

**Anlage 6:**

Ingenieursozietät Prof. Dr.-Ing. Katzenbach GmbH:

Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/01 K+S

Minerals and Agriculture GmbH, Werk Werra,  
Standort Hattorf

Numerische Untersuchungen zur  
Standicherheit und Gebrauchstauglichkeit der  
geplanten Haldenerweiterung Phase 2 der Halde Hattorf.

Darmstadt, 31.05.2021

K+S Minerals and Agriculture GmbH  
Werk Werra · Standort Hattorf  
Postfach 11 63  
36267 Philippsthal (Werra)

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

K/Vo/Se/Le/Te  
IK2035  
31.05.2021

**K+S Minerals and Agriculture GmbH · Werk Werra · Standort Hattorf**

hier: Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/01 zu den numerischen Untersuchungen zur  
Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der geplanten Haldenerweiterung Phase 2  
der Halde Hattorf

Sehr geehrte Frau Gerber,  
sehr geehrter Herr Artschwager,  
sehr geehrte Damen und Herren,

in der Anlage erhalten Sie unser o.g. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/01 1-fach im  
Original sowie die Unterschriftenseite 7-fach im Original. Das Sachverständigen-Gutachten  
geht verabredungsgemäß einfach mit gleicher Post und per E-Mail an die K+S AG.

Für evtl. Rückfragen und weitergehende Erläuterungen stehen wir Ihnen gerne jederzeit zur  
Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

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



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



D/: - K+S AG, Herrn Dr.-Ing. Schleinig, Elisabeth-Consbruch-Straße 1, 34131 Kassel,  
vorab per E-Mail: jan-peter.schleinig@k-plus-s.com

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

01001 Kiev (Ukraine)  
Kreschatik Street, 7/11, office 602  
Tel: +38 044 / 49592-65  
Fax: +38 044 / 49592-64



K/Vo/Se/Le/Te  
IK2035  
31.05.2021

## SACHVERSTÄNDIGEN-GUTACHTEN Nr. IK2035/01

**Vorhaben:** **K+S Minerals and Agriculture GmbH • Werk Werra • Standort Hattorf**  
Numerische Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der geplanten Haldenerweiterung Phase 2 der Halde Hattorf

**Auftraggeber:** **K+S Minerals and Agriculture GmbH**  
Werk Werra • Standort Hattorf  
36267 Philippsthal

**Geotechnische Sachverständige:** Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH  
Vereidigte und nach Bauordnungsrecht anerkannte  
Sachverständige für Geotechnik  
Robert-Bosch-Straße 9 • 64293 Darmstadt

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite:</b>
<b>1</b>	<b>Vorgang</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Unterlagen</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Numerische Untersuchungen zur Haldenerweiterung Hattorf</b>	<b>13</b>
3.1	Geplante Erweiterung	13
3.1.1	Topographie	13
3.1.2	Baugrundverhältnisse	16
3.1.3	Abmessung und Geometrie	17
3.2	Numerische Modellbildung und Materialkennwerte für die numerischen Untersuchungen	17
3.3	Kalibrierung des numerischen Modells	17
3.4	Nachweis- und Sicherheitskonzept	20
3.5	Numerische Untersuchungen zur Standsicherheit	22
3.6	Numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit	22
3.7	Prüfung der numerischen Untersuchungen für die Phase 2	23
<b>4</b>	<b>Ergänzende Untersuchungen im Anschüttungsbereich der Phase 2 auf der Basis der numerischen Berechnungen im Schnitt 1-1'</b>	<b>27</b>
4.1	Grundlagen	28
4.1.1	Topographie	28
4.1.2	Baugrundverhältnisse	29
4.2	Numerische Modellbildung	30
4.3	Materialkennwerte für die numerischen Untersuchungen	32
4.3.1	Baugrund	32
4.3.2	Bodenmechanische Parameter in der Aufstandsfläche	34
4.3.3	Salzmechanische Parameter des Rückstandssalzes	35
4.4	Verifizierung des numerischen Modells	37
4.5	Nachweis- und Sicherheitskonzept	38
4.6	Numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit im Anschüttungsbereich der Phase 2	39
4.6.1	Numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit Schnitt 1-1' 2021 mit Schüttblock	40
4.6.1.1	Vertikale Verschiebungen und Setzungen	40
4.6.1.2	Dehnungen in der Basisabdichtung am Ende des Betrachtungszeitraums	42

<b>5</b>	<b>Vorgaben zur Bemessung des Systems Basisabdichtung Haldenerweiterung</b>	
	<b>Phase 2</b>	<b>43</b>
5.1	Charakteristische Setzungs- und Dehnungsverteilungen	43
5.2	Monitoring im Rahmen der Beobachtungsmethode	44
5.3	Überprüfung der Baugrundsituation der einzelnen Beschüttungsabschnitte	45
<b>6</b>	<b>Schlussbemerkung / Zusammenfassung</b>	<b>45</b>

### Bilderverzeichnis:

<b>Bild 1:</b>	Lageplan der genehmigten Halde Hattorf, der genehmigten nordwestlich gelegenen Haldenerweiterung Phase 1 und den geplanten südwestlich gelegenen Erweiterungsflächen Phase 2 und Phase 3 mit den Untersuchungsschnitten 1-1' (Südwestflanke), A-A' und C-C'. Schnitt B-B' nur informativ	<b>6</b>
<b>Bild 2:</b>	Schnitt A-A' [U6.6]	<b>14</b>
<b>Bild 3:</b>	Schnitt B-B' [U6.6]	<b>14</b>
<b>Bild 4:</b>	Schnitt C-C' <sub>2016</sub> [U6.6]	<b>15</b>
<b>Bild 5:</b>	Schnitt C-C' <sub>2017</sub> [U6.6]	<b>15</b>
<b>Bild 6:</b>	Schnitt A-A' <sub>2018</sub> [U6.15]	<b>16</b>
<b>Bild 7:</b>	Schnitt C-C' <sub>2018</sub> [U6.15]	<b>16</b>
<b>Bild 8:</b>	Numerisches Modell zur Kalibrierung der gesamten Modellbildung	<b>18</b>
<b>Bild 9:</b>	Gemessene und berechnete horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten $v_h$ in [cm/a], aufgetragen über die Zeit	<b>19</b>
<b>Bild 10:</b>	Gemessene und berechnete horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten $v_h$ in [cm/a], aufgetragen über die Tiefe der Inklinometer in [m]	<b>20</b>
<b>Bild 11:</b>	Aktuelle gemessene und berechnete horizontale Verformungsgeschwindigkeiten $v_h$ in [cm/a] im Bereich des Messpunkts 81 und an den Permanentmessstationen PMS 32 und 34.2, aufgetragen über die Zeit	<b>24</b>
<b>Bild 12:</b>	Detail Haldenerweiterung Phase 2 mit dem haldenfußnahen Bereich mit lokal größeren gemessenen horizontalen Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten	<b>27</b>
<b>Bild 13:</b>	Schnitt 1-1' <sub>2021</sub> mit Schütthistorie und Schüttblock für die Betrachtung der Haldenerweiterung der Phase 2	<b>29</b>
<b>Bild 14:</b>	Numerisches Modell zur Untersuchung der Anschüttung Phase 2 an die bestehende Rückstandshalde im Schnitt 1-1' <sub>2021</sub>	<b>30</b>
<b>Bild 15:</b>	Modifiziertes Drucker-Prager-Modell	<b>32</b>

---

<b>Bild 16:</b>	Ergebnis der Ursachenforschung im Schnitt 1-1' gemäß [U6.8] und Ergebnis der Vergleichsberechnung im Schnitt 1-1' <sub>2021</sub> ohne Anschüttung der geplanten Erweiterung Phase 2 (Grundvariante)	<b>38</b>
<b>Bild 17:</b>	Vertikale Verschiebungen U3 in [m] im Zeitraum der Flächenvorbereitung (Anfang 2020 bis Ende 2020) des Schnitt 1-1' <sub>2021</sub> inkl. Schüttblock	<b>41</b>
<b>Bild 18:</b>	Horizontale Dehnungen und Stauchungen der Basisabdichtung unterhalb des Schüttblocks im Schnitt 1-1' <sub>2021</sub> , Endzustand	<b>42</b>
<b>Bild 19:</b>	Dehnungsverteilung unter dem Schüttblock der Haldenerweiterung der Phase im Schnitt 1-1' <sub>2021</sub> , Endzustand	<b>43</b>

**Tabellenverzeichnis:**

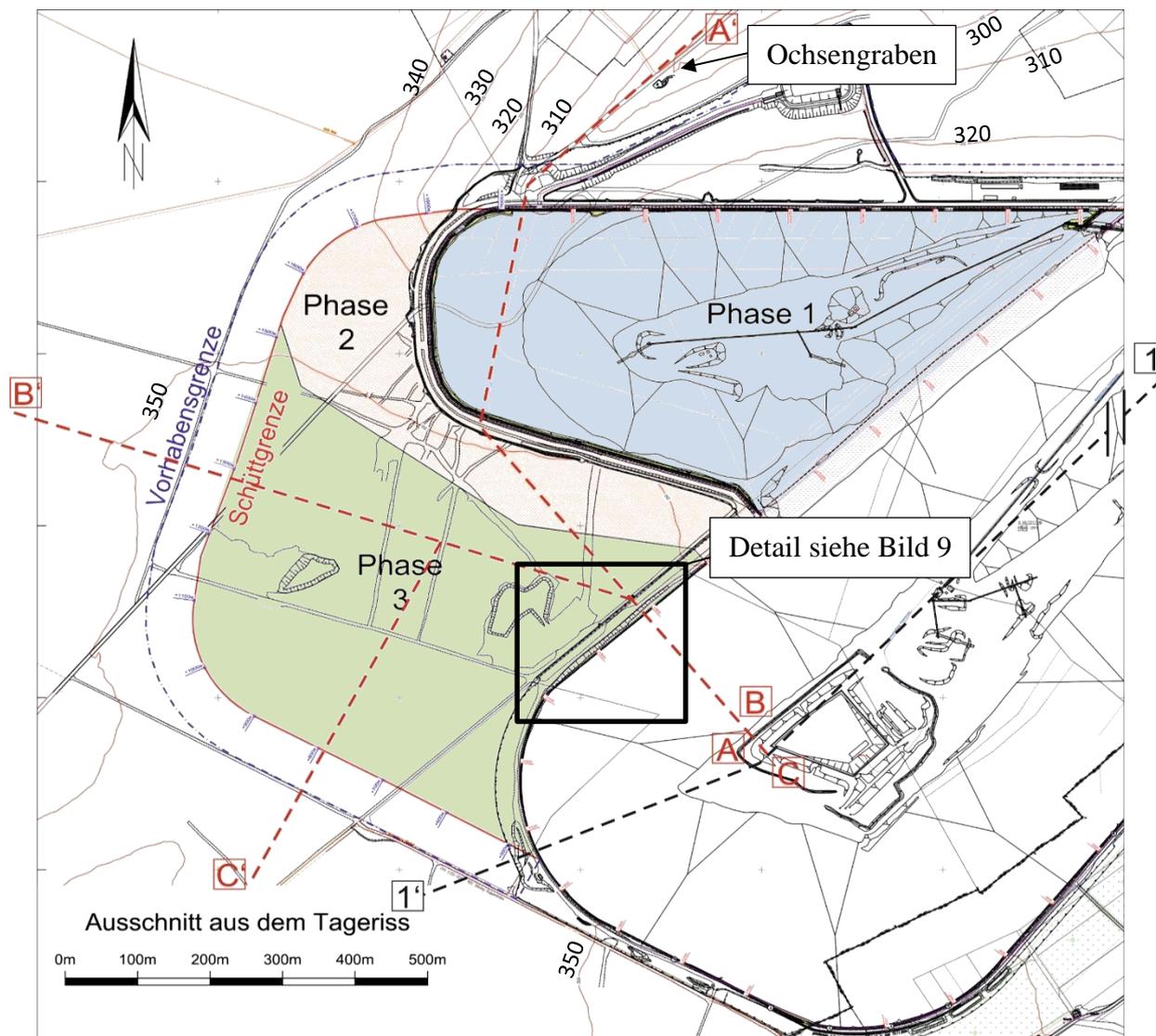
<b>Tabelle 1:</b>	Baugrundmodell der numerischen Untersuchungen	<b>32</b>
<b>Tabelle 2:</b>	Charakteristische Werte der boden- und felsmechanischen Parameter der Materialtypen I bis III	<b>32</b>
<b>Tabelle 3:</b>	Bodenmechanische Parameter der Basisabdichtung und des Flächenfilters in den Schnitten 1-1' <sub>2021</sub>	<b>34</b>
<b>Tabelle 4:</b>	Salzmechanische Parameter des Rückstandssalzes	<b>36</b>

## 1 Vorgang

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 unmittelbar an das Fabrikgelände anschließenden Halde abgelagert.

Die ESTA-Rückstandshalde Hattorf hat derzeit eine maximale Höhe über Grund von bis zu rd. 200 m und erstreckt sich in der Längsachse von Nordost nach Südwest. Die derzeitige Länge beträgt rd. 1.500 m. Mit dem Planfeststellungsbeschluss des Regierungspräsidiums Kassel für den Rahmenbetriebsplan „Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf)“, Aktenzeichen 34/Hef-76 d 40-11-314-30/717 vom 10.10.2018 wurde die Haldenerweiterung der Phase 1 (blaue Fläche) genehmigt, die im Nordwesten an die bestehende Rückstandshalde anschließt (Bild 1). Die geplante Haldenerweiterung der Phase 2 (orangene Fläche) schließt südlich der Haldenerweiterung Phase 1 an die Haldenerweiterung und die bestehende Rückstandshalde an. Die geplante Phase 3 (grüne Fläche) ist nicht Teil des gegenständlichen Sachverständigen-Gutachtens Nr. IK2035/01.

Die geplante Phase 2 der Haldenerweiterung Hattorf soll südlich der Haldenerweiterung Phase 1 an die Bestandshalde Hattorf anschließen (Haldenstationierung 1+000 bis 1+100). Zulassungsvoraussetzung für die Phase 2 ist, dass die Verträglichkeit der zu erwartenden Verformungen für das Gesamtsystem Halde, System Basisabdichtung und Untergrund sowie eventuelle Schutzgüter im Haldenvorland nachgewiesen werden. Diese Anforderung an die Gebrauchstauglichkeit gilt für die Betriebsphase vom Zeitpunkt der Flächenvorbereitung bis zur Beschüttung sowie die Nachbetriebsphase im bisher betrachteten Zeitraum der numerischen Untersuchungen. Gleichzeitig ist die Standsicherheit in Betriebs- und Nachbetriebsphase nachzuweisen.



**Bild 1:** Lageplan der genehmigten Halde Hattorf, der genehmigten nordwestlich gelegenen Haldenerweiterung Phase 1 und den geplanten südwestlich gelegenen Erweiterungsflächen Phase 2 und Phase 3 mit den Untersuchungsschnitten 1-1' (Südwestflanke), A-A' und C-C'. Schnitt B-B' nur informativ

In unseren Sachverständigen-Gutachten Nr. 1713/01 vom 10.02.2017 [U6.6] und Nr. IK1754/01 vom 27.04.2018 [U6.15] sind die Ergebnisse unserer bisherigen, sehr umfangreichen numerischen Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der insgesamt geplanten und für die Phase 1 genehmigten Haldenerweiterung dokumentiert. Diese numerischen Untersuchungen berücksichtigen insgesamt drei unterschiedliche Untersuchungsschnitte (A-A', B-B' und C-C'), die veränderliche Geometrie der Halde während des Schüttprozesses sowie eine Kontaktformulierung zur Übertragung der Schubspannungen in der Aufstandsfläche und in der Schwächezone. Die

numerischen Untersuchungen untergliedern sich in Basisuntersuchungen für die Schnitte A-A', B-B' und C-C' sowie in ergänzende Untersuchungen für die Schnitte A-A' und C-C'. In [U6.6] wurde zunächst der bis Februar 2017 gültige Planstand berücksichtigt. Die Untersuchungsschnitte in [U6.6] wurden mit A-A', B-B', C-C'<sub>2016</sub> und C-C'<sub>2017</sub> bezeichnet. In [U6.15] wurde zusätzlich die geänderte Planung für die Haldenerweiterung Hattorf entsprechend des RBP HA-04/09 in der Fassung der 2. Planänderung nach Maßgabe der Konzeptstudie vom 22.09.2017 [U1.4] berücksichtigt. Dabei wurden ergänzende numerische Untersuchungen mit Berücksichtigung des Systems Basisabdichtung, bestehend aus Witterungsschutzschicht, Flächenfilter und Dichtung unterhalb der Haldenerweiterung in den Untersuchungsschnitten A-A' und C-C' durchgeführt. Die Schnitte wurden mit A-A'<sub>2018</sub> und C-C'<sub>2018</sub> bezeichnet.

Seit Herbst 2011 werden im Bereich der Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde außergewöhnlich große und bisher im Bereich der Bestandshalde nicht beobachtete horizontale und vertikale Verschiebungen des Böschungsfußes und des Haldenvorfeldes gemessen. K+S hat daraufhin die Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH beauftragt, die Ursachen für die in diesem Bereich im Vergleich zur Bestandshalde hinsichtlich Betrag und Geschwindigkeit auffälligen Verformungen festzustellen. Auftragsgemäß wurden die folgenden Untersuchungen im Zeitraum März 2016 bis Juni 2017 durchgeführt:

- Ursachenforschung mit Erkundung der geotechnischen Verhältnisse und Eigenschaften des Baugrunds sowie die Bewertung der Verformungsprozesse
- Numerische Untersuchungen im Schnitt 1-1' (Bild 1) zu den gemessenen Verschiebungen und den Verschiebungsmechanismen/-ursachen am Böschungsfuß und im Haldenvorfeld

Die Ergebnisse der Ursachenforschung inklusive der ergänzenden Baugrunderkundungsmaßnahmen sind in unserem Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1655/01 vom 23.06.2017 [U6.7] dokumentiert. Die Ergebnisse der umfangreichen numerischen Untersuchungen zu den gemessenen Verschiebungen und den Verschiebungsmechanismen/-ursachen am Böschungsfuß und im Haldenvorfeld im Bereich der Südwestflanke der Halde sind in unserem Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1657/01 vom 23.06.2017 [U6.8] dokumentiert.

Im gegenständlichen geotechnischen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/01 werden die bereits ausgeführten und dokumentierten numerischen Untersuchungen hinsichtlich ihrer Gültigkeit für die geplante Haldenerweiterung Phase 2 geprüft und bewertet. Zusätzlich wurden, zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit des Systems Basisabdichtung im Anschüttungsbereich an die Bestandshalde ergänzende numerische Untersuchungen im Schnitt 1-1' durchgeführt, die ebenfalls im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/01 dokumentiert sind. Zur Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit des Systems Basisabdichtung wurde die Ingenieursozietät

Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH (IK) von der K+S Minerals and Agriculture GmbH (K+S), Werk Werra, beauftragt, mit der Finite-Element-Methode (FEM) numerische Berechnungen unter besonderer Berücksichtigung des stark zeitvarianten Materialverhaltens des Rückstandssalzes durchzuführen. Hierzu wurden für den Haldenkörper ein am Institut und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt (TU Darmstadt) entwickeltes viskoplastisches Materialgesetz für Rückstandssalz verwendet [U7].

## 2 Unterlagen

- [U1] K+S KALI GmbH, Werk Werra, Standort Hattorf:
1. E-Mail zu den Ergebnissen der Inklinometermessungen vom 26.05.2014
  2. E-Mail mit Messdaten zur Südwestflanke vom 23.11.2015
  3. E-Mail zu den Baugrundverhältnissen auf der Ruppertshöhe vom 05.01.2016
  4. Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf“ (Haldenerweiterung Hattorf); Rahmenbetriebsplan RBP HA-04/09, DVS Nr. 3002013, in der Fassung der 2. Planänderung nach Maßgabe der Konzeptstudie vom 22.09.2017 (Anlage 3 zu Band 1.1. der Antragsunterlage)
  5. Quartalsbericht II und III/2018 zum Verformungsmonitoring ESTA-Halde Hattorf vom 06.12.2018
  6. Quartalsbericht IV/2018 zum Verformungsmonitoring ESTA-Halde Hattorf vom 04.03.2019
  7. Quartalsbericht I/2019 zum Verformungsmonitoring ESTA-Halde Hattorf vom 06.06.2019
  8. Quartalsbericht II/2019 zum Verformungsmonitoring ESTA-Halde Hattorf vom 13.09.2019
- [U2] K+S Minerals and Agriculture GmbH, Werk Werra, Standort Hattorf:
1. Quartalsbericht III/2019 zum Verformungsmonitoring ESTA-Halde Hattorf vom 13.12.2019
  2. Quartalsbericht IV/2019 zum Verformungsmonitoring ESTA-Halde Hattorf vom 02.03.2020
  3. Quartalsbericht I/2020 zum Verformungsmonitoring ESTA-Halde Hattorf vom 15.06.2020
  4. Quartalsbericht II/2020 zum Verformungsmonitoring ESTA-Halde Hattorf vom 09.09.2020

5. Quartalsbericht III/2020 zum Verformungsmonitoring ESTA-Halde Hattorf vom 07.12.2020
6. Quartalsbericht IV/2020 zum Verformungsmonitoring ESTA-Halde Hattorf vom 09.03.2021
7. Band 3.16.4 des Rahmenbetriebsplans RBP HA-04/09 „Anpassung der Infrastruktur entlang des Haldenrandes der ESTA-Rückstandshalde, Bereich Nord-west – Maßnahme 2019, Baugrunddokumentation“, Entwurf vom Mai 2021

[U3]

Das Baugrund Institut Dipl.-Ing. Knierim GmbH, Kassel:

1. Geotechnisches Gutachten Halde Hattorf Erweiterung der ESTA Rückstandshalde vom 13.02.2013
2. Gutachterliche Stellungnahme, Halde Hattorf, Erweiterung der ESTA Rückstandshalde, ergänzende Untersuchungen zur Lage der Felsoberfläche vom 14.03.2013

[U4]

Hessisches Landesamt für Bodenforschung:

Gutachten über die Erweiterung der Rückstandshalde des Kaliwerkes Hattorf, Philippsthal (Werra), Kreis Hersfeld-Rotenburg vom 13.09.1977

[U5]

Professor Dr.-Ing. Rolf Katzenbach, Institutsdirektor, Vereidigter Sachverständiger, Darmstadt:

1. Sachverständigen-Gutachten zur Langzeitstabilität von Salzhalden auf söhlig gelagertem Buntstandstein vom 18.01.1996
2. Sachverständigen-Gutachten zur Langzeitstabilität der Halde Hattorf unter Berücksichtigung der geplanten Haldenerweiterung (K96012) vom 20.08.1998
3. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK0262/01 „Grundsatzstudie zur Langzeitstabilität von Salzhalden auf Fels und Lockergestein“ vom 30.04.2003
4. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK0231/01 zur Kalibrierung der Stoffparameter anhand der vorliegenden Verformungsmessungen am Inklinometer 1 für den Haldenquerschnitt, Entwurf vom 25.06.2013

[U6]

Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH, Darmstadt:

1. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1311/01 zu den Kernbohrungen des Festgesteins für die geplante Haldenerweiterung vom 28.05.2014
2. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1312/01 zu den numerischen Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit für die geplante Haldenerweiterung vom 10.06.2014

3. Stellungnahme Nr. IK1687/01 zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 05.09.2016
4. Stellungnahme Nr. IK1657/01 zu den Untersuchungen zu den Verformungsmechanismen/-ursachen am Böschungsfuß und im Haldenvorfeld im Bereich der Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde Hattorf unter Berücksichtigung der vorliegenden Verformungsmessungen vom 06.02.2017
5. Stellungnahme Nr. IK1687/02 zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 10.02.2017
6. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1713/01 zu den numerischen Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit für die geplante Haldenerweiterung vom 10.02.2017
7. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1655/01 zur Ursachenforschung an der Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde Hattorf vom 23.06.2017
8. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1657/01 zu den numerischen Untersuchungen zu den gemessenen Verformungen und den Verformungsmechanismen/-ursachen am Böschungsfuß und im Haldenvorfeld im Bereich der Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde Hattorf vom 23.06.2017
9. Stellungnahme Nr. IK1687/03 zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 27.07.2017
10. Stellungnahme Nr. IK1687/04 zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 28.07.2017
11. Stellungnahme Nr. IK1687/05 zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 01.11.2017
12. Stellungnahme Nr. IK1687/06 zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 22.01.2018
13. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1811/01 zur Baugrunderkundung am nördlichen Rand der Haldenerweiterung Hattorf im Bereich Ochsengraben vom 27.04.2018
14. Geotechnische Stellungnahme Nr. IK1754/01 zu den Nachweisen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der geplanten Haldenerweiterung Hattorf unter Berücksichtigung der hydraulischen Trennung vom 27.04.2018
15. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1754/01 zu den numerischen Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der geplanten Haldenerweiterung Hattorf vom 27.04.2018
16. Stellungnahme Nr. IK1687/07 (Hessen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 18.06.2018
17. Stellungnahme Nr. IK1687/08 (Thüringen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 18.06.2018

18. Stellungnahme Nr. IK1687/10 zur Befahrung der Rückstandshalde Hattorf am 22.08.2018 vom 31.08.2018
19. Geotechnische Stellungnahme Nr. IK1610/06 zur geotechnischen Prüfung und Beurteilung des Beschüttungsabschnitts A1 der geplanten Haldenerweiterung Hattorf im Rahmen der Beobachtungsmethode vom 13.09.2018
20. Stellungnahme Nr. IK1687/12 (Hessen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 22.01.2019
21. Stellungnahme Nr. IK1687/13 (Thüringen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 22.01.2019
22. Stellungnahme Nr. IK1687/14 (Hessen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 29.01.2019
23. Stellungnahme Nr. IK1687/15 (Thüringen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 29.01.2019
24. Stellungnahme Nr. IK1687/16 (Hessen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 26.03.2019
25. Stellungnahme Nr. IK1687/17 (Thüringen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 26.03.2019
26. Stellungnahme Nr. IK1687/19 (Hessen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 27.06.2019
27. Stellungnahme Nr. IK1687/20 (Thüringen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 27.06.2019
28. Stellungnahme Nr. IK1687/21 (Hessen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 08.10.2019
29. Stellungnahme Nr. IK1687/22 (Thüringen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 14.10.2019
30. Stellungnahme Nr. IK1687/23 (Hessen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 12.12.2019
31. Stellungnahme Nr. IK1687/24 (Thüringen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 13.12.2019
32. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1934/01 zu den numerischen Untersuchungen zum möglichen Teilrückbau der oberen Haldenböschung im Bereich der Südwestflanke der bestehenden Halde Hattorf vom 25.11.2019 (Entwurf)
33. Stellungnahme Nr. IK1687/25 (Hessen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 18.03.2020
34. Stellungnahme Nr. IK1687/26 (Thüringen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 18.03.2020
35. Stellungnahme Nr. IK1687/27 (Hessen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 25.06.2020

36. Stellungnahme Nr. IK1687/28 (Thüringen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 02.07.2020
37. Geotechnische Stellungnahme Nr. IK1610/10a zur geotechnischen Prüfung und Beurteilung des Beschüttungsabschnitts A2 und A3 der geplanten Haldenerweiterung Hattorf im Rahmen der Beobachtungsmethode vom 07.07.2020
38. Stellungnahme Nr. IK1687/29 (Hessen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 18.09.2020
39. Stellungnahme Nr. IK1687/30 (Thüringen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 21.09.2020
40. Stellungnahme Nr. IK1610/13 zur geotechnischen Prüfung und Beurteilung des Beschüttungsabschnitts A4 und A5 der geplanten Haldenerweiterung Hattorf im Rahmen der Beobachtungsmethode vom 25.09.2020
41. Stellungnahme Nr. IK1687/31 (Hessen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 14.12.2020
42. Stellungnahme Nr. IK1687/32 (Thüringen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 15.12.2020
43. Stellungnahme Nr. IK1687/33 (Hessen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 26.03.2021
44. Stellungnahme Nr. IK1687/44 (Thüringen) zu den Ergebnissen der messtechnischen Überwachung der Bestandshalde Hattorf vom 29.03.2021

[U7] Leppla, S. (2017):  
Zeitvariantes Materialverhalten von granularem Steinsalz und Simulation in numerischen Modellen. Mitteilungen des Instituts und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 103 vom Dezember 2017

[U8] Regierungspräsidium Kassel:  
Planfeststellungsbeschluss für den Rahmenbetriebsplan „Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf“ (Haldenerweiterung Hattorf), Aktenzeichen: 34/Hef-76 d 40-11-314-30/717 vom 10.10.2018

### 3 Numerische Untersuchungen zur Haldenerweiterung Hattorf

Im Folgenden werden die numerischen Untersuchungen für die Haldenerweiterung Hattorf, bestehend aus Basisuntersuchungen und ergänzenden Untersuchungen, in den Schnitten A-A', B-B' und C-C' beschrieben. Randbedingungen, Vorgehen und Ergebnisse sind in [U6.6] und [U6.15] detailliert dokumentiert. In Abhängigkeit vom Planungsstand aktualisierte Schnitte werden durch die Jahreszahl im Index unterschieden. Insgesamt sind folgende Untersuchungsschnitte dokumentiert:

- Schnitt A-A' in [U6.6], siehe auch Bild 2
- Schnitt B-B' in [U6.6], siehe auch Bild 3
- Schnitt C-C'<sub>2016</sub> in [U6.6], siehe auch Bild 4
- Schnitt C-C'<sub>2017</sub> in [U6.6], siehe auch Bild 5
- Schnitt A-A'<sub>2018</sub> in [U6.15], siehe auch Bild 6
- Schnitt C-C'<sub>2018</sub> in [U6.15], siehe auch Bild 7

Für die geplante Phase 2 sind diese numerischen Untersuchungen auf ihre Gültigkeit zu überprüfen.

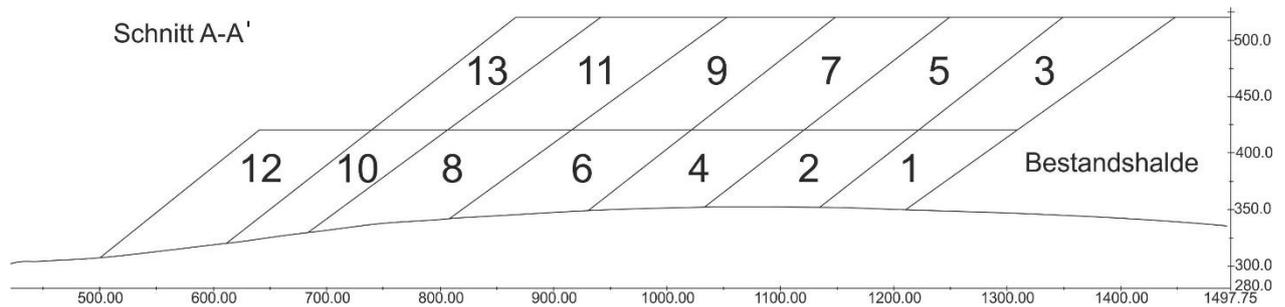
#### 3.1 Geplante Erweiterung

##### 3.1.1 Topographie

Einen Überblick über die gesamte Fläche der geplanten Haldenerweiterung mit den Phasen 1, 2 und 3 gibt Bild 1. Im südlichen Bereich der Erweiterungsfläche steigt das Gelände leicht nach Westen hin an. Im nördlichen Bereich fällt das Gelände in den Ochsengraben in nordwestlicher bis nordöstlicher Richtung ein. Die Absoluthöhe der Haldenaufstandsfläche befindet sich im südlichen Bereich bei rd. 355 mNN und im nordöstlichen Bereich bei rd. 305 mNN.

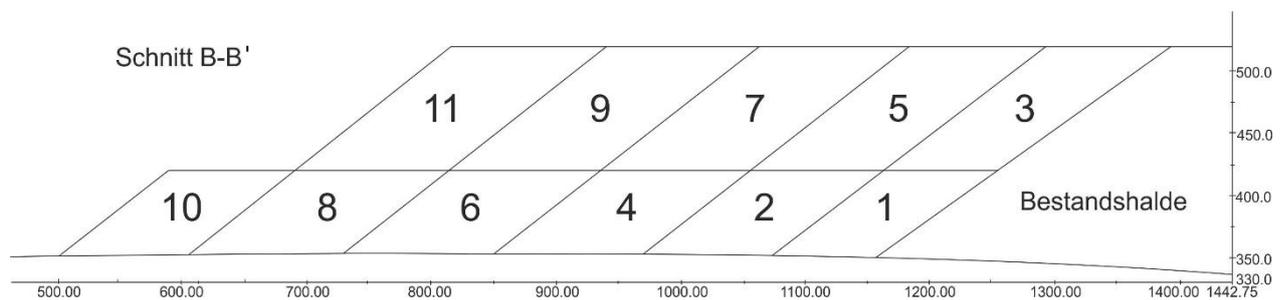
Bei den bisherigen numerischen Untersuchungen (Basisuntersuchungen) zu den Berechnungsschnitten A-A', B-B', C-C'<sub>2016</sub> und C-C'<sub>2017</sub> [U6.6] sind die nachfolgend beschriebenen topografischen und geometrischen Randbedingungen berücksichtigt:

Gemäß ursprünglicher Planung erfolgt die Beschüttung der Haldenerweiterung im Schnitt A-A' in zwei Schüttscheiben mit insgesamt 13 Schüttblöcken. Der Abstand zwischen Böschungsfuß und Vorhabensgrenze beträgt 25 m. Die Geländeneigung des Schnittes A-A' beträgt am nördlichen Rand der geplanten Haldenerweiterung in der Tallinie des Ochsengrabens max. ca. 15 %. Dies entspricht einer maximalen Geländeneigung der Aufstandsfläche von rd. 8,5 Grad (Bild 2).



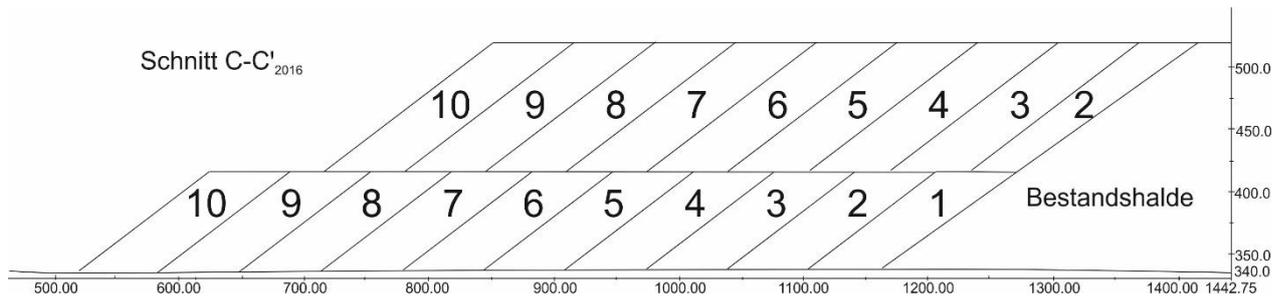
**Bild 2:** Schnitt A-A' [U6.6]

Die Beschüttung der Haldenerweiterung im Schnitt B-B' erfolgt gemäß der ursprünglichen Planung in zwei Schüttscheiben mit insgesamt 11 Schüttblöcken. Der Abstand zwischen Böschungsfuß und Vorhabensgrenze beträgt 25 m. Die Geländeneigung des Schnittes B-B' beträgt am westlichen Rand der geplanten Haldenerweiterung max. ca. 2 %. Dies entspricht einer maximalen Geländeneigung der Aufstandsfläche von rd. 1 Grad (Bild 3).

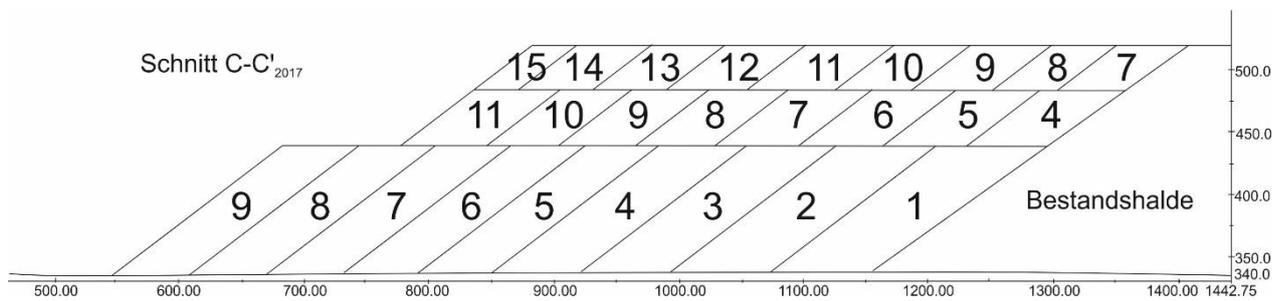


**Bild 3:** Schnitt B-B' [U6.6]

Für den Schnitt C-C' wurden zwei Schütthistorien bei gleichem Gelände Verlauf untersucht. Im Schnitt C-C'<sub>2016</sub> erfolgt die Beschüttung der Haldenerweiterung in zwei, teils parallel geschütteten Schüttscheiben mit insgesamt 10 Schüttblöcken (Bild 4). Im Schnitt C-C'<sub>2017</sub> erfolgt die Beschüttung der Haldenerweiterung in drei Schüttscheiben mit insgesamt 15 Schüttblöcken (Bild 5). Der Abstand zwischen Böschungsfuß und Vorhabensgrenze wurde im Vergleich zu den Schnitten A-A' und B-B' von 25 m auf 65 m vergrößert. Das Gelände im Schnitt C-C' verläuft nahezu horizontal.

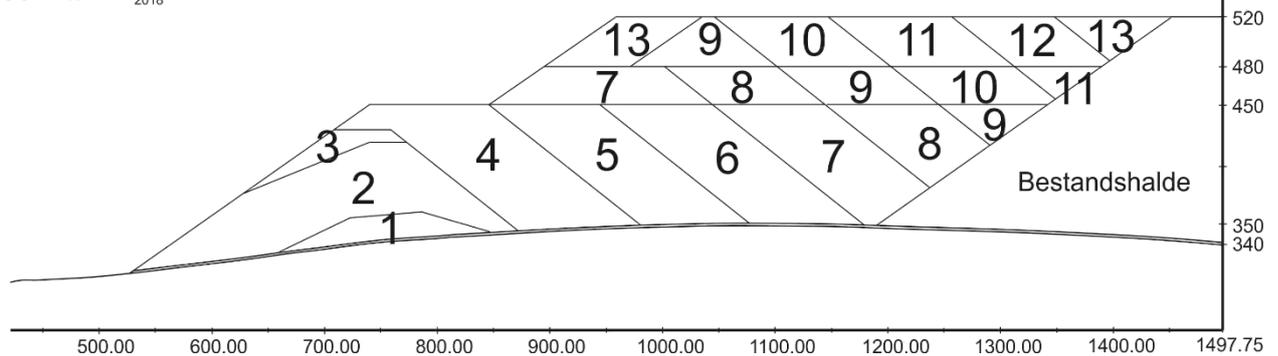
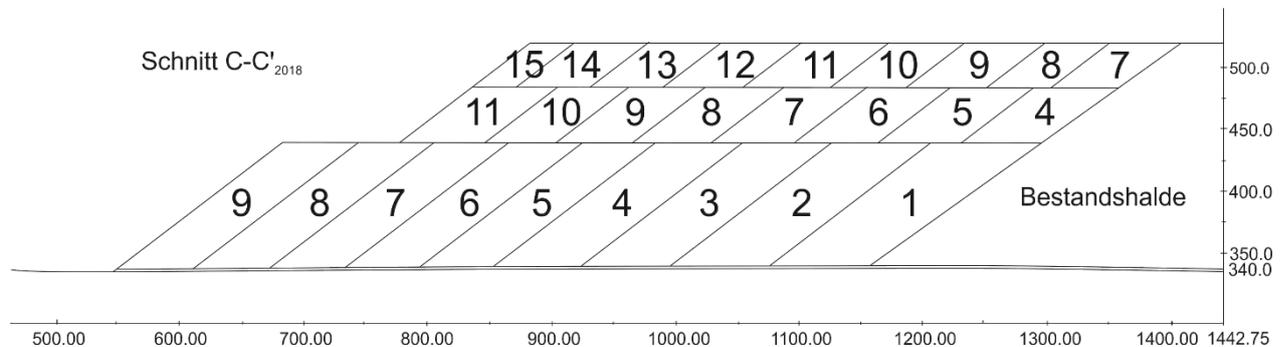


**Bild 4:** Schnitt C-C' 2016 [U6.6]



**Bild 5:** Schnitt C-C' 2017 [U6.6]

In unserem Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1754/01 [U6.15] sind die ergänzenden numerischen Untersuchungen in den Schnitten A-A' 2018 und C-C' 2018 dokumentiert. Grundlage für die ergänzenden Untersuchungen in den Schnitten A-A' 2018 (Bild 6) und C-C' 2018 (Bild 7) war eine aktualisierte Planung gemäß [U1.4]. Dabei wurden das System Basisabdichtung, bestehend aus Witterungsschutzschicht, Flächenfilter und Basisabdichtung, der vergrößerte Abstand zwischen endgültigem Böschungsfuß und Vorhabensgrenze von 65 m sowie eine Aufhaldung in 3 Schüttscheiben berücksichtigt.

Schnitt A-A'<sub>2018</sub>**Bild 6:** Schnitt A-A'<sub>2018</sub> [U6.15]**Bild 7:** Schnitt C-C'<sub>2018</sub> [U6.15]

### 3.1.2 Baugrundverhältnisse

Ergänzend zu den für frühere Fragestellungen im Bereich der Halden aus Rückstandssalz realisierten Maßnahmen zur Baugrunderkundung [U5] wurden die in [U3], [U2.7], [U6.5] und [6.13] und dokumentierten projektspezifischen Baugrunderkundungen durchgeführt.

Gemäß der in [U3], [U2.7], [U6.5] und [U6.13] dokumentierten Untersuchungsergebnissen ist die Baugrundsichtung von der Geländeoberfläche nach unten bis zum Verwitterungshorizont wie folgt gegliedert:

- Oberboden
- Auffüllungen (bereichsweise)
- Hanglehm/Decklehm/Lößlehm
- Hangschutt
- Verwitterungszone Buntsandstein

### 3.1.3 Abmessung und Geometrie

Der Umring der gesamten Haldenerweiterung einschließlich der Phasen 1 bis 3 ist im Grundriss in Bild 1 dargestellt. Die Erweiterungsfläche besitzt eine Größe von insgesamt rd. 62 ha. Die geplante Haldenerweiterung der Phase 2 besitzt eine Größe von rd. 11 ha.

Die Höhe der bestehenden Halde erreicht 200 m über der Geländeoberfläche, die Böschungsneigung beträgt bei der Aufhaldung entsprechend dem Schüttwinkel des frischen Rückstandssalzes ca. 38 Grad bis 40 Grad.

Die geplante Haldenhöhe im Erweiterungsbereich Phase 1 bis 3 beträgt in Abhängigkeit des Niveaus der Geländeoberfläche maximal etwa 180 m. Die Schüttung der geplanten Erweiterung erfolgt im sogenannten kombinierten Schüttverfahren (KSV). Das kombinierte Schüttverfahren (KSV) sieht eine 100 m breite Berme etwa in halber Haldenhöhe von rd. 100 m über GOF vor.

Für die geplante Haldenerweiterung der Phase 2 wird nur die untere Schüttscheibe mit einer maximalen Höhe von 100 m über GOF beantragt.

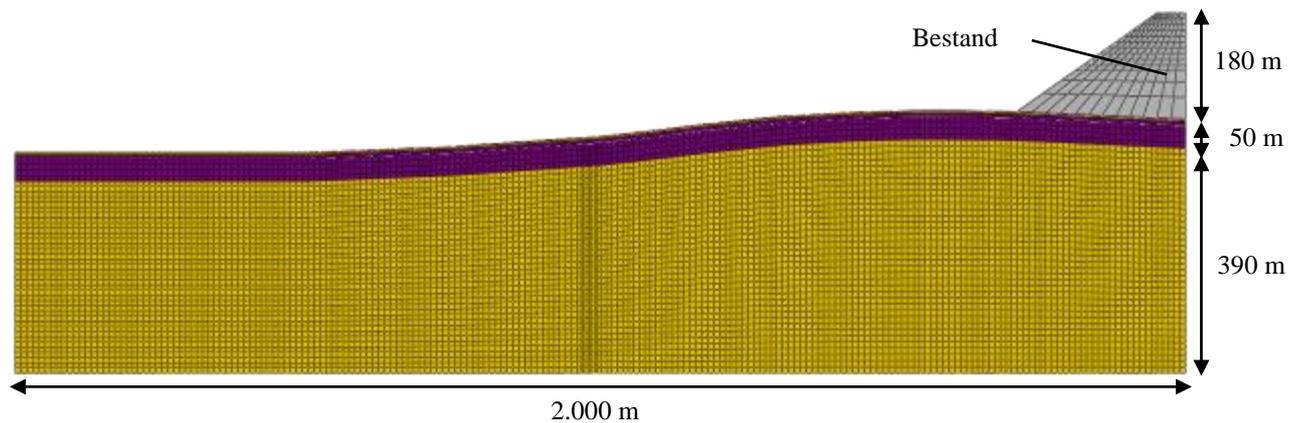
### 3.2 Numerische Modellbildung und Materialkennwerte für die numerischen Untersuchungen

Die für die Untersuchung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit entwickelten numerischen Modelle der Schnitte A-A', B-B' und C-C', die modellierten Materialgesetze und die angesetzten bodenmechanischen bzw. salzmechanischen Parameter für den Baugrund und das Rückstandssalz sind detailliert in [U6.6] und [U6.15] dokumentiert. Darüber hinaus sind die Betrachtungszeiten der Schüttphasen und Nachbetriebsphasen sowie die Gleitbedingungen und Reibungswinkel in den Kontaktflächen (Aufstandsfläche und Schwächezone) beschrieben.

### 3.3 Kalibrierung des numerischen Modells

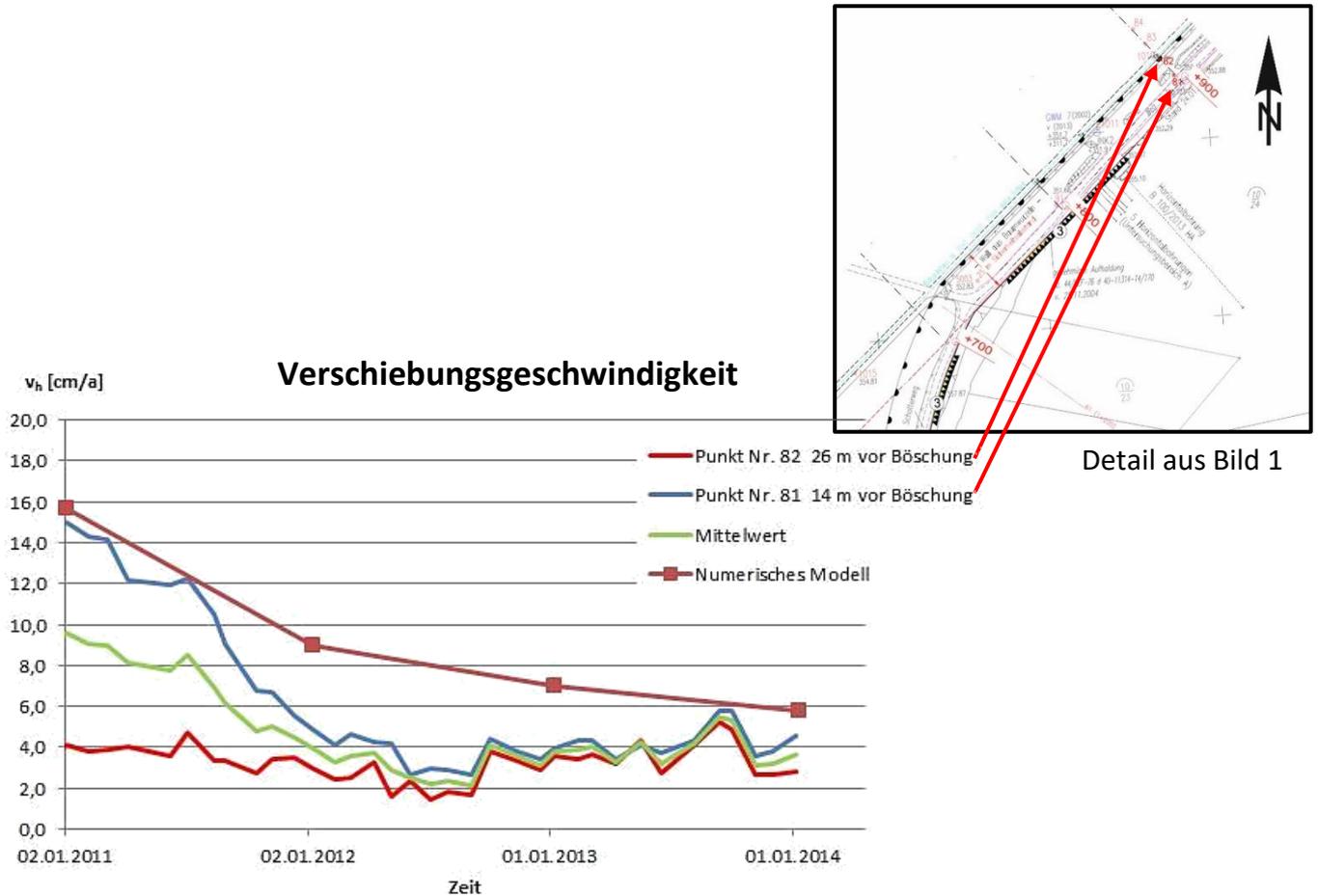
In den Schnitten A-A' und B-B' sowie für den Untersuchungsschnitt C-C' erfolgte eine Kalibrierung anhand der geodätischen und geotechnischen Messungen, wobei im Wesentlichen die Messpunkte im Vorfeld der bestehenden Halde im Bereich der Haldenstation +900 sowie die Inklinometer INK 1 und INK 2 verwendet wurden. Dazu wurde der bereits bestehende Haldenkörper im Schnitt A-A' gemäß der Schnittführung erfasst und bewertet (Bild 8). In Abbildung der realen

Untergrundverhältnisse wurde die Aufstandsfläche mit den Kennwerten des Materialtyps I berücksichtigt. Die Grundlagen, Randbedingungen, das Vorgehen und die Ergebnisse der Kalibrierung sind in [U6.2] beschrieben. Die Kalibrierungsberechnung erfasst das charakteristische Verformungsverhalten der Rückstandshalde Hattorf.



**Bild 8:** Numerisches Modell zur Kalibrierung der gesamten Modellbildung

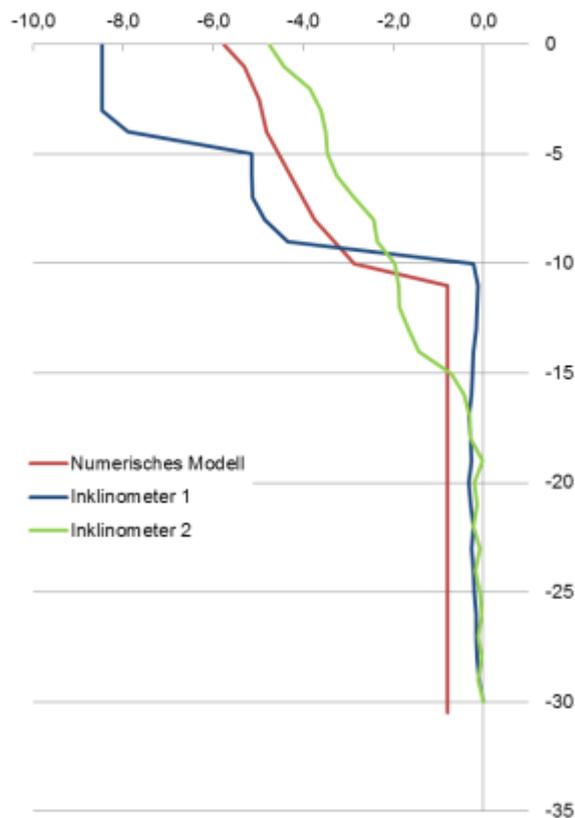
Die an den Messpunkten im nahen Haldenvorfeld gemessenen und die numerisch berechneten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten sind in Bild 9 dargestellt. Der Vergleich zeigt sowohl qualitativ als auch quantitativ für den stationären Zustand der horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten eine gute Übereinstimmung, wobei auf der sicheren Seite liegend, eine geringfügige Überschätzung der numerisch berechneten Verschiebungsgeschwindigkeit in Kauf genommen wird.



**Bild 9:** Gemessene und berechnete horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten  $v_h$  in [cm/a], aufgetragen über die Zeit

Zusätzlich zu den horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten an der Geländeoberfläche wurden die in Inclinometern gemessenen und die numerisch berechneten Verschiebungsgeschwindigkeiten im Untergrund über eine Tiefe von 30 m verglichen. Die gemessenen und die numerisch berechneten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten über die Tiefe sind in Bild 10 dargestellt. Der Vergleich zeigt sowohl qualitativ als auch quantitativ im Mittel eine gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten.

### Horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit [cm/a]



**Bild 10:** Gemessene und berechnete horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten  $v_h$  in [cm/a], aufgetragen über die Tiefe der Inklinometer in [m]

### 3.4 Nachweis- und Sicherheitskonzept

In unseren Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1713/01 [U6.6] und Nr. IK1754/01 [U6.15] wurden für die Schnitte A-A', B-B' und C-C' sowohl die Standsicherheit als auch die Gebrauchstauglichkeit der damals geplanten Erweiterung der Rückstandshalde Hattorf im Bereich der jetzigen Phasen 1 bis 3 nachgewiesen.

Die Nachweise wurden auf Basis der DIN EN 1997-1, der DIN EN 1997-1 N/A sowie der DIN 1054 geführt. Dazu wurde der Nachweis der Standsicherheit mit abgeminderten Scherparametern geführt. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfolgte mit charakteristischen Scherparametern.

Diese Vorgehensweise wurde bereits bei früheren Untersuchungen erfolgreich angewandt [U5], [U6.4], [U6.5]. Zur Berücksichtigung des zeitvarianten Materialverhaltens des Rückstandssalzes wurde ein Untersuchungszeitraum von mindestens 70 Jahren (20 Jahre Beschüttung und 50 Jahre Nachbetriebsphase) angesetzt. Der Untersuchungszeitraum beginnt mit der Beschüttung der Erweiterungsfläche und endet 50 Jahre nach Schüttende.

Für den Nachweis der Standsicherheit werden die Scherparameter aller Materialien einschließlich des Rückstandssalzes mit dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma = 1,25$  für die ständige Bemessungssituation gemäß DIN EN 1997-1 abgemindert. Die Standsicherheit bei den numerischen Berechnungen gilt dann als nachgewiesen, wenn das System im Gleichgewicht ist, d.h. wenn die Berechnungen zu jedem Zeitpunkt konvergieren, die Berechnungen bis zum definierten Ende durchlaufen und die Verschiebungsgeschwindigkeiten über die Zeit einen konstanten bzw. degressiven Verlauf annehmen.

Die Finite-Element-Berechnungen erfolgen in Zeitinkrementen  $\Delta t_j$  bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes. Kann für die abgeminderten Scherparameter in jedem Zeitinkrement im Untersuchungszeitraum der Gleichgewichtszustand erreicht werden, so ist der Nachweis der Standsicherheit für die ständige Bemessungssituation mit der Sicherheit  $\gamma = 1,25$  erbracht. Kann für eine Parameterkombination in einem Zeitinkrement  $\Delta t_j$  kein Gleichgewichtszustand erreicht werden, so bricht die Finite-Element-Berechnung den Berechnungsvorgang ab. In diesem Fall ist die Standsicherheit lediglich bis zum Ende des vorhergehenden Zeitinkrements  $\Delta t_{j-1}$  gegeben. Für den gesamten Untersuchungszeitraum ist die Standsicherheit mit einer Sicherheit von  $\gamma = 1,25$  in diesem Fall nicht gegeben. Das Nichterreichen eines Gleichgewichtszustandes ist somit eindeutig berechenbar.

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfolgten die Berechnungen mit charakteristischen, d.h. mit nicht abgeminderten Scherparametern. Die aus den numerischen Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit resultierende Prognose der sich zeitlich verändernden Spannungen, Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten lieferten die für andere Untersuchungen notwendigen Eingangsparameter, die z.B. für die Bemessung der Basisabdichtung und die Entwässerungssysteme erforderlich sind.

Zur Verifizierung der Modellbildung und der Materialkennwerte wurden die numerischen Berechnungen kalibriert. Die Kalibrierung erfolgt anhand der in-situ gemessenen Verschiebungen bzw. Verschiebungsgeschwindigkeiten im Bereich der Nordwestflanke der bestehenden Halde. Die Kalibrierung des entwickelten numerischen Modells und der zugrunde liegenden Materialkennwerte sind in Kapitel 3.3 bzw. in [U6.2] beschrieben.

Aufgrund der Komplexität der geplanten Haldenerweiterung ist das gesamte Projekt gemäß DIN EN 1997-1 in die Geotechnische Kategorie GK 3, dies ist die Kategorie für den höchsten

Schwierigkeitsgrad, einzuordnen. Die Komplexität ergibt sich aus der Baugrundsituation, der Topographie, den großen geometrischen Abmessungen und dem zeitvarianten Materialverhalten des Rückstandssalzes. Daraus ergeben sich eine komplexe Baugrund-Tragwerk-Interaktion sowohl für die Halde und den Baugrund selbst, aber auch entsprechende Auswirkungen auf im Einflussbereich liegende Bauwerke und technische Systeme.

Daher wurde im Sinne der Beobachtungsmethode nach DIN EN 1997-1, Abs. 2.1, seitens K+S ein geodätisches und geotechnisches Monitoringprogramm für die Betriebs- und die Nachbetriebsphase der Haldenerweiterung eingerichtet und mit den Sachverständigen und Fachgutachtern abgestimmt.

### **3.5 Numerische Untersuchungen zur Standsicherheit**

Zur numerischen Untersuchung der Standsicherheit wurden für alle Berechnungen in den Schnitten A-A', B-B' und C-C' ([U6.6], [U6.15]) der Haldenerweiterung die Materialkennwerte mit dem Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma = 1,25$  gemäß den aktuell gültigen technischen Regelwerken abgemindert. Der Untersuchungszeitraum vom Beginn der Beschüttung der Erweiterungsfläche bis 50 Jahre nach Schüttende beträgt mehr als 70 Jahre. Die Berechnungen zeigen, dass die größten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten am Haldenfuß auftreten.

Alle numerischen Berechnungen sind bis zum Ende des Untersuchungszeitraums durchgelaufen, d.h. sie sind konvergiert. Außerdem gilt für alle Berechnungen, dass die Verschiebungsgeschwindigkeiten einen degressiven Verlauf nehmen und am Ende des Untersuchungszeitraums einen konstanten Wert anstreben. Damit befindet sich das jeweils untersuchte System zu jedem Zeitpunkt im Gleichgewicht und ist standsicher [U7].

### **3.6 Numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit**

Zur numerischen Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit in den Schnitten A-A', B-B' und C-C' ([U6.6], [U6.15]) wurden charakteristischen Materialkennwerte für Baugrund und Rückstandssalz verwendet. Wie für die Untersuchungen der Standsicherheit auch, beträgt der Untersuchungszeitraum für die Gebrauchstauglichkeit ebenfalls mindestens 70 Jahre (20 Jahre Beschüttung und 50 Jahre Nachbetriebsphase).

Im Ergebnis der numerischen Berechnungen wurden auf Basis der gewählten konservativen Ansätze und Randbedingungen im Wesentlichen folgende Spannungen, Verschiebungen, Verschiebungsgeschwindigkeiten und Dehnungen für die Schnitte A-A', B-B' und C-C' ausgewiesen:

- vertikale Spannungen
- vertikale Verschiebungen
- Schubspannungen
- horizontale Spannungen
- horizontale Verschiebungen
- horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten
- horizontale Dehnungen

Die Darstellung der Berechnungsergebnisse erfolgte in [U6.6] und [U6.15] in Form von Konturplots und Diagrammen.

### **3.7 Prüfung der numerischen Untersuchungen für die Phase 2**

Schwerpunkte für die Bewertung der Aussagekraft bzw. Gültigkeit der numerischen Untersuchungen in [U6.6] und [U6.15] für die nun folgende Haldenerweiterung der Phase 2 sind folgenden Aspekte:

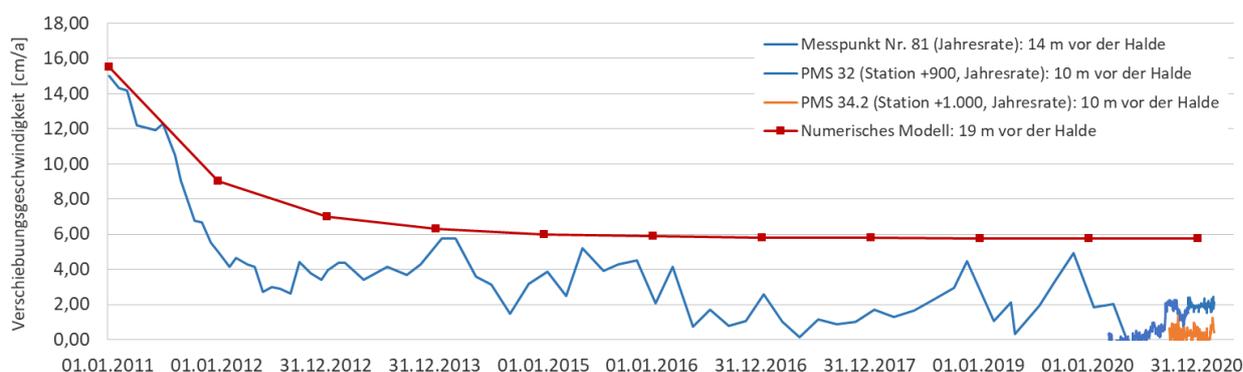
- Kalibrierung gemäß Kapitel 3.3 und [U6.2]
- modellierter Geländeverlauf und Geländegefälle in [U6.6] und [U6.15]
- modellierte Haldenhöhe in [U6.6] und [U6.15]
- modellierte Baugrundverhältnisse in [U6.6] und [U6.15]

#### Kalibrierung:

Die in Kapitel 3.3 und [U6.2] beschriebene Kalibrierung erfolgte im Bereich der Haldenstation +900 anhand der Messpunkte Nr. 81 rd. 14 m vor dem Böschungsfuß und Nr. 82 rd. 26 m vor dem Böschungsfuß. Es ist zu prüfen, ob diese Kalibrierungsberechnung für die Haldenerweiterung Phase 2 Gültigkeit hat.

Die bestehende Halde Hattorf sowie die Phasen der Haldenerweiterung werden durch ein umfangreiches Monitoringprogramm, bestehend aus Permanentmessstation (PMS), Laserscannermessungen, Abstandsmesslinien und Inklinometer, überwacht. Die Ergebnisse des Monitorings werden quartalsweise dokumentiert ([U1.5] bis [U1.8] und [U2]) und von IK bewertet [U6]. Im Bereich des Kalibrierungsschnitts (Station + 900) wurde zur Bestimmung der Horizontalverschiebungen

bis Anfang 2020 der Messpunkt Nr. 81 gemessen, seit Dezember 2019 wird dieser Bereich durch die Permanentmessstation PMS 32 (Station + 900) messtechnisch überwacht. Im Bereich des Anschüttungsbereiches der Phase 2 der Haldenerweiterung wird zur Bestimmung der horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten seit September 2020 zusätzlich durch die Permanentmessstation PMS 34.2 (Station + 1.000) gemessen. Die Permanentmessstationen stehen am Rand des Infrastrukurstreifens, d.h. in einem Abstand von ca. 10 m zum Böschungsfuß. Die aktuellen horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten  $v_h$  im Bereich des Kalibrierungsschnitts betragen hier max. 2 cm/a (Jahresrate, Station + 900) und liegen somit unter der rechnerisch prognostizierten, konstanten Verschiebungsgeschwindigkeit von rd. 6 cm/a (Kalibrierungsberechnung gemäß [U6.2], Bild 11). Die gemessenen horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten im Anschüttungsbereich der Phase 2 betragen  $< 2$  cm/a (Jahresrate extrapoliert, Station + 1.000).



**Bild 11:** Aktuelle gemessene und berechnete horizontale Verformungsgeschwindigkeiten  $v_h$  in [cm/a] im Bereich des Messpunkts 81 und an den Permanentmessstationen PMS 32 und 34.2, aufgetragen über die Zeit

Es ist zu berücksichtigen, dass die Auswertung der Kalibrierungsberechnung rd. 20 m vor dem Haldenfuß im Bereich der damals vorhandenen Messpunkte Nr. 81 und Nr. 82 erfolgte. Aus diesem konservativen Ansatz lassen sich für die numerischen Untersuchungen größere berechnete Verformungsgeschwindigkeiten bei rd. 10 m vor dem Haldenfuß, d.h. im Bereich der aktuell messenden Permanentmessstationen, ableiten. Die aktuellen Messungen im Bereich der Permanentmessstationen 32 und 34.2 unterschreiten die Prognose der Kalibrierung daher deutlich.

Neben den Permanentmessstationen werden seit 2013 zusätzlich Laserscannmessungen zur Bestimmung der Verschiebungen im Bereich der Salzwasserrinne, d.h. wenige Meter vor dem bestehenden Haldenfuß durchgeführt. Die prognostizierten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten für diesen Bereich liegen gemäß Kalibrierung bei rd. 11 cm/a. Die aktuell gemessenen horizontalen

Verschiebungsgeschwindigkeiten im Anschüttungsbereich der Phase 2 betragen rd. 15 cm/a (Station +1.000) bzw. rd. 30 cm/a (Station + 1.050) und überschreiten somit die rechnerische Prognose. Im Bereich der Station +900 beträgt die aktuell gemessene horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit rd. 40 cm/a. Die größeren horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten sind lokal auf den unmittelbaren, haldenfußnahen Bereich begrenzt und klingen bereits bis rd. 10 m vor dem Böschungsfuß auf  $\leq 2$  cm/a (Permanentmessstationen PMS 32, Station + 900 und PMS 34.2, Station +1.000) ab. Der böschungsfußnahe Bereich  $< 10$  m ist somit als Sondersituation zu betrachten und gesondert zu bewerten.

Der Kalibrierungsschnitt in Kapitel 3.3 und [U6.2] hat für den Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Phase 2 der Haldenerweiterung mit einem Abstand zum aktuellem Böschungsfuß der Bestandshalde  $> 10$  m grundsätzlich weiterhin Gültigkeit. Der böschungsfußnahe Bereich konnte in [U6.2] auf Grund der Lage der zu Kalibrierungszwecken herangezogenen Messpunkte nicht untersucht werden. Dieser Bereich ist daher gesondert zu betrachten und der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit für das System Basisabdichtung zu präzisieren. Hierzu wurden ergänzende numerische Untersuchungen durchgeführt, die in Kapitel 4 dokumentiert und bewertet werden.

#### Geländeverlauf und Geländegefälle:

Der Verlauf des Geländes wurde bereits für die Phase 1 der Haldenerweiterung ausreichend konservativ im Schnitt A-A' berücksichtigt. Der Schnitt A-A' verläuft von Osten kommend Richtung Norden und erfasst das maximale Einfallen des Geländes im Bereich Ochsengraben. Im Schnitt A-A' wird eine maximale Geländeneigung in der Aufstandsfläche von 15 % bzw. 8,5 Grad berücksichtigt (Bild 2).

Die Geländeneigung im Bereich der Phase 2 der Haldenerweiterung beträgt im Bereich des Haldenfußes max. 7,5 %. In 90 % der Aufstandsfläche beträgt die Geländeneigung in der Aufstandsfläche max. 5 %. Die numerischen Untersuchungen in den Schnitten A-A', B-B' und C-C' sind somit hinsichtlich des Geländeverlaufs und Geländegefälles im Bereich der Haldenerweiterung Phase 2 ausreichend konservativ.

#### Haldenhöhe:

Eine maximale Haldenhöhe von 180 m über GOF wurde bereits für die Phase 1 in allen numerischen Untersuchungen in den Schnitten A-A', B-B' und C-C' berücksichtigt. Für die geplante Haldenerweiterung der Phase 2 wird nur die untere Schüttscheibe mit einer maximalen Höhe von 100 m über GOF beantragt. Die numerischen Untersuchungen in den Schnitten A-A', B-B' und

C-C' sind somit hinsichtlich der maximalen Haldenhöhe der Haldenerweiterung Phase 2 ausreichend konservativ.

#### Baugrundverhältnisse:

Die in [U2.7], [U3], [U6.5] und [U6.13] dokumentierten Baugrundsichtungen und Schichtdicken wurden durch ergänzende Baugrunderkundungen für die Phase 1 überprüft und bestätigt. Die Ergebnisse der ergänzenden Baugrunderkundungen der Phase 1 sind in [U6.19], [U6.37] und [U6.40] dokumentiert. Die zusätzlich durchgeführten Maßnahmen zur Baugrunderkundung bestätigen die bisherigen Kenntnisse. Sowohl die Schichtdicken der Lockergesteins- und Zersatzzone als auch die bodenmechanischen Parameter (Scherfestigkeit und Steifigkeit) wurden bestätigt.

Für die weiteren Beschüttungsabschnitte in der Phase 2 ist gemäß [U2] die fachtechnische Überwachung der Flächenvorbereitung im Sinne der Beobachtungsmethode fortzuführen.

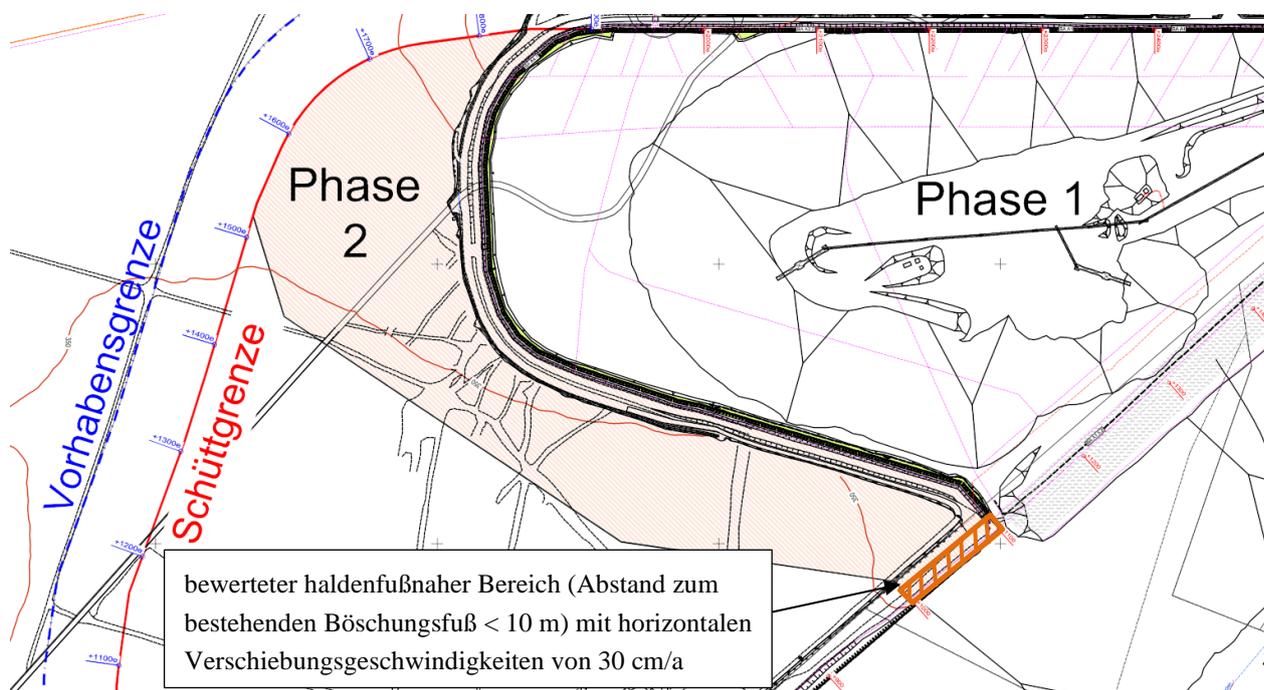
#### Bewertung:

Alle Aspekte zur Bewertung der Gültigkeit/Aussagekraft der in [U6.6] und [U6.15] dokumentierten numerischen Untersuchungen zum Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Haldenerweiterung wurden für die geplante Phase 2 der Haldenerweiterung mit folgendem Ergebnis geprüft:

Die in Kapitel 3.3 und [U6.2] dokumentierte Kalibrierungsberechnung hat, unter Berücksichtigung der aktuellen Messergebnisse, weiterhin Gültigkeit für die Haldenerweiterung der Phase 2 für einen Abstand zum bestehenden Haldenfuß von  $> 10$  m. Daher sind auch die Untersuchungen und Ergebnisse zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit grundsätzlich weiterhin gültig. Nur lokal, direkt am Haldenfuß der Bestandshalde, werden aktuell größere Verschiebungsgeschwindigkeiten gemessen als in der Kalibrierungsberechnung prognostiziert. Dieser Bereich wird in Kapitel 4 detailliert untersucht und bewertet. Für den Bereich  $> 10$  m, dies entspricht über 99 % der Haldenerweiterungsfläche der Phase 2, haben die in den numerischen Untersuchungen in [U6.6] und [U6.15] geführten Nachweise somit weiterhin Gültigkeit. Dies wird auch durch die Überprüfung der geometrischen Randbedingungen (Geländeverlauf, Geländeneigung und Haldenhöhe) und die Überprüfung der Baugrundverhältnisse bestätigt.

#### 4 Ergänzende Untersuchungen im Anschüttungsbereich der Phase 2 auf der Basis der numerischen Berechnungen im Schnitt 1-1'

Im Bereich der geplanten Anschüttung in der Phase 2 an den bestehenden Haldenfuß (Bild 12) werden aktuell horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten von maximal rd. 30 cm/a (Station + 1.050) gemessen. Aufgrund der größeren Verschiebungen im böschungsfußnahen Bereich der geplanten Haldenerweiterung der Phase 2 wurden ergänzende numerische Untersuchungen zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit des Systems Basisabdichtung durchgeführt. Eine zusätzliche Bewertung der Standsicherheit ist aufgrund der großräumigen Wirkung der Halde und dem nur lokal begrenzten Auftreten höherer Verschiebungsgeschwindigkeiten nicht erforderlich. Als Grundlage für die ergänzenden Bewertungen der Gebrauchstauglichkeit der Basisabdichtung im Anschüttungsbereich der Phase 2 werden die numerischen Berechnungen des Schnittes 1-1' (Bild 1) genutzt, die in [U6.8] dokumentiert sind. Die nachfolgend dokumentierten numerischen Untersuchungen gelten allgemein für den haldenfußnahen Bereich mit einem Abstand zum bestehenden Böschungsfuß von < 10 m und wurden auf den in Bild 12 markierten Bereich entsprechend übertragen.



**Bild 12:** Detail Haldenerweiterung Phase 2 mit dem haldenfußnahen Bereich mit lokal größeren gemessenen horizontalen Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten

Die ursprüngliche Veranlassung für die numerischen Untersuchungen im Schnitt 1-1' waren die seit Herbst 2011 im Bereich der Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde gemessenen außergewöhnlich großen und bisher im Bereich der Bestandshalde nicht beobachteten horizontalen und vertikalen Verschiebungen des Böschungfußes und des Haldenvorfeldes. Die Ergebnisse der Ursachenforschung in Form von ergänzenden Baugrunderkundungsmaßnahmen und umfangreichen numerischen Untersuchungen sind in [U6.7] und [U6.8] dokumentiert.

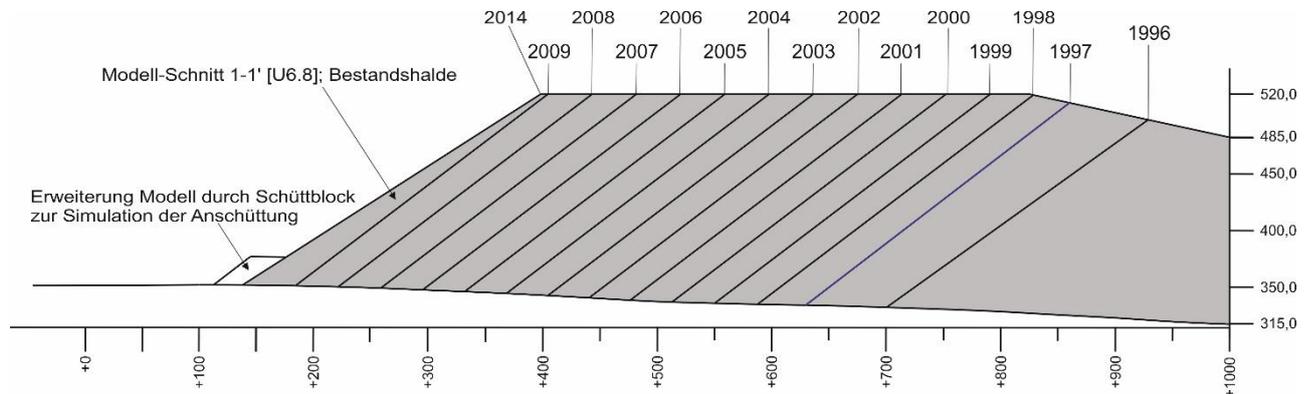
Die numerischen Modellierungen im Schnitt 1-1' bieten aufgrund der hier im Vergleich zu den Schnitten A-A' bis C-C' ermittelten deutlich größeren horizontalen Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten eine konservative Grundlage für die grundsätzliche Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit des Systems Basisabdichtung in haldenfußnahen Bereichen der Rückstandshalde. Für die ergänzenden numerischen Untersuchungen für den Anschüttungsbereich der Phase 2 wurden die Modellierungen im verwendeten Schnitt 1-1' entsprechend angepasst. Das verformte Haldenvorland aus den numerischen Modellierungen im Schnitt 1-1' dient als Ausgangssituation für die Untersuchungen zur Anschüttung an die Bestandshalde im Zuge der Phase 2. Hierbei soll insbesondere die Verträglichkeit/Gebrauchstauglichkeit der Basisabdichtung im Anschüttungsbereich an die Bestandshalde vor, während und nach der Beschüttung bewertet werden (Betriebs- und Nachbetriebsphase).

## **4.1 Grundlagen**

### **4.1.1 Topographie**

Für die Fragestellung der Gebrauchstauglichkeit des Systems Basisabdichtung bei größeren Verschiebungen/Verschiebungsgeschwindigkeiten wurde der Schnitt 1-1' (Bild 1) im Haldenvorland um das System Basisabdichtung, bestehend aus Witterungsschutzschicht, Flächenfilter und Basisabdichtung ergänzt und die Beanspruchung im Vorland der Bestandshalde im Zuge der Haldenerweiterung Phase 2 durch einen Schüttblock (Bild 13) simuliert. Der Schüttblock mit einer Höhe von 25 m und einer Breite von 25 m entspricht einer Regelschüttung über rd. 0,25 Jahre. Der verwendete Schnitt 1-1'<sub>2021</sub> und die zugehörige Schütthistorie sind in Bild 13 dargestellt.

Die Haldenaufstandsfläche im Schnitt 1-1'<sub>2021</sub> hat im Südwesten eine Höhenlage von bis zu rd. 350 mNN und im Nordosten eine Höhenlage von rd. 315 mNN. Demnach steigt das Gelände mit bis zu 4 % (entspricht bis zu 2,3 Grad) nach Südwesten hin an. Bisher wurde die Rückstandshalde im sogenannten Flankenschüttverfahren (FSV) gegen das leicht ansteigende Gelände geschüttet. Die Haldenerweiterung der Phasen 1 bis 3 werden im kombinierten Schüttverfahren (KSV) errichtet. Im Schnitt 1-1'<sub>2021</sub> wird dies in Form des o.g. Schüttblocks berücksichtigt.



**Bild 13:** Schnitt 1-1' 2021 mit Schüttgeschichte und Schüttblock für die Betrachtung der Haldenerweiterung der Phase 2

#### 4.1.2 Baugrundverhältnisse

Für die ergänzenden numerischen Untersuchungen zur Anschüttung der Haldenerweiterung der Phase 2 an die bestehende Rückstandshalde werden die Ergebnisse der ergänzenden Baugrunderkundungen gemäß [U6.7] zugrunde gelegt. Die in [U6.7] dokumentierten Maßnahmen zur Baugrunderkundung ergaben, dass die Baugrundsichtung von der Geländeoberfläche nach unten bis zum Verwitterungshorizont im Bereich des Schnittes 1-1' 2021 wie folgt gegliedert ist:

- Oberboden
- Auffüllungen (bereichsweise)
- Hanglehm/Decklehm/Lößlehm
- Hangschutt
- Zersatz- und Verwitterungszone Buntsandstein

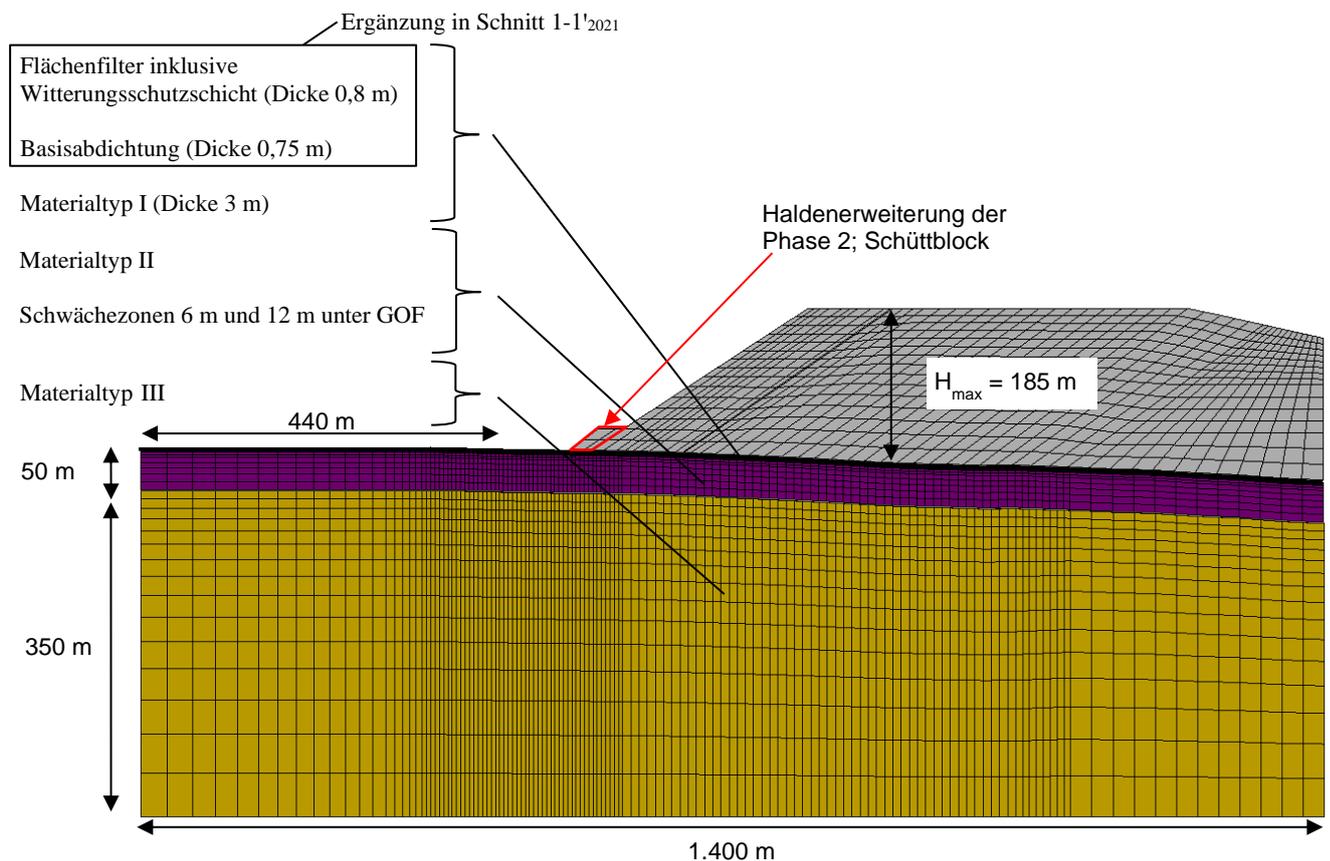
Detaillierte Angaben zu den boden- und felsmechanischen Parametern sind in [U6.7] enthalten.

Die Baugrundverhältnisse im Bereich der Südwestflanke sind als Sonderfall zu bewerten und deutlich ungünstiger als im Bereich der Haldenerweiterungsfläche (Kapitel 3.1 und 3.2). Die im Bereich der Südwestflanke erkundeten ungünstigen Baugrundverhältnisse und bodenmechanischen Parameter wurden in den umfangreichen Baugrunderkundungen im Bereich der Haldenerweiterung der Halde Hattorf nicht angetroffen.

Der Schnitt 1-1'<sub>2021</sub> dient mit den ungünstigen Baugrundverhältnissen dazu, die Gebrauchstauglichkeit des Systems Basisabdichtung für Bereiche mit lokal größeren horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten grundsätzlich und ausreichend konservativ zu untersuchen.

## 4.2 Numerische Modellbildung

Das für die numerischen Untersuchungen verwendete numerische Modell des Schnittes 1-1'<sub>2021</sub> ist für den Endzustand der bestehenden Rückstandshalde in Bild 14 dargestellt. Die Schüttabfolge zeigt Bild 13. Ergänzend wurde das im Schnitt 1-1' [U6.8] bisher nicht enthaltene System Basisabdichtung mit Flächenfilter, Witterungsschutzschicht und Basisabdichtung modelliert.

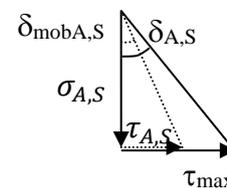


**Bild 14:** Numerisches Modell zur Untersuchung der Anschüttung Phase 2 an die bestehende Rückstandshalde im Schnitt 1-1'<sub>2021</sub>

Für die numerischen Simulationen wurden die Halde und der Baugrund analog zum Vorgehen in [U6.8] voneinander getrennt und mit unterschiedlichen FE-Netzen modelliert. Die Verbindung der beiden FE-Netze von Halde und Baugrund in der Aufstandsfläche wird über eine Kontaktfläche nach dem Master-Slave-Prinzip hergestellt, d.h. das Verhalten in der Aufstandsfläche wird über einen Reibungswinkel  $\delta_A$  durch das Reibungsgesetz von *Coulomb* definiert. Die Schwächezonen wurden nach dem gleichen Prinzip über einen Reibungswinkel  $\delta_S$  modelliert. In den Kontaktflächen sind gemäß dem Reibungsgesetz von *Coulomb* die aufnehmbaren Schubspannungen  $\tau_{\max}$  proportional zu den Normalspannungen  $\sigma$ .

Die Gleitbedingung in diesen Kontaktflächen (Aufstandsfläche (A) und Schwächezonen (S)) kann wie folgt beschrieben werden:

$$\delta_{\text{mob } A,S} = \arctan\left(\frac{\tau_{A,S}}{\sigma_{A,S}}\right) \begin{cases} < \delta_{A,S} \rightarrow \text{Haften} \\ = \delta_{A,S} \rightarrow \text{Gleiten} \end{cases}$$



mit:  $\delta_{\text{mob } A,S}$  mobilisierter Reibungswinkel in der Aufstandsfläche/Schwächezone  
 $\tau_{A,S}$  Schubspannung in der Aufstandsfläche/Schwächezone  
 $\sigma_{A,S}$  Normalspannung in der Aufstandsfläche/Schwächezone  
 $\delta_{A,S}$  Scherfestigkeit der Aufstandsfläche/Schwächezone

Die über die Kontaktflächen übertragbaren Schubspannungen sind also begrenzt auf:

$$\tau_{\text{max } A,S} = \sigma_{A,S} \cdot \tan \delta_{A,S}$$

mit:  $\tau_{\text{max } A,S}$  maximal aufnehmbare Schubspannung in der Kontaktfläche

Der Reibungswinkel  $\delta_A$  in der Aufstandsfläche der Halde wurde analog [U6.7] mit  $\delta_A = 30^\circ$  angesetzt. Gemäß [U6.7] beträgt der Reibungswinkel in der Schwächezone  $\delta_S = 22,5^\circ$ . Der Reibungswinkel in den Schwächezonen SZ1 und SZ2 in 6 m und 12 m Tiefe unter GOF wurde im Rahmen der numerischen Variationsberechnungen auf Basis der Untersuchungen in [U6.7] bis minimal  $\delta_S = 12,5^\circ$  abgemindert. Auf der sicheren Seite liegend wurde für die Kontaktflächen keine Kohäsion angesetzt. Details zur Abminderung der Reibungswinkel in den Schwächezonen sowie eine Beschreibung der detektierten Verschiebungsmechanismen/-ursachen im Schnitt 1-1' sind in [U6.8] enthalten.

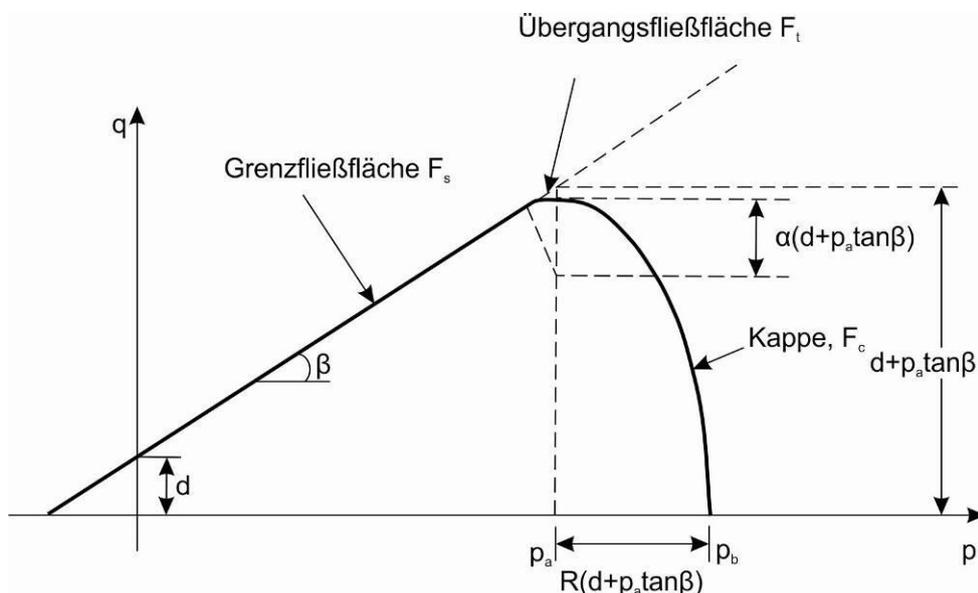
Rückstandshalden sind durch den Schüttprozess einer permanenten Änderung der Geometrie unterworfen und stellen - wie in Bild 12 anschaulich visualisiert - ein System mit veränderlicher

Gliederung dar. Der Schüttprozess wird in den FE-Berechnungen durch eine Folge von Berechnungsschritten im Sinne einer Step-by-Step-Analyse abgebildet. Dazu wird in der Berechnung zunächst das FE-Netz in einem statischen (zeitunabhängigen) Rechenschritt um eine Elementgruppe vergrößert. Hierauf folgt ein zeitabhängiger Rechenschritt zur Simulation des Kriechens der Halde mit neuer Geometrie. Die Kriechfunktion, d.h. der zeitvariante Verformungsanteil, wird in Kapitel 4.3.3 beschrieben.

## 4.3 Materialkennwerte für die numerischen Untersuchungen

### 4.3.1 Baugrund

Der Baugrund wird wirklichkeitsnah als elastoplastisches Material modelliert. Die elastischen Verformungen werden nach dem Hooke'schen Gesetz ermittelt. Die plastischen Verformungsanteile ergeben sich aus einem modifizierten Drucker-Prager-Modell mit linearer Grenzfließfläche  $F_s$  (Konus), kreisförmiger Übergangfließfläche  $F_t$  und elliptischer Kappe  $F_c$ . Bild 15 zeigt das modifizierte Drucker-Prager-Modell in der Meridianebene.



**Bild 15:** Modifiziertes Drucker-Prager-Modell

Auf Basis der Unterlagen [U3], [U4] und [U6] und der darin dokumentierten Erkundungs- und Berechnungsergebnisse wird, auf der sicheren Seite liegend, den ergänzenden numerischen

Untersuchungen das in Tabelle 1 dargestellte Baugrundmodell zugrunde gelegt. Dabei stellt die oberflächennahe Lockergesteins- und Zersatzzone den Materialtyp I dar. Darunter befinden sich infolge der dort weniger fortgeschrittenen Verwitterung festere und steifere Schichten. Diese Schichten bestehen im Wesentlichen aus Sandstein und Ton-/Schluffstein und wurden zu den Materialtypen II und III zusammengefasst.

Tiefe unter Geländeoberfläche	Materialtyp
0 m – 3 m	I
3 m – 50 m	II
50 m – 400 m	III

**Tabelle 1:** Baugrundmodell der numerischen Untersuchungen

Die charakteristischen Werte der boden- und felsmechanischen Parameter der Materialtypen I bis III auf Basis der Untersuchungen in [U6.6] und [U6.7] sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Die bodenmechanischen Parameter des Materialtyps I (Reibungswinkel  $\varphi'$  und Kohäsion  $c'$ ) wurden auf Basis der umfangreichen numerischen Untersuchungen in [U6.8] festgelegt.

	Materialtyp I 0 – 3 m	Materialtyp II 3 – 50 m	Materialtyp III 50 – 400 m
Dichte $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,95	1,95	2,1
Reibungswinkel $\varphi'$ [°]	32	28	35
Kohäsion $c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	16	30	100
Elastizitätsmodul E [MN/m <sup>2</sup> ]	20	200	500
Querdehnzahl $\nu$ [-]	0,3	0,3	0,3
Kappenexzentrizität R [-]	0,02	0,02	0,02
Radius Übergangsbereich $\alpha$ [-]	0,001	0,001	0,001
Fließflächenformfaktor K [-]	0,78	0,78	0,78

**Tabelle 2:** Charakteristische Werte der boden- und felsmechanischen Parameter der Materialtypen I bis III

Auf Basis der Messungen und Untersuchungen in [U6.7] werden in den numerischen Untersuchungen zwei Schwächezonen in einer Tiefe von 6 m unter GOF (SZ1) und 12 m unter GOF (SZ 2) berücksichtigt.

#### 4.3.2 Bodenmechanische Parameter in der Aufstandsfläche

Anders als im FE-Modell des Schnittes 1-1' [U6.8] wird im FE-Modell des Schnittes 1-1'<sub>2021</sub> das System Basisabdichtung, bestehend aus Witterungsschutzschicht, Flächenfilter und Basisabdichtung, im Bereich der Haldenerweiterung implementiert.

Die Aufstandsfläche wird vor der Beschüttung durch die Haldenerweiterung Phase 2 durch Rodung und Entfernung des Oberbodens (Mutterbodens) von Wurzelresten und anderen organischen Bestandteilen sowie durch Profilierung vorbereitet. Danach wird die von der upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH entwickelte Basisabdichtung nach Herstellung eines Planums in der Aufstandsfläche qualifiziert eingebaut. In Abstimmung mit der upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH wurden die bodenmechanischen Parameter der Basisabdichtung für die numerischen Berechnungen auf der Basis von bodenmechanischen Versuchen auf der sicheren Seite festgelegt ([U6.6], [U6.15]). Die bodenmechanischen Parameter der Basisabdichtung, die dem oberen Meter des Baugrundes zugewiesen wurden, sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

	<b>Basisabdichtung</b>	<b>Flächenfilter</b>
Schichtdicke [m]	0,75	0,80
Dichte $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,95	1,95
Reibungswinkel $\phi'$ [°]	30	37,5
Kohäsion $c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0	0
Elastizitätsmodul $E$ [MN/m <sup>2</sup> ]	25	100
Querdehnzahl $\nu$ [-]	0,3	0,3
Kappenexzentrizität $R$ [-]	0,02	0,02
Radius Übergangsbereich $\alpha$ [-]	0,001	0,001
Fließflächenformfaktor $K$ [-]	0,78	0,78

**Tabelle 3:** Bodenmechanische Parameter der Basisabdichtung und des Flächenfilters in den Schnitten 1-1'<sub>2021</sub>

Die Aufstandsfläche wurde in allen Untersuchungsschnitten als Kontaktfläche zwischen Flächenfilter und Basisabdichtung bzw. zwischen Flächenfilter und Materialtyp I (unterhalb der bestehenden Rückstandshalde) abgebildet. Der Reibungswinkel in der Aufstandsfläche wurde entsprechend dem Mindestwert der mineralischen Dichtungsschicht gewählt und beträgt  $\delta_A = 30^\circ$ . Auf der sicheren Seite liegend wurde für die Kontaktfläche keine Kohäsion angesetzt.

### 4.3.3 Salzmechanische Parameter des Rückstandssalzes

Das Materialverhalten des Rückstandssalzes wird mit dem am Institut und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt entwickelten Materialgesetz mathematisch beschrieben ([U6], [U7]). Demnach resultieren die Verformungen von Rückstandssalz aus einem elastischen, einem instantan plastischen und einem viskoplastischen Anteil infolge Kriechens (Gleichung (1)).

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} + \varepsilon^{vpl} \quad (1)$$

Die Verformungsanteile werden auf der Basis von Versuchsergebnissen an Rückstandssalz mittels mathematischer Funktionen unter Verwendung entsprechender Material- und Regressionsparameter approximiert.

Der elastische Verformungsanteil wird mit Hilfe des Hooke'schen Gesetzes ermittelt. Hierzu wurden der Elastizitätsmodul  $E$  und die Querdehnzahl  $\nu$  bestimmt. Der instantan und damit zeitinvariante, plastische Verformungsanteil wird mit Hilfe des Kappenmodells im Materialgesetz abgebildet (Bild 15).

Der viskoplastische und damit zeitvariante Verformungsanteil setzt sich aus einem stationären (Gleichung (2)) und einem transienten (Gleichung (3)) Anteil zusammen. Der stationäre Anteil wird maßgebend durch die Deviatorspannung beeinflusst. Demgegenüber nimmt der transiente Anteil in Abhängigkeit von der Zeit den Wert Null an, so dass dann bei Langzeitbetrachtungen das Materialverhalten von Rückstandssalz maßgeblich durch den stationären Anteil bestimmt wird.

$$\dot{\varepsilon}^{vpl,st} = e^{-\frac{Q}{R \cdot T}} \cdot \left[ B_1 \cdot s + (B_2 \cdot s^{B_4} - B_1 \cdot s) \cdot \tanh(B_3 \cdot s) \right] \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}^{vpl,tr} = \frac{D_1 \cdot n_{max}}{C_1} \cdot e^{-\frac{t}{C_1}} \quad (3)$$

Die viskoplastische Volumenänderungsrate wird mit Gleichung (4) beschrieben.

$$\dot{\varepsilon}_{kk}^{vp, tr} = e^{-\frac{Q_t}{R \cdot T}} \cdot E_7 \cdot e^{E_8 \cdot I_1} \cdot \left( \ln \left( \frac{\varepsilon_{kk, max}}{\varepsilon_{kk, max} - \varepsilon_{kk}} \right) \right)^{-(E_5 + E_6 \cdot \varepsilon_{kk, max})} \quad (4)$$

Die experimentell bestimmten und in Tabelle 4 zusammengestellten salzmechanischen Parameter basieren auf [U7]. Dabei werden die Vorzeichen der einzelnen Parameter durch die Konventionen des verwendeten Stoffgesetzes bzw. numerischen Programmsystems bestimmt.

Das Materialverhalten wird maßgeblich vom Spannungsverhältnis der kleineren zur größeren Hauptspannung und von der Verschiebungsrate beeinflusst. Bei verträglichen Spannungsverhältnissen und Verschiebungsraten entzieht sich das Rückstandssalz der Einwirkung durch bruchloses Kriechen – es tritt dann kein Bruchversagen ein. Hohe, überkritische Verschiebungsrate führen zum Spröbruch. Demgegenüber führen geringe, unterkritische Verschiebungsrate zum bruchlosen, plastischen Kriechen. Das an der TU Darmstadt entwickelte Materialgesetz überprüft zu jedem Zeitpunkt einer Simulation den Spannungszustand und die zugehörige, zulässige Verschiebungsrate. Bei überkritischen Verschiebungsrate bricht die Berechnung mit einer entsprechenden Fehlermeldung ab.

	<b>Formelzeichen</b>	<b>Zahlenwert</b>	<b>Einheit</b>
Dichte	$\rho$	1,9	[kg/dm <sup>3</sup> ]
Elastizitätsmodul	E	1.500.000	[kN/m <sup>2</sup> ]
Querdehnzahl	$\nu$	0,25	[-]
Beiwerte der Konusfließfunktion	$\alpha$	4.600	[kN/m <sup>2</sup> ]
	$\lambda$	3.611,83	[kN/m <sup>2</sup> ]
	$\beta^{*)}$	$-2 \cdot 10^{-5}$	[m <sup>2</sup> /kN]
	$\theta^{*)}$	-0,61	[-]
Halbmesserverhältnis	$R^{*)}$	-0,35	[-]
Anfangskonuskappenschnittpunkt	$\kappa_0^{*)}$	-5	[kN/m <sup>2</sup> ]
Max. Porenanteil	$n_{max}^{*)}$	-0,3	[-]
Beiwerte der Kappenfließfunktion	$d^{*)}$	-0,0006	[m <sup>2</sup> /kN]
	$w^{*)}$	-0,01	[-]

**Tabelle 4:** Salzmechanische Parameter des Rückstandssalzes

Fortsetzung Tabelle 4

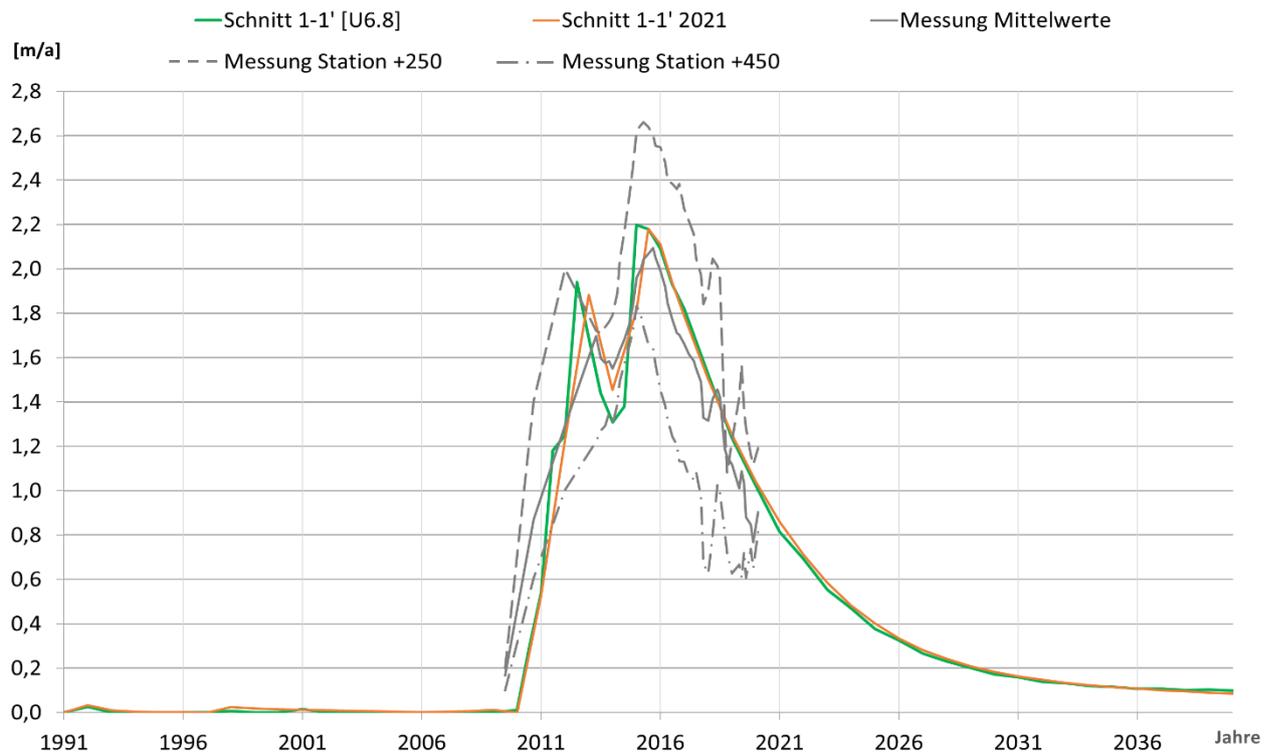
	<b>Formelzeichen</b>	<b>Zahlenwert</b>	<b>Einheit</b>
Regressionsparameter der stationären Verformungsrate	B <sub>1</sub>	150	[m <sup>2</sup> /kNs]
	B <sub>2</sub>	1	[m <sup>2</sup> /kNs]
	B <sub>3</sub>	1 · 10 <sup>-5</sup>	[m <sup>2</sup> /kN]
	B <sub>4</sub>	1	[-]
Regressionsparameter der transienten Verformungsrate	C <sub>1</sub>	1.728.000	[s]
	D <sub>1</sub> <sup>*)</sup>	-0,015	[-]
Regressionsparameter der viskoplastischen Volumenänderungsrate	E <sub>5</sub>	1	[-]
	E <sub>6</sub> <sup>*)</sup>	-1,36	[-]
	E <sub>7</sub> <sup>*)</sup>	-5.000	[1/s]
	E <sub>8</sub> <sup>*)</sup>	-0,0001	[m <sup>2</sup> /kN]
Aktivierungsenergie	Q	79	[kJ/mol]
*) Transformation des Vorzeichens im Rahmen der Regressionsanalyse			

**Tabelle 4:** Salzmechanische Parameter des Rückstandssalzes

#### 4.4 Verifizierung des numerischen Modells

Die Verifizierung des Schnitts 1-1'<sub>2021</sub> erfolgte anhand der Ergebnisse der umfangreichen numerischen Untersuchungen zur Ursachenforschung an der Südwestflanke im Schnitt 1-1' [U6.8]. Zur Überprüfung der numerischen Modellierung und der angesetzten salzmechanischen und bodenmechanischen Parameter wurde eine Vergleichsrechnung im Schnitt 1-1'<sub>2021</sub> ohne geplante Haldenerweiterung durchgeführt.

In Bild 16 sind als Ergebnis die Verschiebungsgeschwindigkeiten aus der Ursachenforschung im Schnitt 1-1' gemäß [U6.8] (Berechnungsvariante 6.2) sowie der Vergleichsberechnung im Schnitt 1-1'<sub>2021</sub> (ohne Schüttblock, Grundvariante) dargestellt.



**Bild 16:** Ergebnis der Ursachenforschung im Schnitt 1-1' gemäß [U6.8] und Ergebnis der Vergleichsberechnung im Schnitt 1-1' 2021 ohne Anschüttung der geplanten Erweiterung Phase 2 (Grundvariante)

Die Berechnungsergebnisse im Schnitt 1-1' 2021 (orange) ohne Schüttung der Haldenerweiterung der Phase 2 ergeben eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Kalibrierungsberechnung (grün) gemäß [6.8]. Das Modell ist konservativ gegenüber allen Bereichen in der Haldenerweiterung kalibriert.

#### 4.5 Nachweis- und Sicherheitskonzept

Im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/01 wird für die Anschüttung an die Bestandshalde im Schnitt 1-1' 2021 die Gebrauchstauglichkeit des Systems Basisabdichtung untersucht.

Die Nachweise werden auf Basis der DIN EN 1997-1, der DIN EN 1997-1 N/A sowie der DIN 1054 geführt. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfolgt mit charakteristischen, d.h. mit nicht abgeminderten Scherparametern. Diese Vorgehensweise wurde bereits bei früheren Unter-

suchungen angewandt ([U5], [6.6] und [6.15]). Zur Berücksichtigung des zeitvarianten Materialverhaltens des Rückstandssalzes wurde ein Untersuchungszeitraum von rd. 76 Jahren (19 Jahre Beschüttung der Bestandshalde (1995 bis 2014), 7 Jahre Kriechzeitraum bis zur Beschüttung der Haldenerweiterung in 2021, Beschüttung der Haldenerweiterung in 0,25 Jahren, 50 Jahre Nachbetriebsphase) angesetzt. Der Untersuchungszeitraum beginnt mit der Beschüttung der Bestandshalde im FSV und endet 50 Jahre nach Schüttende. Der Beginn der Beschüttung der Haldenerweiterung der Phase 2 im Jahr 2021 wurde konservativ, d.h. auf der sicheren Seite liegend, gewählt und berücksichtigt eine horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit im Bereich des bestehenden Böschungsfußes von 1,0 m/a (siehe Bild 16).

Die aus den numerischen Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit resultierenden Prognosen der sich zeitlich verändernden Spannungen, Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten liefern die Eingangsparameter, die z.B. für die Bemessung der Basisabdichtung und die Entwässerungssysteme erforderlich sind.

#### **4.6 Numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit im Anschüttungsbereich der Phase 2**

Zur numerischen Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit im Schnitt 1-1' <sub>2021</sub> inkl. Schüttblock wurden die in Kapitel 4.3 aufgeführten charakteristischen Materialkennwerte für Baugrund und Rückstandssalz verwendet.

Der Beginn der Beschüttung der geplanten Haldenerweiterung der Phase 2 wurde, auf der sicheren Seite liegend, bei einer horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeit im Haldenvorland, d.h. 5 m vor dem bestehenden Böschungsfuß, von 1,0 m/a angesetzt. Dies entspricht im numerischen Modell (siehe Bild 16) fiktiv einem Beginn der Haldenerweiterung der Phase 2 im Jahr 2020. Geplant ist der Beginn der Beschüttung Phase 2 ab Mitte 2023. Aufgrund der im Vergleich zur Berechnung aktuell gemessenen, geringeren Verschiebungsgeschwindigkeiten (Kapitel 3.7) sind die berechneten Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten größer als tatsächlich zu erwarten. Die Modellierung ist daher konservativ und liegt auf der sicheren Seite.

Im Rahmen der numerischen Berechnungen wurden auf Basis der Fragestellung im Wesentlichen die horizontalen Verschiebungen und Dehnungen am Ende des Betrachtungszeitraums sowie die vertikalen Verschiebungen und Differenzverschiebungen 1 Jahr vor Beschüttung der Haldenerweiterung (Zeitraum 2020 bis 2021) betrachtet. Die vertikalen Verschiebungen und Differenzverschiebungen sind maßgebend für die Abschätzung möglicher Liegezeiten des Systems Basisabdichtung,

bevor eine Ballastierung mit Rückstandssalz erforderlich wird. Im Einzelnen werden im Schnitt 1-1'2021 folgende Ergebnisse ausgewertet:

- vertikale Verschiebungen vor Beschüttung der Haldenerweiterung in 2021
- vertikale Differenzverschiebungen im Zeitraum 2020 bis 2021 (vor Anschüttung Phase 2)
- horizontale Dehnungen am Ende des Betrachtungszeitraums

Der Schwerpunkt der Ergebnisdarstellung liegt im Bereich der Haldenerweiterung Phase 2. Bei der Dokumentation der Ergebnisse in Form von Zahlenwerten werden numerische Singularitäten nicht berücksichtigt.

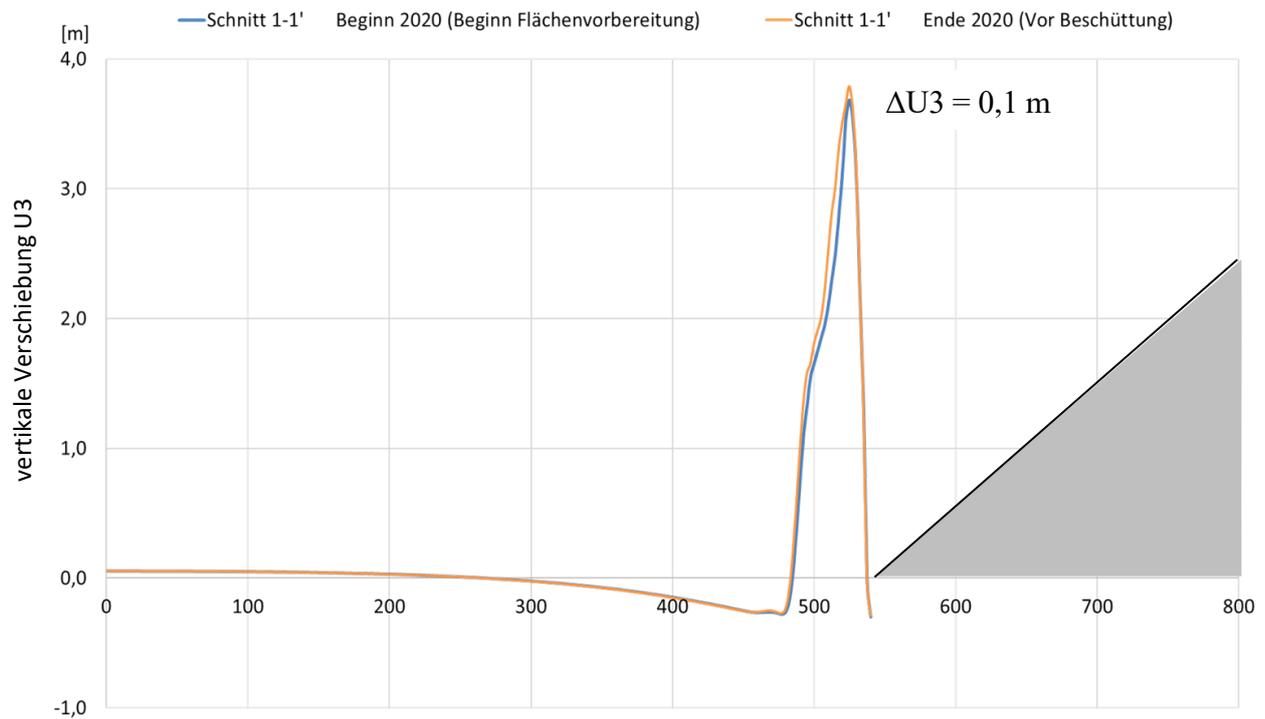
#### **4.6.1 Numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit Schnitt 1-1'2021 mit Schüttblock**

##### **4.6.1.1 Vertikale Verschiebungen und Setzungen**

Zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit des Systems Basisabdichtung wurden die vertikalen Differenzverschiebungen vor Anschüttung der Phase 2, d.h. im Zeitraum der Flächenvorbereitung und Erstellung des Systems Basisabdichtung, ausgewertet. Im numerischen Modell wird hierfür das gesamte Jahr 2020 betrachtet, d.h. der Zeitraum 1 Jahr vor dem Schüttbeginn.

Im Zeitraum vom Beginn der Flächenvorbereitung im Anschüttungsbereich der Haldenerweiterung Phase 2 (Anfang 2020 im numerischen Modell) bis zum Ende der Flächenvorbereitung (Ende 2020 im numerischen Modell) ergibt sich im Bereich des Schüttblocks eine vertikale Differenzverschiebung von maximal 0,1 m.

Die vertikalen Verschiebungen im Bereich der Anschüttung Phase 2 für die o.g. Zeiträume sind in Bild 17 dargestellt.

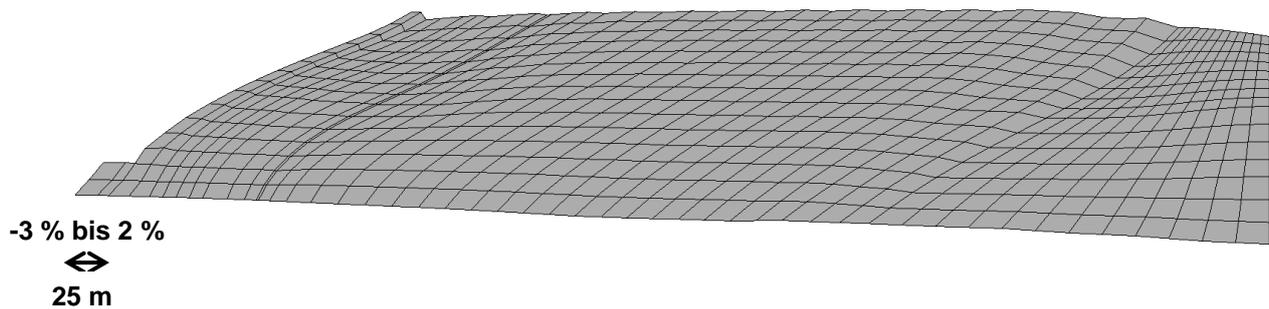


**Bild 17:** Vertikale Verschiebungen  $U_3$  in [m] im Zeitraum der Flächenvorbereitung (Anfang 2020 bis Ende 2020) des Schnitt 1-1' <sub>2021</sub>

Die Hebungen bzw. Setzungen, die bereits vor Beginn der Flächenvorbereitung im Haldenvorland aufgetreten sind, werden bei der Flächenvorbereitung berücksichtigt und ausgeglichen, so dass, anders als im numerischen Modell, ein ebenes Planum im Haldenvorland hergestellt wird.

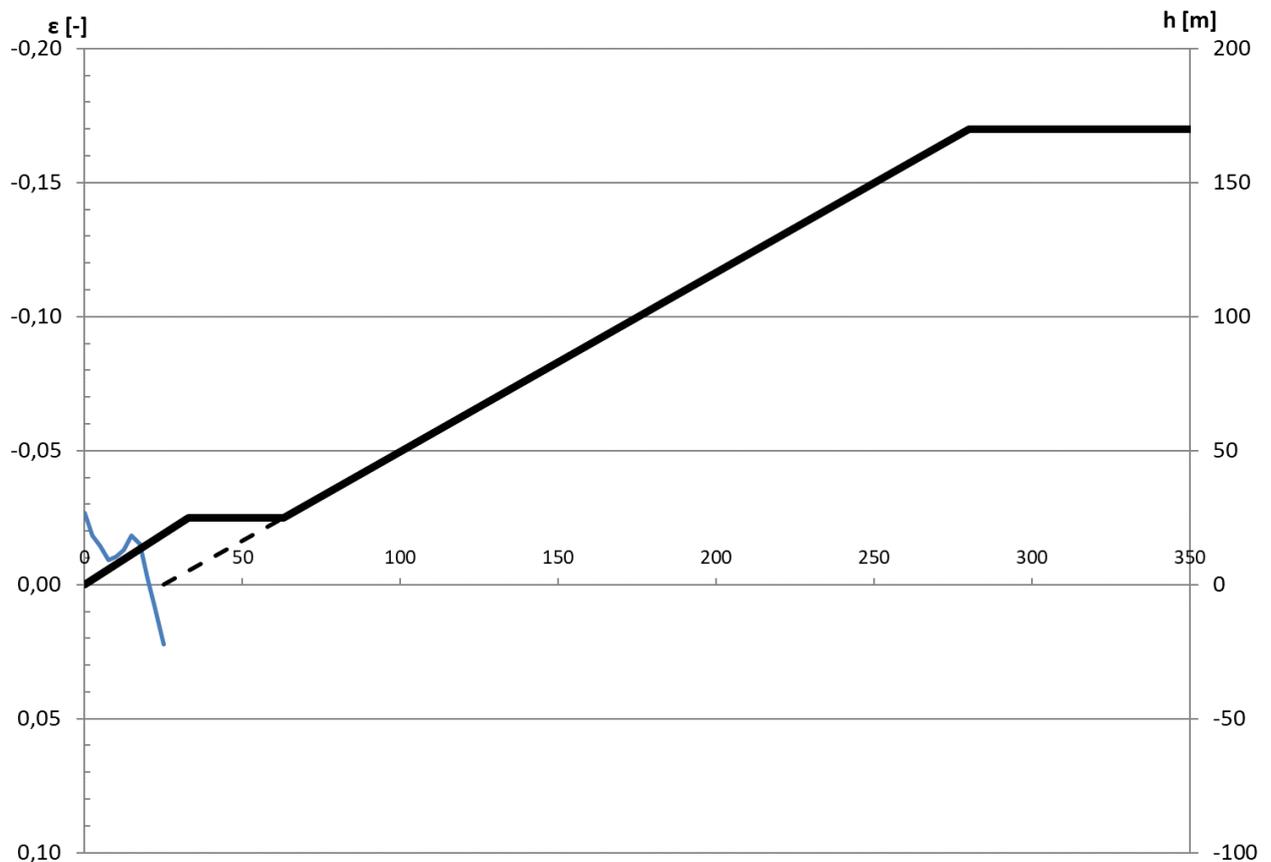
#### 4.6.1.2 Dehnungen in der Basisabdichtung am Ende des Betrachtungszeitraums

In Bild 18 sind die Bereiche horizontaler Dehnungen (positiv) und Stauchungen (negativ) in der Basisabdichtung unterhalb des Schüttblocks der Haldenerweiterung Phase 2 am Ende des Untersuchungszeitraums als Bandbreite dargestellt. Sie betragen zwischen 3 % Stauchung und 2 % Dehnung.



**Bild 18:** Horizontale Dehnungen und Stauchungen der Basisabdichtung unterhalb des Schüttblocks im Schnitt 1-1'<sub>2021</sub>, Endzustand 50 Jahre nach Schüttende

Bild 19 zeigt die Dehnungsverteilung für den Schnitt 1-1'<sub>2021</sub> inkl. Schüttblock im Bereich der Haldenerweiterung der Phase 2. Die maximale Dehnung beträgt 2 % und liegt unter der Rückstandshalde rd. 25 m vom endgültigen Böschungsfuß entfernt und somit im Bereich des ehemaligen Böschungsfußes der bestehenden Halde Hattorf.



**Bild 19:** Dehnungsverteilung unter dem Schüttblock der Haldenerweiterung der Phase im Schnitt 1-1'<sub>2021</sub>, Endzustand 50 Jahre nach Schütten

## 5 Vorgaben zur Bemessung des Systems Basisabdichtung Haldenerweiterung Phase 2

### 5.1 Charakteristische Setzungs- und Dehnungsverteilungen

Zur Bemessung des Systems Basisabdichtung (Dichtungsschicht und Entwässerungselemente) werden Angaben zu den charakteristischen Setzungs- und Dehnungsverteilungen benötigt.

Aus den vorgenannten Untersuchungen (Kap. 3 und 4) werden für den Schnitt 1-1'<sub>2021</sub> die prognostizierten Setzungs- und Dehnungsverteilungen in der Aufstandsfläche der geplanten Haldenerweiterung im Anschüttungsbereich an die bestehende Rückstandshalde dokumentiert. Die horizontalen Verschiebungen (Hebungen/Setzungen) wurden sowohl für den Zeitraum der Flächenvorbereitung (im numerischen Modell fiktiv von Beginn 2020 bis Ende 2020) als auch für den Endzustand (50 Jahre Nachbetrachtungsphase) ausgewertet. Die Dehnungen im Schnitt 1-1'<sub>2021</sub> wurden, analog

zu unseren Auswertungen in [U6.6] und [U6.15], für den Endzustand ausgewertet. Ergänzend werden für die Haldenerweiterungsfläche Phase 2 mit einem Abstand zum bestehenden Böschungsfuß von  $> 10$  m, die Ergebnisse der Schnitte A-A'<sub>2018</sub> und C-C'<sub>2018</sub> in den nachfolgenden Bewertungen/Vorgaben berücksichtigt.

Die Dehnungsverteilung im Schnitt 1-1'<sub>2021</sub> ist in den Bildern 18 und 19 dargestellt. Dehnungen werden mit positivem Vorzeichen, Stauchungen mit negativem Vorzeichen dargestellt. Die Dehnungen und Stauchungen sind dimensionslos. Die maximal ermittelten Dehnungen betragen 2 %. Der Bereich der maximalen Dehnungen liegt vor dem Böschungsfuß der bestehenden Halde Hattorf. Die Dehnungsverteilungen für die Schnitte A-A'<sub>2018</sub> und C-C'<sub>2018</sub> sind in [U6.15] dokumentiert. Die maximalen Dehnungen betragen 5 % (Schnitt C-C'<sub>2018</sub>) und liegen, unabhängig vom Untersuchungsschnitt, unterhalb der Halde im Bereich des endgültigen Böschungsfußes der Haldenerweiterung.

Die generalisierte Setzungsmulde für die Erweiterungsfläche der Rückstandshalde Hattorf basiert auf den Setzungskurven der Schnitte A-A'<sub>2018</sub> und C-C'<sub>2018</sub> [U6.15]. Die Setzungen im Schnitt 1-1'<sub>2021</sub> sind aufgrund der untersuchten geringen Schütthöhe von 25 m nicht maßgebend. Die generalisierte Setzungsmulde für die Erweiterungsfläche der Rückstandshalde Hattorf gemäß [U6.15], die der Bemessung der Entwässerungselemente mit Kennzeichnung zugrunde gelegt werden kann, hat weiterhin Gültigkeit. Für Detailplanungen wird auf die Zahlenwerte in [U6.15] verwiesen.

Für die weiteren Beschüttungsabschnitte in der Erweiterungsfläche wird von K+S untersucht, ob die Dicken der Dichtungsschicht und/oder des Flächenfilters optimiert werden können. Dazu ist festzustellen, dass auch bei einer Reduktion der Schichtdicken um bis zu 50 % die umfangreichen numerischen Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit in [U6.6] und [U6.15] sowie im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten weiterhin Gültigkeit haben, da eine Reduktion der Schichtdicken zu günstigeren, d.h. kleineren Verschiebungen führt.

## 5.2 Monitoring im Rahmen der Beobachtungsmethode

Das für die Phase 1 genehmigte umfangreiche Monitoringprogramm der Endkontur der Haldenerweiterung Hattorf hat weiterhin Gültigkeit und ist auf die Endkontur der Phase 2 übertragbar.

Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen für die Haldenerweiterung in [U6.6] und [U6.15] werden im gegenständlichen Gutachten bestätigt und haben weiterhin Gültigkeit. Die im Monitoringkonzept für die Haldenerweiterung Hattorf angesetzten horizontalen Verschiebungs-

geschwindigkeiten aus den numerischen Untersuchungen gemäß [U6.15] sind Grundlage für die Bewertung kritischer Zustände und für die Festlegung der Überwachungswerte.

Bei signifikanten Abweichungen der Messwerte von den prognostizierten Werten ist durch einen Sachverständigen eine Bewertung der Situation vorzunehmen. Ggf. sind aus dieser Bewertung dann weitere Maßnahmen abzuleiten.

### **5.3 Überprüfung der Baugrundsituation der einzelnen Beschüttungsabschnitte**

Aufgrund der Komplexität des Systems Halde, Basisabdichtung und Baugrund sowie der Größe des Vorhabengebietes sind die in unsere Untersuchungen eingegangenen Parameter zum Baugrund (Schichtdicken, bodenmechanische Kennwerte etc.) auch im Bereich der Haldenerweiterung der Phase 2 zu überprüfen. Dies soll abschnittsweise im Zuge der Flächenvorbereitung erfolgen. K+S lässt durch einen geotechnischen Sachverständigen überprüfen, ob die den Nachweisen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit in [U6.6], [U6.15] und im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/01 zugrunde liegenden geometrischen und stofflichen Randbedingungen den Verhältnissen im Bereich der Haldenerweiterungsfläche der Phase 2 angemessen entsprechen. Im Bedarfsfall sind für einzelne Teilbereiche der Erweiterungsfläche zusätzliche Untersuchungen durchzuführen.

## **6 Schlussbemerkung / Zusammenfassung**

Mit der geplanten Phase 2 der Haldenerweiterung Hattorf soll ab Mitte 2023 die Haldenerweiterung Phase 1, deren Flächenvorbereitung im Zeitraum 2018 bis 2020 erfolgte, um etwa 100 m nach Süden vergrößert werden. Die Planung sieht eine Verschiebung der genehmigten Vorhabensgrenze bei Station + 1.100, an der die Haldenerweiterung an der Bestandshalde anbindet, zu Station + 1.000 vor. Die Haldenerweiterung umfasst im Rahmen der Phase 2 die untere Schüttscheibe mit einer Höhe bis rd. 100 m über GOF.

Im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/01 wurden für die geplante Haldenerweiterung der Phase 2 die numerischen Untersuchungen zu den Nachweisen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit in [U6.6] und [U6.15] hinsichtlich ihrer Gültigkeit geprüft sowie ergänzende Untersuchungen durchgeführt.

Die in [U6.6] und [U6.15] dokumentierten umfangreichen numerischen, zeitvarianten Berechnungen mit Hilfe der Finite-Element-Methode (FEM) wurden für 99 % der Haldenerweiterungsfläche

der Phase 2, d.h. für den Bereich mit einem Abstand vom  $\geq 10$  m zum bestehenden Haldenfuß der Bestandshalde Hattorf, bestätigt. Die aktuellen Messungen der Permanentmessstationen an den Haldenstationen + 900 und + 1.000, die sich in einem Abstand von ca. 10 m zum bestehenden Haldenfuß befinden, liegen unter den prognostizierten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten gemäß Kalibrierungsberechnung (Kapitel 3.3 und [U6.2]). Die Untersuchungen in [U6.6] und [U6.15] sind somit, mit Ausnahme eines ca. 10 m breiten Streifen im Bereich des bestehenden Böschungsfußes, ausreichend konservativ und haben weiterhin Gültigkeit für die geplante Haldenerweiterung Phase 2.

Auf Basis der in [U6.6] und [U6.15] dokumentierten Randbedingungen wird mit den numerischen Untersuchungen gezeigt, dass die geplante Haldenerweiterung der Phase 2 im Sinne des in Kapitel 3.5 beschriebenen Nachweis- und Sicherheitskonzeptes und der aktuellen technischen Regelwerke standsicher ist. Die Standsicherheit wurde für die ständige Bemessungssituation mit dem Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma = 1,25$  nachgewiesen.

Aus den Ergebnissen der numerischen Berechnungen zur Gebrauchstauglichkeit in [U6.6] und [U6.15] können die zu erwartenden Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten sowie Dehnungen abgeleitet bzw. prognostiziert werden. Sie bilden die Basis für die Bemessung des Systems Basisabdichtung sowie für die Ausgestaltung des Monitoringprogramms.

Für den Anschüttungsbereich der geplanten Haldenerweiterung der Phase 2 an die Bestandshalde, d.h. im Bereich mit einem Abstand  $< 10$  m zum bestehenden Böschungsfuß der Bestandshalde Hattorf, erfolgten ergänzende numerische Untersuchungen im Schnitt 1-1'<sub>2021</sub> an der Haldenstation + 450, der mit konservativem Ansatz für die Phase 2 die Verformungs- und Baugrundsituation im Südwesten der Bestandshalde berücksichtigt. Für den Schnitt 1-1'<sub>2021</sub> werden übereinstimmend zum Schnitt 1-1' [U6.8] sowie zu den Ergebnissen des aktuellen Verformungsmonitorings [U6.43] horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten im Bereich des Haldenfußes von 1,0 m/a für das Jahr 2020 berechnet. Bis zum Beginn der geplanten Haldenerweiterung der Phase 2 im Jahr 2023 wird mit dem Schnitt 1-1'<sub>2021</sub> eine Abnahme der horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten auf ca. 0,6 m/a prognostiziert. Die entsprechenden Verschiebungsgeschwindigkeiten im weiteren Anbindungsbereich der Phase 2 an die Bestandshalde liegen dagegen, gemäß der in [U2.6] dokumentierten Messungen Anfang 2021, bei rd. 0,3 m/a; nach bisherigen Erfahrungen im langfristigen Trend werden sie sich weiter reduzieren. Als Startbedingung für die ergänzenden numerischen Untersuchungen für die Phase 2 im böschungsfußnahen Bereich  $< 10$  m wurde deutlich konservativ eine horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit von 1,0 m/a angesetzt, woraus im numerischen Modell ein fiktiver Schüttbeginn Anfang 2021 resultiert. Der Gesamtbetrachtungszeitraum beträgt mindestens 76 Jahre und setzt sich aus der bis zu 26 Jahre dauernden Schüttphase der Bestandshalde inkl. Kriechzeitraum bis Ende 2020, der Beschüttung der Haldenerweiterung ab 2021 in Form eines

Schüttblocks mit 25 m Höhe und 25 m Länge sowie der rd. 50 Jahre dauernden Nachbetrachtungsphase zusammen. Damit wird ein ausreichend langer Zeitraum für die Nachbetriebsphase zur Beurteilung des Verformungsverhaltens untersucht.

Aus den Ergebnissen der numerischen Berechnungen geht hervor, dass die temporären horizontalen Verschiebungen bzw. Hebungen im Bereich des Systems Basisabdichtung im Anschüttungsbereich der Phase 2, d.h. bis < 10 m vor dem bestehenden Böschungsfuß, bei einer Flächenvorbereitungszeitraum vom 1 Jahr (Anfang 2020 bis Ende 2020) max. 0,1 m betragen. Hierbei wurde, wie bereits beschrieben, eine sehr konservative Ausgangssituation mit einer horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeit im Bereich des Haldenfußes von  $\geq 1,0$  m/a gewählt. Die prognostizierten temporären Hebungen des Systems Basisabdichtung können durch eine frühere Beschüttung oder durch eine Balastierung nach Herstellung des Systems Basisabdichtung reduziert werden. Außerdem kann das System Basisabdichtung vor Beschüttung ggf. saniert werden.

Im Rahmen der Beobachtungsmethode ist das umfangreiche geodätische und geotechnische Monitoringprogramm der genehmigten Haldenerweiterung der Phase 1 auch für die geplante Endkontur der Haldenerweiterung der Phase 2 anzuwenden.

Die unseren Untersuchungen zugrunde liegenden geometrischen und stofflichen Randbedingungen sind im Zuge der Flächenvorbereitung durch einen geotechnischen Sachverständigen zu überprüfen.

Projektbearbeitung: Eva Teutsch M.Sc.

Projektleitung: Dr.-Ing. Steffen Leppla

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

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

**Verteiler:**

- |                                     |              |
|-------------------------------------|--------------|
| - K+S Minerals and Agriculture GmbH | 8 x Original |
| - K+S Aktiengesellschaft            | 1 x Kopie    |
| - z.d.A. (IK2035, Se)               | 2 x Kopie    |