

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

Geschäftsleitung:
Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach
Prof. Dr.-Ing. Matthias Vogler
Dipl.-Ing. Matthias Seip

Dr.-Ing. Sebastian Fischer
Dipl.-Ing. Heiko Kuttig
Dr.-Ing. Alexandra Weidle
Dr.-Ing. Anke Werner

Sachverständigen-Gutachten
Beratung · Planung
Forschung · Entwicklung

Bodenmechanik · Felsmechanik
Baugrund-Tragwerk-Interaktion
Tunnelbau · Dammbau
Geothermie · Umweltgeotechnik

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

K/Vo/Se/Le/Te/Mu
IK2035
03.12.2024

Geotechnische Stellungnahme Nr. IK2035/12

zu den Ausführungen der Umtec | Prof. Biener | Sasse | Konertz, Partnerschaft Beratender Ingenieure und Geologen mbB in der Gutachterlichen Stellungnahme zu der seitens K+S vorgelegten Erwiderung auf die Stellungnahme „Restdurchsickerung der mineralischen Dichtung unter aufgeprägter Dehnung“ vom 25.11.2024

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 04.2024 beantragte K+S die Erweiterung der bestehenden Rückstandshalde Hattorf in der Phase 3.

Mit der o.g. gutachterlichen Stellungnahme vom 25.11.2024, im Weiteren als [U1.2] bezeichnet, nimmt die Umtec | Prof. Biener | Sasse | Konertz, Partnerschaft Beratender Ingenieure und Geologen mbB (nachfolgend Umtec) Bezug auf die Stellungnahmen des Herrn Dr.-Ing. U. Sehrbrock (IG Braunschweig GmbH) [U2] und auf unsere geotechnische Stellungnahmen Nr. IK2035/09 vom 08.05.2024 [U3.1] und Nr. IK2035/11 vom 07.11.2024 [U3.2].

65931 Frankfurt am Main
Pfaffenwiese 14A
Tel: +49 (0)69 / 9362230
Fax: +49 (0)69 / 361049

64293 Darmstadt
Robert-Bosch-Straße 9
Tel: +49 (0)6151 / 13013-10
Fax: +49 (0)6151 / 13013-20

69469 Weinheim
Wachenbergstraße 13
Tel: +49 (0)6201 / 25 83-36
Fax: +49 (0)6201 / 25 83-37

64625 Bensheim
Darmstädter Straße 120
Tel: +49 (0)6251 / 86052-16
Fax: +49 (0)6251 / 86052-15

01135 Kiev (Ukraine)
V. Chernovola, 26/2, office 10
Tel: +38 095 / 45193-99
Fax: +38 044 / 49592-64

Zur Klärung der offenen Fragen von Seiten des Regierungspräsidiums Kassel (RP Kassel) und der Umtec wurde ein Fachgespräch am 27.11.2024 via Teams geführt. Auf Anfrage von K+S nahmen die IG Braunschweig GmbH und die Ingenieursozietät Professor Dr. Ing. Katzenbach GmbH (IK) als geotechnische Sachverständige ebenfalls an der Besprechung teil.

Zitate aus den genannten Unterlagen werden nachfolgenden durch *Kursivdruck* gekennzeichnet.

Die für die gegenständliche Stellungnahme verwendeten Unterlage sind nachfolgend aufgeführt:

- [U1] Umtec | Prof. Biener | Sasse | Konertz, Partnerschaft Beratender Ingenieure und Geologen mbB, Bremen:
1. Gutachterliche Stellungnahme zur Fragestellung der Restdurchsickerung der Mineralischen Dichtung unter der aufgeprägten Dehnung vom 13.09.2024
 2. Gutachterliche Stellungnahme zu der seitens K+S vorgelegten Erwiderung auf die Stellungnahme „Restdurchsickerung der mineralischen Dichtung unter aufgeprägter Dehnung“ vom 25.11.2024
- [U2] Herr Dr. Sehrbrock, IG Braunschweig GmbH, Braunschweig:
1. Erwiderung zur Stellungnahme der Umtec vom 27.09.2023 vom 22.11.2023
 2. Erwiderung zur Stellungnahme der Umtec vom 18.03.2024 vom 24.04.2024
 3. Erwiderung zur Stellungnahme der Umtec vom 13.09.2024 vom 05.11.2024
- [U3] Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH, Darmstadt:
1. 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 vom 08.05.2024
 2. Geotechnische Stellungnahme Nr. IK2035/11 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 13.09.2024 vom 07.11.2024
- [U4] K+S Minerals and Agriculture GmbH, Werk Werra, Philippsthal:
1. E-Mail vom 29.11.2024 zur Verlängerung der KDB mit Informationen zum Einsatz von Kunststoffdichtungsbahnen in Dichtungssystemen unter Rückstandshalten
 2. E-Mail vom 29.11.2024 inkl. Regelquerschnitt Haldenfuß

I. Sachverhalt/Fragestellung

In unserer geotechnischen Stellungnahme Nr. IK2035/11 vom 07.11.2024 [U3.2] wurden die Vertikalspannungen im Schnitt C-C' im Bereich des Haldenfußes detailliert über die Zeit ausgewertet. Der Bereich des endgültigen Haldenfußes ist der Bereich, in dem am Ende des Betrachtungszeitraums die größten Dehnungen im numerischen Modell auftreten.

Die Auswertemethodik der Vertikalspannungen sowie die auftretenden und erforderlichen Auflastspannungen gemäß [U2] sind ausführlich in [U3.2] beschrieben, dokumentiert und bewertet.

Zitat aus der geotechnischen Stellungnahme Nr. IK2035/11 vom 07.11.2024:

„Im Element A, dem ersten Element der Basisabdichtung unmittelbar am Haldenfuß gelegen, werden die erforderlichen Auflastspannungen für die obere und untere Lage der Basisabdichtung gemäß [U1] und [U2] zwischen 5 und 10 Jahren Nachbetriebsphase erreicht.

Gemäß [U2.3] ist der Nachweis der mineralischen Dichtung für einen Zeitraum von 1 Jahr nach Schüttende im Element A unter Ansatz eines Teilsicherheitsbeiwertes von $\gamma_{\phi'} = \gamma_{c'} = 1,03$ erfüllt; für einem Zeitraum von 5 Jahren nach Schüttende kann der Nachweis der mineralischen Dichtung im Element A unter Ansatz eines Teilsicherheitsbeiwertes von $\gamma_{\phi'} = \gamma_{c'} = 1,16$ geführt werden.“

Ziel des Fachgesprächs am 27.11.2024 war es, eine bautechnische Lösung für den haldenfußnahen Bereich zu finden, welche eine uneingeschränkte Gebrauchstauglichkeit des Systems Basisabdichtung am Haldenfuß sicherstellt. Gemäß [U1.2] wurden folgende Maßnahmen grundsätzlich als geeignet bewertet (Zitat aus der Stellungnahme der Umtec vom 25.11.2024 [U1.2]):

- „ - Herstellung von Dichtungsmaterial mit konsistenten (und geringeren) Scherparametern*
- Verifizierung der Scherparametern anhand einer deutlich größeren Probenzahl und Festlegung von charakteristischen Werten mit einem Sicherheitsabstand zu den Mittelwerten*
- Verwendung eines Mineralischen Dichtungsmaterials im maßgeblichen Dehnungsbereich mit begrenzter Kohäsion, ggf. in Verbindung mit den vorgesehenen Materialien [...]*
- Zusätzliche Anordnung einer Kunststoffdichtungsbahn im maßgeblichen Dehnungsbereich, ggf. in Verbindung mit einem Geogitter [...]*“

K+S schätzt die Erweiterung der ohnehin auf den ersten 2 m vorgesehenen Kunststoffdichtungsbahn (KDB) im Randbereich um weitere 3 m auf rd. 5 m als umsetzbar ein. Mit einer Einbinde-länge von rd. 5 m ist der Bereich des Elements A vollkommen abgedeckt. Für dieses Element werden die erforderlichen Auflastspannungen zum Nachweis der Basisabdichtung erst nach rd. 5 bis 10 Jahren Nachbetriebsphase erreicht. In Bild 1 ist ein Ausschnitt des angepassten Regelquer-schnitts dargestellt.

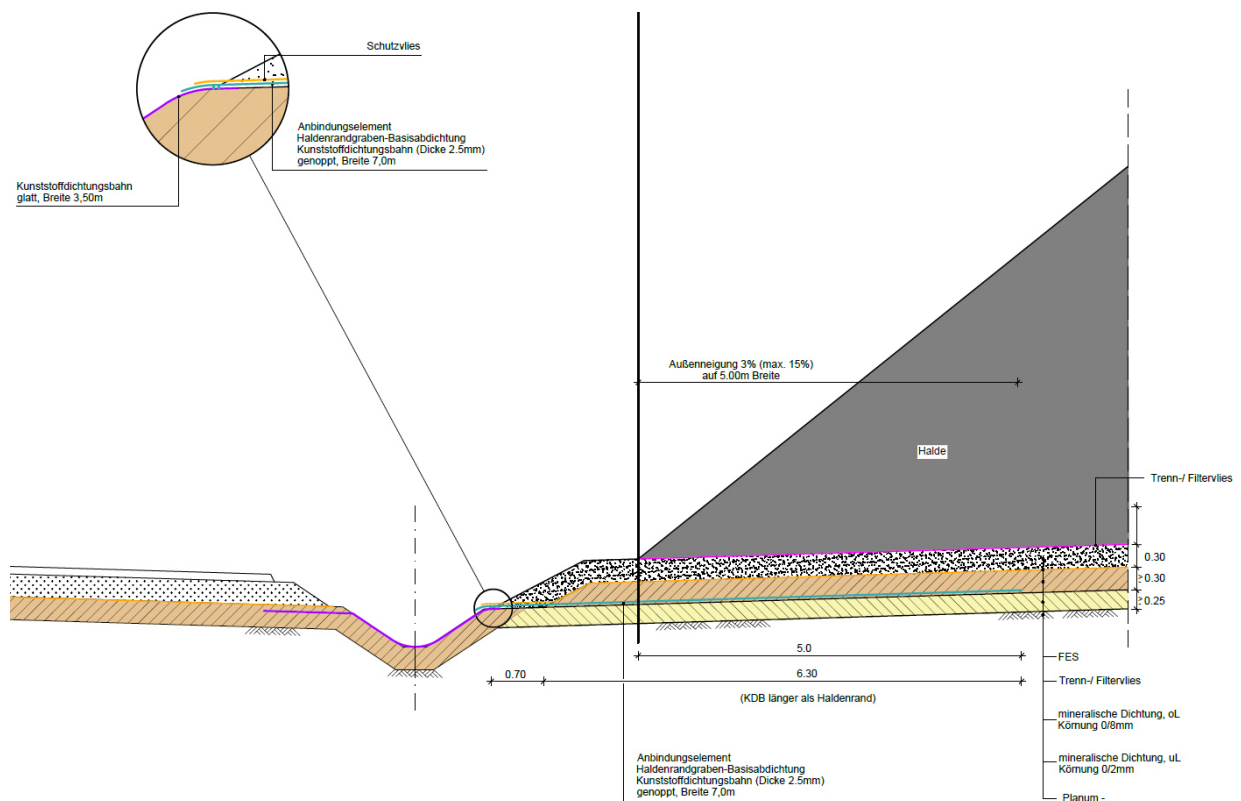


Bild 1: Regelquerschnitt gemäß [U4.2]

II. Standsicherheitsnachweis

In Abstimmung mit K+S ist die Standsicherheit im Schnitt C-C unter Ansatz einer Kunststoffdichtungsbahn (KDB) im Bereich des endgültigen Haldenfußes nachzuweisen. Die Standsicherheit des Böschungsfußes soll im vorliegenden Fall mit analytischen, zweidimensionalen Rechenverfahren für die Bemessungssituation BS-P (ständige Bemessungssituation gemäß DIN EN 1997-1/NA, DIN 1054 und DIN 4084) nachgewiesen werden.

Für die geometrischen Randbedingungen wurden folgende Festlegungen getroffen:

- Zweidimensionaler Berechnungsschnitt C-C' gemäß Numerik
- Haldenhöhe bis zu 165 m
- Böschungsneigung von 34° bis 37°
- Bermbreite = 100 m
- KDB bis 5 m hinter den endgültigen Haldenfuß

Aus den vorgenannten geometrischen Randbedingungen ergibt sich das in Bild 2 dargestellte Systembild des Schnittes C-C'.

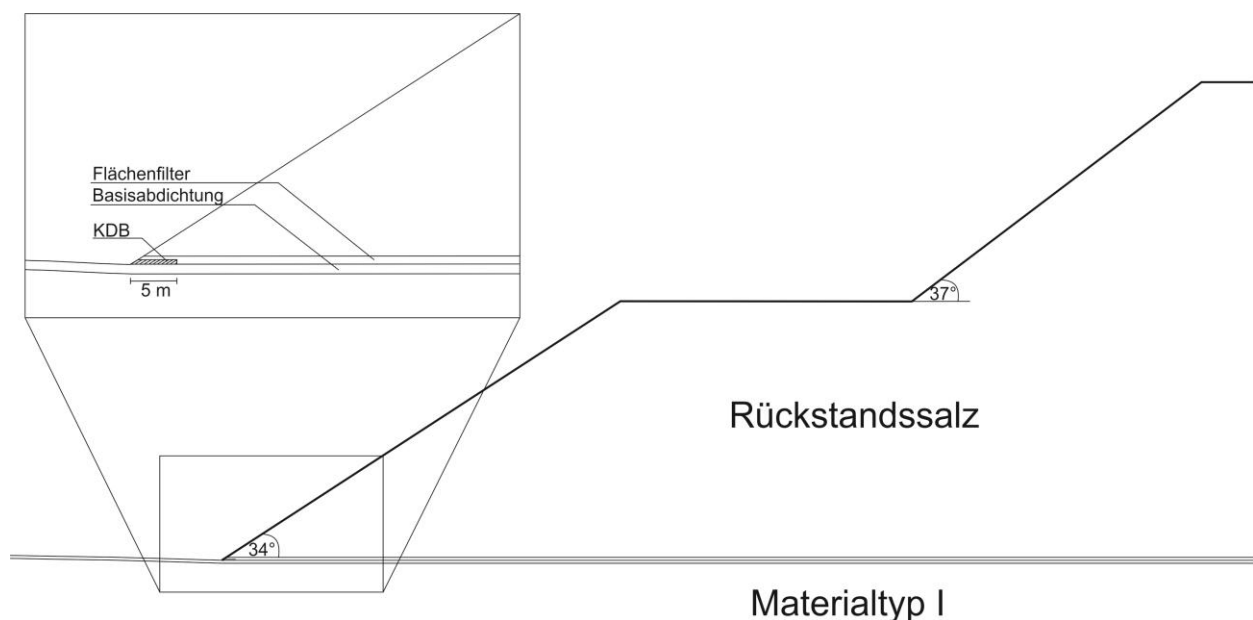


Bild 2: Berechnungsschnitt C-C'

Die Standsicherheit wurde im Berechnungsschnitt C-C' nach DIN 4084 sowohl mit kreisförmigen Gleitlinien als auch mit gebrochenen Gleitlinie als Polygonzüge für die Bemessungssituation BS-P nachgewiesen.

Der Baugrund inkl. System Basisabdichtung wurde mit den Schichten Flächenfilter, Basisabdichtung und Materialtyp MI abgebildet. Die bodenmechanischen Kennwerte entsprechen denen in den numerischen Berechnungen im Schnitt C-C' verwendeten. Das vorhandene Festgestein MII, das in einer Tiefe von rd. 4 m bis 8 m Tiefe (Haldenfuß bzw. Haldenvorland) ansteht, wurde nicht berücksichtigt, da der lokale Standsicherheitsnachweis für den Haldenfußbereich inkl. der eingebundenen KDB geführt werden soll. Die boden- und salzmechanischen Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

	Feuchtwichte γ' [kN/m ³]	Innerer Reibungswinkel φ' [°]	Kohäsion c' [kN/m ²]
Flächenfilter	19,5	37,5	0
Basisabdichtung	19,5	30	0
Materialtyp MI	19,5	27,5	5
Rückstandssalz	20	50	100

Tabelle 1: Boden- und salzmechanische Parameter

Gemäß aktueller Planung in [U4] soll eine beidseitig strukturierte KDB im Bereich des endgültigen Haldenfußes verlegt werden. Im Jahr 2020 wurden verschiedene KDBs in Rahmenscherversuchen gegen das Material der mineralischen Dichtung abgesichert. Die Ergebnisse für eine beidseitig strukturierte KDB sind in Tabelle 2 dokumentiert. Es wird in Bruchschersfestigkeit (Bruch) und Gleitschersfestigkeit (Gleiten) mit einem Scherweg von 25 mm im Schergerät unterschieden.

		Einzelwerte	Mittelwert
Bruch	Reibungswinkel φ' [°]	29,8 / 27,5 / 26,0	27,8
	Kohäsion c' [kN/m ²]	110 / 105 / 133	116
	Ersatzreibungswinkel $\varphi'_{c'=0}$ [°]	33,0 / 29,4 / 26,9	29,8
Gleiten	Reibungswinkel φ' [°]	18,2 / 24,2 / 26,0	22,8
	Kohäsion c' [kN/m ²]	70,4 / 81,3 / 66,3	72,7
	Ersatzreibungswinkel $\varphi'_{c'=0}$ [°]	19,1 / 26,5 / 27,1	24,2

Tabelle 2: Schersfestigkeiten mineralische Dichtung vs. KDB gemäß [U4]

Für den Nachweis der Standsicherheit wurden für die KDB folgende Schersfestigkeiten (Reibungswinkel und Kohäsion angesetzt):

Ersatzreibungswinkel $\varphi'_{c'=0} = 24^\circ$
 Kohäsion $c' = 0 \text{ kN/m}^2$

Insgesamt wurden zwei Varianten im Schnitt C-C untersucht:

- Berechnungsschnitt C-C' (Bild 2):
 - gekrümmte Gleitlinien
 - gebrochene Gleitlinien durch die KDB

Der Nachweis der Standsicherheit wird unter Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes nach DIN EN 1997-1, DIN 1054 und DIN 4084 geführt. Zugrunde gelegt werden die Teilsicherheitsbeiwerte für die ständige Bemessungssituation BS-P, die das größte Sicherheitsniveau im Sinne der vorgenannten Vorschriften gewährleistet.

Zum Nachweis der Standsicherheit werden die Einwirkungen (Beanspruchungen) wie auch die Widerstände (Beanspruchbarkeit) durch sog. charakteristische Werte beschrieben. Charakteristische Werte sind „vorsichtige“ Mittelwerte, die aus Berechnungen oder aus Materialuntersuchungen abgeleitet werden. Sie erhalten den Index „k“. Die Definition für charakteristische Bodenkennwerte ist der DIN 4020 „Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-2“ zu entnehmen.

Die charakteristischen Werte der Einwirkung E_k und des Widerstandes R_k werden durch die Teilsicherheitsbeiwerte γ_F bzw. γ_R in Bemessungswerte überführt, die durch den Index „d“ gekennzeichnet sind. Die Teilsicherheitsbeiwerte unterscheiden sich je nach Bemessungssituation, nach Art der Einwirkungen und Widerstände (ständig oder veränderlich) und nach Typus der Einwirkungen und der Widerstände. Die Bemessungswerte sind damit die durch Faktoren erhöhten (Einwirkungen) oder abgeminderten (Widerstände) Größen, mit denen der Grenzzustand nachgewiesen wird.

$$\text{Einwirkung: } E_d = E_k \cdot \gamma_F$$

$$\text{Widerstand: } R_d = R_k / \gamma_R$$

Alle rechnerischen Nachweise werden durch einen Vergleich von Beanspruchung und Widerstand geführt. Der Bemessungswert der Beanspruchungen E_d darf nicht größer sein als der Bemessungswert des Widerstandes R_d eines Bauwerkes oder Bauteils:

$$E_d \leq R_d$$

Anders ausgedrückt, darf der so genannte Ausnutzungsgrad μ eines Bauwerkes oder einer Konstruktion, der aus dem Quotienten des Widerstandes R_d und der Einwirkung E_d gebildet wird, den Wert 1 nicht überschreiten.

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

Wird die o.g. Bedingung eingehalten, so ist sichergestellt, dass das Bauwerk bzw. die Konstruktion mindestens mit der gemäß den Teilsicherheitsbeiwerten γ_F bzw. γ_R definierten Sicherheit standsicher ist.

Für den Berechnungsschnitt C-C' werden nachfolgend für alle Bruchmechanismen die ungünstigsten Gleitkörper mit dem berechneten Ausnutzungsgrad dargestellt. Die untersuchten Varianten sind in den Bildern 3 und 4 sowie in der Anlage 1 dokumentiert.

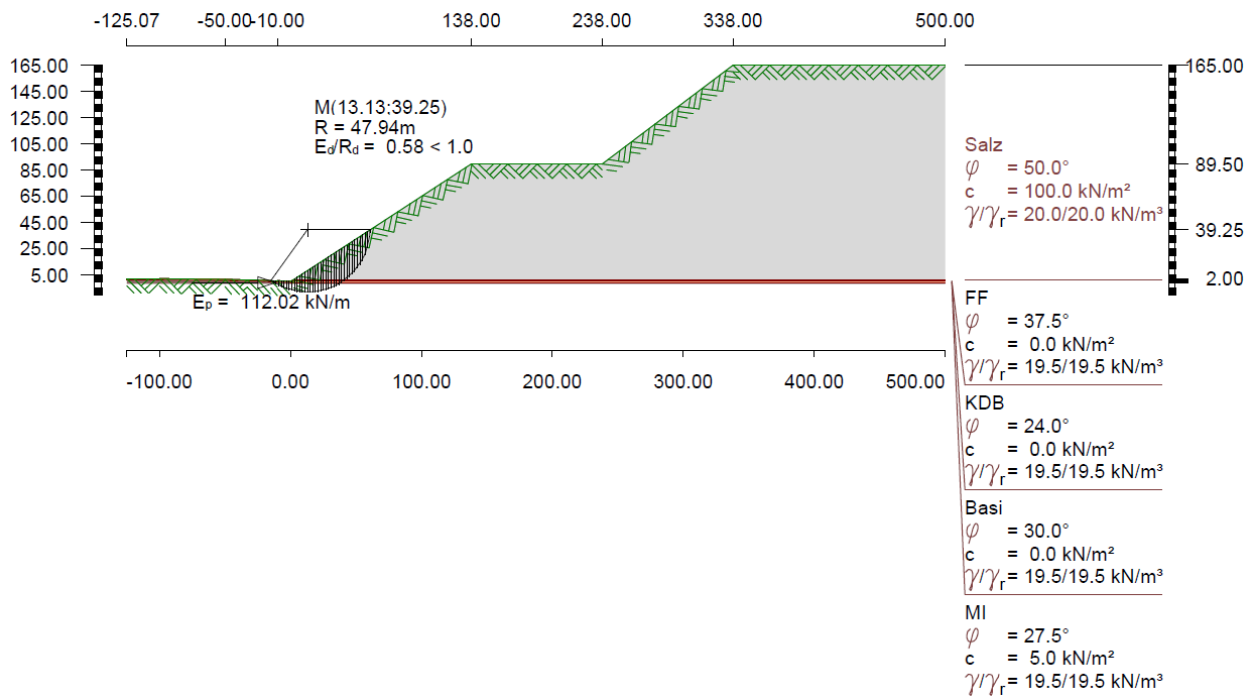


Bild 3: Berechnungsschnitt C-C', kreisförmige Gleitlinie

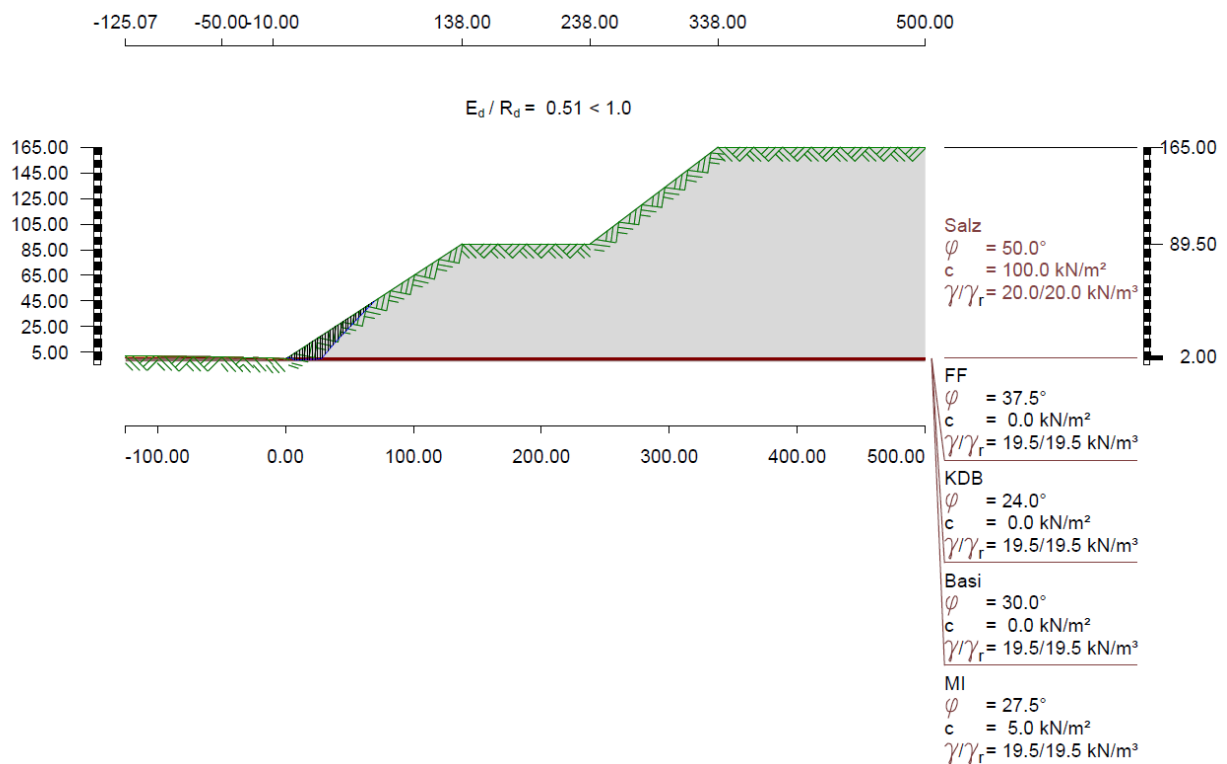


Bild 4: Berechnungsschnitt C-C', gebrochene Gleitlinie durch die KDB

Die berechneten Ausnutzungsgrade μ für die einzelnen Varianten des Berechnungsschnittes C-C' sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Aus Tabelle 3 wird ersichtlich, dass der Ausnutzungsgrad μ für die untersuchten Varianten maximal $\mu = 0,58$ für kreisförmige Gleitlinien und $\mu = 0,51$ für gebrochene Gleitlinien beträgt.

Berechnungsschnitt C-C'	Ausnutzungsgrad μ [-]
kreisförmige Gleitlinien	0,58
gebrochene Gleitlinien durch die KDB	0,51

Tabelle 3: Ausnutzungsgrade des Berechnungsschnittes C-C'

Der maximale Ausnutzungsgrad beträgt $\mu = 0,58$. Mit dem Ausnutzungsgrad $\mu \leq 1,0$ ist die Standsicherheit des Böschungssystems im Berechnungsschnitt C-C' unter Berücksichtigung einer 5 m breiten KDB im Bereich des endgültigen Haldenfußes nachgewiesen.

III. Schlussbemerkung

Auf Basis der vorliegenden Unterlagen haben wir die lokale Standsicherheit des Haldenfußes im Schnitt C-C' unter Berücksichtigung einer 5 m langen, beidseitig strukturierten KDB untersucht. Die Nachweise der Standsicherheit gegen Böschungsbruch nach DIN 4084 sind unter den vorgeannten Randbedingungen erbracht.

Der bautechnischen Lösung in Form eines Einbaus einer 5 m langen (Einbindelänge) KDB im Bereich des Haldenfußes kann sachverständigenseits zugestimmt werden. Durch den Einbau der KDB wird die Gebrauchstauglichkeit des Systems Basisabdichtung bis zum Erreichen der erforderlichen Auflastspannungen gewährleistet. Die gemäß [U2] erforderlichen Auflastspannungen werden gemäß [U3.2] nach 5 Jahren bzw. 10 Jahren Nachbetriebsphase erreicht.

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

Uatzenbach
Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach
-Vereidigter Sachverständiger-



M. Seip
Dipl.-Ing. Matthias Seip
-Prüfsachverständiger nach HPPVO-



Verteiler: siehe Seite 10

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
Herrn Dr. Michael Wündsche,
E-Mail: michael.wuendsch@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