins beruhen auf Erfahrungswerten.

Tabelle 6.2 Charakteristische Berechnungskennwerte des Baugrunds

Schicht		Wichte, erdfeucht	Wichte u. Auftrieb	Reibungs- winkel	Kohäsion	Steife- modul	Belas- tungs- situation
		$\gamma_k$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_k'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi_k'$ [°]	$c_k'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{s,k}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	
S1.2		21,0	12,0	25,0	5,0	} 6	Erstb.
S2.1		19,0	10,0	25,0	8,0		
S2.2		21,5	12,0	23,0	10,0		
S2.3		20,0	11,0	34,0	0,0		
S3.1		21,5	12,0	27,0	10,0	7	Erstb.
S3.2		17,0	9,5	32,0	0,0	13	Erstb.
S3.3		21,5	12,0	28,0	20,0	30	Wiederb.
S3.4 *		18,0	10,5	36,0	0,0	100	Wiederb.
						50	Wiederb.
S4		20,0	11,0	29,0	25,0	40	Wiederb.
S5		21,0	11,0	25,0	5,0	25	Wiederb.
S6		22,0	22,0	n.r.	n.r.	250	Wiederb.

**Anmerkungen:**

\* Aufgrund der Ergebnisse des SP-Tests wird in [U2] eine Teilung der Schicht vorgeschlagen, wobei das obere Drittel eine höhere Steifigkeit aufweist.

n.r. nicht relevant

Sämtliche Schichten unterhalb der S3.3 sowie die S3.3 selbst sind eiszeitlich vorbelastet. Für die eiszeitliche Überprägung kann von einer Last zwischen 600 und 800 kPa ausgegangen werden. Unter Berücksichtigung der geplanten Deponiehöhe von ca. 40 m ergibt sich die aufzubringende Last zu etwa 600 kPa, was einer Wiederbelastung der eiszeitlich bereits überprägten Schichten entspricht. Die entsprechenden Wiederbelastungsmoduli sind im Baugrundgutachten [U2] angegeben und werden für die nachfolgenden Berechnungen verwendet.

Für die nicht eiszeitlich vorbelasteten Schichten oberhalb der S3.3 werden Erstbelastungsmoduli verwendet. Die Schichten S1.2, S2.1, S2.2 und S2.3 werden für die Setzungsabschätzung zu einer gemeinsamen Schicht S1 + S2 zusammengefasst, siehe auch Abschnitt 9.2.3. Auf der sicheren Seite liegend wird für diese Schicht der minimale Steifigkeitswert der Einzelschichten (6 MN/m<sup>2</sup> in Schicht 2.1) aus [U2] verwendet.

Die Erstbelastungsmoduli der Schichten S3.1 und S3.2 werden konservativ mit 1/3 der im Baugrundgutachten [U2] angegebenen Wiederbelastungsmoduli angesetzt.

### 6.4.2 Kennwerte der geplanten Deponieelemente

Der Aufbau der Basis- und Oberflächenabdichtungssysteme ist wie in Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2 dargestellt geplant.

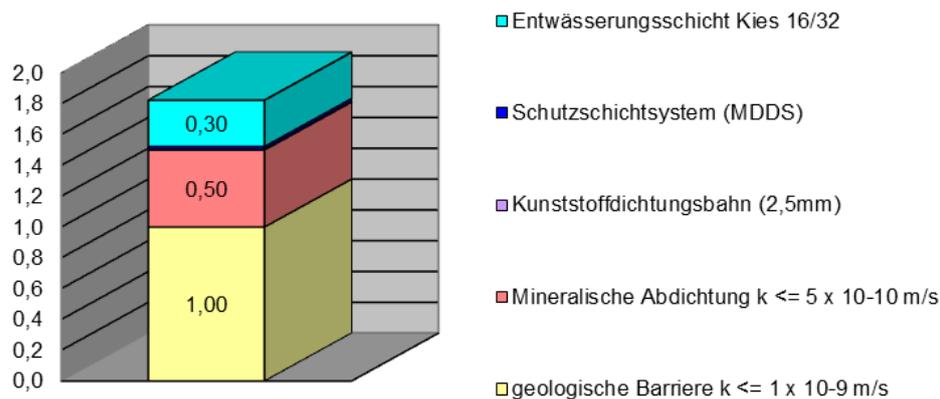


Abbildung 6.1 Skizze Systemaufbau Basisabdichtungssystem [U1]

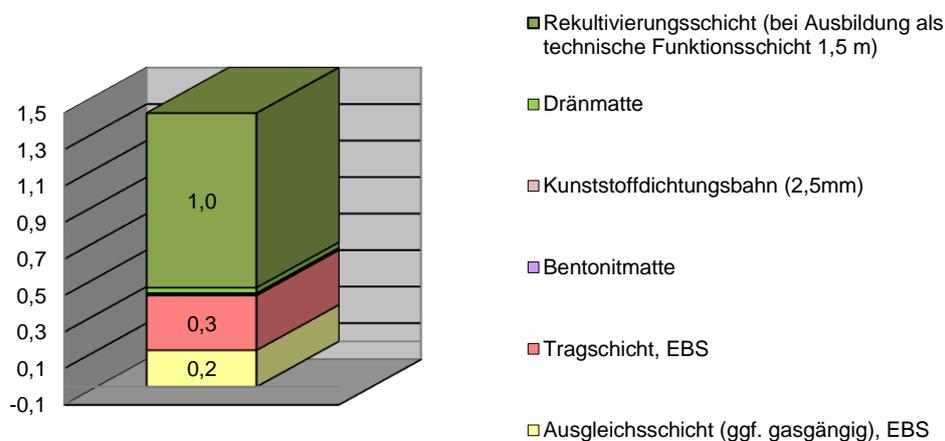


Abbildung 6.2 Skizze Systemaufbau Oberflächenabdichtungssystem [U1]

Für die Bestandteile der Abdichtungssysteme werden die in Tabelle 6.3 angegebenen Scherfestigkeitskennwerte angenommen. Außerdem wird eine Annahme zu den Festigkeitseigenschaften des Deponats entsprechend der in [U3] verwendeten Kennwerte getroffen.

Die mineralischen Komponenten der Basis- und Oberflächenabdeckung sind lagenweise verdichtet einzubauen. Basierend auf Erfahrungswerten kann dem lagenweise verdichteten

Material der Trag- und Ausgleichsschicht unterhalb der Oberflächenabdichtung ein Steifemodul von 15 MN/m<sup>2</sup> zugeordnet werden.

Zur Ablagerung sollen mineralische Abfälle kommen. Infolge der mineralischen Zusammensetzung und der zulässigen Gehalte an Organik von < 5 % ist das Deponiematerial als beständig gegenüber organisch-chemischen Veränderungen einzuordnen. Es werden keine maßgebenden Verformungen aus Umsetzungsprozessen organischer Substanz erwartet. Damit kann für das Verformungsverhalten von bodenähnlichen Abfällen ausgegangen werden. Die bodenmechanischen Eigenschaften bodenähnlicher mineralischer Abfälle weisen eine große Streubreite auf. In Anlehnung an [U4] wird ein minimaler Steifemodul von 10 MN/m<sup>2</sup> gesetzt.

Tabelle 6.3 Charakteristische Berechnungskennwerte der Abdichtungskomponenten und des Deponats

Schicht		Wichte, erdfeucht	Wichte u. Auftrieb	Reibungs- winkel	Kohäsion	Steife- modul
		$\gamma_k$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_k'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi_k'$ [°]	$c_k'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_{s,k}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
Entwässerungsschicht Kies		18	10	35	0	n.r
Mineralische Abdichtung		20	10	25	10	n.r
Geologische Barriere		20	10	25	10	n.r
Rekultivierungsschicht		17	9	22	5	n.r
Tragschicht		n.r	n.r	n.r	n.r	15
Ausgleichsschicht		20	10	30	0	15
Deponat		15	7	33	2	10

**Anmerkung:**

n.r. nicht relevant

Die Kunststoffdichtungsbahn (KDB) bildet eine mögliche Gleitfläche in den Abdichtungssystemen. Ihre Scherfestigkeitseigenschaften ergeben sich im Zusammenwirken mit der unter- und überlagernden Schicht und abhängig von der Beschaffenheit und Strukturierung der KDB. Die notwendige Scherfestigkeit der KDB wird im Ergebnis der Nachweise zur Standsicherheit der Böschungen und Gleitsicherheit der Oberflächenabdichtung ermittelt, siehe Abschnitte 7 und 8.

## 6.5 Lastannahmen

In den Böschungsbruchberechnungen für den Bau- und Endzustand der geplanten Baumaßnahmen sind Verkehrslasten zu berücksichtigen. Der Bauzustand umfasst dabei auch den regulären Deponiebetrieb in den Ausbaufeldern. Die Verkehrslasten resultieren aus der Anlieferung des Deponiegutes und dem Baustellenverkehr (Baugeräte, Anlieferung von Baustoffen). Sie werden auf den Bermen des Deponiekörpers und an der Böschungsoberkante der Baugrube angesetzt.

Die Verkehrslast wird in Form einer Ersatzflächenlast von 33,3 kN/m<sup>2</sup> berücksichtigt. Der Lastansatz umfasst Fahrzeuge bis zu einer Masse von etwa 60 t.

Im Endzustand erfolgt ein analoger Ansatz von Verkehrslasten auf den Bermen des abgedeckten Deponiekörpers. Eine zusätzliche Last wird auf den Böschungsfächen angesetzt, um anfallende Pflegearbeiten (Grasschnitt etc.) zu berücksichtigen. Die angesetzte Ersatzflächenlast beträgt 10 kN/m<sup>2</sup>.

## 7 BÖSCHUNGSBRUCHUNTERSUCHUNGEN

### 7.1 Berechnungsprogramm und -verfahren

Standsicherheitsberechnungen erfolgen mit dem Programm SLOPE/W (GeoStudio2020) nach dem Berechnungsverfahren „Morgenstern-Price“ (Lamellenverfahren). Das Verfahren wird in der Literatur als statisch einwandfreies Verfahren gewürdigt.

Maßgebend und berechnungsrelevant sind potenzielle Versagensmechanismen längs kreiszylindrischer Prüfflächen (KZP). Zur Ermittlung der Standsicherheit der Abdichtung auf der Deponieoberfläche im Endzustand wird das Böschungsversagen entlang vorgegebener ebener Gleitflächen (VG) untersucht.

Die Hydrologische Situation wurde entsprechend der Angaben in [U2] und Abschnitt 5.2 in den Berechnungen berücksichtigt.

Die Berechnungen erfolgten an den in Abschnitt 7.2 aufgeführten Schnitten. Die Schnittgeometrie einschließlich der Baugrundsichtung wurde dabei direkt in die Berechnungen übernommen.

### 7.2 Berechnungsschnitte

Für die Böschungsbruchberechnungen sind repräsentative Schnitte mit den für die Böschungsstandsicherheit ungünstigsten Randbedingungen (höchste Böschung im End-, Betriebs- und Bauzustand, besonders steile Böschungen, ungünstiger Baugrund etc.) zu wählen. Dabei wird von den in Tabelle 7.1 zusammengefassten geometrischen Randbedingungen ausgegangen.

Tabelle 7.1 Geometrische Randbedingungen der berechneten Böschungen

Böschung	Bermen	Generalneigung	Neigung
		[°]	Teilböschungen [°]
Böschung der Deponie im abgedeckten Endzustand	ja	1 : 4	1 : 3
Böschung der Deponie im Betriebszustand (aktiver Einbau)	ja	1 : 2,5	1 : 2
Böschung der Baugrube im Endzustand an West-, Ost- und Südgrenze der Erweiterungsfläche	nein	1 : 3	-
Böschung der Baugrube im Betriebszustand (Ausbaustufen 3, 4 und 5)	ja	1 : 2	1 : 1,5

In Tabelle 7.2 sind die gewählten Schnitte, die weiteren maßgebenden Randbedingungen und die berechneten Szenarien zusammengefasst. Die Lage der Schnitte ist in Anlage 1.2 dargestellt. Die Baugrundschnitte selbst enthält [U2].

Tabelle 7.2 Berechnungsschnitte und -szenarien

Schnitt	Auswahlkriterium	Berechnungsszenarien
WO2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• höchste Baugrubenwestböschung</li> <li>• höchste Deponieostböschung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauzustand: Westböschung der Baugrube (1 : 3) mit verschiedenen Lastkombinationen</li> <li>• Endzustand: Deponieostböschung (1 : 4 / 1 : 3), verschiedene Lastkombinationen</li> </ul>
WO4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• höchste Baugrubenostböschung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauzustand: Ostböschung der Baugrube (1 : 3), verschiedene Lasten</li> </ul>
NS2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• höchste Baugrubensüdböschung</li> <li>• höchste Deponieböschung im Betriebszustand</li> <li>• sehr variable Baugrundsichtung im Schnittverlauf</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauzustand: Südböschung der Baugrube (1 : 2 / 1 : 1,5) für Ausbaustufe 3, 4 und 5 mit verschiedenen Lastkombinationen</li> <li>• Betriebsbauzustand: Südböschung der Deponie (1 : 2,5 / 1 : 2) für Ausbaustufe 3, 4 und 5 mit verschiedenen Lastkombinationen</li> <li>• Endzustand: Südböschung der Deponie (1 : 4 / 1 : 3) mit verschiedenen Lastkombinationen</li> </ul>
NS3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• höchste Deponiesüdböschung im Endzustand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Endzustand: Südböschung (1 : 4 / 1 : 3) der Deponie</li> <li>• Endzustand: Ermittlung des erforderlichen Reibungswinkels in der OFA</li> </ul>

Für Berechnungen der Deponieböschung im Endzustand wurde jeweils das Versagen auf nur den Deponiekörper erfassenden Gleitkreisen (Standicherheit abhängig von Scherfestigkeit des Deponats) und auf Gleitkreisen untersucht, die durch Deponiekörper und Baugrund verlaufen (tiefgreifende Gleitfuge, Standicherheit abhängig von Scherfestigkeiten des Deponats und des Baugrundes).

Die im Schnitt WO2 berechnete Westböschung der Baugrube wird durch den Schnittverlauf leicht schräg geschnitten, siehe Anlage 1.2. Die im Berechnungsschnitt abgebildete Böschungsneigung ändert sich dadurch nur sehr geringfügig und hat auf die Aussagekraft der Berechnungen keine Auswirkung.

### 7.3 Berechnungsergebnisse

Aus den umfangreichen Berechnungen sind in Tabelle 7.2 die maßgebenden Szenarien mit den höchsten Ausnutzungsgraden  $\mu$  zusammengefasst. Außerdem sind Angaben zur Unterscheidung in Bauzustand (BZ) oder Endzustand (EZ), die Bemessungssituation gemäß Abschnitt 6.3, die berücksichtigten hydrologischen Randbedingungen und Verkehrslasten, sowie die berechnete Prüffläche (kreiszyllindrische Prüffläche – KZP bzw. Vorgegebene Gleitfläche – VG) enthalten. Die grafische Darstellung der aufgeführten Ergebnisse ist in Anlage 2 abgelegt.

Tabelle 7.3 Maßgebende Ausnutzungsgrade  $\mu$  der Böschungsbruchberechnungen

Schnitt	Bemessungssituation	Anlage 2 Blatt-Nr.	Böschung	Wasser	Lastkombination [kN/m <sup>2</sup> ]	Prüffläche	$\mu$
WO2	BZ, BS-T	1	Westböschung der Baugrube + Last	GWL 3, GWL 2	33,3	KZP	<b>0,57</b>
	EZ, BS-P	2	Deponieostböschung + Last	GWL 3	33,3 + 10	KZP	<b>0,72</b>
	EZ, BS-P	3	Deponieostböschung, tiefliegende Gleitfuge + Last	GWL 3	33,3 + 10	KZP	<b>0,44</b>
WO4	BZ, BS-T	4	Ostböschung des Aushubbereichs + Last	GWL 3, GWL 2	33,3	KZP	<b>0,57</b>
NS2	BZ, BS-T	5	Baugrubenböschung DA 3 + Last	GWL 3, GWL 2	33,3	KZP	<b>0,88</b>
	BZ, BS-T	6	Baugrubenböschung DA 4 + Last auf Istgelände	GWL 3, GWL 2	33,3	KZP	<b>0,95</b>
	BZ, BS-T	7	Baugrubenböschung DA 4 + Last auf 1. Aushubberme	GWL 3, GWL 2	33,3	KZP	<b>0,96</b>
	BZ, BS-T	8	Baugrubenböschung DA 4 + Last auf 2. Aushubberme	GWL 3, GWL 2	33,3	KZP	<b>0,87</b>
	BZ, BS-T	9	Baugrubenböschung DA 4 + Last auf 3. Aushubberme	GWL 3, GWL 2	33,3	KZP	<b>0,76</b>
	BZ, BS-T	10	Baugrubenböschung DA 5 + Last	GWL 3, GWL 2	33,3	KZP	<b>0,85</b>
	BZ, BS-T	11	Betriebsböschung der Deponie DA5, Last auf allen Bermen	GWL 3, GWL 2	33,3	KZP	<b>0,76</b>
	EZ, BS-P	12	Deponiesüdböschung + Last	GWL 3	33,3 + 10	KZP	<b>0,52</b>
	EZ, BS-P	13	Deponiesüdböschung, tiefgreifende Gleitfuge + Last	GWL 3, GWL 2	33,3 + 10	KZP	<b>0,29</b>
	EZ, BS-P	14	Südböschung der Deponie + Last	GWL 3	33,3 + 10	KZP	<b>0,60</b>
NS3	EZ, BS-P	15	Südböschung der Deponie, Abgleiten auf KDB mit $\varphi = 22^\circ$ , Last auf Berme und Böschung	GWL 3	33,3 + 10	VG	<b>0,94</b>
	EZ, BS-P	16	Südböschung der Deponie, tiefgreifende Gleitfuge + Last	GWL 3, GWL 2	33,3 + 10	KZP	<b>0,41</b>

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die gemäß [U1] geplante Bauausführung möglich ist. Das Standsicherheitskriterium  $\mu \leq 1,00$  wird in allen Berechnungen erfüllt. Wird es erforderlich von der vorgesehenen Ausführung abzuweichen, ist eine erneute Prüfung der Standsicherheit notwendig.

Im Schnitt NS3 wurde iterativ der erforderliche Mindestreibungswinkel für das System der Oberflächenabdichtung ermittelt. Dieser ist mit den in den Gleitsicherheitsnachweisen in Abschnitt 8.1 abzugleichen und der maßgebende Wert zu ermitteln, siehe Abschnitt 8.3.

## 8 SPREIZ- UND GLEITNACHWEISE

### 8.1 Oberflächenabdichtung

Der Nachweis der Gleitsicherheit für das System der Oberflächenabdichtung erfolgt nach [U9] für verschiedene Lastkombinationen. In Abbildung 8.1 sind die Eingangsparameter der Nachweisführung skizziert.

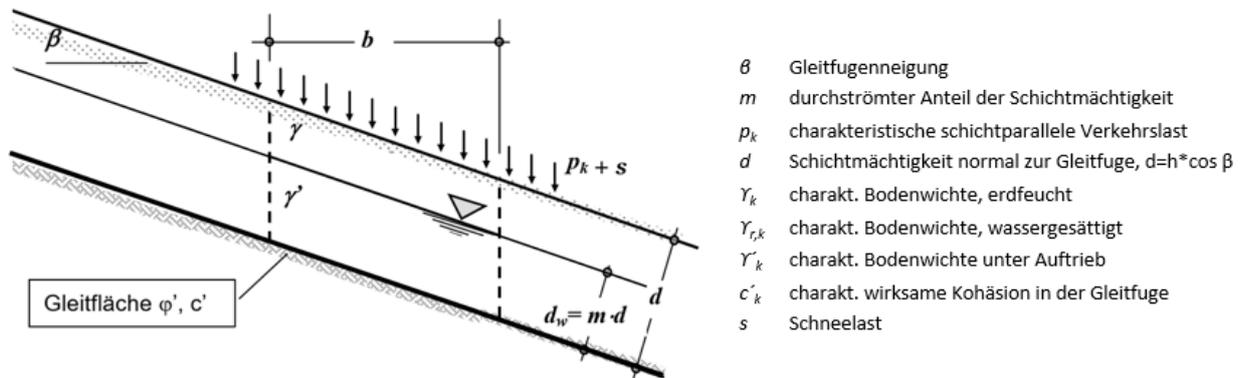


Abbildung 8.1 Schichtparalleles Gleiten eines teilweise durchströmten Abdichtungssystems nach [U9]

Eine Kohäsion in der Gleitfuge darf gemäß [U9] nur angenommen werden, wenn ihre Mobilisierbarkeit im Laborversuch nachgewiesen wird und sie im Feld in Bau- und Endzustand sichergestellt ist. Auf der sicheren Seite liegend wird in der Ermittlung der erforderlichen Reibungswinkel in der Gleitfuge eine mögliche Kohäsion vernachlässigt. Die Berechnung des Mindestreibungswinkels ist in Anlage 3 dargestellt. Gemäß [U9] ist eine ausreichende Gleitsicherheit gegeben, wenn ein Ausnutzungsgrad  $\mu \leq 1$  ermittelt wird. Die für den Nachweis bei verschiedenen Lastkombinationen erforderlichen Reibungswinkel sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst.

Tabelle 8.1 Erforderliche Reibungswinkel gemäß Gleitsicherheitsnachweis

Lastfall	Bemessungssituation	Einwirkungen	Reibungswinkel $\varphi'$ [°]
LF1	BS-P	Eigenlast	22,6
LF2	BS-P	Eigenlast, Schneelast	22,9
LF3	BS-T	Eigenlast, Verkehrslast 10 kN/m <sup>2</sup>	22,4
LF4	BS-T	Eigenlast, Schneelast	21,2
LF5	BS-T	Eigenlast, Verkehrslast 33,3 kN/m <sup>2</sup>	23,5
LF6	BS-T	Eigenlast + zeitweiser Einstau Reku-Schicht	22,1

Lastfall	Bemessungssituation	Einwirkungen	Reibungswinkel $\varphi'$ [°]
LF7	BS-A	Eigenlast, Verkehrslast 33,3 kN/m <sup>2</sup> , Teileinstau 10% der Reku-Schicht, standortspezifische Schneelast	20,9
LF8	BS-A	Eigenlast, Verkehrslast 10 kN/m <sup>2</sup> , Teileinstau 20% der Reku-Schicht, standortspezifische Schneelast	21,5
LF9	BS-A	Eigenlast, Verkehrslast 10 kN/m <sup>2</sup> , standortspezifische Schneelast	20,1
LF10	BS-A	Eigenlast, Verkehrslast 10 kN/m <sup>2</sup> , Teileinstau 20% der Reku-Schicht	21,6
LF11	BS-A	Eigenlast, Teileinstau 20% der Reku-Schicht	22,5

Aus Tabelle 8.1 ist ersichtlich, dass mit einem Mindestreibungswinkel von  $\varphi' = 24^\circ$  für alle Komponenten des Oberflächenabdichtungssystem die Gleitsicherheit gegeben ist.

Bei der Durchführung von Laborversuchen zur Bestimmung der Scherparameter zwischen Geokunststoffen und Boden bzw. zwei Geokunststoffen ist zu beachten, dass bei Einzelversuchen der Messwert gemäß [U9] zur Berücksichtigung der versuchstechnischen Unsicherheiten abgemindert werden muss, siehe Anlage 3.

## 8.2 Basisabdichtung

In einem abgeböschten Deponiekörper wirken auf der Deponiebasis Schubspannungen, die zu einer Spreizverformung der Deponiebasis führen können. Die Schubbeanspruchung muss vom Basisabdichtungssystem in den Untergrund abgeleitet werden, ohne die Standsicherheit der Deponie und Funktionsfähigkeit der Abdichtung zu gefährden [U12].

Die Nachweise zum Spreizen und Gleiten der Deponiebasis im Endzustand auf den Schichten und Bauteilen der Basisabdichtung können aufgrund der Ausführung der Deponie als Grubendeponie und der damit verbundenen unverschieblichen seitlichen Einspannung entfallen.

Die geplante Entwicklung der Deponie von Nord nach Süd bei lageweisem, sich über die gesamte West-Ost-Ausdehnung des Baufelds erstreckendem Einbau verhindert eine Verschiebung der Basisschichten in Richtung Osten und Westen auch während des Bau- bzw. Betriebszeitraums.

Eine Spreizverformung aufgrund der auftretenden Schubspannungen ist demnach lediglich im Betriebszustand möglich. Der Nachweis gemäß [U12] nach dem Verfahren nach *Brauns* erfolgt ebenfalls nach dem Teilsicherheitskonzept. Die Randbedingungen und Eingabewerte sind in Anlage 3.2 angegeben. Der Nachweis der Spreizsicherheit ist erfüllt, wenn gilt:

$$\mu = \frac{\tan \delta_{\text{erf},k}}{\tan \delta_{\text{vorh},k}} \leq 1$$

Als Wert für den vorhandenen Sohlreibungswinkel  $\delta_{\text{vorh}}$  ist dabei der geringste Reibungswinkel der in der Basisabdichtung enthaltenden Schichten anzusetzen. Dabei muss auch der Reibungsbeiwert der Kunststoffdichtungsbahn zu den angrenzenden unter- und überlagernden Schichten gemäß Abschnitt 6.4.2 berücksichtigt werden. Es wird ein Erfahrungswert von  $\delta_{\text{vorh}} = 18^\circ$  angesetzt, welcher den Einsatz einer glatten bzw. leicht strukturierten Oberfläche der Kunststoffdichtungsbahn berücksichtigt. Der Wert  $\delta_{\text{vorh}} = 18^\circ$  stellt verglichen mit den Scherfestigkeitsparametern aus Tabelle 6.3, Abschnitt 6.4.2 den maßgeblichen Sohlreibungswert dar.

Der erforderliche Sohlreibungswinkel wird in den Berechnungen ermittelt, siehe Anlage 3.2.

Der bei Ansatz eines Sohlreibungswinkels  $\delta_{\text{vorh}} = 18^\circ$  erreichte Ausnutzungsgrad beträgt

$$\mu = 0,81 \leq 1.$$

Der Nachweis ist somit erfüllt. Der Sohlreibungswinkel  $\delta_{\text{vorh}} = 18^\circ$  ist in allen Schichten und Grenzflächen zwischen Abdichtungskomponenten einzuhalten. Bei Verwendung von Materialien, deren Kennwerte von den für die Nachweisführung angesetzten abweichen ist die Spreizsicherheit erneut zu prüfen.

### 8.3 Maßgebende Anforderungen an die Scherfestigkeit

Zur Ausweisung der erforderlichen Scherfestigkeit werden die Ergebnisse der Böschungsbruchberechnungen auf vorgegebenen Gleitflächen im Oberflächenabdichtungssystem mit den Ergebnissen der Gleitsicherheitsberechnungen verglichen. Entscheidend ist der höchste berechnete Reibungswinkel.

Die Böschungsbruchberechnungen und Gleitsicherheitsnachweise ergaben erforderliche Reibungswinkel von:

$$\varphi'_{\text{erf},\text{Böschungsbruch}} = 22^\circ \quad \text{und} \quad \varphi'_{\text{erf},\text{Gleitsicherheit}} = 24^\circ$$

Damit ist in den Gleitsicherheitsnachweisen ermittelte Reibungswinkel  $\varphi' = 24^\circ$  für die Komponenten der Oberflächenabdichtung maßgebend.

Aus dem Nachweis der Spreizsicherheit für den Betriebs- und Bauzustand geht hervor, dass in der Deponiebasis ein Sohlreibungswinkel von  $\delta \geq 18^\circ$  einzuhalten ist.

## 9 SETZUNGSABSCHÄTZUNG BASISABDICHTUNG

### 9.1 Berechnungsverfahren

Die infolge einer Auflast  $\sigma$  in jeder Schicht  $i$  zu erwartenden Setzungen werden in Abhängigkeit der Schichtmächtigkeit  $h_i$  sowie des Steifemoduls der jeweiligen Schicht  $E_{S,i}$  entsprechend folgendem Zusammenhang berechnet:

$$S_i = \sigma \cdot \frac{h_i}{E_{S,i}}$$

Die Gesamtsetzung  $S$  ergibt sich durch Addition der Einzelsetzungen aller Schichten als  $\sum S_i$ .

Aufgrund der komplexen Schichtverhältnisse sowie der unsymmetrischen Geometrie der geplanten Deponie resultieren eine Vielzahl von Berechnungspunkten. Die Abschätzung der Setzungen der Basisabdichtung infolge der Deponieauflast erfolgt daher unter Nutzung des Programms GGU-SETTLE. Hier können durch mosaikartiges Zusammenfügen von Dreieckselementen jede beliebige Belastungsform nachgebildet werden. Das Steifigkeitsprofil des Bodens wird durch lineare Interpolation zwischen einzelnen Knotenpunkten programmintern ermittelt. Als Knotenpunkte dienen Schichtprofile (z.B. basierend auf einem Bohrprofil) mit zugehörigen Steifemoduli.

### 9.2 Berechnungsrandbedingungen (System)

#### 9.2.3 Steifigkeitsprofil

Dem für die Setzungsabschätzung verwendeten Steifigkeitsprofil liegen folgende Randbedingungen, Annahmen und Vereinfachungen zugrunde:

- Die Schichtenfolge für das Steifigkeitsprofil wurde aus den Kernbohrungen sowie vier Bestandspegeln (P4, P7, P9 und P10) abgeleitet. Insgesamt gehen damit 18 Ansatzpunkte als Stützstellen (Knoten) ins Modell ein. Die Lage der Knoten zeigt Anlage 4.1.
- Die Geländeoberkante des Schichtenmodells wurde im Niveau +103,5 m NHN gewählt. Dieses entspricht etwa dem höchsten Punkt der künftigen Deponiebasisfläche.
- Schichten oberhalb des Niveaus +103,5 m NHN sind damit für die aus der Schüttung der Deponie resultierenden Setzungen nicht relevant. Dies betrifft größtenteils die Schichten S1.2, S2.1, S2.2 und S2.3. Aufgrund der untergeordneten Relevanz dieser vier Schichten wurden sie zu einer Schicht S1 + S2 zusammengefasst und dieser die minimale Steifigkeit der Einzelschichten zugewiesen.

- Die Schichten S3.1, S3.2 und S3.3 kommen in der Schichtenabfolge der Kernbohrungen teilweise mehrfach – auch im regellosen Wechsel – vor, was eine Vereinfachung und Homogenisierung erforderlich machte. Geringmächtige Schichten wurden daher zu einem größeren Schichtpaket zusammengefasst bzw. zu benachbarten größeren Schichtpaketen hinzugerechnet.

Final ergibt sich damit die in Abbildung 9.1 dargestellte Schichtenfolge, wobei nicht an jedem Knoten tatsächlich alle Schichten vorhanden sind. Die zugehörigen Steifigkeitswerte enthält Tabelle 6.2 auf Seite 15. Aufgrund der geotechnischen Verhältnisse wird für die Setzungsabschätzung der gesamte Tiefenbereich bis knapp unterhalb der Felsoberkante berücksichtigt. Aus dem tieferliegenden Fels sind keine signifikanten Setzungen mehr zu erwarten.

Schicht	Bezeichnung
	S1 + S2
	S3.1
	S3.2
	S3.3
	S3.4 (1/3)
	S3.4 (2/3)
	S4
	S5
	S6

Abbildung 9.1 In der Setzungsabschätzung berücksichtigte Schichtenfolge

#### 9.2.4 Auflast

Der geplante Deponiekörper wurde durch 177 Punkte definiert. An den entsprechenden Knotenpunkten wurden jeweils das Basisniveau (entsprechend Anlage 1.4) sowie die aus der Mächtigkeit der Schüttung (OK Deponie entsprechend Anlage 1.3) resultierende Auflast angegeben. Aus den 177 Knotenpunkten resultieren 342 Dreieckselemente, die in die Abschätzung der Setzungen eingehen, siehe Anlage 4.1.

### 9.3 Berechnungsergebnisse

In Anlage 4.2 sind die zu erwartenden Setzungen als Isoflächen dargestellt. Es wird deutlich, dass im westlichen Bereich der Deponieerweiterungsfläche grundsätzlich höhere Setzungen zu erwarten sind als im östlichen Bereich. Dies begründet sich damit, dass im westlichen Bereich ein wesentlicher Anteil eiszeitlich nicht vorbelasteter Schichten unterhalb der geplanten Deponiebasis verbleibt.

Der größte Setzungsbetrag ist mit 58 cm im südwestlichen Bereich der Deponieerweiterungsfläche zu erwarten. Zum Rand der Deponie ist – korrelierend zur Verringerung der Depotmächtigkeit – ein deutlicher Rückgang der Setzungen zu erkennen.

Für die Funktionsfähigkeit der Basisabdichtung ist deren geringe Durchlässigkeit von entscheidender Bedeutung. Große Verformungen können durch Rissbildung in der Dichtungsschicht zu einer Erhöhung der Durchlässigkeit führen. Gemäß [U19] kann eine solche Rissbildung ausgeschlossen werden, wenn der zu erwartende Krümmungsradius den Wert von  $R = 200\text{ m}$  nicht unterschreitet.

Der zu erwartende Krümmungsradius wurde auf Basis der Isoflächendarstellung der Anlage 4.2 für relevante Bereiche des geplanten Deponiekörpers ermittelt. Er beträgt minimal 500 m im Anschlussbereich zur bestehenden Deponiefläche, siehe Abbildung 9.2. Die Funktionsfähigkeit der Basisabdichtung ist damit nachgewiesen.

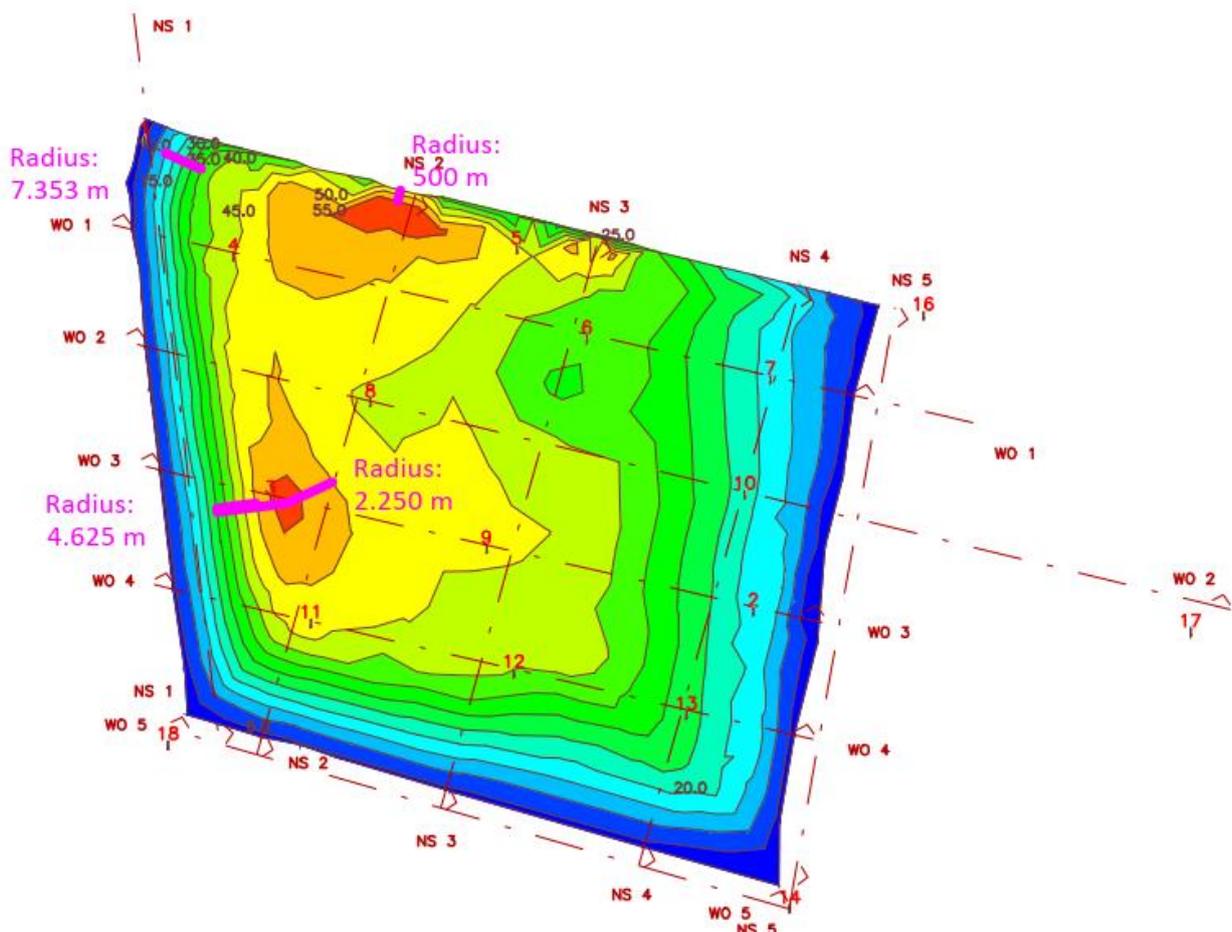


Abbildung 9.2 Ermittelte Krümmungsradien der Basisabdichtung

Anlage 4.3 enthält die Setzungsmulden für die relevanten Baugrundschnitte. Oberhalb des Geländeniveaus +103,5 m NHN ist die aus der Deponie resultierende Auflast und unterhalb des Niveaus +103,5 m NHN die tatsächliche Gründungsebene der Deponie dargestellt. Die Einschnittböschung in den bestehenden Boden ist daher nur unterhalb des Niveaus +103,5 m NHN realistisch abgebildet. Vor der Zielstellung einer Setzungsabschätzung der deutlich tiefer liegenden Sickerwasserdränagen ist diese Ungenauigkeit in der Modellbildung vernachlässigbar.

Der Verlauf der Schnitte WO 1 bis WO 4 entspricht dem Verlauf der Sickerwasserdränagen oberhalb der Basisabdichtung. Das derzeit geplante Gefälle der Sickerwasserdränagen muss nach Abschluss aller Setzungen noch vorhanden sein, um die Entwässerung auch perspektivisch zu gewährleisten. Basierend auf den in Anlage 4.3 ausgewiesenen Setzungsmulden sind in Tabelle 9.1 die in Längsrichtung der Sickerwasserdränagen zu erwartenden Setzungen und maximale Setzungsdifferenzen zusammengestellt.

Tabelle 9.1 Setzungen und Setzungsdifferenzen im Bereich der Sickerwasserdränagen oberhalb der Deponiebasisabdichtung

Schnitt	Max. Setzung [cm]	Setzung am Hochpunkt SW-Dränage [cm]	Setzung am Tiefpunkt SW-Dränage [cm]	Setzung am Schacht [cm]	Max. Setzungsdifferenz [cm]
WO 1	50,8	43,61	10,79	1,46	49,34
WO 2	48,9	45,16	16,78	1,84	47,06
WO 3	56,1	50,56	18,56	2,40	53,70
WO 4	47,7	43,48	19,62	1,81	45,89

## 10 SETZUNGSABSCHÄTZUNG OBERFLÄCHENABDICHTUNG

Unter der berechtigten Annahme, dass die Setzungen im Deponieuntergrund mit der Herstellung der Oberflächenabdichtung (OFA) weitgehend abgeschlossen sind, können Setzungen der OFA nur noch aus dem Gewicht der oberhalb der Abdichtung aufgetragenen Rekultivierungsschicht resultieren. Gemäß Abbildung 6.2 (Seite 16) ist diese 1 m mächtig. Unter Berücksichtigung der Wichte des Rekultivierungsmaterials von  $17 \text{ kN/m}^3$  sowie eines geringfügigen Zuschlages für KDB, Drän- und Bentonitmatte ergibt sich eine Auflast  $\sigma_s$  von  $18 \text{ kN/m}^2$  auf der Dichtschicht.

Diese Auflast verursacht Setzungen in allen nicht gewachsenen Schichten unterhalb der Dichtung. Hierzu zählen:

- Tragschicht,
- Gasdrän- und Ausgleichsschicht sowie
- Deponiekörper.

Entsprechend des in Abschnitt 9.1 beschriebenen analytischen Zusammenhangs sind durch das Aufbringen der 1 m mächtigen Rekultivierungsschicht im Bereich der Oberflächenabdichtung max. Setzungen von 6,8 cm (am Deponiehochpunkt) zu erwarten, siehe Anlage 5.

Zur Ableitung der sich ergebenden Krümmungsradien wurde die Setzungsabschätzung an mehreren Stützstellen entlang von 5 Profilschnitten geführt. Die Lage der Profile ist in Abbildung 10.1 dargestellt. Die Ergebnisse enthält ebenfalls Anlage 5. Der minimale Krümmungsradius beträgt demnach 673 m (Station 15 ... 19 im Nordwestbereich). Der laut [U19] zulässige Wert von 200 m ist damit überall eingehalten.

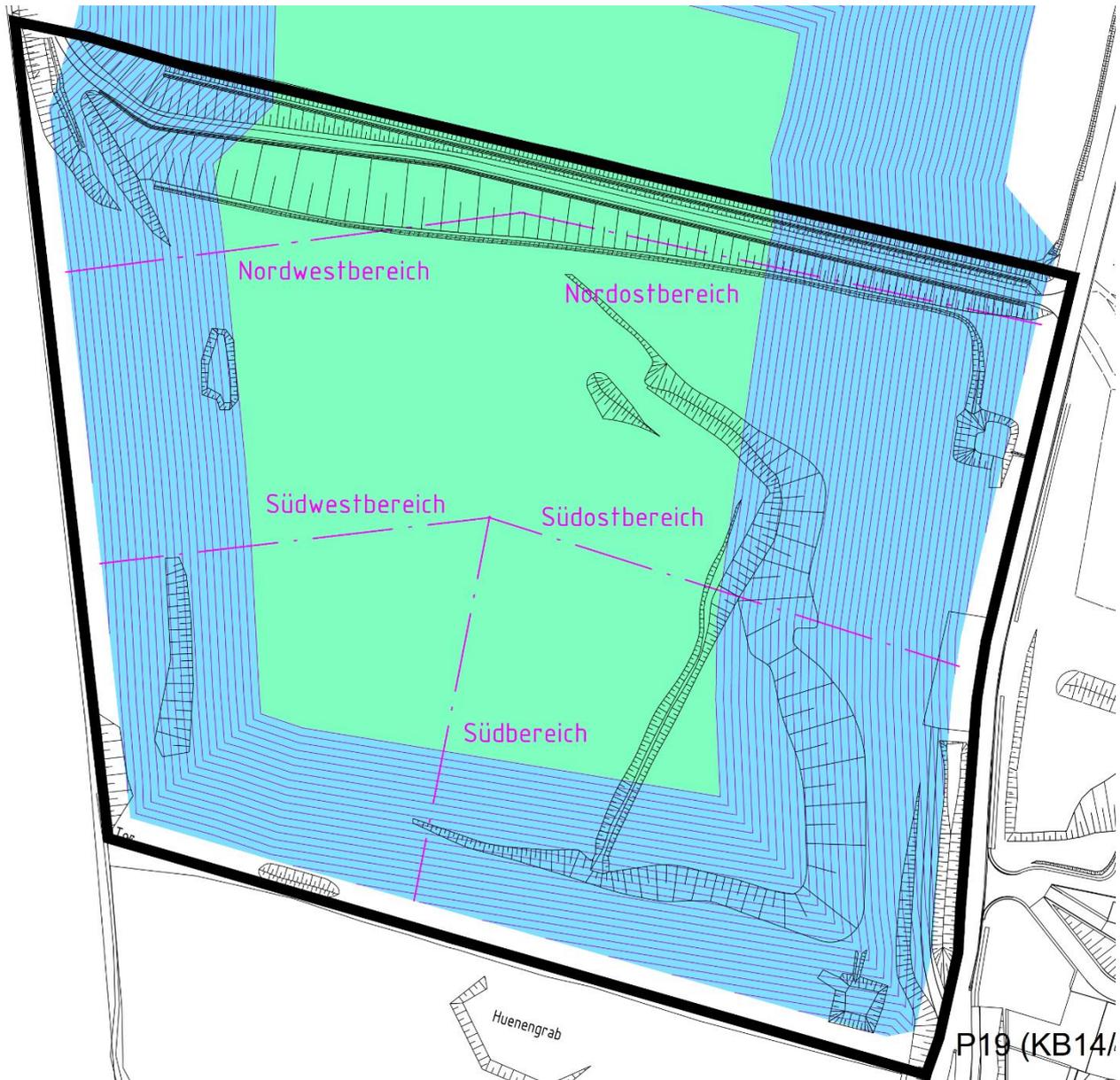


Abbildung 10.1 Lage der für die Krümmung der Oberflächenabdichtung untersuchten Profilschnitte

## 11 ZUSAMMENFASSUNG

In den Böschungsbruchberechnungen zur geplanten Ausführung des Bau-, Betriebs- und Endzustands werden keine Standsicherheitsdefizite festgestellt.

Durch die Bauweise der geplanten Deponie (Grubendeponie) und die geplante Bauausführung (auf ganzer W-O-Ausdehnung in N-S-Richtung voranschreitender Einbau) wird das Spreizen und Gleiten der Deponiebasisschichten im Endzustand verhindert. Aus dem Nachweis der Spreizsicherheit für den Bau- und Betriebszustand wurde ein notwendiger Sohlreibungswinkel von  $\delta \geq 18^\circ$  ermittelt. Dieser ist in allen Schichten der Basisabdichtung und den Grenzflächen der Abdichtungskomponenten einzuhalten und durch geeignete Verfahren nachzuweisen.

Die Gleitsicherheitsberechnungen der Oberflächenabdichtung ermöglichen im Vergleich mit den Böschungsbruchberechnungen die Ausweisung eines Mindestreibungswinkels, der für die Dimensionierung der Kunststoffdichtungsbahn und der angrenzenden Bodenbaustoffe bzw. geosynthetischen Bauteile maßgebend ist. Dieser beträgt  $\varphi'_{\text{eff}} = 24^\circ$ . Dieser muss bei der Planung berücksichtigt werden und ist durch geeignete Verfahren nachzuweisen.

Aus der Setzungsabschätzung geht hervor, dass keine Setzungsbeträge zu erwarten sind, die Schäden an der Basis- oder der Oberflächenabdichtung verursachen könnten. Die Planung der Sickerwasserfassung ist unter Berücksichtigung der ermittelten Setzungsbeträge zu überprüfen, um das erforderliche Gefälle nach Abschluss der Setzungen sicher zu stellen.

Wird es erforderlich von der vorgesehenen Ausführung abzuweichen, ist eine erneute Prüfung der Standsicherheit und Setzungen notwendig.

CDM Smith Consult GmbH  
August 2023

i.V.   
Dipl.-Ing. Grit Renker

erstellt:

i.A.   
Martin Lehmann M.Sc.

i.A.   
Dipl.-Ing. Sabine Metzker