



Boden und Altlasten

DDB 17 0393

26.03.2021

Nachtrag zur Standsicherheitsuntersuchung vom 29.01.2021

Setzungsbetrachtung zur Planumsauffüllung

Errichtung und Betrieb einer Deponie der Deponieklasse 0 nach DepV im Tontagebau Herzfelde

HKV Herzfelder Kreislaufwirtschafts- und Verwertungs GmbH

Strausberger Straße 8h
15378 Rüdersdorf OT Herzfelde

Tel.: 033434 43124

E-Mail: info@hkv-umwelt.de

HKV
Herzfelder Kreislaufwirtschafts-
und Verwertungs GmbH

Nachtrag zur Standsicherheitsuntersuchung vom 29.01.2021

Setzungsbetrachtung zur Planumsauffüllung

Objekt Tontagebau Herzfelde
Errichtung und Betrieb einer Deponie der Klasse 0 nach DepV

Lage Bundesland Brandenburg
Landkreis Märkisch-Oderland
Rüdersdorf bei Berlin, OT Herzfelde

Auftraggeber HKV Herzfelder Kreislaufwirtschafts- und Verwertungs- GmbH
Strausberger Straße 8h
15378 Rüdersdorf, OT Herzfelde

Auftragnehmer G.U.B. Ingenieur AG
Niederlassung Dresden
Glacisstraße 2, 01099 Dresden
Telefon 0049 351 658778-0
Telefax 0049 351 658778-30
E-Mail info@gub-dresden.de
Internet www.gub-ing.de

Bearbeiter Dr. rer. nat. Conny Zeeb
Dipl.-Ing. Wiebke Weber

Projekt-Nr. DDB 17 0393

Datum 26.03.2021



Dr. C. Zeeb
Bearbeiter



Dr. sc. agr. Dietmar Meyer
Projektleiter



Dipl.-Ing. W. Weber
Bearbeiterin

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Deckblatt	
Titelblatt	
Inhaltsverzeichnis	
Abbildungsverzeichnis	
Tabellenverzeichnis	
Anlagenverzeichnis	
1	
Veranlassung und Aufgabenstellung	6
2	
Arbeitsunterlagen	7
3	
Grundlagen der Bearbeitung	9
3.1	9
Standortsituation	
3.2	9
Feld- und Laboruntersuchungen	
3.3	13
Ableitung der Kenngröße E_s für Setzungsbetrachtung	
4	
Untersuchungen zur Setzung und Verformung der Planumsauffüllung	17
4.1	17
Aufgabenstellung	
4.2	17
Modellverhältnisse	
4.2.1	17
Programmsoftware	
4.2.2	18
Bodenverhältnisse	
4.2.3	18
Methodik der Modellierung	
4.3	19
Ergebnisse	
4.3.1	19
Querschnitt D - D'	
4.3.2	20
Querschnitt E - E'	

4.3.3	Bewertung der Ergebnisse	20
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	22

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenstellung Lagerung zu Spitzenwiderstand q_c nach [8]	11
Tabelle 2:	Erkundungsergebnisse bezogen auf die Lagerungsverhältnisse	12
Tabelle 3:	Ableitung von Werten für den Elastizitätsmodul aus dem Spitzenwiderstand nach [6]	13
Tabelle 4:	Ableitung von E_s als Teufenmodell aus dem Spitzenwiderstand an DS 01/21	14
Tabelle 5:	Ableitung von E_s als Teufenmodell aus dem Spitzenwiderstand an DS 02/21	14
Tabelle 6:	Ableitung von E_s als Teufenmodell aus dem Spitzenwiderstand an DS 03/21	15
Tabelle 7:	Ableitung des E_s -Modells für Schnitt D-D'	15
Tabelle 8:	Ableitung des E_s -Modells für Schnitt E-E'	16

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1 Lageplan des Untersuchungsgebietes
mit Aufschlussansatzpunkten und Schnittspuren
M 1 : 1 000
- Anlage 2 Ergebnisdiagramme DS / Aufschlussprofile BK
Drucksondierungen DS 01/21 bis DS 03a/21
Kernbohrungen BK 01/21, BK 02/21, M 1 : 50
- Anlage 3 Geologische Schnitte
- Anlage 3.1 Geologischer Querschnitt D - D'
M 1 : 1 000
- Anlage 3.2 Geologischer Querschnitt E - E'
M 1 : 1 000
- Anlage 4 Berechnungsergebnisse zur Setzungsbetrachtung für die Planumsauffüllung
- Anlage 4.1 Schnitt D-D'
- Anlage 4.2 Schnitt E-E'

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die HKV Herzfelder Kreislaufwirtschafts- und Verwertungs GmbH (AG) beabsichtigt im Bereich des Tontagebaues Herzfelde - mit seinen Abbaufeldern Ost und West - eine Deponie der Klasse 0 nach DepV zu errichten und zu betreiben.

Hierzu liegt ein Planfeststellungsantrag zum Vorhaben mit Datum 26.03.2021 vor, in der auch die Standsicherheit der Deponieböschungen sowie die Verformung des Aufschüttkörpers sowie das Ausdrücken der herzustellenden geologischen Barriere untersucht und bewertet wurde.

Der Untergrund im Bereich der künftigen Deponie besteht aus Bänderschluft / Bänderton und Geschiebemergel. Beim Betreiben des Tontagebaues wurde der Bänderschluft / -ton abschnittsweise vollständig oder teilweise entfernt und durch Auffüllungen ersetzt. Bei diesem Material handelt es sich um Gemische aus Boden, Steine, Beton und Baggergut. Im Hangenden dieser Auffüllung soll die geologisch-technische Barriere für die künftige Deponie aus Bänderschluft / -ton mit einem Meter Mächtigkeit aufgebracht und im Anschluss daran die eigentliche Deponie in drei Bauabschnitte errichtet werden.

Neben den Standsicherheits- und Setzungsbetrachtungen zu Deponiekörper ist zusätzlich das Setzungsverhalten der Auffüllung unter der geologisch-technischen Barriere zu untersuchen. Diese Betrachtungen sind Bestandteil der hiermit vorliegenden Unterlage.

Die Setzungsbetrachtung zur Planumsauffüllung stellt einen Nachtrag zur Standsicherheitsuntersuchung vom 29.01.2021 [3] dar und Bestandteil des Planfeststellungsantrages für die DK 0-Deponie.

Werden Situationen festgestellt, für die sich mit der geplanten Kontur keine rechnerisch standsicheren Verhältnisse ergeben, werden entsprechende Vorgaben zum Erreichen standsicherer Verhältnisse aufgeführt.

Die erdstatischen Berechnungen erfolgen anhand maßgebender, konkreter geometrischer und geologischer Situationen, die aus den zur Verfügung gestellten geologischen Schnitten entnommen werden.

Alle Arbeitsunterlagen liegen beim Auftragnehmer vor und können auf Wunsch eingesehen werden.

2 **Arbeitsunterlagen**

- [1] Angebot zur Erarbeitung
 der Setzungsprognose zum geschütteten Deponieuntergrund = Planum
 Angebotsnummer DDB 170393/4 (A),
 einschließlich der Anpassungen vom 27.11.2020 und 28.01.2021
 G.U.B. Ingenieur AG, Niederlassung Dresden
 01.10.2020

- [2] Auftrag zur Erarbeitung
 der Setzungsprognose zum geschütteten Deponieuntergrund = Planum,
 einschließlich der Anpassungen vom 27.11.2020 und 28.01.2021
 Herzfelde, 07.10.2020

- [3] Standsicherheitsuntersuchung zur Entwurfs- und Genehmigungsplanung
 Errichtung und Betrieb einer Deponie Klasse 0 nach DepV im Tontagebau Herzfelde
 T 2.1 zum Planfeststellungsantrag
 G.U.B. Ingenieur AG, Niederlassung Dresden
 29.01.2021

- [4] Bestandsplan zum Auffüll- / Verfüllbereich, Stand 06.05.2020,
 einschließlich Absteckung der Bohr- / Sondierpunkte am 15.02.2021
 Vermessungs- und Abrechnungsbüro J. Leonhardt

- [5] Schichtenverzeichnis der Bohrungen BK 01 und BK 02,
 Diagramme der Drucksondierungen CPT 1, CPT 2, CPT 3, CPT 3a
 Bohr- und Geotechnik Nowak GmbH, Kelbra, OT Tilleda
 Februar 2021

- [6] Handbuch Eurocode 7
 Geotechnische Bemessung
 Band 2: Erkundung und Untersuchung
 Beuth Verlag GmbH, Berlin
 1. Auflage 2011

beinhaltet die Normen:

DIN EN 1997-2:2010-10

Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik
Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds

DIN EN 1997-2/NA:2010-12

Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter -
Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 2
Erkundung und Untersuchung des Baugrunds

DIN 4020: 2010-12

Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke -
Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2

[7] FLAC3D Version 7.00.134
Itasca Consulting Group, Inc. 2019

[8] PRINZ:
Abriss der Ingenieurgeologie
Enke-Verlag, 1997

3 Grundlagen der Bearbeitung

3.1 Standortsituation

Die vorgesehene Deponie soll in drei Bauabschnitten auf einem Gelände angelegt werden, dass in seinem Planum aus gewachsenen Böden (Bauabschnitt 2) und aus aufgefüllten Massen Bauabschnitte 1 und 3) besteht.

Im Vorfeld des eigentlichen Deponiekörperaufbaues ist die geologisch-technische Barriere anzulegen. Hierfür wird zum jetzigen Zeitpunkt das vorhandene Restloch Herzfelde Ost des Tontagebaus Herzfelde auf der Grundlage des bergrechtlich zugelassenen Abschlussbetriebsplans (ABP) verfüllt bzw. teilverfüllt. Als Verfüllmaterial werden die mit dem ABP zugelassenen gering belasteten bzw. unbelasteten mineralischen Baurestmassen und Bodenaushub der Einbauklassen Z0 und Z1.1 verwendet.

Für die weiteren Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die Auffüllung und das Deponat einen gemischtbindigen Grundcharakter aufweisen. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass es lokal auch rein rollige Partien geben wird.

Die derzeitigen Verhältnisse können dem Lageplan in Anlage 1 entnommen werden.

Mit [3] liegt die Standsicherheits- und Setzungsbetrachtung zum eigentlichen Deponiekörper vor. In einem zweiten Schritt wird nunmehr die sich mit dem Deponiekörperaufbau einstellenden Setzung der Auffüllung im Planum des Deponiekörpers bzw. der geologisch-technischen Barriere betrachtet. Diese betrachten die Verformungen der Rückverfüll- und Auffüllmassen sowie des Deponiekörpers aus deren Konsolidation.

3.2 Feld- und Laboruntersuchungen

- Vorbemerkungen

In der bisherigen Standsicherheitsuntersuchung zur Errichtung der Deponie [3] wurden ingenieurtechnologisch plausible Kenngrößen und Rechenwerte für die Auffüllung verwendet, da zum aufgefüllten bzw. gekippten und noch zu verkippenden Material liegen keine näheren Angaben vor.

Für die Betrachtungen der zu erwartenden Setzungen der eigentlichen Auffüllung unter der geologisch-technischen Barriere (nachfolgend als Planumsauffüllung bezeichnet) wurden direkte und indirekte Aufschlüsse zur Ermittlung der Lagerungs- und Tragfähigkeitsverhältnisse der aufgefüllten Massen ausgeführt.

- **Felduntersuchungen**

Im Vorfeld Setzungsbetrachtungen wurden Drucksondierungen (DS 01/21 bis DS 03/21, DS 3a/21) ausgeführt, um Angaben zu den Lagerungsverhältnissen und der Zusammensetzung der Auffüllung zu erhalten.

Zudem wurden zwei Kernbohrungen (BK 01/21, BK 02/21) niedergebracht, um Angaben zum Material und dem Schichtenaufbau innerhalb der Auffüllung zu erhalten bzw. um den mit den Drucksondierungen ermittelten Schichtenaufbau zu verifizieren. Die Erkundungsteufe beträgt bei den Drucksondierungen 9 m bis 13 m und bei den Kernbohrungen 10 m.

Die Lage der Aufschlussansatzpunkte geht aus Anlage 1 hervor.

Alle im Rahmen der Erkundungsarbeiten hergestellten Aufschlüsse wurden nach Lage und Höhe durch das Vermessungs- und Abrechnungsbüro Leonhardt vermessungstechnisch erfasst [4].

Die Einweisung und geologisch-geotechnische Betreuung der Erkundungsarbeiten wurde durch den Auftragnehmer ausgeführt. Die Lage der Ansatzpunkte und die Art der Erkundung wurde unter Beachtung der örtlichen Gegebenheiten durch AG und AN festgelegt.

Das Niederbringen und die Aufzeichnung der Drucksondiererergebnisse erfolgte nach DIN EN 22476-1 (2013). Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte in den Anlagen 2.1 bis 2.3. Die Bemusterung und Klassifikation des Bohrgutes erfolgten nach DIN EN ISO 14688-1:2013-12. Auf dieser Grundlage wurden, die in den Anlagen 2.4 und 2.5 dargestellten Aufschlussprofile erstellt.

Die erkundete Schichtung wurde in die geologischen Schnitte D-D' und E-E' in Anlage 3 übernommen, die aus [3] übernommen wurden. Da es sich bei den Aufschlüssen nur um punktuelle Aufschlüsse handelt, gilt der erbohrte/sondierte Schichtenverlauf nur für die Ansatzpunkte. Der dazwischenliegende Bereich wurde ingenieurgeologisch plausibel interpoliert.

Die Lage der Schnittspurenverläufe innerhalb des Bearbeitungsgebietes geht ebenfalls aus Anlage 1 hervor.

- **Erkundungsergebnisse**

Anhand des Bohrgutes aus BK 01/21 und BK 02/21 wurde die Auffüllung bis zu einer Teufe von 7 m unter GOK (BK 02/21 = +41,73 m NHN) bzw. 7,5 m unter GOK (BK 01/21 = +41,38 m NHN) ermittelt. Die Auffüllung in BK 01/21 wurde als schluffiger, kiesiger Sand bis hin zu sandigem, kiesigen Schluff mit teilweise vorhandenen Ziegelbruchstückchen angesprochen. Sie ist in ihrer Gesamtheit gemischtbindiger als die Auffüllung in BK 02/21. Diese wurden durchgängig als Sand mit unterschiedlichen Anteilen an Kies, Schluff und Ton in den Nebengemengeanteilen.

Bei der Einteilung der Auffüllung nach Bodengruppen ist diese in BK 01/21 als Bodengruppen SU / SU* / UL und somit als Sand-Schluff-Gemische und leichtplastischer Schluff einzuordnen. In BK 02/21 hingegen ist die Auffüllung den Bodengruppen SW / SE / SU / SU* zuzuordnen und somit als weit- und enggestufte Sande sowie Sand-Schluff-Gemische zu bezeichnen.

Die Konsistenz der gemischtbindigen Auffüllung reicht von weich bis steif bis hinzu halbfest. Dies belegen die an BK 02/21 gemessenen Ergebnisse mit der Standart-Sonde (SPT). Die Schlagzahlen auf 10 cm Eindringtiefe der Standart-Sonde in der Auffüllung reichen von $N_{30} = 4$ bis 24.

Ab 7,0 m bzw. 7,5 m wurde Gewachsenes erbohrt. Hierbei handelt es sich um schwach organischen Schluff in BK 01/21 der Bodengruppe UL (= leichtplastischer Schluff) in steifer bis halbfester Konsistenz bzw. um stark schluffigen, schwach sandigen Ton und um organischen Ton / Schluff der Bodengruppe TM bzw. UM-TM (= mittelplastischer Ton bzw. mittelplastischer Schluff) in weicher bis steifer Konsistenz. Dies belegen auch die an BK 02/21 gemessenen Ergebnisse des SPT. Die Schlagzahlen auf 10 cm Eindringtiefe der Standart-Sonde im gewachsenen Boden reichen von $N_{30} = 4$ bis $N_{30} = 14$, lokal bis $N_{30} = 21$.

Die in unmittelbarer Nähe zu beiden Bohrungen ausgeführten Drucksondierungen DS 01/21 und DS 02/21, wie auch die südlich gelegene Drucksondierung DS 03/21 weisen nahezu einheitliche Verhältnisse auf und spiegeln die Ergebnisse aus dem Bohrgut wider.

Bei der Erkundung wurden nur mit dem Aufschluss BK 01/21 Wasser angeschnitten. Dies erfolgt in 5,45 m unter GOK (= +43,43 m NHN). Nach Abschluss der Bohrung wurde der Ruhewasserstand 7,35 m unter GOK (= +41,53 m NHN) registriert. Anhand der Verhältnisse vor Ort wird eingeschätzt, dass es sich beim angeschnittenen Wasser um Schichtenwasser handelt.

Anhand der Drucksondierergebnisse wurden die Auffüllung und das Gewachsene wie folgt bewertet.

Die ausgeführten drei Drucksondierungen besitzen eine Erkundungstiefe von 9 m bis 13 m.

Ihre Ergebnisse sind in den Anlagen 2.1 bis 2.3 dargestellt. Danach zeigen sich für die Auffüllung Reibungsverhältnisse von $R_f \geq 1,5$, was für gemischtbindiges / bindiges Material spricht und Abschnitte mit $R_f < 1,5$, was für rolliges Material steht.

Anhand der Spitzenwiderstände der ausgeführten Drucksondierungen wird gleichfalls auf die Konsistenz der gemischtbindigen / bindigen Materialbereiche und auf die Lagerungsdichte der rolligen bzw. nichtbindigen Materialbereiche geschlossen. Unter Berücksichtigung der nachfolgend tabellarisch aufgeführten Angaben nach [8] werden die erkundeten Materialbereich hinsichtlich der Lagerungsverhältnisse eingeordnet.

Tabelle 1: Zusammenstellung Lagerung zu Spitzenwiderstand q_c nach [8]

Lagerung	Spitzenwiderstand q_c in MN/m ²	Lagerung	Spitzenwiderstand q_c in MN/m ²
locker (l)	< 5,0	weich (w)	1,0 bis 1,5
mitteldicht (md)	5,0 bis 7,5 / 10	steif (st)	1,5 bis 2,0
dicht (d)	7,5 bis 18 / 20	halbfest (hf)	2,0 bis 5,0
sehr dicht (sd)	> 18 / 20	fest (f)	> 5,0

Tabelle 2: Erkundungsergebnisse bezogen auf die Lagerungsverhältnisse

DS 01/21			DS 02/21			DS 03/21		
Teufe	q _c	Lagerung / Konsis.	Teufe	q _c	Lagerung / Konsis.	Teufe	q _c	Lagerung / Konsis.
in m u. GOK	in MN/m ²		in m u. GOK	in MN/m ²		in m u. GOK	in MN/m ²	
1,2	7,5	md	1,75	4,0 bis 10,0	l bis d	1,75	1,25	st
2,0	31,0	sd	2,25	30,0	f	4,0	0,8 bis 3,25; danach 0,5	l / w
4,8	8,5 bis 15,0	d	7,0	1,8 bis 2,3	l / st	4,75	15,0	d
7,5	2,0 bis 7,0	st bis hf	10,0 (ET)	1,25 bis 2,0	w bis st	6,25	2,0	st bis hf
13,0 (ET)	2,0 bis 3,2	st bis hf	-	-		7,25	20,0	d
-	-	-	-	-	-	9,0 (ET)	6,0 bis 8,0; danach 2,5	md bis 8,0; danach st bis hf

ET = Endteufe des Aufschlusses

Zusammengefasst ist festzustellen, dass die Auffüllung unterschiedliche Lagerungsverhältnisse und der gewachsene Untergrund vergleichsweise einheitliche Lagerungsverhältnisse aufweist.

- Laboruntersuchungen

Aus den mit BK 01/21 und BK 02/21 erbohrten Auffüllungen und dem darunter anstehenden gewachsenen Material wurden gestörte Bodenproben entnommen und verschiedene bodenphysikalische Laboruntersuchungen durchgeführt, um charakteristische Eigenschaften der Materialien zu bestimmen. Es wurden in erster Linie Korngrößenverteilungen ermittelt.

Die Auffüllungen wurde auf der gesamte Erkundungsteufe von 7,5 m (BK 01/21) bzw. 7,0 m (BK 02/21) beprobt. An vier Einzelproben wurden Korngrößenverteilung ermittelt, an zwei Proben zudem Konsistenzgrenzen bestimmt und der Glühverlust ermittelt.

Die untersuchte Auffüllung aus (Bodenaushub) wurde als Fein- und Mittelsand mit unterschiedlichem Nebengemengeanteilen bestimmt. Der Anteil am Feinkorn (FKA) < 0,063 mm beträgt 9,4 % (D5 von BK 02/21) bis 25,2 % (D3 von BK 02/21) und der Anteil > 2,0 mm 2,0 % (D7 von BK

01/21) bis 19,4 % (D3 von BK 01/21). Die Auffüllung kann der Bodengruppe SU (Sand-Schluff-Gemisch) bzw. SU* (Schluff-Sand-Gemische) zugeordnet werden. Die Ungleichförmigkeitszahl schwankt zwischen $C_u = 3,88$ und 58,91.

Der Durchlässigkeitsbeiwert reicht von $1,93 \times 10^{-6}$ m/s bis $3,62 \times 10^{-5}$ m/s.

Der an der Basis der Auffüllung vorhandene gewachsene Boden wurde nach der Korngrößenverteilung als schwach organischer Ton (D9 von BK 01/21) und stark schluffiger, schwach sandiger und organischer Ton (D) von BK 02/21) klassifiziert und der Bodengruppe UL und TM (leichtplastischer Schluff und mittelplastischer Ton) zugeordnet. Der Anteil am Feinkorn (FKA) < 0,063 mm beträgt 94,2 % bzw. 97,8 % und der Anteil > 2,0 mm 0,1 %.

Nach der Bestimmung der Konsistenzgrenzen weisen beide Proben eine Konsistenzzahl I_c von 0,70 (BK 01/21) bzw. 0,61 (BK 02/21) auf, was eine Einstufung zur Konsistenz weich bedeutet. Der Glühverlust gibt eine Auskunft über die organischen Beimengungen. Er beträgt $V_{gl} = 2,86$ % bzw. 4,03 % und liegt damit in dem für anorganische Böden typischen Bereich von < 5 %.

Der Anlage 5 sind die Laborergebnisse zusammengefasst beigefügt.

3.3 Ableitung der Kenngröße E_s für Setzungsbetrachtung

Anhand der mit den Drucksondierungen DS 01/21 bis DS 03/21 gemessenen Spitzenwiderstände wurden nach [6] die entsprechenden Ableitungen zum Elastizitätsmodul geführt, die in den weiteren Setzungsbetrachtungen zum Ansatz kommen. Basis der Betrachtungen ist die nachfolgende Tabelle aus [6].

Tabelle 3: Ableitung von Werten für den Elastizitätsmodul aus dem Spitzenwiderstand nach [6]

Spitzenwiderstand q_c in MN/m ²	Bezogene Lagerungsdichte I_D	Elastizitätsmodul E_s in MN/m ²
0,0 - 2,5	sehr locker (sl)	< 10,0
2,5 - 5,0	locker (l)	10 bis 20
5,0 - 10,0	mitteldicht (md)	20 bis 30
10,0 - 20,0	dicht (d)	30 bis 60
> 20,0	sehr dicht (sd)	60 bis 90

Nachfolgend werden die drei Drucksondierungen einzeln betrachtet.

DS 01/21 und DS 02/21 liegen im Bereich des Schnittes D - D', der den nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes darstellt.

Der Schnitt D - D' repräsentiert den überwiegenden Teil des Bereiches, der bis zum Planum der künftigen geologisch-technischen Barriere aufzufüllen ist.

Tabelle 4: Ableitung von E_s als Teufenmodell aus dem Spitzenwiderstand an DS 01/21

Teufe in m u. GOK ¹⁾	Spitzenwiderstand q_c in MN/m ²	Elastizitätsmodul E_s in MN/m ²
1,2	7,5	15
2,0	31,0	60
3,0	14,0	28
4,0	8,5	17
4,8	15,0	30
7,5	2,0 bis 7,0	10
8,6	2,0	10
13,0	3,2	15

¹⁾ GOK = Ansatzhöhe des Aufschlusspunktes

Tabelle 5: Ableitung von E_s als Teufenmodell aus dem Spitzenwiderstand an DS 02/21

Teufe in m u. GOK ¹⁾	Spitzenwiderstand q_c in MN/m ²	Elastizitätsmodul E_s in MN/m ²
0,75	4,0	8
1,75	10,0	20
2,25	30,0	60
4,5	2,3	10
5,75	1,8	10
7,0	2,0	5
8,0	2,0	5
10,0	1,25	8

¹⁾ GOK = Ansatzhöhe des Aufschlusspunktes

DS 03/21 liegt im Bereich des Schnittes E - E', der den südlichen Teil des Untersuchungsgebietes repräsentiert.

Tabelle 6: Ableitung von E_s als Teufenmodell aus dem Spitzenwiderstand an DS 03/21

Teufe in m u. GOK ¹⁾	Spitzenwiderstand q_c in MN/m ²	Elastizitätsmodul E_s in MN/m ²
1,75	1,25	4
3,25	0,8	2
4,0	0,5	3
4,75	15,0	45
6,25	2,0	10
7,25	20,0	60
8,0	6,0	12
9,0	2,5	15

¹⁾ GOK = Ansatzhöhe des Aufschlusspunktes

Um ein für den geologischen Schnitt D - D' repräsentatives Teufenmodell der Auffüllung zu erhalten, wurden die beiden vorgenannten Modelle in den Tabellen 4 und 5 ingenieurtechnisch plausibel zu einem Teufenmodell vereint. Dieses wurde in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Die sich somit für die Setzungsbetrachtungen ergebende Schichtung innerhalb der bereits vorhandenen Auffüllung sowie die abgeleiteten Rechenwerte wurden im Schnitt D - D' in Anlage 3.1 dargestellt. Dieser Schnitt bildet die Basis für die weiteren Betrachtungen zur Setzung im überwiegenden Teil des Untersuchungsgebietes.

Tabelle 7: Ableitung des E_s -Modells für Schnitt D - D'

Teufe in m u. GOK ¹⁾	Spitzenwiderstand q_c in MN/m ²	Mittelwert von q_c in MN/m ²	Elastizitätsmodell E_s in MN/m ²	Mittelwert von E_s in MN/m ²
-4,8	2,3 bis 31,0	14	8 bis 60	27
-7,5	1,8 bis 7,0	3	5 bis 10	8
Gewachsenes	1,25 bis 3,2	2	5 bis 15	9,5

¹⁾ GOK = Ansatzhöhe des Aufschlusspunktes

Um ein für den geologischen Schnitt E - E' repräsentatives Teufenmodell der Auffüllung zu erhalten, wurden die einzelnen Teilschichten aus Tabelle 6 ingenieurtechnisch plausibel zu einem Teufenmodell vereint. Dieses wurde in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Die sich somit für die Setzungsbetrachtungen ergebende Schichtung innerhalb der bereits vorhandenen

Auffüllung sowie die abgeleiteten Rechenwerte wurden im Schnitt E - E' in Anlage 3.2 dargestellt. Dieser Schnitt bildet die Basis für die weiteren Betrachtungen zur Setzung im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes.

Es wird darauf hingewiesen, dass in den zu führenden Betrachtungen zur Setzung die Auffüllung bis zur vorgesehenen Planumshöhe berücksichtigt werden muss. Um hier die noch künftig vorzunehmende Verfüllung mit zu berücksichtigen, wird der noch bis Planumshöhe fehlenden Auffüllung der Rechenwert der obersten erkundeten Auffüllungsschicht zugewiesen. Diese Herangehensweise wird auch am Schnitt E - E' genutzt.

Tabelle 8: Ableitung des E_s -Modells für Schnitt E - E'

Teufe in m u. GOK **)	Spitzenwiderstand q_c in MN/m ²	Mittelwert von q_c in MN/m ²	Elastizitätsmodell E_s in MN/m ²	Mittelwert von E_s in MN/m ²
-4,0	0,5 bis 1,25	0,8	2 bis 4	3
-6,25	2,0 / 15,0	8,5	10 / 45	10 *)
-8,0	6,0 / 20,0	13,0	60 / 12	12 *)
>8,0	2,5	-	15	-

*) wurde auf der sicheren Seite liegend gewählt

**) GOK = Ansatzhöhe des Aufschlusspunktes

Aufgrund der Tatsache, dass mit den Aufschlussarbeiten im Ansatzbereich 3 der gewachsene Untergrund aus technischen Gründen nicht erkundet werden konnte, wird in den Betrachtungen zur Setzung der Bereich tiefer als 8 m unter GOK durchgängig mit $E_s = 15 \text{ MN/m}^2$ und damit auf der sicheren Seite liegend mit ungünstigen Rechenwerte belegt.

Aus der tabellarischen Zusammenfassung zu Schnitt E - E' kann abgeleitet werden, dass die Tragfähigkeitsverhältnisse im südlichen Teil des Untersuchungsgebietes deutlich geringer sind als im nördlichen Teil. Demnach ist zu erwarten, dass in den Berechnungen zur Setzung im südlichen Teil größere Setzungen an der Auffüllung zu rechnerisch zu erwarten sind als im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes.

4 Untersuchungen zur Setzung und Verformung der Planumsauffüllung

4.1 Aufgabenstellung

Für die Standsicherheitsuntersuchung sind Setzungsanalysen durchzuführen [1]. Diese betrachten die Verformungen der Rückverfüll- und Auffüllmassen sowie des Deponiekörpers aus deren Konsolidation. Zwei maßgebende Schnitte werden mit FEM-Modellierung untersucht. Sie entsprechen in ihren Grundlagen und Randbedingungen dem geologischen Querschnitt D - D' und dem geologischen Querschnitt E - E' aus Anlage 3.

Der Querschnitt D - D' verläuft von WSW nach ENE und ist ca. 660 m lang. Der Deponiekörper inklusive der Massen aus Rückverfüllung und Auffüllung hat eine Länge von ca. 560 m, davon liegen beginnend im Westen ca. 340 m auf Auffüllmassen. Im Osten liegt das Deponieplanum direkt auf Bänderschluft des Gewachsenen Untergrundes (Anlage 3.1, Anlage 4.1, Abbildung 1).

Der Querschnitt E - E' verläuft ebenfalls von WSW nach ENE und ist ca. 415 m lang. Der Deponiekörper inklusive der Massen aus Rückverfüllung und Auffüllung erstreckt sich über den gesamten Querschnitt. Das Deponieplanum besteht aus ca. 17 m mächtigen Auffüllmassen (Anlage 3.2, Anlage 4.2, Abbildung 1).

In den Berechnungen werden die Verformungen der Auffüllung und die Setzungen auf Höhe des Deponieplanums bestimmt.

4.2 Modellverhältnisse

4.2.1 Programmsoftware

Die Setzungsanalysen wurden mit der Software FLAC3D© Version 7.0 (**F**ast **L**agrangian **A**nalysis of **C**ontinua) der Itasca Consulting Group, Inc., verwendet. FLAC3D verwendet den Explizite Finite-Volumen Ansatz zur Berechnung von drei-dimensionalen mechanischen Fragestellungen [7]. Materialien werden durch vielgestaltige Elemente repräsentiert, die vom Anwender angepasst werden, um das zu modellierende Objekt abzubilden. Außerdem bietet FLAC3D eine Vielzahl von Features, um auch sehr spezielle Fragestellung abbilden zu können. Darüber hinaus bietet FLAC3D eine programminterne Programmiersprache (**FISH**), die dem Anwender ein hohes Maß an Freiheit bei der numerischen Simulation ermöglicht. Eine detaillierte Beschreibung der Software und aller Funktionalitäten findet sich in der Dokumentation zu FLAC3D [7].

Für Modellierungen stehen eine Vielzahl von Stoffgesetzen zur Verfügung, die vorliegenden Betrachtungen wurden mit dem elastisch-plastische Mohr-Coulomb Materialmodell simuliert.

4.2.2 Bodenverhältnisse

Entlang des Querschnitt D - D' wurden zwei Drucksondierungen (BK01/21 & BK02/21) zur Verifizierung des Elastizitätsmoduls der Rückverfüllungs- und Auffüllungsmassen durchgeführt. Die für die Setzungsmodellierung des Querschnitt D - D' angesetzten Bodenkennwerte sind in Tabelle 1 der Anlage 4.1 aufgeführt.

Entlang des Querschnitt E - E' wurde eine Drucksondierung (DS 03/21) zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls der Rückverfüllungs- und Auffüllungsmassen durchgeführt. Die für die Setzungsmodellierung des Querschnitt E - E' angesetzten Bodenkennwerte sind in Tabelle 1 der Anlage 4.2 aufgeführt.

Die oberste Auffüllung (Auffüllung-3) weist ein sehr geringes Elastizitätsmodul von 3,0 MPa/m² auf. Daher wurde in einer Variantenbetrachtung die Setzung der Auffüllung untersucht, bei der die oberste Auffüllung (Auffüllung-3) soweit verdichtet wird, dass ein Elastizitätsmodul von 10,0 MPa/m² erreicht wird (Anlage 4.3, Tabelle 1).

Für den Grundwasserspiegel wurde der höchste zu erwartende Grundwasserstand bei 47,7 m NHN angesetzt (Anlage 3.1 und Anlage 3.2).

4.2.3 Methodik der Modellierung

Die Modellgeometrie des Querschnittes D - D' (Anlage 4.1, Abbildung 1) entspricht dem Schnitt in Anlage 3.1 und die Modellgeometrie des Querschnittes E - E' (Anlage 4.2, Abbildung 1) entspricht dem Schnitt in Anlage 3.2. Die beiden Modellvarianten des Querschnittes E - E' sind identisch.

Die Modellsimulation erfolgt in drei Schritten:

Schritt 1: Erstellung der Modellgeometrie entsprechend der Querschnitte D - D' und E - E' und Belegung der Modellränder mit Randbedingungen.

Schritt 2: Belegung der verschiedenen Schichten im Modell mit den Bodenkennwerten (Tabelle 1 der Anlagen 4.1, 4.2 und 4.3) und Definition des Grundwasserspiegels bei 47,7 m NHN. Anschließend werden das initiale Spannungsfeld und der Porenwasserdruck im Grundwasser initiiert.

Schritt 3: Durchführung der Modellrechnung und Auswertung der Modellergebnisse.

Die Modellrechnungen wie folgt ausgewertet und in den Anlagen 4.1, 4.2 und 4.3 dargestellt:

- vertikalen Verformung im Modell (Abbildung 2),
- vertikale Verformung auf Höhe des Deponieplanums (Abbildung 3),

- Verformungsvektoren an den Deponierändern (Abbildung 4 & Abbildung 6),
- und horizontalen Verformung entlang eines Schnittes durch die Auffüllmassen an den beiden Enden des Deponieplanums (Abbildung 5 & Abbildung 7).

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Querschnitt D - D'

Die Berechnungsergebnisse sind in Anlage 4.1 zusammengefasst.

Der Querschnitt D - D' repräsentiert den nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes und auch gleichzeitig den überwiegenden Teil mit Mächtigkeiten in der Auffüllung unter dem Planum der geologisch-technischen Barriere von unter 10 m.

Aufgrund der unterschiedlichen Mächtigkeiten der Auffüllung im Querschnitt D - D' ergeben sich für das Deponieplanum bereichsweise sehr unterschiedliche vertikale Verformungen (Abbildung 3). Im östlichen Bereich liegt die Deponie direkt auf dem Bänderschluft des gewachsenen und es werden hier Setzung zwischen 5,0 cm und 6,0 cm berechnet. Ähnliche Setzungen von ca. 4,0 cm werden für den zentralen Bereich berechnet.

In Abbildung 2 der Anlage 4.1 sind die vertikalen Verformungen im Berechnungsquerschnitt dargestellt. Jeweils an den Übergängen zu den Deponieböschungen werden die höchsten Setzungen von bis zu 1,0 m im Deponiekörper berechnet. Direkt unterhalb werden für die Oberkante des Deponieplanums ebenfalls die höchsten Verformungen berechnet. Ursache hierfür ist die horizontale Verdrängung und Verformung der Auffüllmassen um ca. 1,0 m auf Höhe Oberkante Deponieplanum (Anlage 4.1, Abbildung 4 bis Abbildung 7).

Bei Stationierung 100,0 m in der Abbildung 3 werden die höchsten Setzungen von bis zu 16,0 cm auf Höhe Oberkante des Deponieplanums berechnet. Die in BK 01/21 erbohrte „Aufwölbung“ des Geschiebemergels begrenzt die horizontale Verdrängung der Auffüllungsmassen, so dass bei Stationierung 90,0 m in der Abbildung 3 die Setzungen auf etwa 4,0 cm begrenzt werden. Dort wo die Auffüllung endet werden die Auffüllungsmassen aufgeschoben. Bei Stationierung 250,0 m in der Abbildung 3 hebt sich das Deponieplanum somit um bis zu 13 cm.

4.3.2 Querschnitt E - E'

Der Querschnitt E - E' repräsentiert den südlichen Teil des Untersuchungsgebietes, in dem die Mächtigkeit der Auffüllung unter dem Planum der geologisch-technischen Barriere mehr als 17 m betragen kann, da hier bereits zum jetzigen Zeitpunkt, d. h., noch während der laufenden Verfüllung Bereiche vorliegen, in denen mindestens 15 m verkippt wurden.

In den Berechnungen zum Querschnitt E-E' wurden verschiedene Betrachtungen angestellt. Diese werden nachfolgend beschrieben.

- **Querschnitt E - E' – unverdichtete Auffüllung-3**

In Abbildung 2 der Anlage 4.2 sind die vertikalen Verformungen im Berechnungsquerschnitt dargestellt. Wie bereits für den Querschnitt D - D' gezeigt werden die höchsten Setzungen im Deponiekörper von ca. 50 cm an den Übergängen zu den Deponieböschungen berechnet. Die horizontale Verdrängung und Verformung der Auffüllmassen auf Höhe Oberkante Deponieplanum betragen etwa 0,9 bis 1,0 m (Anlage 4.2, Abbildung 4 bis Abbildung 7).

Entsprechend erreichen die vertikalen Setzungen der Oberkante des Deponieplanums im Westen des Schnittes bis zu 16,0 cm. Aufgrund der geringeren Mächtigkeit der Auffüllung werden im Osten des Schnittes Setzungen bis 12,0 cm berechnet. Im zentralen Bereich erreichen die Setzungen ca. 6,0 cm.

- **Querschnitt E - E' – verdichtete Auffüllung-3**

Die Berechnungsergebnisse werden in Anlage 4.3 zusammengefasst.

In Abbildung 2 der Anlage 4.3 sind die vertikalen Verformungen im Berechnungsquerschnitt dargestellt. Durch die Verdichtung der Auffüllung-3 von 3,0 MPa/m² auf 10,0 MPa/m² wird jedoch erreicht, dass sich die Setzungen im Deponiekörper sich etwa halbieren. Betrachtet man die horizontalen Verformungen der Auffüllmassen, so erkennt man, dass diese sich ebenfalls etwa halbiert haben.

Durch die Verdichtung der Auffüllung-3 werden die vertikalen Setzungen der Oberkante des Deponieplanums vor allem im Westen des Schnittes von 16,0 cm auf etwa 14,0 cm verringert.

4.3.3 Bewertung der Ergebnisse

Anhand der beiden untersuchten Querschnitte wird mittel numerischer Methoden gezeigt, dass die vertikale Verformung des Deponieplanums lokal sehr unterschiedlich ist. Im zentralen Bereich werden Setzungen von ca. 6,0 cm berechnet, welche auf eine Konsolidierung der Auffüllmassen

zugeführt werden können. Ähnlich geringe Setzungen werden für die Bereiche ausgewiesen, wo das Deponieplanum aus gewachsenem Untergrund besteht.

Zu den Rändern hin nimmt die vertikale Verformung stark zu und beträgt lokal bis zu 16,0 cm. Ursächlich hierfür ist eine horizontale Verdrängung der Auffüllmassen, welche auf Höhe des Deponieplanums bis zu 1,0 m erreichen kann. Eine Verdichtung der Auffüllungsmassen führt dazu, dass diese horizontale Verdrängung gemindert wird.

Bei der Verdichtung sollte beachtet werden, dass diese für die gesamte Mächtigkeit der Auffüllung erreicht wird. außerdem sollte sich der Grad der Verdichtung an der Auflast orientieren, welche sich aus der finalen Höhe des Deponiekörpers ergibt.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Für den sich in der Planungsphase Entwurfs- und Genehmigungsplanung befindliche Bearbeitungsstand wurden erdstatische Berechnungen und Setzungs- sowie Verformungsbetrachtungen geführt.

In Auswertung der dargestellten Berechnungsergebnissen ist nachgewiesen, dass der Ausnutzungsgrad von 1,0 für die untersuchten und relevanten Versagensmechanismen nicht überschritten wird und somit standsichere Verhältnisse vorliegen.

Die ermittelten Setzungen und Verformungen liegen innerhalb der für das Bauwerk und seine Abdeckung verträglichem Maß. Die Setzungsbeträge sind für die Herstellung der Oberfläche des Deponiekörpers, der Abdeckung und auch der Gräben für die Oberflächenentwässerung zu berücksichtigen.

Für den Bau und Betrieb der Deponie können herkömmliche Bau- und Betriebsmechanismen eingesetzt werden, ohne dass standsicherheitlich gefährliche Betriebszustände zu erwarten sind. Mechanismen, die mit erheblichem Lasteintrag (über die untersuchten Lastgrößen hinaus) an Böschungen verbunden sind (z. B. ggf. eingesetzte dynamisch verdichtenden Walzenzüge), sind vor ihrem Einsatz hinsichtlich ihrer standsicherheitlichen Auswirkungen zu überprüfen.

Sollten Erdstoffe verwendet werden, für die die zugrundeliegenden Ansätze nicht zutreffen, sind deren bodenmechanische Berechnungskennwerte festzustellen und mit den Berechnungsansätzen zu vergleichen.

Für das Zusammenwirken der Geokunststoffe und Erd- / Baustoffe an Kontaktflächen sind nach deren Festlegung die verwendeten Scherparameter gemäß dem Stand der Technik nachzuweisen.

Die den Berechnungen zugrunde gelegten Materialkennwerte sind als Mindestwerte zu verstehen, die durch qualitätssichernde Maßnahmen bei Bau und ein geeignetes Betriebs- und Einbauregime in der Betriebsphase abzusichern sind.

Zur Gewährleistung der erforderlichen Materialeigenschaften sollte im Rahmen der Eingangskontrolle auch die geotechnischen Eigenschaften der zu deponierenden Schüttmaterialien überwacht werden.

Durch die Einlagerungstechnologie ist sicherzustellen, dass in böschungsnahen Bereichen eine weitgehende Homogenisierung durch Einlagerung gleichartiger und geeigneter Erdstoffe erzielt wird.

Zur Problematik der eventuell auftretenden Harnischflächen im Bänderschlufl wurden im Abschnitt 4.6 entsprechende Hinweise und Empfehlungen benannt.