

K+S Minerals and Agriculture GmbH
Werk Werra · Standort Hattorf
Herrn Dipl.-Ing. Christian Artschwager
Postfach 11 63
36267 Philippsthal (Werra)

vorab per E-Mail: christian.artschwager@k-plus-s.com

K/Vo/Se/Le/Te
IK2035
08.05.2024

Geotechnische Stellungnahme Nr. IK2035/09

zu den Ausführungen der Umtec | Prof. Biener | Sasse | Konertz, Partnerschaft Beratender Ingenieure und Geologen mbB in der Gutachterlichen Stellungnahme zur Fragestellung der Restdurchsickerung der Mineralischen Dichtung unter der aufgeprägten Dehnung vom 18.03.2024

Die K+S Minerals and Agriculture GmbH (K+S) Werk Werra betreibt am Standort Hattorf mit Sitz in Philippsthal einen untertägigen Kalibergbau. Nach der Gewinnung und Förderung wird das Rohsalz aufbereitet und der überwiegend in der elektrostatischen Aufbereitung (ESTA) entstehende, im Wesentlichen aus Steinsalz bestehende Rückstand auf der nahegelegenen Rückstandshalde abgelagert.

Mit dem Rahmenbetriebsplan zur Erweiterung der Rückstandshalde des Werkes Werra in der Fassung 06.2023 beantragte K+S die Erweiterung der bestehenden Rückstandshalde Hattorf in der Phase 3.

Mit der gutachterlichen Stellungnahme vom 18.03.2024 nimmt die Umtec | Prof. Biener | Sasse | Konertz, Partnerschaft Beratender Ingenieure und Geologen mbB (nachfolgend Umtec) Bezug auf die Stellungnahme des Herrn Dr.-Ing. U. Sehrbrock vom 22.11.2023 und auf unsere geotechnische Stellungnahme Nr. IK2035/07 vom 16.11.2023.

K+S beauftragte daher die Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH (IK) mit der Beantwortung der in Bezug auf unsere geotechnische Stellungnahme Nr. IK2035/07 aufgetretenen Fragestellungen. In der gegenständlichen Stellungnahme Nr. IK2035/09 wird auf die Ausführungen der Umtec in der gutachterlichen Stellungnahme vom 18.03.2024 Bezug genommen. Zitate aus dem v.g. Schreiben sind nachfolgend durch *Kursivdruck* kenntlich gemacht.

I.

Zitat Umtec, gutachterliche Stellungnahme vom 18.03.2024:

„Bei der Berechnung zur Querdehnung (Verformungsnachweis) setzt IG BS [Dr.-Ing. Ulrich Sehrbrock, IG Braunschweig (IG BS) (Anmerkung IK)] voraus, dass die Raumelemente in x-Richtung zunehmend einen lastfreien Zustand erreichen. Dies wird damit begründet, dass durch ein fehlendes Widerlager (Randgraben) sich keine in x-Richtung rückwirkenden Verspannungen aufbauen können („vergleichbar einer Zahnpastatube mit geöffnetem Verschluss“ [Zitat aus der Stellungnahme des Herrn Dr. Sehrbrock vom 22.11.2023 (Anmerkung IK)]. Dieser Logik folgend wurde die vom Böschungsfuß potenziell gegen das Raumelement gerichtete Spannung zu 0 gesetzt.

Diese Annahme scheint im Widerspruch zu den Berechnungen von IK [4] [Unterlage 4: Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1754/01 vom 27.04.2018 (Anmerkung IK)] zu stehen.

[...]

Gemäß Abbild 1 [Bild 20 aus dem o.g. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1754/01 vom 27.04.2018 zum Schnitt C-C' 2018 (Anmerkung IK)] ergeben sich demnach auch im Bereich des Randgrabens maßgebliche Horizontalspannungen (gemäß der farblichen Kennzeichnung 180,3 kN/m² vor dem Haldenrandgraben). Die Berechnungsergebnisse von IG BS (Horizontalspannung = 0) passen also weiterhin nicht zu den Berechnungsergebnisse von IK, wobei einschränkend darauf hinzuweisen ist, dass die Ergebnissprünge in den FE-Berechnungen erheblich sind und generell die Annahmen von IG BS nicht völlig abwegig erscheinen.“

Die Abbildung 1 der Umtec-Stellungnahme vom 18.03.2024 zeigt die horizontalen Spannungen des gesamten Baugrundes im Schnitt C-C' 2018 am Ende des Untersuchungszeitraums in Form eines Konturplots (entspricht dem Bild 20 aus unserem Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1754/01 vom 27.08.2018).

Der Schnitt C-C' 2018 wurde im Jahr 2018 für die Haldenerweiterung der Halde Hattorf modelliert. Zweck der numerischen Untersuchungen war die Beantwortung der Fragestellung der zu erwartenden horizontalen Verschiebungen am Haldenfuß der damals geplanten und in den Phasen 1 und 2 bereits genehmigten Haldenerweiterung. Der Haldenrandgraben im Bereich des Haldenfußes wurde im numerischen Modell nicht explizit abgebildet, da dies für die o.g. Fragestellung unerheblich war.

Die Modellbildung für die Frage nach den horizontalen Verschiebungen wurde 2018 unter Berücksichtigung von konservativen Parametern durchgeführt.

Die Fragestellung der Durchlässigkeit der Basisabdichtung unter aufgeprägter Dehnung, die Herr Dr. Sehrbrock in seiner Stellungnahme beantwortet, ist eine völlig andere Fragestellung.

II.

Zitat Umtec, gutachterliche Stellungnahme vom 18.03.2024:

„Die Berechnungen wurden von IG BS für zunächst für die obere (oL) und untere (uL) Lagen der mineralischen Dichtung geführt. [...] Die herangezogene Literaturquelle (QMgeo Prüfgesellschaft [Nachreichung der Scherversuche zum Bauabschnitt BA B1 vom 16. Juni 2023 (Anmerkung IK)] kann nun nachvollzogen werden, es handelt sich angabegemäß um Ergebnisse, die im Rahmen regelmäßiger Kontrollprüfungen der Bauausführung gewonnen wurden [...].

[...]

Es überrascht, dass die MD [mineralische Dichtung (Anmerkung IK)] keine Kohäsion haben soll (der minimale Wert in Tabelle 1 in der IK Stellungnahme). [geotechnische Stellungnahme Nr. IK2035/07 vom 16.11.2023 (Anmerkung IK)]

[...]

Die neu angesetzten Scherparameter liegen höher als in [4] [Unterlage 4: Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1754/01 vom 27.04.2018 (Anmerkung IK)], was sich sicherheitsreduzierend auswirkt, weil bei der gewählten Nachweisführung insbesondere höhere Kohäsionen mit höheren erforderlichen Vertikalspannungen einhergehen.

[...]

Gem. dem Teilsicherheitskonzept nach DIN 4084 sind für die Reibungskennwerte keine Laborwerte, sondern charakteristische Werte anzusetzen. Es sind vorliegend die Mittelwerte einer nicht näher bekannten Anzahl von stark streuenden Laborversuchen (und teilweise unplausiblen, z.B. $c' = 0 \text{ kN/m}^2$) als charakteristische Werte angesetzt worden.

Es wird gebeten, dass diese Werte vom geotechnischen Sachverständigen geprüft und bestätigt werden.“

An dieser Stelle ist zu erläutern, welche Grundlagen und Informationen zum Zeitpunkt der jeweiligen Untersuchungen (Numerik IK vs. Betrachtung des Durchlässigkeitsverhaltens bei aufgeprägter Dehnung durch Herrn Dr. Sehrbrock) vorlagen. Außerdem ist die jeweilige Fragestellung, die durch die gewählten Modelle beantwortet werden soll, zu berücksichtigen.

Die in den numerischen Berechnungen zum Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Haldenerweiterung Hattorf angesetzten Parameter für die Basisabdichtung resultierten aus Mindestanforderungen an das System Basisabdichtung. Laborversuche oder Ergebnisse einer in-situ geprüften Basisabdichtung lagen zu diesem Zeitpunkt nicht vor.

Ziel der numerischen Berechnungen zum Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit war u.a. die Prognose von möglichen Verschiebungen am Haldenfuß der Haldenerweiterung Hattorf. Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen bilden bis heute die Grundlage des Monitoringkonzepts für die Haldenerweiterung Hattorf.

Im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung für den Nachweis der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit wurde in den zahlreichen numerischen Untersuchungen für die Haldenerweiterung Hattorf für die Basisabdichtung ein Reibungswinkel von $\phi' = 30^\circ$ und eine Kohäsion von $c' = 0 \text{ kN/m}^2$ angesetzt.

Demgegenüber stehen die Berechnungen und Modellansätze zur Betrachtung des Durchlässigkeitsverhaltens bei aufgeprägter Dehnung von Herrn Dr. Sehrbrock, welche sich einer komplett anderen Fragestellung widmen. Es ist zulässig und sogar notwendig, dass sich diese Untersuchungen und Berechnungen auf den aktuellen Stand und die vorliegenden Erkenntnisse der QMGeo Prüfungsgesellschaft stützen.

Gemäß unserer Stellungnahme Nr. IK2035/07 vom 16.11.2023 wurden für die Betrachtungen des Durchlässigkeitsverhaltens bei aufgeprägter Dehnung des Herrn Dr. Sehrbrock die in Tabelle 1 dokumentierten Parameter für die Basisabdichtung (obere und untere Lage) angesetzt (Quelle: Erweiterung zur Stellungnahme der Umtec vom 27.09.2023, Herr Dr.-Ing. Sehrbrock, November 2023). Diese Parameter ergeben sich aus den Mittelwerten der von der QMGeo Prüfungsgesellschaft dokumentierten Scherversuchen.

	Reibungswinkel φ' [°]	Kohäsion c' [kN/m ²]
Mittelwert <u>obere</u> Lage	42,3	13,4
Mittelwert <u>untere</u> Lage	35,1	25,8

Tabelle 1: Ergebnisse der Rahmenscherversuche an der oberen und unteren Lage der Basisabdichtung (Erwiderung zur Stellungnahme der Umtec vom 27.09.2023, Herr Dr. Sehrbrock, November 2023)

Die Ergebnisse wurden von Herrn Dr. Sehrbrock erneut geprüft und in seiner aktuellen Stellungnahme vom 24.04.2024 in tabellarischer Form dokumentiert. Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen der Scherversuche (Ausführendes Labor, Größe des verwendeten Scherrahmens, maximale Scherspannung, etc.) wurde von Herrn Dr. Sehrbrock ergänzend für alle Versuche eine Ersatzscherfestigkeit ermittelt.

Die in der Stellungnahme des Herrn Dr. Sehrbrock dokumentierten Scherfestigkeiten inkl. der Mittelwert sind in den Tabellen 2 und 3 erneut aufgeführt. Dort wird ebenfalls in obere und untere Lage der Basisabdichtung unterschieden. Zusätzlich wurden die Standardabweichungen, d.h. das Maß für die Streubreite der einzelnen Werte um das arithmetische Mittel ermittelt.

Neben den Standardabweichungen für den Reibungswinkel φ und die Kohäsion c' wurden auch die Abweichungen der einzelnen Laborergebnisse vom jeweiligen Mittelwert, d.h. die Größe der Abweichung des im Laborversuch ermittelten Ergebnisses φ_i bzw. c'_i zu $\bar{\varphi}$ bzw. \bar{c}' , berechnet.

Proben-Nr.	Reibungswinkel [°]	$\varphi_i - \bar{\varphi}$	Kohäsion [kN/m ²]	$c'_i - \bar{c}'$
L-8375 (2.1)	45,3	1,8	57,0	30,2
L-8375 (2.2)	44,2	0,7	4,7	22,1
E-0627-OL-01	42,2	1,3	17,6	9,2
E-0627-OL-02	45,6	2,1	3,6	23,2
E-0627-OL-03	40,0	3,5	51,3	24,5
Mittelwert oL	43,5		26,8	
Standardabweichung	2,1		22,9	

Tabelle 2: Ergebnisse der Rahmenscherversuche an der oberen Lage der Basisabdichtung (Erwiderung zur Stellungnahme der Umtec vom 18.03.2024, Herr Dr. Sehrbrock, 24.04.2024)

Proben-Nr.	Reibungswinkel [°]	$\varphi_i - \bar{\varphi}$	Kohäsion [kN/m ²]	$c'_i - \bar{c}'$
L-8467	37,7	1,9	16,0	9,4
L-8375	39,0	3,2	7,8	17,6
E-0627-UL-01	34,0	1,8	35,9	10,5
E-0627-UL-02	34,8	1,0	34,2	8,8
E-0627-UL-03	33,6	2,2	33,0	7,6
Mittelwert uL	35,8		25,4	
Standardabweichung	2,1		11,3	

Tabelle 3: Ergebnisse der Rahmenscherversuche an der unteren Lage der Basisabdichtung
(Erwiderung zur Stellungnahme der Umtec vom 18.03.2024, Herr Dr. Sehrbrock,
24.04.2024)

In Bild 1 sind zudem die Schergeraden der in den Tabellen 2 und 3 dokumentierten Scherversuchen dargestellt.

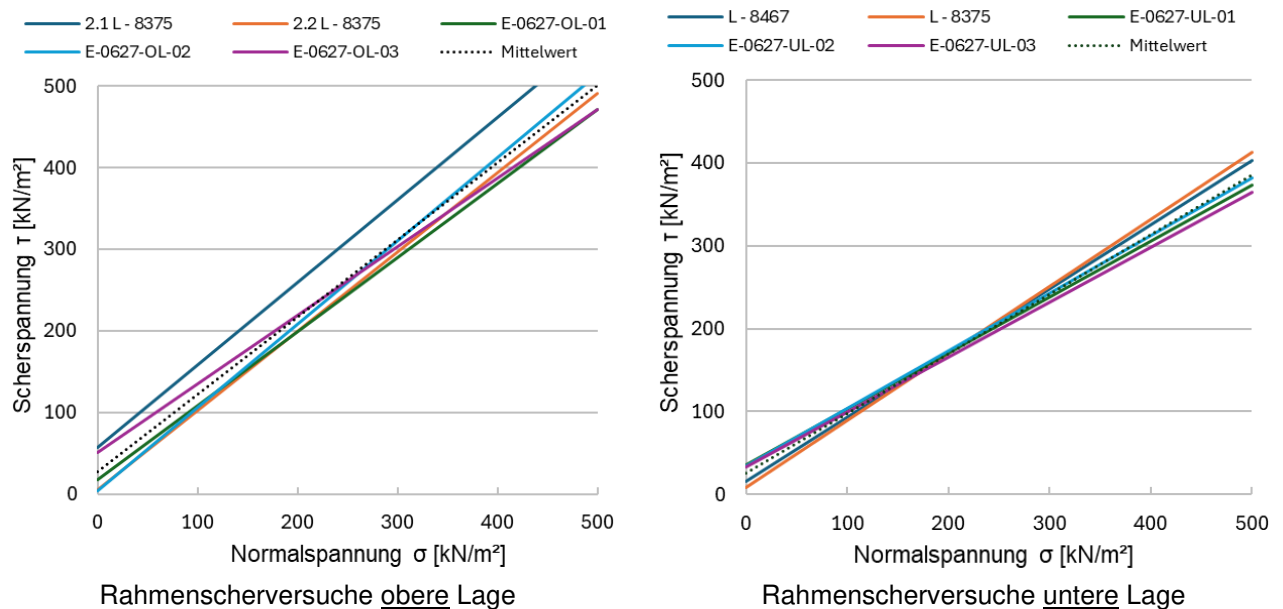


Bild 1: Schergeraden der oberen und unteren Lage gemäß Tabelle 2 und 3 inkl. des jeweiligen Mittelwertes

Aus den Tabellen 2 und 3 sowie aus dem Bild 1 wird deutlich, dass die Mittelwerte (Reibungswinkel und Kohäsion) für die untere Lage der Basisabdichtung sehr gut mit den einzelnen Rahmenscherversuchen übereinstimmen. Das zeigt sich auch an den kleinen Standardabweichungen. Der Schwankungsbereich um das arithmetische Mittel für die obere Lage fällt etwas größer aus. Dies resultiert in erster Linie aus der größeren Bandbreite der im Labor ermittelten Kohäsionen.

Wie bereits beschrieben wurden für alle Laborversuche Ersatzreibungswinkel abgeleitet, welche in den Tabellen 4 und 5 dokumentiert sind. (Hinweis: Die Ersatzreibungswinkel sind aus der Erwiderung zur Stellungnahme der Umtec vom 18.03.2024, Herr Dr. Sehrbrock, 24.04.2024). Der Ersatzreibungswinkel ergibt sich aus den effektiven Scherparametern φ' und c' bezogen auf einen definierten Spannungszustand σ . Die Kohäsion wird zur Ermittlung des Ersatzreibungswinkels zu $c' = 0$ gesetzt.

Proben-Nr.	Ersatzreibungswinkel [°]
L-8375 (2.1)	46,1
L-8375 (2.2)	44,6
E-0627-OL-01	42,8
E-0627-OL-02	45,9
E-0627-OL-03	42,5
Mittelwert oL	44,4
Standardabweichung	1,5

Tabelle 4: Ersatzreibungswinkel für die obere Lage der Basisabdichtung (Erwiderung zur Stellungnahme der Umtec vom 18.03.2024, Herr Dr. Sehrbrock, 24.04.2024)

Proben-Nr.	Ersatzreibungswinkel [°]
L-8467	39,7
L-8375	39,8
E-0627-UL-01	36,3
E-0627-UL-02	36,9
E-0627-UL-03	35,8
Mittelwert uL	37,7
Standardabweichung	1,7

Tabelle 5: Ersatzreibungswinkel für die untere Lage der Basisabdichtung (Erwiderung zur Stellungnahme der Umtec vom 18.03.2024, Herr Dr. Sehrbrock, 24.04.2024)

In Bild 2 sind die Schergeraden für die ermittelten Ersatzreibungswinkel getrennt nach oberer und unterer Lage dargestellt.

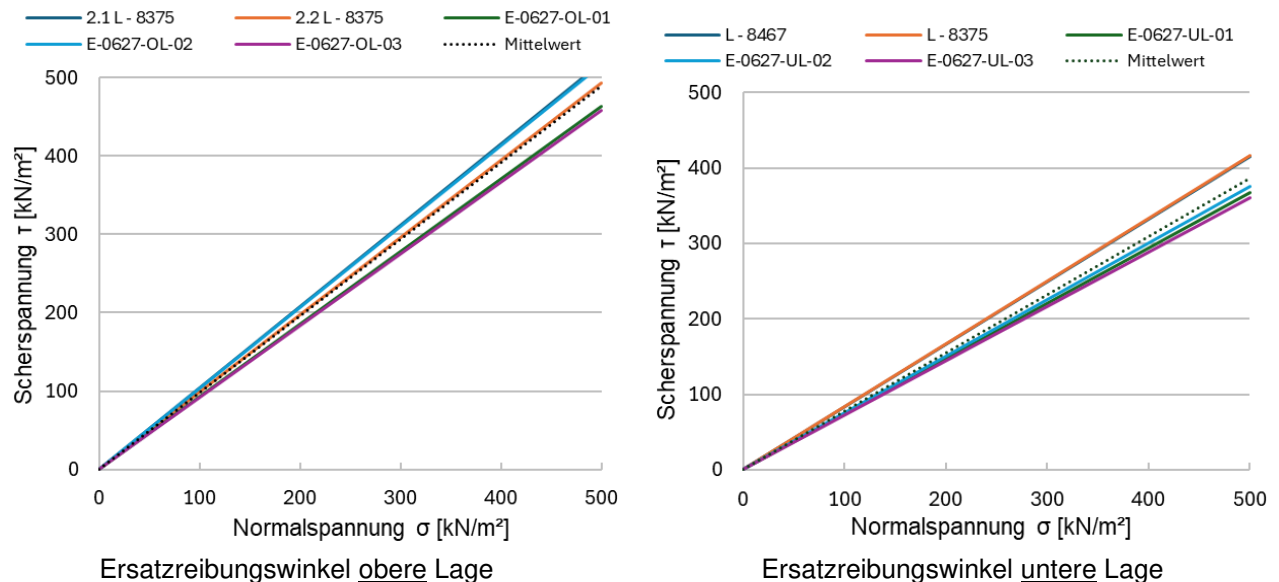


Bild 2: Schergeraden für die ermittelten Ersatzreibungswinkel der oberen und unteren Lage gemäß Tabelle 4 und 5 inkl. des jeweiligen Mittelwertes

Die Betrachtung des Ersatzreibungswinkels für die in der Erwiderung des Herrn Dr. Sehrbrocks vom 24.04.2024 dokumentierten Rahmenscherversuche zeigt, dass – getrennt nach oberer und unterer Lage der Basisabdichtung – die Scherfestigkeiten in ihrer Größenordnung gut übereinstimmen. Dies wird auch durch die sehr kleinen Standardabweichungen deutlich (siehe Tabelle 4 und 5).

Herr Dr. Sehrbrock führt in seinen Stellungnahmen mehrfach aus, dass für seine Nachweisführung die Mittelwerte für die obere und untere Lage als charakteristische Werte in Ansatz gebracht werden. Auf die gemäß DIN 1055-2 beschriebene Abminderung der Kennwerte auf charakteristische Scherparameter wird verzichtet, da nach seiner Aussage eine Abminderung der Parameter in den geführten Spannungsnachweisen nach GDA E 2-13 zu einer Abminderung der erforderlichen Auflasten führen würde (siehe hierzu Erwiderung zur Stellungnahme der Umtec vom 18.03.2024, Herr Dr. Sehrbrock, April 2024).

Mit Verweis auf die DIN 1055-2 wird in der o.g. Stellungnahme erläutert, dass eine Ableitung der Scherfestigkeit von Böden auf Basis von Erfahrungswerten zulässig ist. In der DIN 1055-2 wird konkret auf die Mittelwertbildung als vorsichtiger Schätzwert verwiesen (siehe hierzu Erwiderung zur Stellungnahme der Umtec vom 18.03.2024, Herr Dr.-Ing. Sehrbrock, April 2024).

Prinzipiell kann aus fachlicher Sicht einer Mittelwertbildung der im Labor ermittelten bodenmechanischen Parameter zu Festlegung der charakteristischen Bodenkennwerte zugestimmt werden. Die Betrachtungen zum Ersatzreibungswinkel zeigen, dass die labortechnisch bestimmten Scherfestigkeiten – getrennt in obere und untere Lage der Basisabdichtung – gut übereinstimmen. Den von Herrn Dr. Sehrbrock in seinen Berechnungen verwendeten bodenmechanischen Werten, i.e. dem Reibungswinkel und der Kohäsion, wird unsererseits für die Untersuchung/Bewertung der konkreten Fragestellung der Durchlässigkeiten bei aufgeprägter Dehnung zugestimmt.

III.

Zitat Umtec, gutachterliche Stellungnahme vom 18.03.2024:

„Der Verlauf der Vertikalspannung in der Mineralischen Dichtung ist feiner aufzulösen, um ortsgenau die tatsächlich vorhandene Auflastspannung in Relation zu der rechnerisch erforderlich Auflastspannung (einschließlich Sicherheitsbeiwert nach DIN 4084, Abschnitt 1) setzen zu können.“

Zur Beantwortung der Fragestellung wurden die Vertikalspannungen in der Aufstandsfläche (OK Basisabdichtung) am Ende der Nachbetriebsphase ausgewertet und in Bild 3 dargestellt. Die Auswertung erfolgte an jedem Elementknoten der Basisabdichtung, d.h. im Abstand von 4 m (Bereich des Haldenfußes und der Berme) bis 19 m (rechter Modellrand/Bereich unter der Bestandshalde).

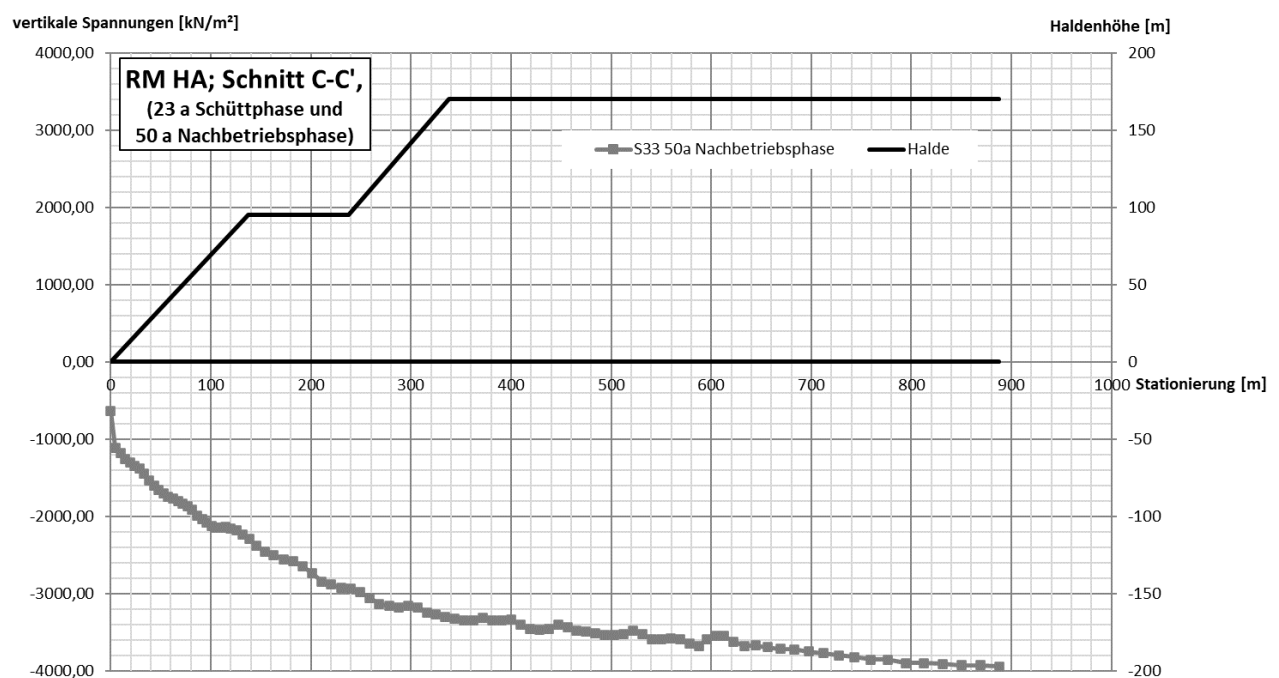


Bild 3: Vertikalspannungen S33 unterhalb der Halde im Schnitt C-C'₂₀₁₈

IV.

Zitat Umtec, gutachterliche Stellungnahme vom 18.03.2024:

„Es wird um eine ergänzende Klarstellung der Ingenieursozietät Prof.-Dr.-Ing. Katzenbach GmbH gebeten, dass sich die in IK1754/1 getroffenen Berechnungsannahmen (abweichende Dicke von Mineralischer Dichtung und Flächenfilter, Nichtberücksichtigung Geotextil) nicht relevant auf die Dehnungsverteilung auswirken“

Das System Basisabdichtung, bestehend aus der mineralischen Dichtung und dem Flächenfilter inkl. Witterungsschutzschicht, wurde in den numerischen Berechnungen zur Haldenerweiterung der Halde Hattorf (Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1754/01 vom 27.04.2018) durch zwei 1 m dicke Elementlagen abgebildet. Das System Basisabdichtung wurde für die Haldenerweiterung Phase 2 optimiert, d.h. die mineralische Dichtung wird mit einer tatsächlichen Dicke von 0,55 m eingebaut. Die Dicke des Flächenfilters inkl. Witterungsschutzschicht beträgt 0,4 m (0,3 m Flächenfilter + 0,1 m Witterungsschutzschicht). Das optimierte System Basisabdichtung soll auch für die Haldenerweiterung Phase 3 Anwendung finden.

Die Rückstandshalde wurde im Schnitt C-C mit einer maximalen Haldenhöhe von 170 m und einer 100 m hohen und 100 m breiten Berme erfasst.

Wie bereits in unserer Stellungnahmen Nr. IK2035/07 vom 16.11.2023 erläutert, führt die geplante geringfügige Reduzierung der Dicken des Systems Basisabdichtung zu keiner systemrelevanten Veränderung der Vertikalspannungen und damit auch nicht der darin eintretenden Dehnungen.

Maßgebend für die berechneten Dehnungen in der Basisabdichtung sind die Vertikalspannungen und der Kontaktreibungswinkel in der Aufstandsfläche.

Die Nichtberücksichtigung eines Geotextils in den numerischen Berechnungen ist zulässig. Bei den o.g. Dimensionen der Halde und einem Baugrundmodell bis rd. 400 m Tiefe, ist die Abbildung einer wenige Millimeter dicken Elementlage nicht zielführend und nicht erforderlich.

Aufgrund der Grobkörnigkeit des Flächenfilters ist davon auszugehen, dass sich das Korngefüge, d.h. die Rauigkeit des Flächenfilters durch das Geotextil in die Basisabdichtung drückt und eine verzahnte Kontaktfläche entsteht. Die Kontaktfläche zwischen Flächenfilter und Basisabdichtung wurde im numerischen Modell als Master-Slave-Kontaktfläche abgebildet und erfasst. Maßgebend für die Kontakteigenschaften waren dabei die bodenmechanischen Parameter der „schwächeren“ Elementlage (Basisabdichtung). Wie bereits oben beschrieben wurden in der Kontaktfläche im Sinne einer Mindestanforderung ein Reibungswinkel von $\varphi' = 30^\circ$ und eine Kohäsion von $c' = 0 \text{ kN/m}^2$ angesetzt.

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Steffen Leppla
Eva Eden-Teutsch, M.Sc.

U. Katzenbach
Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach
-Vereidigter Sachverständiger-
Sachverständiger für
Grund- und Felsbau,
besondere Baugruben und
Baugrundverformungen
Verein der Industrie- und Handelskammer Darmstadt
Öffentlich bestellt und vereidigt

M. Seip
Dipl.-Ing. Matthias Seip
-Prüfsachverständiger nach HPPVO-
VEREIN DER INDUSTRIE- UND HANDELSKAMMER HESSEN
Dipl.-Ing. Matthias Seip
ERD-127
nach § 23 HPPVO
SACHVERSTÄNDIGER FÜR ERD- UND GRUNDBAU

Verteiler:

- K+S Minerals and Agriculture GmbH, Werk Werra, 1 x Kopie
- K+S Minerals and Agriculture GmbH, Werk Werra, per E-Mail
Frau Dr. Hanka Poppitz
E-Mail: hanka.poppitz@k-plus-s.com
- K+S Minerals and Agriculture GmbH, Werk Werra, per E-Mail
Herr Dr. Michael Wündsche
E-Mail: michael.wuendsch@k-plus-s.com
- K+S Minerals and Agriculture GmbH, Werk Werra, per E-Mail
Herrn Dipl.-Ing. Christian Artschwager:
E-Mail: christian.artschwager@k-plus-s.com
- K+S AG, Herrn Dr.-Ing. Jan-Peter Schleinig per E-Mail
E-Mail: jan-peter.schleinig@k-plus-s.com