

Anlage 7:

Ingenieursozietät Prof. Dr.-Ing. Katzenbach GmbH:

Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/02

K+S Minerals and Agriculture GmbH, Werk Werra,
Standort Hattorf

Numerische Untersuchungen zur
Standicherheit und Gebrauchstauglichkeit der
geplanten Haldenerweiterung Phase 3 der Halde Hattorf.

Darmstadt, 10.12.2021

K/Vo/Se/Le/Te
IK2035
10.12.2021

SACHVERSTÄNDIGEN-GUTACHTEN Nr. IK2035/02

Vorhaben: **K+S Minerals and Agriculture GmbH • Werk Werra • Standort Hattorf**
Numerische Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der geplanten Haldenerweiterung Phase 3 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

Inhaltsverzeichnis	Seite:
1 Vorgang	5
2 Unterlagen	8
3 Numerische Untersuchungen zur Haldenerweiterung Hattorf	13
3.1 Geplante Erweiterung	14
3.1.1 Topographie	14
3.1.2 Baugrundverhältnisse	17
3.1.3 Abmessung und Geometrie	17
3.2 Numerische Modellbildung und Materialkennwerte für die numerischen Untersuchungen	18
3.3 Kalibrierung des numerischen Modells	18
3.4 Nachweis- und Sicherheitskonzept	18
3.5 Numerische Untersuchungen zur Standsicherheit	20
3.6 Numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit	21
3.7 Prüfung der numerischen Untersuchungen für die Phase 3	21
4 Ergänzende Untersuchungen im Anschüttungsbereich der Phase 3 an die Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde im Schnitt 1-1'2021b	28
4.1 Grundlagen	29
4.1.1 Topographie	29
4.1.2 Baugrundverhältnisse	30
4.2 Numerische Modellbildung	31
4.3 Materialkennwerte für die numerischen Untersuchungen	33
4.3.1 Baugrund	33
4.3.2 Bodenmechanische Parameter in der Aufstandsfläche	35
4.3.3 Salzmechanische Parameter des Rückstandssalzes	36
4.4 Verifizierung des numerischen Modells	38
4.5 Nachweis- und Sicherheitskonzept	38
4.6 Numerische Untersuchungen zur Standsicherheit im Anschüttungsbereich der Phase 3 an die Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde	39
4.7 Numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit im Anschüttungsbereich der Phase 3 an die Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde	41

5	Vorgaben zur Bemessung des Systems Basisabdichtung Haldenerweiterung Phase 3	45
5.1	Charakteristische Setzungs- und Dehnungsverteilungen	45
5.2	Einfluss der Haldenerweiterung Phase 3 auf das Haldenvorland der Bestandshalde im Bereich der Südwestflanke	46
5.3	Monitoring im Rahmen der Beobachtungsmethode	47
5.4	Überprüfung der Baugrundsituation der einzelnen Beschüttungsabschnitte	47
6	Schlussbemerkung / Zusammenfassung	48

Bilderverzeichnis:

Bild 1:	Lageplan der genehmigten Halde Hattorf, der genehmigten nordwestlich gelegenen Haldenerweiterung Phase 1, der beantragten südwestlich gelegenen Erweiterungsfläche Phase 2 und der geplanten südwestlich gelegenen Erweiterungsfläche Phase 3 mit den Untersuchungsschnitten 1-1' (Südwestflanke), A-A' und C-C'. Schnitt B-B'	6
Bild 2:	Schnitt A-A' [U6.6]	14
Bild 3:	Schnitt B-B' [U6.6]	15
Bild 4:	Schnitt C-C' ₂₀₁₆ [U6.6]	15
Bild 5:	Schnitt C-C' ₂₀₁₇ [U6.6]	16
Bild 6:	Schnitt A-A' ₂₀₁₈ [U6.15]	16
Bild 7:	Schnitt C-C' ₂₀₁₈ [U6.15]	17
Bild 8:	Lageplan der genehmigten Halde Hattorf mit der geplanten Haldenerweiterung Phase 3 sowie den zwei Bereichen (orange, und grün) mit unterschiedlicher Nachweisführung	22
Bild 9:	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	26
Bild 10:	Schnitt 1-1' _{2021a} mit Schütthistorie und Schüttblock für die Betrachtung des Anschüttbereichs an die bestehende Rückstandshalde Hattorf	27
Bild 11:	Detail Haldenerweiterung Phase 3 mit dem Anschüttungsbereich an die Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde Hattorf	29
Bild 12:	Schnitt 1-1' ₂₀₂₁ mit Schütthistorie und Schüttblock für die Betrachtung der Haldenerweiterung der Phase 3	30

Bild 13:	Numerisches Modell zur Untersuchung der Anschüttung Phase 3 an die bestehende Rückstandshalde im Schnitt 1-1' ₂₀₂₁	31
Bild 14:	Modifiziertes Drucker-Prager-Modell	33
Bild 15:	Normierte horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten	40
Bild 16:	Ergebnis der Ursachenforschung im Schnitt 1-1' gemäß [U6.8] und [U6.45] mit Beginn der Beschüttung der geplanten Erweiterung Phase 3 im Schnitt 1-1' _{2021b}	41
Bild 17:	Volumendehnungen und -stauchungen der Basisabdichtung unterhalb der Haldenerweiterung im Schnitt 1-1' ₂₀₂₁ , Endzustand 50 Jahre nach Schüttende	42
Bild 18:	Dehnungsverteilung unterhalb der Haldenerweiterung der Phase 3 im Schnitt 1-1' ₂₀₂₁ , Endzustand 50 Jahre nach Schüttende	43

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1:	Baugrundmodell der numerischen Untersuchungen	34
Tabelle 2:	Charakteristische Werte der boden- und felsmechanischen Parameter der Materialtypen I bis III	34
Tabelle 3:	Bodenmechanische Parameter der Basisabdichtung und des Flächenfilters in den Schnitten 1-1' ₂₀₂₁	35
Tabelle 4:	Salzmechanische Parameter des Rückstandssalzes	38
Tabelle 5:	horizontale und vertikale Verschiebungen im Haldenvorland am Ende des Betrachtungszeitraums	44

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 beantragte Haldenerweiterung der Phase 2 (orange Fläche) schließt südlich der Haldenerweiterung Phase 1 an die Haldenerweiterung und die bestehende Rückstandshalde an. Die geplante Haldenerweiterung Phase 3 (grüne Fläche) schließt sich südlich der beantragten Haldenerweiterung Phase 2 (Haldenstationierung 1+000 bis 0+450) an die Haldenerweiterung und die bestehenden Rückstandshalde an.

Zulassungsvoraussetzung für die Phase 3 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 der Betriebs- und Nachbetriebsphase nachzuweisen.

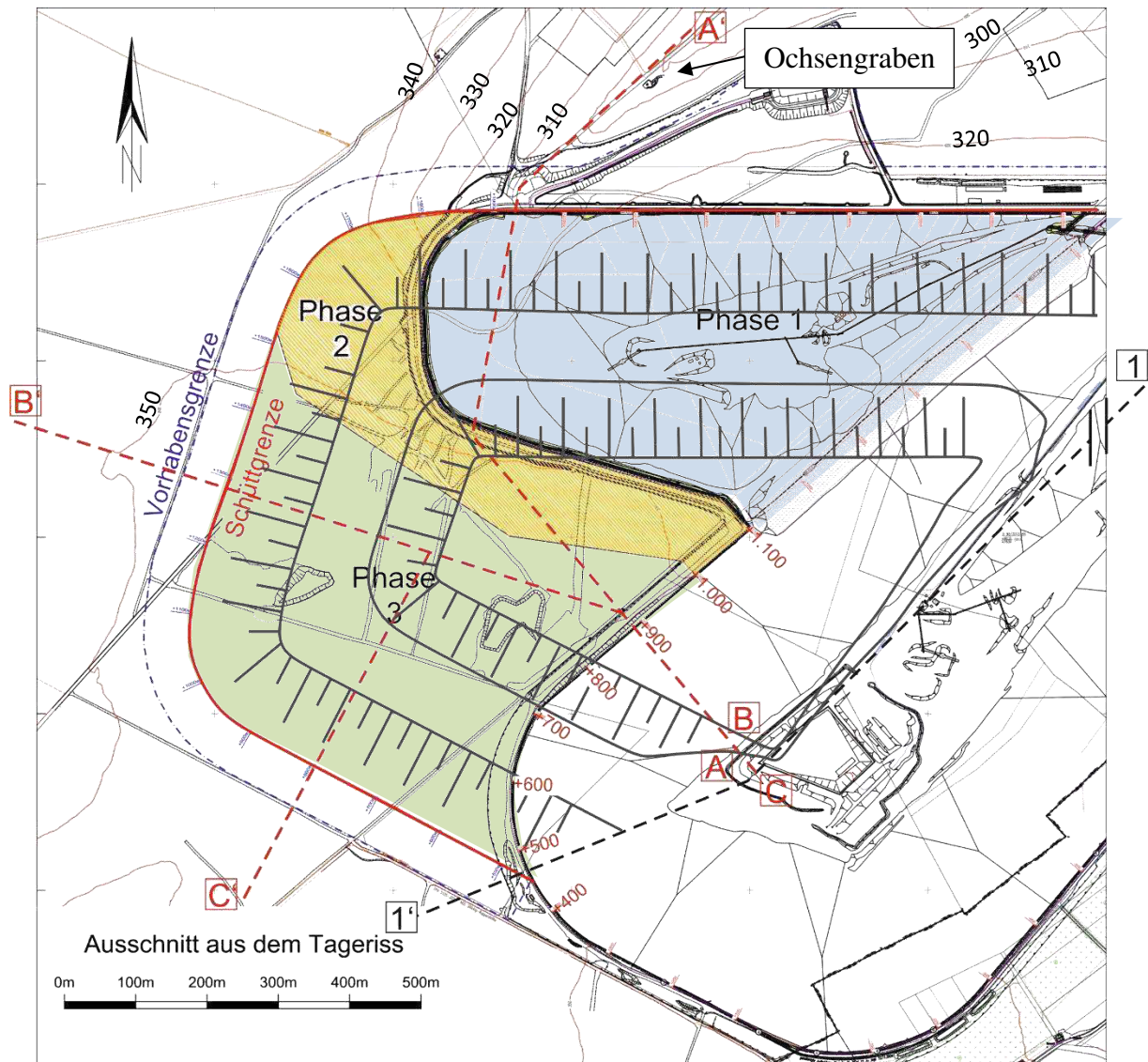


Bild 1: Lageplan der genehmigten Halde Hattorf, der genehmigten nordwestlich gelegenen Haldenerweiterung Phase 1, der beantragten südwestlich gelegenen Erweiterungsfläche Phase 2 und der geplanten südwestlich gelegenen Erweiterungsfläche Phase 3 mit den Untersuchungsschnitten 1-1' (Südwestflanke), A-A'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

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'₂₀₁₆ und C-C'₂₀₁₇ 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'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ 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. Seit 2015 zeigen die Bewegungen einen abnehmenden Trend (vgl. [U1.5] bis [U1.8], [U2.1] bis [U2.6], [U6]).

In unserem geotechnischen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/01 vom 31.05.2021 [U6.45] wurden die bereits ausgeführten und dokumentierten numerischen Untersuchungen hinsichtlich ihrer Gültigkeit für die beantragte Haldenerweiterung [U2.8] 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' _{2021a} durchgeführt, die ebenfalls in [U6.45] dokumentiert sind.

Im gegenständlichen geotechnischen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/02 werden die bereits ausgeführten und dokumentierten numerischen Untersuchungen hinsichtlich ihrer Gültigkeit für die geplanten Haldenerweiterung Phase 3 geprüft und bewertet.

Zur Untersuchung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Haldenerweiterung im Bereich ihrer Anbindung an die Bestandshalde im Schnitt 1-1' ₂₀₂₁ 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
 8. Rahmenbetriebsplan RBP HA-04/09 „Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf) – Phase 2“, DVS 3002013.19 in der Fassung 2021
 9. Quartalsbericht I/2021 zum Verformungsmonitoring ESTA-Halde Hattorf vom 15.06.2021
 10. Quartalsbericht II/2021 zum Verformungsmonitoring ESTA-Halde Hattorf vom 26.09.2021
 11. Quartalsbericht III/2021 zum Verformungsmonitoring ESTA-Halde Hattorf vom 01.12.2021
- [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
45. Geotechnisches Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/01 zu den numerischen Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der geplanten Haldenerweiterung Phase 2 der Halde Hattorf vom 31.05.2021

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

Die o.g. Schnitte wurden so gewählt, dass sie die Untergrundverhältnisse bezüglich Morphologie, Schichtdicken und Eigenschaften im Schichtenaufbau sowie die Beanspruchung der Basisabdichtung und des Untergrundes aus der ungünstigsten Haldengeometrie heraus für die gesamte geplante Haldenerweiterung Phase 1, 2 und 3 angemessen konservativ erfassen.

Für die geplante Phase 3 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' 2016 und C-C' 2017 [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).

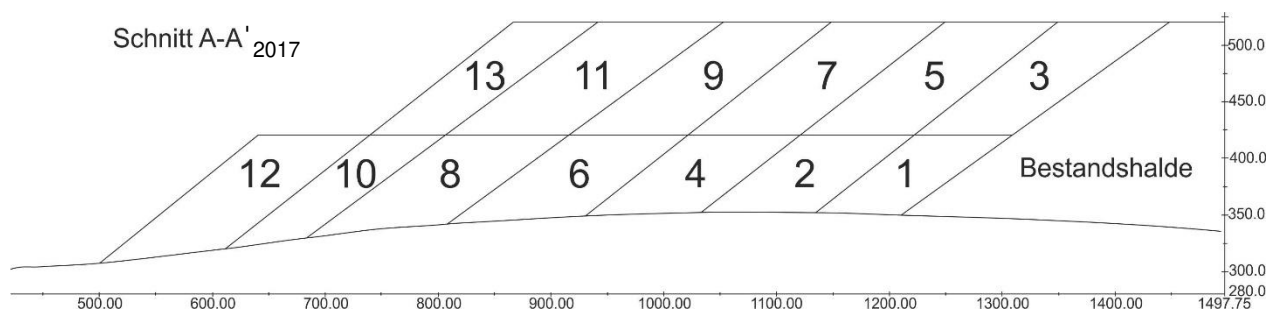


Bild 2: Schnitt A-A' 2017 [U6.6]

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).

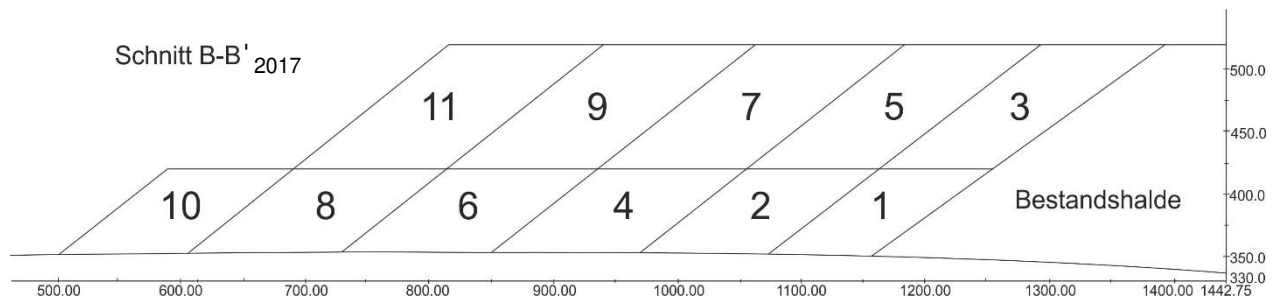


Bild 3: Schnitt B-B' 2017 [U6.6]

Für den Schnitt C-C' wurden zwei Schütthistorien bei gleichem Geländeverlauf untersucht. Im Schnitt C-C' 2016 erfolgt die Beschüttung der Haldenerweiterung in zwei, teils parallel geschütteten Schüttscheiben mit insgesamt 10 Schüttblöcken (Bild 4). Im Schnitt C-C' 2017 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.

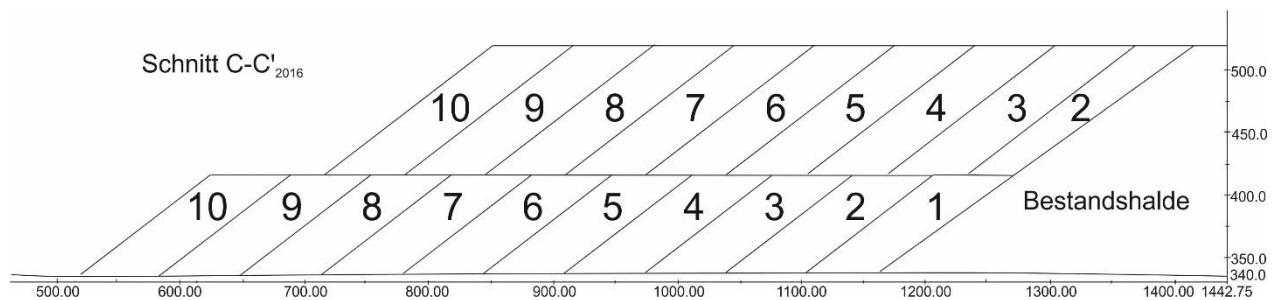


Bild 4: Schnitt C-C' 2016 [U6.6]

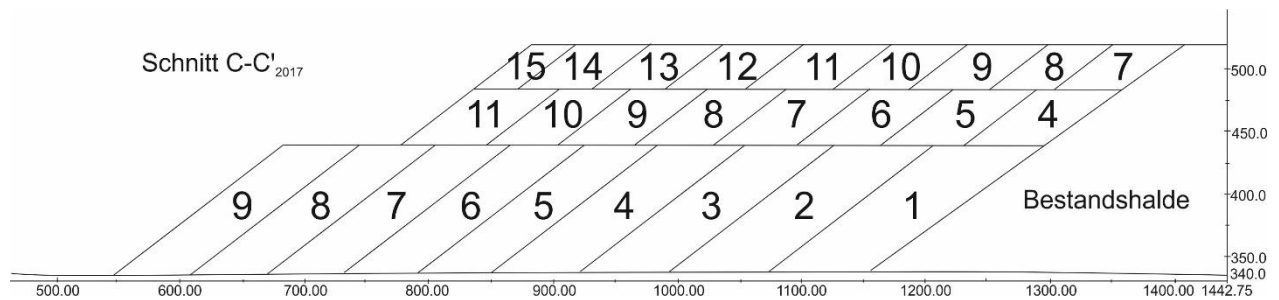


Bild 5: Schnitt C-C' 2017 [U6.6]

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.

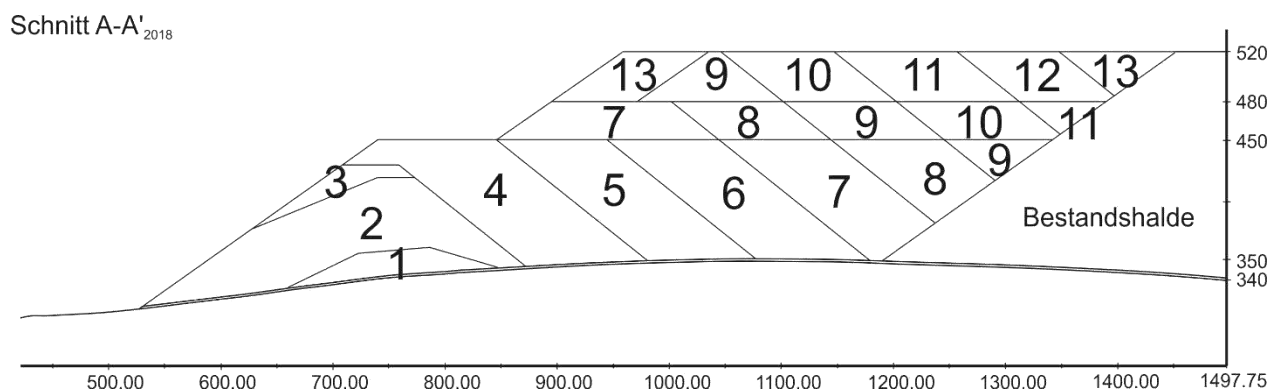


Bild 6: Schnitt A-A' 2018 [U6.15]

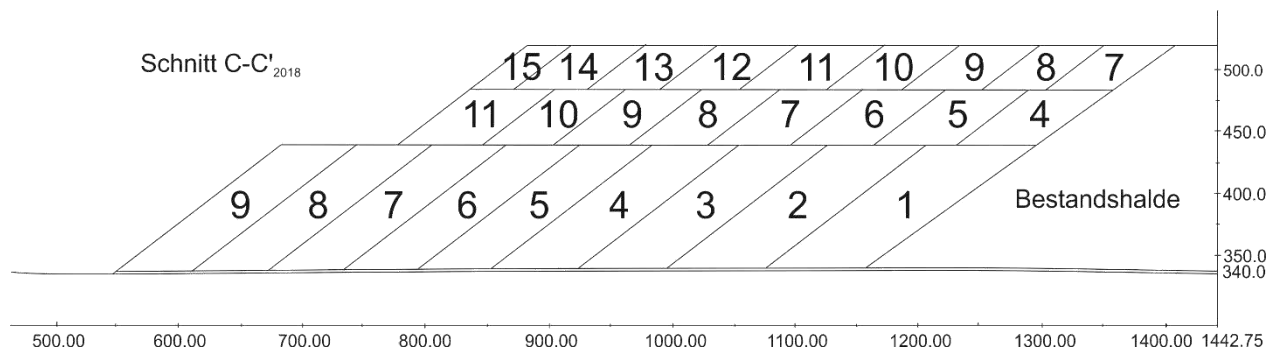


Bild 7: Schnitt C-C' 2018 [U6.15]

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 den 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 Umfang 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 3 besitzt eine Größe von rd. 24,5 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.

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. Eine genau Beschreibung der Kalibrierung ist in [U6.45] enthalten.

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 Δt_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 Δt_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 Δt_{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 Modelle 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] und [U6.45] 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 3

Schwerpunkte für die Bewertung der Aussagekraft bzw. Gültigkeit der numerischen Untersuchungen in [U6.6] und [U6.15] für die nun folgende Haldenerweiterung der Phase 3 sind folgenden Aspekte:

- Kalibrierung gemäß Kapitel 3.3 und [U6.2], [U6.45]
- 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 Kalibrierung gemäß Kapitel 3.3 und [U6.2] wurde bereits in unserem geotechnischen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/01 vom 31.05.2021 auf ihre Gültigkeit hin geprüft. Das Ergebnis der Prüfung ist in [U6.45] enthalten und auf die Phase 3 der geplanten Haldenerweiterung übertragbar.

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. Der Bereich wird seit September 2020 zusätzlich durch die Permanentmessstation PMS 34.2 (Station + 1.000) gemessen. Die Permanentmessstationen stehen am Rand des Infrastrukturstreifens, 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 8).

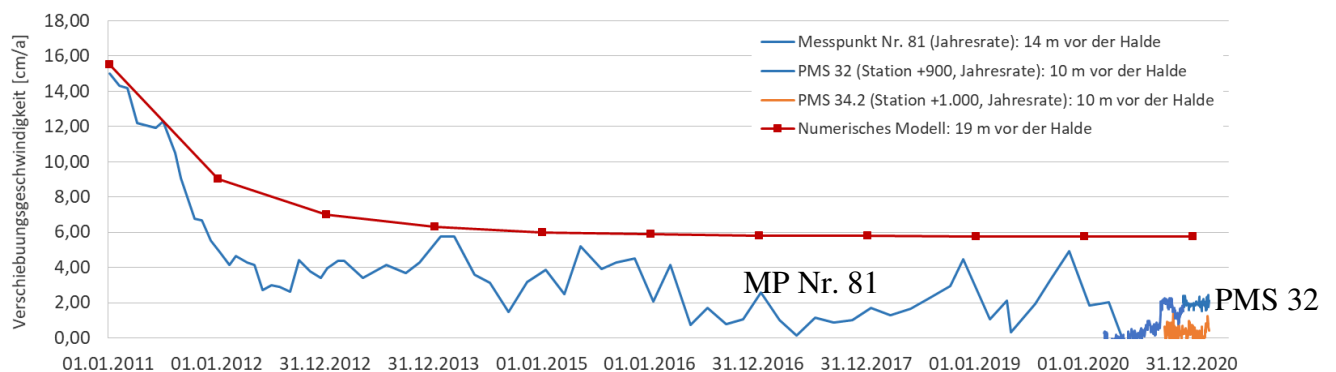


Bild 8: Aktuelle gemessene und berechnete horizontale Verformungsgeschwindigkeiten v_h in [cm/a] im Bereich des Messpunkts 81 und an den Permanentmessstationen PMS 32 und 34.2, aufgetragen über die Zeit

Es ist zu berücksichtigen, dass die Auswertung der Kalibrierungsberechnung rd. 19 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 deutlich.

Neben den Permanentmessstationen werden seit 2013 zusätzlich Laserscanmessungen 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 entlang der Bestandshalde (Station +1.000 bis +450, Anschüttungsbereich Phase 2 und 3) betragen rd. 15 cm/a (Station +1.000) bzw. < 50 cm/a (Station + 445) und überschreiten somit die rechnerische Prognose. Die größeren horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten sind lokal auf den unmittelbaren haldenfußnahen Bereich begrenzt und klingen bereits bis rd. 10 m vor dem Böschungsfuß im Mittel auf ≤ 5 cm/a (Permanentmessstationen PMS 41.2, Station +550, PMS 40, Station +650, PMS 33, Station +750, 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.

Eine Ausnahme bildet die Permanentmessstation PMS 2.2 an der Station +445 mit einer horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeit von rd. 45 cm/a in einem Abstand zum Haldenfuß von rd. 10 m. Hier klingen die größeren horizontalen Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten bis in einem Abstand von 25 m zum Haldenfuß ab [U1], [U2]. Gegen Westen nehmen die gemessenen Verschiebungen deutlich ab und liegen an der PMS 41.2, d.h. an der Haldenstation +550, in der o.g. Größenordnung von im Mittel auf ≤ 5 cm/a.

Der Kalibrierungsschnitt in Kapitel 3.3 und [U6.2] hat für den Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Phase 3 der Haldenerweiterung mit einem Abstand zum aktuellem Böschungsfuß der Bestandshalde > 10 m bzw. lokal > 25 m (Station +450 bis +550) 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 [U6.45] dokumentiert und bewertet wurden. Weitere Auswirkungen für die Phase 3 werden in der nachfolgenden Bewertung beschrieben.

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 in 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 3 der Haldenerweiterung beträgt im Bereich des Haldenfußes max. 2 %. In 90 % der Aufstandsfläche verläuft das Gelände nahezu horizontal, die Geländeneigung in der Aufstandsfläche beträgt max. 1 %. 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 3 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 3 werden drei Schüttscheiben mit einer maximalen Höhe von 180 m über GOF beantragt. Die Haldenerweiterung wird mit einer unteren Schüttscheibe mit einer Höhe von 100 m über GOF und einer Berme zu den oberen Schüttscheiben mit einer Breite von 100 m geplant. Die numerischen Untersuchungen in den Schnitten A-A', B-B' und C-C' sind somit hinsichtlich der maximalen Haldenhöhe der Haldenerweiterung Phase 3 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 3 ist gemäß [U2] die fachtechnische Überwachung der Flächenvorbereitung im Sinne der Beobachtungsmethode fortzuführen.

Im Anschüttungsbereich an die bestehende Rückstandshalde im Bereich der Südwestflanke wurden gemäß [U6.7] und [U6.8] lokal ungünstigere Baugrundverhältnisse erkundet und ein abweichendes Verformungsverhalten der Rückstandshalde und des Haldenvorlandes detektiert. Der Bereich der

Südwestflanke der bestehenden Halde Hattorf stellt eine Sondersituation dar und ist nicht auf andere Bereiche der Halde bzw. auf die Haldenerweiterungsfläche übertragbar.

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 3 der Haldenerweiterung mit folgendem Ergebnis geprüft:

Die in Kapitel 3.3, [U6.2] und [U6.45] dokumentierte Kalibrierungsberechnung hat, unter Berücksichtigung der aktuellen Messergebnisse, weiterhin Gültigkeit für die Haldenerweiterung der Phase 3 für einen Abstand zum bestehenden Haldenfuß von > 10 m bzw. > 25 m am unmittelbaren südwestlichen Anbindungsbereich an die Bestandshalde (Station +550 bis +450). Daher sind auch die Untersuchungen und Ergebnisse zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit in [U6.6] und [U6.15], die auf den Kalibrierungsberechnungen basieren, grundsätzlich weiterhin gültig. Dies wird auch durch die geometrischen Randbedingungen (Geländeverlauf, Geländeneigung und Haldenhöhe) und die Überprüfung der Baugrundverhältnisse bestätigt.

Nur lokal, direkt am Haldenfuß der Bestandshalde, werden aktuell größere Verschiebungsgeschwindigkeiten gemessen als in der Kalibrierungsberechnung prognostiziert. Für diesen Bereich, der weniger als 10 % der Haldenerweiterung Phase 3 entspricht, wurden in [U6.45] mit dem Modellschnitt 1-1' _{2021a} für eine kleine Anschüttung (25 m Höhe x 25 m Breite) die Gebrauchstauglichkeitsnachweise für das System Basisabdichtung und das Gesamtsystem geführt. Diese Berechnungsergebnisse gelten auch für eine entsprechende Anschüttung am unmittelbaren südwestlichen Anbindungsbereich an die Bestandshalde, an dem bis 25 m Abstand zum Haldenfuß größere Verschiebungen als in der Kalibrierungsberechnung auftreten.

Der Bereich der Südwestflanke der bestehenden Halde Hattorf stellt sowohl hinsichtlich der Verformungen im Haldenvorland als auch hinsichtlich der in [U6.7] erkundeten Baugrundverhältnisse eine Sondersituation dar. Auf Grundlage des geotechnischen Verformungsmonitorings ist davon auszugehen, dass die in [U6.7] erkundeten Baugrundverhältnisse im Südwesten der Bestandshalde bis ca. 25 m in das Haldenvorland hinein reichen. Dieser Bereich muss im Zuge der Haldenerweiterung Phase 3 mit der unteren Schüttschiebe (100 m Höhe x 100 m breite Berme) überschüttet werden. Hierfür ist der Nachweis der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit gesondert zu führen (siehe Kapitel 4).

Insgesamt ergeben sich für die Phase 3 der Haldenerweiterung drei Bereiche / Fälle mit unterschiedlichen Standsicherheits- und/oder Gebrauchstauglichkeitsnachweisen. Die Bereiche sind in Bild 9 dargestellt, die Nachweisführung für die einzelnen Bereiche wird im Folgenden erläutert.



Bild 9: Lageplan der genehmigten Halde Hattorf mit der geplanten Haldenerweiterung Phase 3 sowie den zwei Bereichen (orange und grün) mit unterschiedlicher Nachweisführung

Für den grünen Bereich mit einem Abstand zum bestehenden Haldenfuß der Rückstandshalde Hattorf von ≥ 10 m bzw. zwischen Station +550 bis +450 von ≥ 25 m sind keine weiteren Nachweise

zur Standsicherheit und/oder Gebrauchstauglichkeit zu führen. Alle erforderlichen Nachweise wurden bereits mit den numerischen Untersuchungen in [U6.6] und [U6.15] geführt.

Für den in Bild 9 orange gekennzeichneten Bereich der Phase 3 mit einem Abstand zum bestehenden Haldenfuß der bestehenden Halde von < 10 m bzw. zwischen Station +550 bis +450 von < 25 m ist aufgrund der aktuell gemessenen größeren Verschiebungen der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit des Systems Basisabdichtung gesondert zu führen. Dieser Nachweis wurde bereits für die Phase 2 im Schnitt 1-1' _{2021a} für eine kleine Anschüttung geführt und ist in unserem Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/01 [U6.45], Kapitel 4 enthalten. In Bild 10 ist der Schnitt 1-1' _{2021a} mit dem 25 m x 25 m großen Schüttblock gemäß [U6.45] dargestellt.

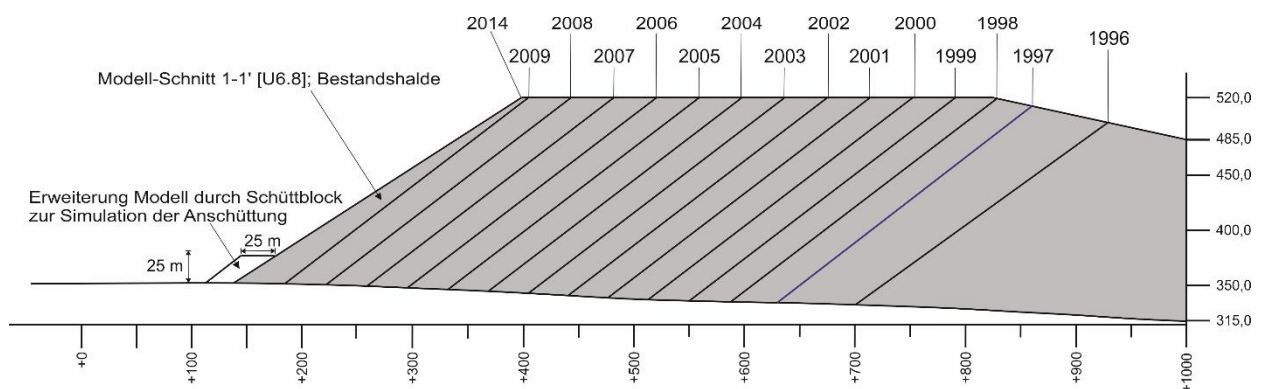


Bild 10: Schnitt 1-1' _{2021a} mit Schütthistorie und Schüttblock für die Betrachtung des Anschüttbereichs an die bestehende Rückstandshalde Hattorf

Als dritter Fall ist die Überschüttung des Baugrunds, der dort lokal durch die in 6 m und 12 m Tiefe anstehenden Schwächezoneneine nur geringe Scherfestigkeit, und zwar von $12,5^\circ$ besitzt, unmittelbar am Fuß der Südwestflanke der Bestandshalde [U6.7], [U6.8] durch die untere Schüttscheibe der Haldenerweiterung Phase 3 zu untersuchen, und hierfür sind die Beanspruchungen des Systems Basisabdichtung auszuweisen. Angrenzend an den hier 25 m breiten, in Bild 9 orange dargestellten, geschwächten Baugrundbereich gelten im Haldenvorland der geplanten Haldenerweiterungsfläche Phase 3 die im Baugrundgutachten [U3] dokumentieren sowie in [U6.15], [U6.13], [U6.19], [U6.37] und [U6.40] bestätigten Baugrundverhältnisse.

Zur Sicherstellung einer konservativen Bewertung der numerischen Untersuchungen für die Phase 3 wird der Modellschnitt 1-1' [U6.8] weiterentwickelt. Vergleichbar zur Bewertung der Phase 2 (Schnittmodell 1-1' _{2021a}) werden dem gesamten Baugrund im Schnittverlauf die ungünstigen bodenmechanischen Eigenschaften und das ungünstige Verformungsverhalten aus [U6.8]

zugewiesen und als Schnitt 1-1'_{2021b} neu berechnet. Die im Folgenden im Ergebnis ausgewiesenen Verschiebungen im Vorland der Haldenerweiterung im Schnitt 1-1'_{2021b}, d.h. im Bereich der Südwestflanke der Bestandshalde, stellen hypothetische, ungünstige Obergrenzen dar. Die für den Gebrauchstauglichkeitsnachweis des Systems Basisabdichtung ausgewiesenen Verschiebungen und Dehnungen bzw. Stauchungen sind konservativ, d.h. sie liegen auf der sicheren Seite.

In dem nachfolgend beschriebenen Schnittmodell 1-1'_{2021b} wird die Beanspruchung des Systems Basisabdichtung mit den in [U6.8] dokumentierten lokalen Baugrundverhältnissen und Verformungsmechanismen für eine Überschüttung mit einer 100 m hohen Böschung und angrenzender 100 m breiten Berme untersucht. Dies entspricht der unteren Schüttscheibe der Phase 3.

4 Ergänzende Untersuchungen im Anschüttungsbereich der Phase 3 an die Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde im Schnitt 1-1'_{2021b}

Im Bereich der geplanten Anschüttung in der Phase 3 an die Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde werden aktuell horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten von maximal rd. 0,5 m/a (Station + 445) gemessen. Dieser Bereich wurde bereits 2017 aufgrund der großen Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten untersucht und im Zuge einer Ursachenforschung gesondert bewertet. Mit der in [U6.7] und [U6.8] dokumentierten Ursachenforschung ist festgestellt worden, dass die dort gemessenen Verschiebungen lokal auf die dort in 6 m und 12 m Tiefe vorhandenen Schwächezonen mit der sehr geringen Restscherfestigkeit von nur $\delta_{S,Rest} = 12,5^\circ$ zurückzuführen sind (s.o.).

Aufgrund dieser im Vergleich zur übrigen Haldenerweiterung besonderen Baugrundsituation haben wir ergänzende numerische Untersuchungen zum Nachweis der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit im Schnitt 1-1'_{2021b} durchgeführt. Als Grundlage für die ergänzenden Bewertungen der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit im Anschüttungsbereich der Phase 3 an die Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde wurde der Schnitt 1-1'_{2021b} auf Basis des Schnittes 1-1' gemäß [U6.8] modelliert. Der Schnittverlauf ist identisch mit dem in [U6.8] untersuchten Schnittverlauf und ist in Bild 9 dargestellt.

Die nachfolgend dokumentierten numerischen Untersuchungen gelten daher nur für den Anschüttungsbereich der Phase 3 an die Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde und sind nicht auf die übrige Rückstandshalde oder Haldenerweiterung übertragbar. Für den Schnitt 1-1'_{2021b} wurde ein Schüttblock mit einer maximalen Haldenhöhe von 100 m, dies entspricht der unteren Schüttscheibe, berücksichtigt. Ziel dieses Schnittes 1-1'_{2021b} ist, die geplante Haldenerweiterung im Haldenvorland des Schnittes 1-1' abzubilden bzw. zu projizieren sowie gleichzeitig die lokal

begrenzten, sehr ungünstigen Baugrundverhältnisse im Bereich der Südwestflanke (Bild 11, orangefarbener Bereich mit $b = 25$ m) zu erfassen.

Die numerischen Untersuchungen im Schnitt 1-1' _{2021b} decken den im Bild 9 und Bild 11 markierten 25 m breiten orangefarbenen Streifen im Bereich der Südwestflanke der Bestandshalde ab.

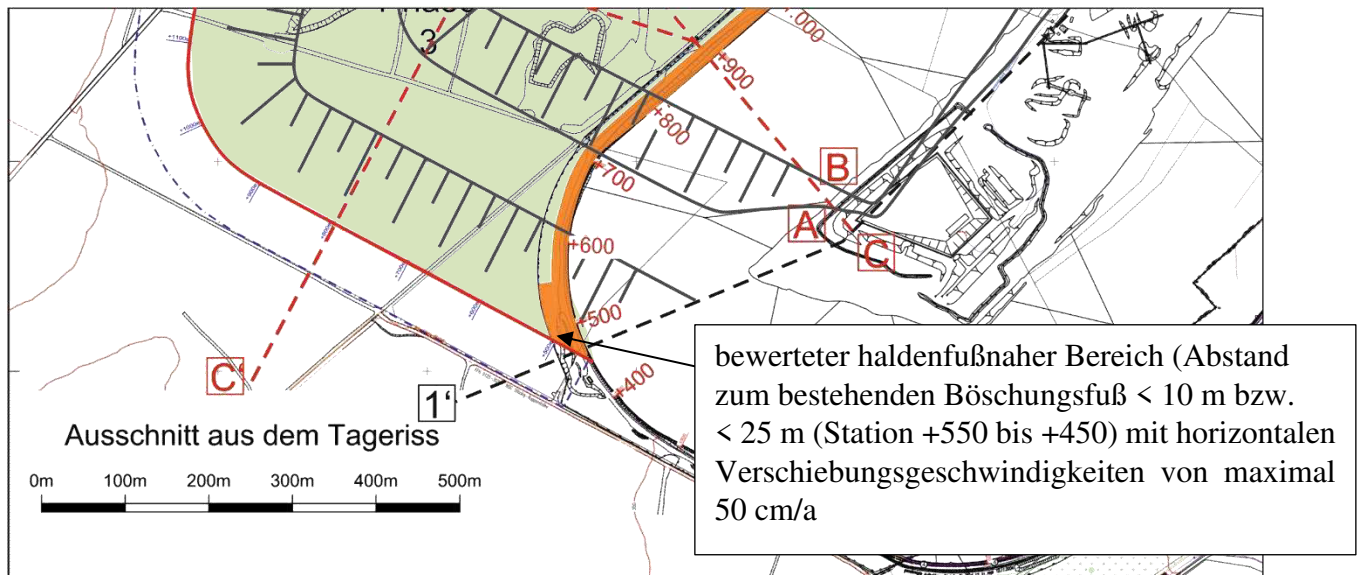


Bild 11: Detail Haldenerweiterung Phase 3 mit dem Anschüttungsbereich an die Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde Hattorf

4.1 Grundlagen

4.1.1 Topographie

Für die Fragestellung der Gebrauchstauglichkeit des Systems Basisabdichtung sowie von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Gesamtsystems, bestehend aus bestehender Rückstandshalde und geplanter Haldenerweiterung, bei größeren Verschiebungen/Verschiebungsgeschwindigkeiten wurde der Schnitt 1-1' (Bild 11) um die untere Schüttscheibe der geplanten Haldenerweiterung verlängert, sodass nun das System Basisabdichtung, bestehend aus Witterungsschutzschicht, Flächenfilter und Basisabdichtung sowie die geplante Haldenerweiterung Phase 3 mit einer 100 m breiten Berme und einer Bermenhöhe von 100 m im Haldenvorland der Bestandshalde durch einen Schüttblock (Bild 12) abgebildet wird. Der verwendete Schnitt 1-1' _{2021b} und die zugehörige Schütthistorie sind in Bild 12 dargestellt.

Die Haldenaufstandsfläche im Schnitt 1-1' _{2021b} hat im Südwesten eine Höhenlage von bis zu rd. 350 mNHN und im Nordosten eine Höhenlage von rd. 315 mNHN. 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' ₂₀₂₁ wird dies in Form des o.g. Schüttblocks berücksichtigt.

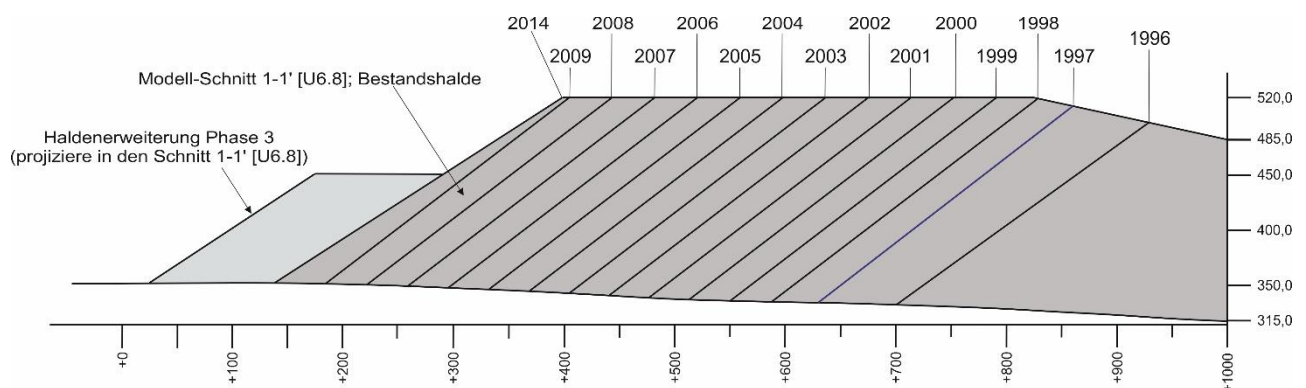


Bild 12: Schnitt 1-1' _{2021b} mit Schütthistorie und Schüttblock für die Betrachtung der Haldenerweiterung der Phase 3

4.1.2 Baugrundverhältnisse

Für die ergänzenden numerischen Untersuchungen zur Anschüttung der Haldenerweiterung der Phase 3 an die Südwestflanke der 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 des Buntsandsteins im Bereich des Schnittes 1-1' _{2021b} wie folgt gegliedert ist:

- Oberboden
- Auffüllungen (bereichsweise)
- Hanglehm/Decklehm/Lößlehm
- Hangschutt
- Verwitterungszone Buntsandstein, inkl. von 2 Schwächezonen mit Restscherfestigkeit $\delta_{S,Rest} = 12,5^\circ$ in 6 m und in 12 m Tiefe unter GOF

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

Der Schnitt 1-1' _{2021b} dient mit den auf den Gesamtschnittverlauf bezogenen, infolge der o.g. Schwächezonen ungünstigen Baugrundverhältnissen dazu, die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Schnittes 1-1' _{2021b} (Endzustand Haldenerweiterung Phase 3) im Bereich der Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde Hattorf mit lokal größeren horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten im Untergrund am Haldenfuß ausreichend konservativ zu untersuchen.

4.2 Numerische Modellbildung

Das für die numerischen Untersuchungen verwendete numerische Modell des Schnittes 1-1' _{2021b} ist für den Endzustand der bestehenden Rückstandshalde in Bild 13 dargestellt. Die Schüttabfolge zeigt Bild 12. Ergänzend wurde das im Schnitt 1-1' [U6.8] nicht enthaltene System Basisabdichtung mit Flächenfilter, Witterungsschutzschicht und Basisabdichtung hier mit modelliert.

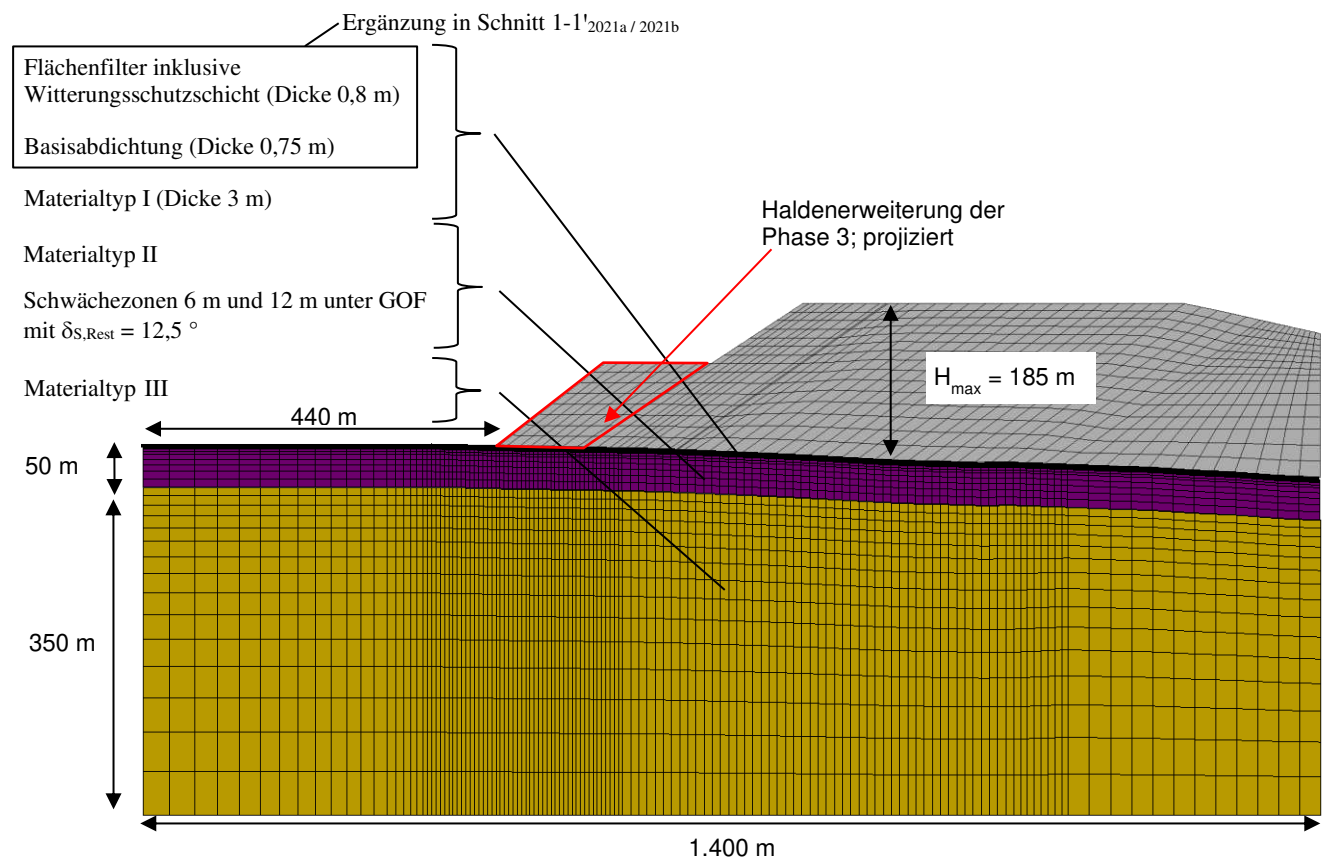
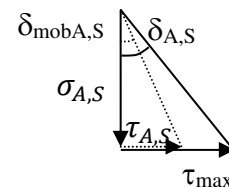


Bild 13: Numerisches Modell zur Untersuchung der Anschüttung Phase 3 an die bestehende Rückstandshalde im Schnitt 1-1' _{2021b}

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 δ_A durch das Reibungsgesetz von *Coulomb* definiert. Die Schwächezonen wurden nach dem gleichen Prinzip über einen Reibungswinkel δ_S modelliert. In den Kontaktflächen sind gemäß dem Reibungsgesetz von *Coulomb* die aufnehmbaren Schubspannungen τ_{\max} proportional zu den Normalspannungen σ .

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

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



mit: $\delta_{mob\ A,S}$ 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:

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

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

Der Reibungswinkel δ_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 bei kleinen Verschiebungen zunächst $\delta_S = 22,5^\circ$. Der Reibungswinkel in den Schwächezonen SZ1 und SZ2 in 6 m und 12 m Tiefe unter GOF fällt bei den hier auftretenden Verschiebungen auf die Restscherfestigkeit von $\delta_{S,Rest} = 12,5^\circ$ ab. Diese verschiebungsabhängige, sukzessive Abnahme der Scherfestigkeit haben wir in unseren numerischen Berechnungen berücksichtigt. In den Kontaktflächen wurde keine Kohäsion angesetzt. Details zur schrittweisen Abminderung des Reibungswinkels in den Schwächezonen sowie eine Beschreibung der detektierten Verschiebungsmechanismen/-ursachen im Schnitt 1-1' sind in [U6.8] enthalten. Sie werden in der nachfolgenden Modellierung so umgesetzt.

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 Übergangsfließfläche F_t und elliptischer Kappe F_c . Bild 14 zeigt das modifizierte Drucker-Prager-Modell in der Meridianebene.

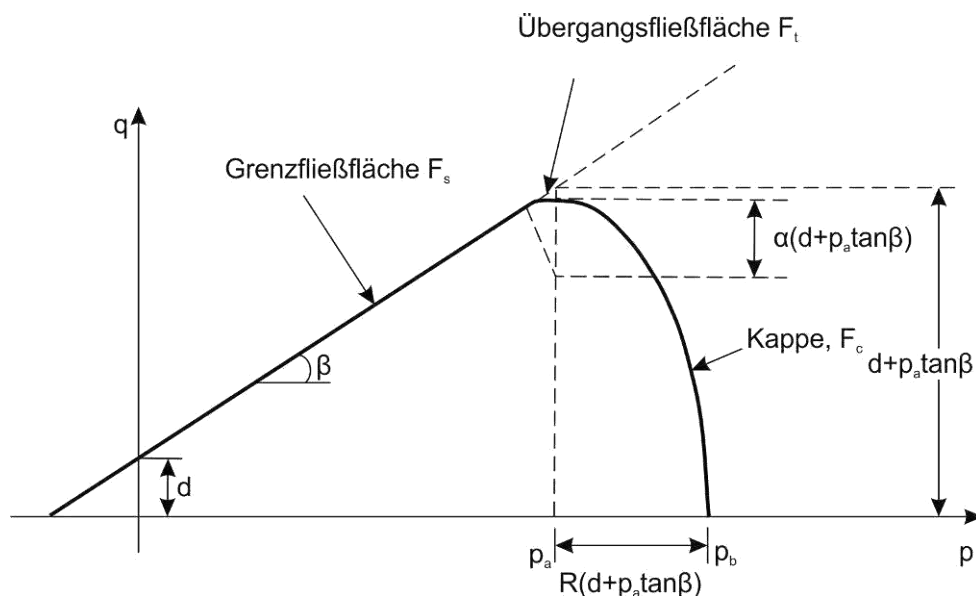


Bild 14: Modifiziertes Drucker-Prager-Modell

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 ϕ' 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 ρ [kg/dm ³]	1,95	1,95	2,1
Reibungswinkel ϕ' [°]	32	28	35
Kohäsion c' [kN/m ²]	16	30	100
Elastizitätsmodul E [MN/m ²]	20	200	500
Querdehnzahl ν [-]	0,3	0,3	0,3
Kappenexzentrizität R [-]	0,02	0,02	0,02
Radius Übergangsbereich α [-]	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

4.3.2 Bodenmechanische Parameter in der Aufstandsfläche

Anders als im FE-Modell des ursprünglichen Schnittes 1-1' aus dem Jahr 2017 [U6.8] wird im FE-Modell des Schnittes 1-1'_{2021b} das System Basisabdichtung, bestehend aus Witterungsschutzschicht, Flächenfilter und Basisabdichtung, im Bereich der Haldenerweiterung implementiert.

Die Aufstandsfläche wird vor der Beschüttung durch die Haldenerweiterung Phase 3 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.

	Basisabdichtung	Flächenfilter
Schichtdicke [m]	0,75	0,80
Dichte ρ [kg/dm ³]	1,95	1,95
Reibungswinkel ϕ' [°]	30	37,5
Kohäsion c' [kN/m ²]	0	0
Elastizitätsmodul E [MN/m ²]	25	100
Querdehnzahl ν [-]	0,3	0,3
Kappenexzentrizität R [-]	0,02	0,02
Radius Übergangsbereich α [-]	0,001	0,001
Fließflächenformfaktor K [-]	0,78	0,78

Tabelle 3: Bodenmechanische Parameter der Basisabdichtung und des Flächenfilters in den Schnitten 1-1'_{2021b}

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 $\delta_A = 30^\circ$. Es 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)).

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

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 ν bestimmt. Der instantan und damit zeitinvariante, plastische Verformungsanteil wird mit Hilfe des Kappenmodells im Materialgesetz abgebildet (Bild 13).

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.

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

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

Die viskoplastische Volumenänderungsrate wird mit Gleichung (4) beschrieben.

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

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 Verschiebungsraten führen zum Sprödbbruch. Demgegenüber führen geringe, unterkritische Verschiebungsraten 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 Verschiebungsraten bricht die Berechnung mit einer entsprechenden Fehlermeldung ab.

	Formelzeichen	Zahlenwert	Einheit
Dichte	ρ	1,9	[kg/dm ³]
Elastizitätsmodul	E	1.500.000	[kN/m ²]
Querdehnzahl	ν	0,25	[-]
Beiwerte der Konusfließfunktion	α	4.600	[kN/m ²]
	λ	3.611,83	[kN/m ²]
	$\beta^{*)}$	$-2 \cdot 10^{-5}$	[m ² /kN]
	$\theta^{*)}$	-0,61	[-]
Halbmesserverhältnis	$R^{*)}$	-0,35	[-]
Anfangkonuskappenschnittpunkt	$\kappa_0^{*)}$	-5	[kN/m ²]
Max. Porenanteil	$n_{\max}^{*)}$	-0,3	[-]
Beiwerte der Kappenfließfunktion	$d^{*)}$	-0,0006	[m ² /kN]
	$w^{*)}$	-0,01	[-]
Regressionsparameter der stationären Verformungsrate	B_1	150	[m ² /kNs]
	B_2	1	[m ² /kNs]
	B_3	$1 \cdot 10^{-5}$	[m ² /kN]
	B_4	1	[-]
	$E_8^{*)}$	-0,0001	[m ² /kN]

Fortsetzung Tabelle 4 siehe Seite 38

Fortsetzung:

	Formelzeichen	Zahlenwert	Einheit
Regressionsparameter der transienten Verformungsrate	C_1	1.728.000	[s]
	$D_1^{*)}$	-0,015	[-]
Regressionsparameter der viskoplastischen Volumenänderungsrate	E_5	1	[-]
	$E_6^{*)}$	-1,36	[-]
	$E_7^{*)}$	-5.000	[1/s]
	$E_8^{*)}$	-0,0001	[m ² /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' _{2021b} 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' _{2021a} ohne geplante Haldenerweiterung durchgeführt.

Die Ergebnisse der Verifizierung sind in [U6.45] dokumentiert. Die Berechnungsergebnisse im Schnitt 1-1' _{2021a} ohne Schüttung der Haldenerweiterung der Phase 2 ergeben eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Kalibrierungsberechnung gemäß [U6.8].

4.5 Nachweis- und Sicherheitskonzept

Im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/02 wird im Schnitt 1-1' _{2021b} die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit für die besondere Situation der Anschüttung an die Südwestflanke der Bestandshalde im Rahmen der Haldenerweiterung Phase 3 untersucht.

Die Nachweise werden auf Basis der DIN EN 1997-1, der DIN EN 1997-1 N/A sowie der DIN 1054 geführt. Dazu wird der Nachweis der Standsicherheit mit abgeminderten Scherparametern geführt. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfolgt mit charakteristischen, d.h. mit nicht abgeminderten Scherparametern. Diese Vorgehensweise wurde bereits bei früheren Untersuchungen 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 0,5 Jahren, 50 Jahre Nachbetriebsphase) angesetzt. Der Untersuchungszeitraum beginnt mit der Beschüttung der Bestandshalde im Flankenschüttverfahren (FSV) und endet 50 Jahre nach Schüttende. Der Beginn der Beschüttung der Haldenerweiterung der Phase 3 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 (vgl. [U6.45]).

Für die numerische Nachweisführung im Schnitt 1-1'_{2021b} wird das gleiche Nachweis und Sicherheitskonzept angewandt, wie es in Kapitel 3.4 beschrieben ist und für alle anderen Berechnungen bereits angewendete wurde.

4.6 Numerische Untersuchungen zur Standsicherheit im Anschüttungsbereich der Phase 3 an die Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde

Zur numerischen Untersuchung der Standsicherheit wurden für die Berechnungen im Schnitt 1-1'_{2021b} der geplanten Haldenerweiterung die in den Kapiteln 4 aufgeführten Materialkennwerte gemäß Kapitel 3.4 mit dem Teilsicherheitsbeiwert von $\gamma = 1,25$ gemäß den aktuell gültigen technischen Regelwerken abgemindert. Der Untersuchungszeitraum vom Beginn der Beschüttung der Erweiterungsfläche bis ca. 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 Untersuchungszeitraumes durchgelaufen, d.h. sind konvergiert. Außerdem gilt für alle Berechnungen, dass die Verschiebungsgeschwindigkeiten einen degressiven Verlauf nehmen und am Ende des Untersuchungszeitraumes einen konstanten Wert annehmen. Damit befindet sich das jeweils untersuchte System zu jedem Zeitpunkt im Gleichgewicht und ist somit standsicher im Sinne des oben beschriebenen Nachweiskonzeptes [U7].

In Bild 15 ist der Verlauf der normierten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten am Haldenfuß dargestellt. Die Bezugsgröße ist dabei die maximale horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit des Schnittes 1-1 '2021b. Alle horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten $v_{h,i}$ aus der Berechnung im Schnitt 1-1 '2021b werden mit der o.g. maximalen horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeit $v_{h,max}$ ins Verhältnis gesetzt (normiert). Maßgebend für die Bewertung der Verschiebungsgeschwindigkeit im Zusammenhang mit der Beurteilung der Standsicherheit ist der qualitative (degressive) Verlauf der Kurven der Verschiebungsgeschwindigkeiten über die Zeit.

Die Auswertung erfolgte am Haldenfußpunkt als Ort der maximalen Verschiebungsgeschwindigkeit. Die maximalen Verschiebungsraten treten unmittelbar nach Erreichen der beantragten Aufhaldungsgrenze auf.

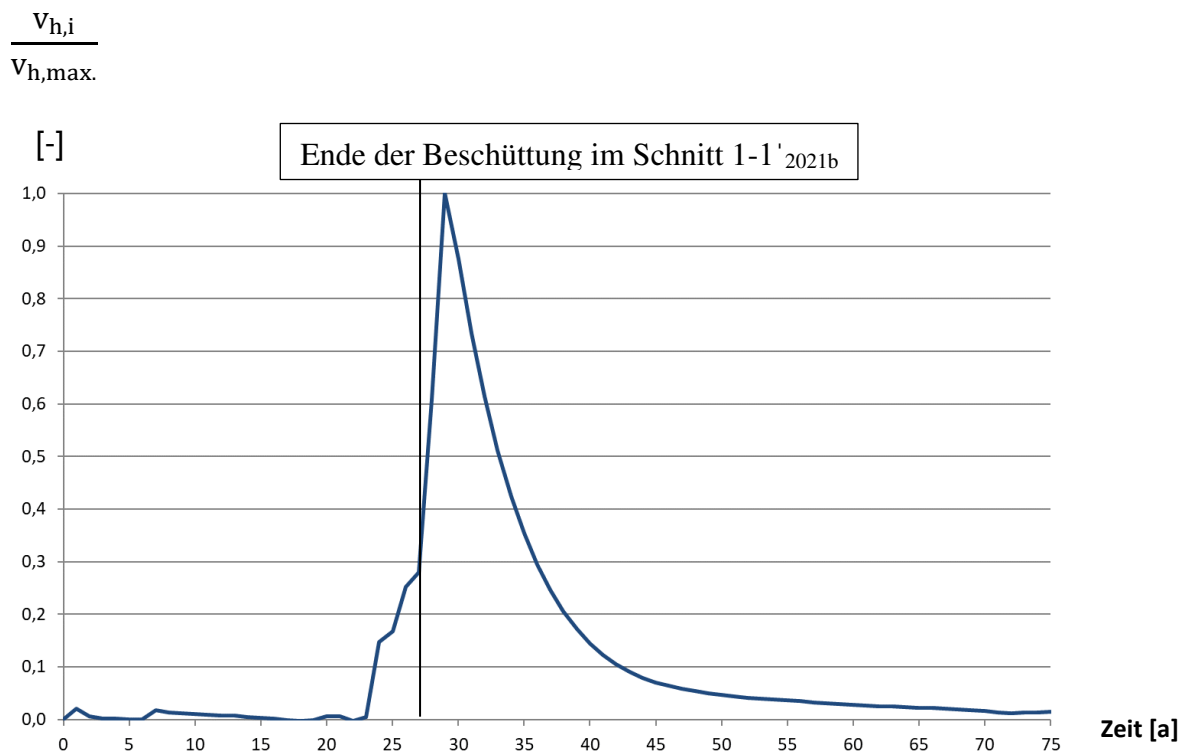


Bild 15: Normierte horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten

Mit den numerischen Berechnungen des Gesamtsystems, bestehend aus Halde, Flächenfilter, Basisabdichtung und Baugrund, wird die Standsicherheit nachgewiesen.

4.7 Numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit im Anschüttungsbereich der Phase 3 an die Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde

Zur numerischen Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit im Schnitt 1-1' ^{2021b} 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 3 wurde, auf der sicheren Seite liegend, bei einer horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeit im Haldenvorland der Bestandshalde, d.h. 5 m vor dem bestehenden Böschungsfuß, von rd. 1,0 m/a angesetzt (Bild 16). Dies entspricht im numerischen Modell fiktiv einem Beginn der Haldenerweiterung der Phase 3 zu Beginn des Jahres 2021. Geplant ist der Beginn der Beschüttung Phase 3 ab Ende 2024. Aufgrund der im Vergleich zur Berechnung aktuell gemessenen, geringeren Verschiebungsgeschwindigkeiten sind die berechneten Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten größer als tatsächlich zu erwarten. Die Modellierung ist daher konservativ und liegt auf der sicheren Seite.

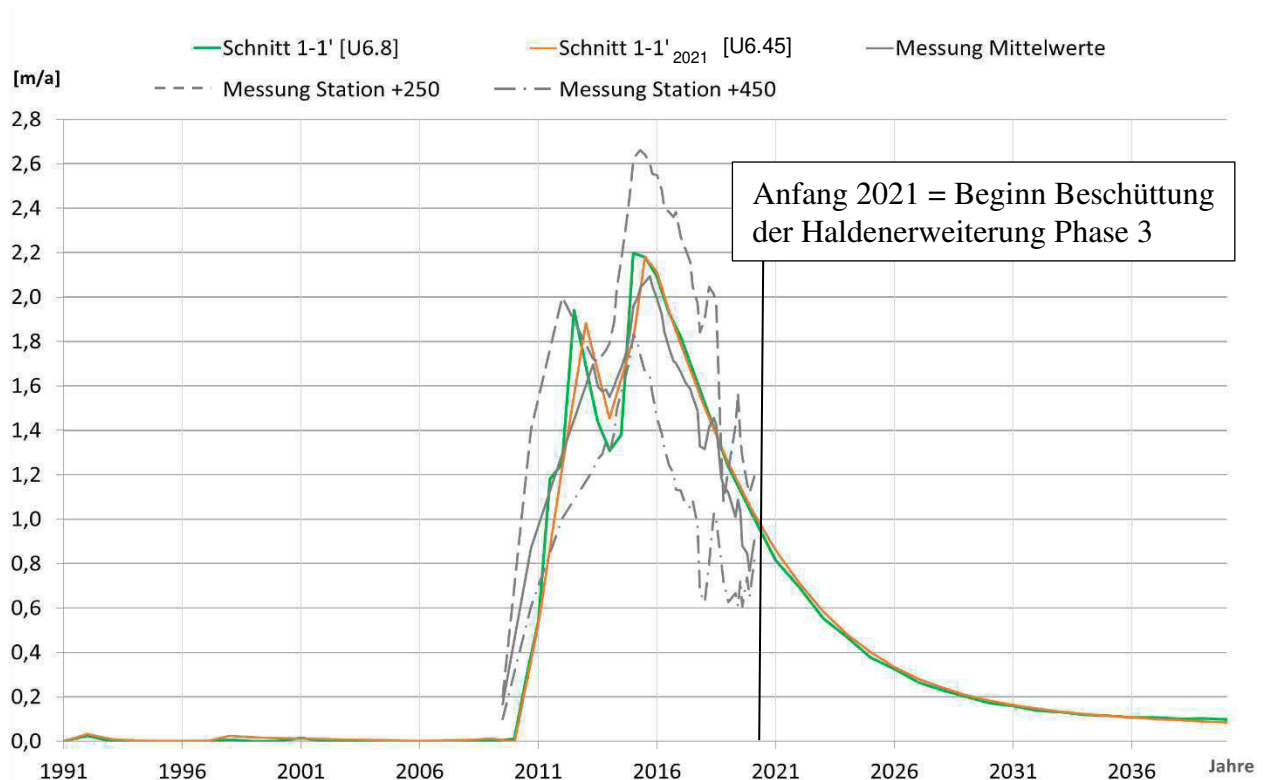


Bild 16: Ergebnis der Ursachenforschung im Schnitt 1-1' gemäß [U6.8] und [U6.45] mit Beginn der Beschüttung der geplanten Erweiterung Phase 3 im Schnitt 1-1' ²⁰²¹

Im Rahmen der numerischen Berechnungen zur Gebrauchstauglichkeit wurden auf Basis der gewählten konservativen Ansätze und Randbedingungen horizontale Dehnungen am Ende des Betrachtungszeitraums für den Schnitt 1-1'_{2021b} ausgewiesen.

In Bild 17 sind die Bereiche horizontaler Dehnungen (positiv) und Stauchungen (negativ) in der Basisabdichtung unterhalb der fiktiven Haldenerweiterung Phase 3 im Schnitt 1-1' _{2021b} am Ende des Untersuchungszeitraums als Bandbreite dargestellt. Sie betragen zwischen 3,5 % Stauchung und 7 % Stauchung.

Bei der Auswertung der Dehnungen bzw. Stauchungen wird das System Basisabdichtung vor Beschüttung des ursprünglichen Haldenvorlands mit dem System Basisabdichtung am Ende des Berechnungszeitraums (50 a Nachbetrachtungsphase) verglichen. Mögliche Beeinflussungen des Systems Basisabdichtung im Bereich der geplanten Haldenerweiterung durch die Bestandshalde vor Beschüttung der Haldenerweiterung werden somit detektiert und entsprechend herausgerechnet. Die dokumentierten Stauchungen bzw. Dehnungen bilden somit den Zeitraum vor Beschüttung der Haldenerweiterung mit Beginn der Flächenvorbereitung bis zum Ende des Berechnungszeitraums (50 a Nachbetriebsphase) ab.

Die Stauchungen bzw. Dehnungen ergeben sich sowohl aus der Längenänderung der Elementlage als auch aus der Höhenänderung der Elementlage. Es wird somit die Volumendehnung bzw. -stauchung der Basisabdichtung ausgewertet.

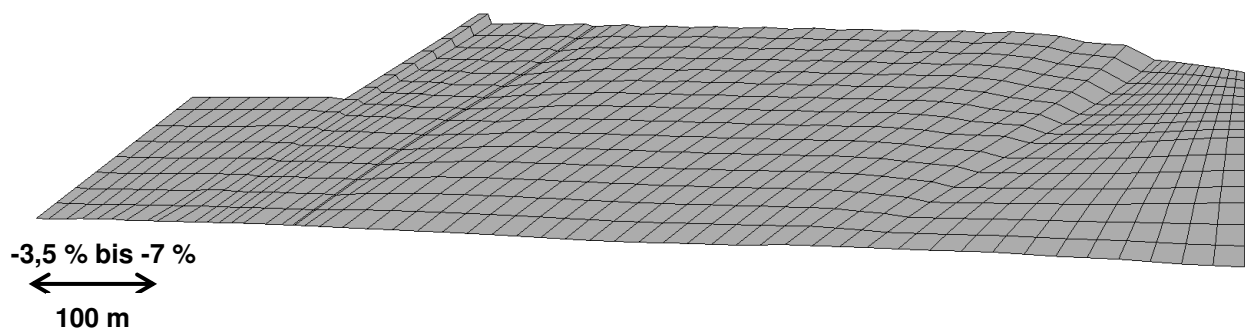


Bild 17: Volumendehnungen und -stauchungen der Basisabdichtung unterhalb der Haldenerweiterung im Schnitt 1-1' _{2021b}, Endzustand 50 Jahre nach Schüttende

Bild 18 zeigt die Stauchungs-/Dehnungsverteilung für den Schnitt 1-1' _{2021b} inkl. Haldenerweiterung der Phase 3.

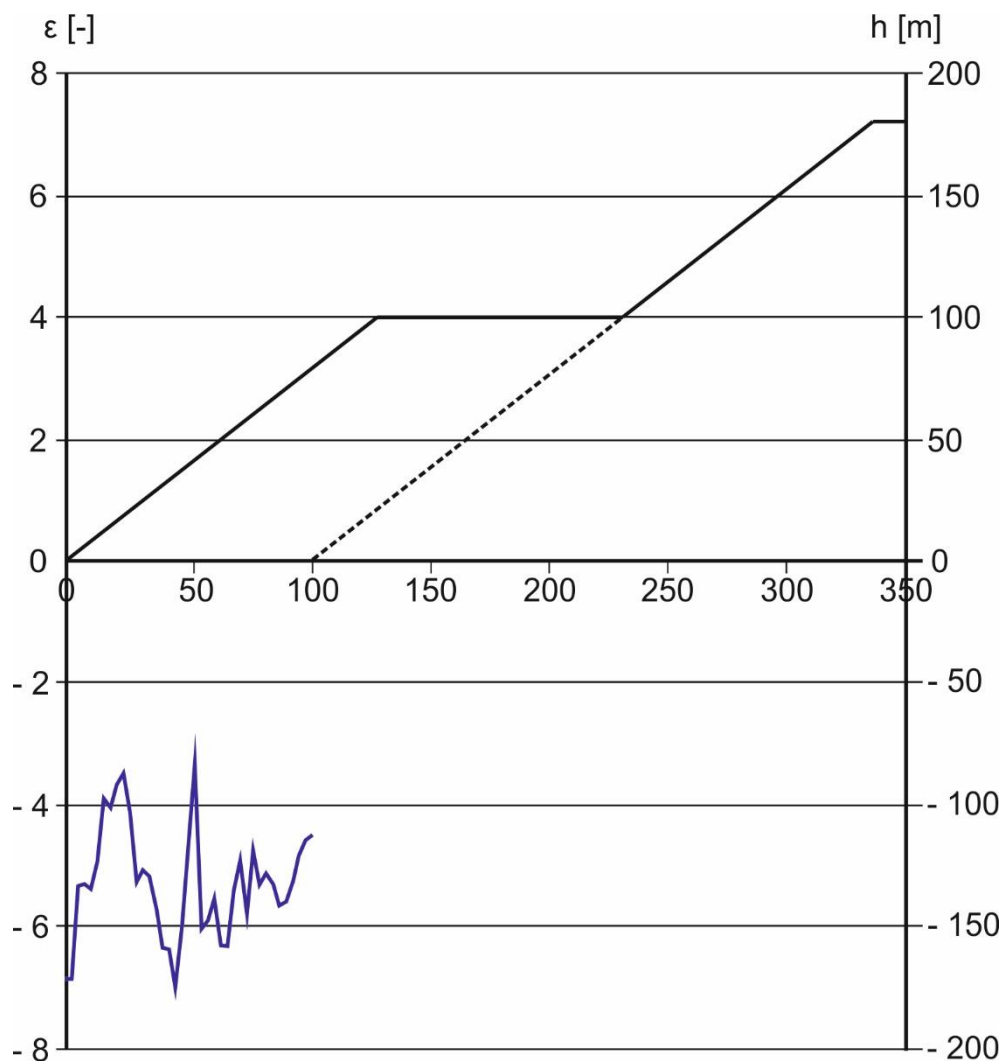


Bild 18: Dehnungsverteilung unterhalb der Haldenerweiterung der Phase 3 im Schnitt 1-1' 2021b, Endzustand 50 Jahre nach Schüttende

Maßgebend für die Haldenerweiterung Phase 3 und das angrenzende Naturschutz/Fauna-Flora-Habitatgebiet (NSG-/FFH-Gebiet) ist neben dem das lokale, haldennahe Vorland im Zwickelbereich der Südwestflanke betrachtende Schnitt 1-1' 2021b der Untersuchungsschnitt C-C' 2018. Beide Schnitte werden hinsichtlich der horizontalen und vertikalen Verschiebungen ausgewertet.

Für den Schnitt C-C' 2018 wurden die horizontalen und vertikalen Verschiebungen in einem Abstand zum endgültigen Haldenfuß der Phase 3 von 15 m, 25 m und 65 m ausgewertet (Tabelle 5). Orientierend an den für den Schnitt C-C' 2018 ausgewiesenen Abständen sind die berechneten

Verschiebungen aus dem Berechnungsschnitt 1-1' _{2021b} in der Tabelle 5 ergänzt. Die Berechnungsergebnisse zeigen grundsätzlich, dass die Verschiebungen am Haldenfuß am größten sind und mit zunehmendem Abstand zum Haldenfuß abnehmen. Die Auswertung erfolgte am Ende des Betrachtungszeitraums mit einer Nachbetrachtungsphase von 50 Jahren. Horizontale Verschiebungen weg vom Haldenfuß sind positiv. Hebungen haben in der Tabelle positives und Setzungen negatives Vorzeichen.

	horizontale Verschiebung U1 [m]			vertikale Verschiebung U3 [m]		
	Abstand zum Haldenfuß			Abstand zum Haldenfuß		
	15 m	25 m	65 m	15 m	25 m	65 m
Schnitt C-C' ₂₀₁₈	0,4	0,3	0,2	- 0,35	- 0,5	- 0,35
Schnitt 1-1' _{2021b}	4,9	2,0	0,2	2,1	0,5	- 0,35

Tabelle 5: Berechnete horizontale und vertikale Verschiebungen im Haldenvorland am Ende des Betrachtungszeitraums von rd. 70 Jahren

Die berechneten Verschiebungen im Schnitt 1-1' _{2021b} zeigen, dass die größten Verschiebungen am Haldenfuß auftreten, die deutlich über denen im Schnitt C-C' ₂₀₁₈ liegen. Haldenfern, an der Vorhabensgrenze, weisen beide Berechnungsschnitte vergleichbare Horizontal- und Vertikalverschiebungen auf.

Der Vergleich der horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten im Schnitt C-C' ₂₀₁₈ und Schnitt 1-1' _{2021b} ergibt:

- Die horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten im Schnitt C-C' ₂₀₁₈ betragen maximal 3 cm/a (65m vor dem Böschungsfuß) bis 5 cm/a (15 m vor dem Böschungsfuß) und treten im ersten Jahr nach Schüttung des Böschungsfußes der Haldenerweiterung auf. Am Ende der Nachbetrachtungsphase betragen die horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten im Schnitt C-C' ₂₀₁₈ < 1cm/a.
- Die horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten im Schnitt 1-1' _{2021b} betragen maximal 3 cm/a (65m vor dem Böschungsfuß) bis 50 cm/a (15 m vor dem Böschungsfuß) und treten im ersten Jahr nach Schüttung des Böschungsfußes der Haldenerweiterung auf. Am Ende der Nachbetrachtungsphase betragen die horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten im Schnitt 1-1' _{2021b} rd. 1cm/a.

5 Vorgaben zur Bemessung des Systems Basisabdichtung Haldenerweiterung Phase 3

5.1 Charakteristische Setzungs- und Dehnungsverteilungen

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

Auf der Basis der vorgenannten Untersuchungen (Kap. 4) werden für den Schnitt 1-1'_{2021b} die prognostizierten Dehnungsverteilungen in der Aufstandsfläche der geplanten Haldenerweiterung im Anschüttungsbereich an die bestehende Rückstandshalde ausgewertet. Die Dehnungen im Schnitt 1-1'_{2021b} wurden, analog zu unseren Auswertungen in [U6.6] und [U6.15] für den Endzustand (50 Jahre Nachbetriebsphase) ausgewertet.

In [U6.45] wurden für den haldennahen Bereich mit einem Abstand ≤ 10 m (orange Fläche gemäß Bild 9) zum Böschungsfuß der Bestandshalde ergänzende numerische Untersuchungen zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit der Basisabdichtungen im Schnitt 1-1'_{2021a} geführt. Hier wurden ebenfalls die Dehnungen analog zu unseren Auswertungen in [U6.6] und [U6.15], für den Endzustand ausgewertet.

Sowohl die Ergebnisse in [U6.45] als auch die Ergebnisse der Schnitte A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ in [U6.15] werden in den nachfolgenden Bewertungen/Vorgaben berücksichtigt.

Die Dehnungsverteilung im Schnitt 1-1'_{2021b} für die Haldenerweiterung Phase 3 ist in den Bildern 17 und 18 dargestellt. Dehnungen sind mit positivem Vorzeichen, Stauchungen mit negativem Vorzeichen dargestellt. Die Dehnungen und Stauchungen sind dimensionslos. Im fiktiven Untersuchungsschnitt 1-1'_{2021b} mit der Haldenerweiterung Phase 3 ergeben sich unterhalb der Haldenerweiterung (Schüttblock mit 100 m Höhe über GOF) Stauchungen zwischen 3,5 % und 7 %. Es treten keine Dehnungen unterhalb der Haldenerweiterung auf.

Die Dehnungen für eine minimale Anschüttung von 25 m x 25 m an der bestehenden Halde Hattorf im Schnitt 1-1'_{2021a} sind in [U6.45] dokumentiert. 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'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ sind in [U6.15] dokumentiert. Die maximalen Dehnungen betragen 5 % (Schnitt C-C'₂₀₁₈) 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'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ [U6.15]. Die Setzungen im Schnitt 1-1'_{2021b} sind aufgrund der untersuchten geringen Schütthöhe von 100 m und einer geringen Breite der Anschüttung von rd. 100 m in der Aufstandsfläche nicht maßgebend. Die generalisierte Setzungsmulde für die Erweiterungsfläche der Rückstandshalde Hattorf gemäß [U6.15], die der Bemessung der Entwässerungselemente 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 rd. 50 % unsere umfangreichen numerischen Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit in [U6.6], [U6.15] und [U6.45] sowie im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten weiterhin Gültigkeit haben, da eine Reduktion der Schichtdicken zu günstigeren, d.h. kleineren Verschiebungen führt.

5.2 Einfluss der Haldenerweiterung Phase 3 auf das Haldenvorland der Bestandshalde im Bereich der Südwestflanke

Anhand des umfangreichen Verformungsmonitoring [U1], [U2] im Bereich der Bestandshalde und der Haldenerweiterung lassen sich aktuell keinerlei Einflüsse der Haldenerweiterung, d.h. für die Beschüttung der unteren Schüttscheibe Phase 1, auf das Haldenvorland der bestehenden Rückstandshalde ableiten. Im Zwickelbereich zwischen Haldenerweiterung Phase 1 und Bestandshalde (Station +1.100 bis +1.000) wurden während der Beschüttung der unteren Schüttscheibe keine größeren Verschiebungen oder Verschiebungsgeschwindigkeiten gemessen. Dies gilt auch für den haldenfußnahen Bereich mit einem Abstand zum Haldenfuß von < 10 m. Die horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten in diesem Bereich betragen aktuell maximal 36 cm/a und zeigen einen konstanten bis leicht abnehmenden Verlauf.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse lassen sich erste Abschätzungen zum Einfluss der Haldenerweiterung Phase 3 auf das Haldenvorland der Bestandshalde im Bereich der Südwestflanke ableiten.

Die mit der Haldenerweiterung Phase 3 geplante Anschüttung an die Südwestflanke (Station +450) umfasst die untere Schüttscheibe der Haldenerweiterung mit einer Höhe von 100 m. Zudem läuft die geplante Haldenerweiterung Phase 3 im Bereich der Südwestflanke spitzwinklig aus, sodass sich im maßgeblichen Schnitt eine flachere und somit günstigere Böschungsneigung einstellt. Der Lasteintrag ist somit geringer als aktuell im Bereich der Station +1.100 bis +1.000 (Anbindungsbereich Phase 2).

Das unter Kapitel 5.3 beschriebene Monitoring ist zu berücksichtigen.

5.3 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 3 übertragbar.

Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen für die Haldenerweiterung in [U6.6] und [U6.15] werden im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten bestätigt und haben weiterhin Gültigkeit. Die im Monitoringkonzept für die Haldenerweiterung Hattorf angesetzten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten 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 den Sachverständigen für Geotechnik eine Bewertung der Situation vorzunehmen. Ggf. sind aus dieser Bewertung dann weitere Maßnahmen abzuleiten.

5.4 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 3 zu überprüfen. Dies soll abschnittsweise im Zuge der Flächenvorbereitung erfolgen. K+S lässt überprüfen, ob die den Nachweisen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit in [U6.6], [U6.15] und im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/02 zugrunde liegenden geometrischen und stofflichen Randbedingungen den Verhältnissen im Bereich der Haldenerweiterungsfläche der Phase 3 im Wesentlichen entsprechen. Im Bedarfsfall sind für einzelne Teilbereiche der Erweiterungsfläche zusätzliche Untersuchungen durchzuführen.

6 Schlussbemerkung / Zusammenfassung

Mit der geplanten Haldenerweiterung Phase 3 der Halde Hattorf soll ab Ende 2024 die Haldenerweiterung Phase 1 und Phase 2 bis zur Vorhabensgrenze vergrößert werden. Die Planung sieht eine Haldenerweiterung an der Westflanke der bestehenden Rückstandshalde bis Station +450 vor. Die Haldenerweiterung umfasst im Rahmen der Phase 3 die untere und obere Schüttscheibe mit einer Höhe von insgesamt max. 180 m über GOF und einer Berme mit einer Breite von 100 m und einer Höhe von rd. 100 m über GOF.

Im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/02 wurden für die geplante Haldenerweiterung der Phase 3 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 90 % der Haldenerweiterungsfläche der Phase 3, d.h. für den Bereich mit einem Abstand vom ≥ 10 m / ≥ 25 m zum bestehenden Haldenfuß der Bestandshalde Hattorf, bestätigt [U6.45]. Die Untersuchungen in [U6.6] und [U6.15] sind, mit Ausnahme eines ca. 10 m bzw. 25 m breiten Streifen im Bereich des bestehenden Böschungsfußes, ausreichend konservativ und haben weiterhin Gültigkeit für die geplante Haldenerweiterung Phase 3.

Auf Basis der in [U6.6] und [U6.15] dokumentierten Randbedingungen wird mit den numerischen Untersuchungen gezeigt, dass die geplante Haldenerweiterung der Phase 3 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 3 an die Bestandshalde, d.h. im Bereich mit einem Abstand von < 10 m bzw. von < 25 m im Bereich der Südwestflanke (Station +550 bis +450) zum bestehenden Böschungsfuß der Bestandshalde Hattorf (orange gekennzeichnete Bereich in Bild 8), erfolgten ergänzende numerische Untersuchungen in [U6.45]. Die numerischen Untersuchungen sind ausreichend konservativ und zeigen, dass die

Gebrauchstauglichkeit, insbesondere des Systems Basisabdichtung, für den Bereich mit einem Abstand < 10 m bzw. < 25 m zum bestehenden Böschungsfuß der Bestandshalde nachgewiesen ist.

Als Grundlage für die im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK2035/02 dokumentierten Bewertungen der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit im Anschüttungsbereich der Phase 3 an die Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde wurde der Schnitt 1-1'_{2021b} auf Basis des Schnittes 1-1' gemäß [U6.8] modelliert.

Für den Schnitt 1-1'_{2021b} wurde ein Schüttblock mit einer maximalen Haldenhöhe von 100 m, dies entspricht der unteren Schüttscheibe, berücksichtigt. Hierbei wurden im numerischen Modell die geplante Haldenerweiterung im Haldenvorland abgebildet bzw. projiziert sowie gleichzeitig die sehr ungünstigen, durch die in 6 m und 12 m Tiefe unter der Geländeoberfläche liegenden Schwächezonen lokal geprägten Baugrundverhältnisse [U6.7] im Bereich der Südwestflanke im gesamten Haldenvorland angesetzt.

Als Startbedingung für die ergänzenden numerischen Untersuchungen für die Phase 3 im Anschüttungsbereich an die Südwestflanke 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 sowie der rd. 50 Jahre dauernden Nachbetrachtungsphase zusammen. Damit wird ein ausreichend langer Zeitraum für die Nachbetriebsphase zur Beurteilung des Verformungsverhaltens untersucht.

Mit den ergänzenden numerischen Berechnungen im Schnitt 1-1'_{2021b} wurde sowohl die Gebrauchstauglichkeit als auch die Standsicherheit für eine Anschüttung der unteren Schüttscheibe Phase 3 an die bestehenden Rückstandshalde nachgewiesen. Hierbei wurde, wie bereits beschrieben, eine auf der sicheren Seite liegende Ausgangssituation mit einer horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeit im Bereich des Haldenfußes von $\geq 1,0$ m/a gewählt. Die numerischen Untersuchungen im Schnitt 1-1'_{2021b} fokussieren sich auf den Bereich an der Südwestflanke, der eine Sondersituation an der Halde Hattorf abbildet, die nicht auf die übrige Haldenerweiterungsfläche übertragbar ist.

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 3 anzuwenden.

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

Projektbearbeitung: Eva Eden-Teutsch M.Sc.

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. Steffen Leppla

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


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


Verteiler:

- | | |
|-------------------------------------|--------------|
| - K+S Minerals and Agriculture GmbH | 5 x Original |
| - K+S Aktiengesellschaft | 1 x Kopie |
| - z.d.A. (IK2035, Se) | 2 x Kopie |