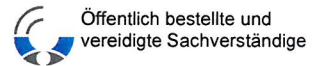


Anlage 3:

Ingenieursozietät Prof. Dr.-Ing. Katzenbach GmbH:
Sachverständigengutachten Nr. IK1754/01 K+S Kali
GmbH, Werk Werra, Standort Hattorf, Numerische
Untersuchungen zur Standsicherheit und
Gebrauchstauglichkeit der geplanten Haldenerweiterung
Hattorf. Darmstadt, 27.04.2018

INGENIEURSOZIENTÄT PROFESSOR DR.-ING. KATZENBACH GMBH

VEREIDIGTE UND NACH BAUORDNUNGSRECHT ANERKANNTE SACHVERSTÄNDIGE FÜR GEOTECHNIK



Öffentlich bestellte und
vereidigte Sachverständige

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

Sachverständigen-Gutachten
Beratung · Planung
Forschung · Entwicklung

Bodenmechanik · Felsmechanik
Baugrund-Tragwerk-Interaktion
Geothermie · Umweltgeotechnik

Gründungsberatung
Hochhausgründungen
Baugruben · Tunnelbau
Dammbau · Deichbau
Grundwassermanagement
Deponiebau · Altlasten
Fachbauüberwachung
Bauschadensanalysen

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

K/Vo/Se/Le/Na/Te
IK1754
27.04.2018

K+S KALI GmbH · Werk Werra · Standort Hattorf

hier: Sachverständigen-Gutachten Nr. IK17154/01 zu den numerischen Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der geplanten Haldenerweiterung

Sehr geehrte Damen und Herren,

in der Anlage erhalten Sie unser o.g. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1754/01 vom 27.04.2018 fünffach, das verabredungsgemäß einfach mit gleicher Post und per E-Mail an die K+S AG und die upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH geht.

Mit freundlichen Grüßen

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



Dipl.-Ing. Matthias Seip
-Geschäftsführender Gesellschafter-

Anlage

- D/:** - K+S AG, Herrn Dr.-Ing. Schleinig, Elisabeth-Consbruch-Straße 1, 34131 Kassel,
vorab per E-Mail: jan-peter.schleinig@k-plus-s.com
- upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH, Breite Straße 30, 39576 Stendal,
vorab per E-Mail: a.palm@upi-umweltprojekt.de und n.gose@upi-umweltprojekt.de

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

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

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

64625 Bensheim
Darmstädter Straße 170
Tel: +49 (0)6251 / 86052-16
Fax: +49 (0)6251 / 86052-15

01011 Kiew (Ukraine)
Panasa Mirnogo, 28A, office 157
Tel: +38 044 / 49592-65
Fax: +38 044 / 49592-64

INGENIEURSOZIENTÄT PROFESSOR DR.-ING. KATZENBACH GMBH

VEREIDIGTE UND NACH BAUORDNUNGSRECHT ANERKANNTE SACHVERSTÄNDIGE FÜR GEOTECHNIK



Öffentlich bestellte und
vereidigte Sachverständige

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

Sachverständigen-Gutachten
Beratung · Planung
Forschung · Entwicklung

Bodenmechanik · Felsmechanik
Baugrund-Tragwerk-Interaktion
Geothermie · Umweltgeotechnik

Gründungsberatung
Hochhausgründungen
Baugruben · Tunnelbau
Dammbau · Deichbau
Grundwassermanagement
Deponiebau · Altlasten
Fachbauüberwachung
Bauschadensanalysen

K/Vo/Se/Le/Na/Te
IK1754
27.04.2018

SACHVERSTÄNDIGEN-GUTACHTEN Nr. IK1754/01

Vorhaben: K+S KALI GmbH • Werk Werra • Standort Hattorf
Numerische Untersuchungen zur Standsicherheit und
Gebrauchstauglichkeit der geplanten Haldenerweiterung Hattorf

Auftraggeber: K+S KALI GmbH
Werk Werra • Standort Hattorf
36267 Philippsthal

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

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

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

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

64625 Bensheim
Darmstädter Straße 170
Tel: +49 (0)6251 / 86052-16
Fax: +49 (0)6251 / 86052-15

01011 Kiew (Ukraine)
Panasa Mirnogo, 28A, office 157
Tel: +38 044 / 49592-65
Fax: +38 044 / 49592-64

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Vorgang	3
2 Unterlagen	5
3 Geplante Erweiterung	6
3.1 Topographie	6
3.2 Baugrundverhältnisse	8
3.3 Abmessungen und Geometrie	9
4 Numerische Modellbildung	9
5 Materialkennwerte für die numerischen Untersuchungen	13
5.1 Baugrund	13
5.2 Bodenmechanische Parameter in der Aufstandsfläche	16
5.3 Salzmechanische Parameter des Rückstandssalzes	17
6 Kalibrierung des numerischen Modells	19
7 Nachweis- und Sicherheitskonzept	20
8 Numerische Untersuchungen zur Standsicherheit	21
9 Numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit	23
9.1 Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes A-A'2018	24
9.1.1 Vertikale Spannungen und Verschiebungen	24
9.1.2 Schubspannungen	26
9.1.3 Horizontale Spannungen, Verschiebungen und Dehnungen	27
9.2 Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes C-C'2018	30
9.2.1 Vertikale Spannungen und Verschiebungen	30
9.2.2 Schubspannungen	33
9.2.3 Horizontale Spannungen, Verschiebungen und Dehnungen	34
9.3 Vergleich der Berechnungsergebnisse	36
10 Vorgaben zur Bemessung des Systems Basisabdichtung sowie zum Monitoring im Rahmen der Beobachtungsmethode	37
10.1 Charakteristische Setzungs- und Dehnungsverteilungen	37
10.2 Monitoring im Rahmen der Beobachtungsmethode	42
10.3 Anschüttung an die bestehende Rückstandshalde	44
10.4 Überprüfung der Baugrundsituation der einzelnen Beschüttungsabschnitte	44
11 Schlussbemerkung / Zusammenfassung	44

1 Vorgang

Die K+S KALI GmbH, 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, die derzeitige Breite rd. 700 m. Die aktuelle Aufhaldungsmasse beträgt rd. 6,5 Mio. t/a. Die genehmigte Grenze der Beschüttungsfläche wird voraussichtlich 2018 erreicht. Zur Gewährleistung der weiteren Produktion am Standort Hattorf ist eine Erweiterung der Haldenkapazität notwendig. Hierzu soll die bestehende Haldenfläche über die nordwestliche Höhenlage bis zum sich daran anschließenden Ochsengraben erweitert werden (Bild 1).

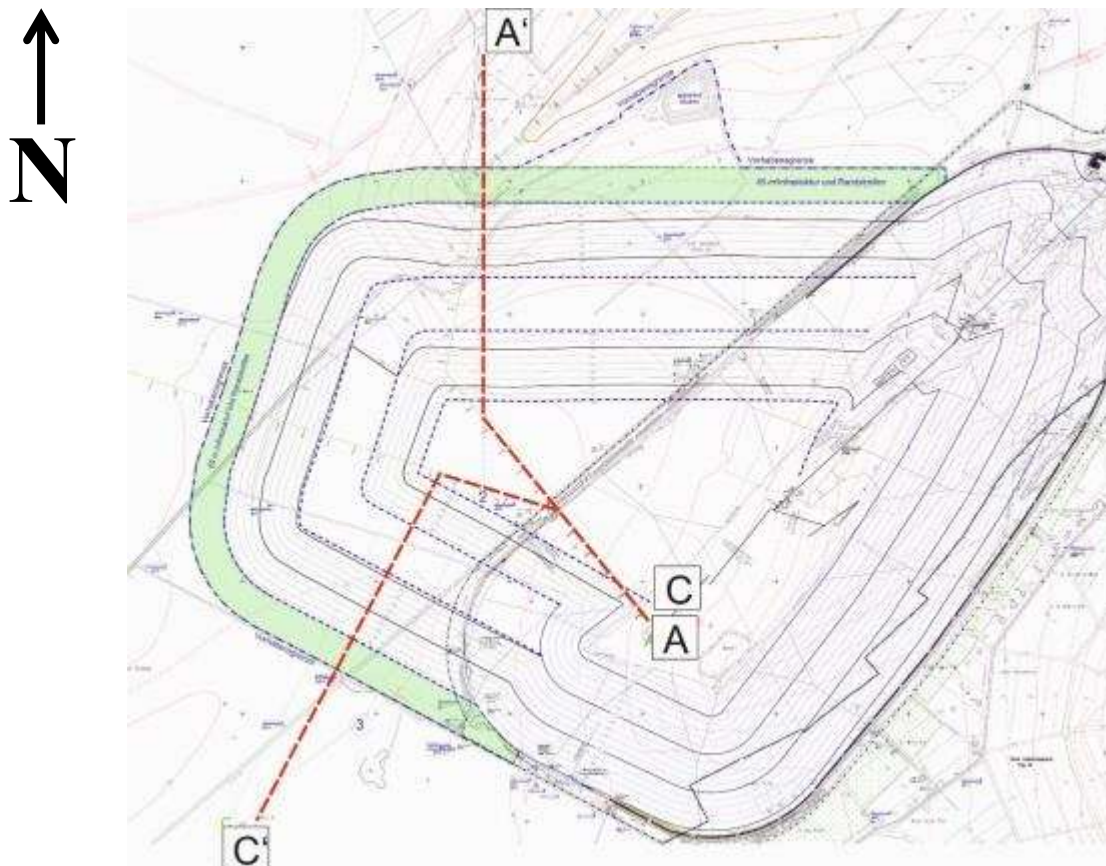


Bild 1: Lageplan der genehmigten Halde Hattorf und der geplanten, nordwestlich gelegenen Erweiterungsfläche mit den Untersuchungsschnitten A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈

Zur Untersuchung der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit der geplanten Haldenerweiterung wurde die Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH von der K+S KALI GmbH (K+S), Werk Werra, beauftragt, mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) numerische Berechnungen unter besonderer Berücksichtigung des stark zeitvarianten Materialverhaltens des Rückstandssalzes durchzuführen. Hierzu wurde für den Haldenkörper ein am Institut und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt (TU Darmstadt) entwickeltes visko-plastisches Materialgesetz für Rückstandssalz verwendet [U7].

In unserem Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1713/01 vom 10.02.2017 [U6.5] sind die Ergebnisse unserer bisherigen, sehr umfangreichen numerischen Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der geplanten Haldenerweiterung dokumentiert. Diese numerischen Untersuchungen berücksichtigen insgesamt 3 unterschiedliche Untersuchungsschnitte (A-A', B-B', C-C'), die veränderliche Geometrie der Halde während des Schüttprozesses sowie eine Kontaktformulierung zur Schubkraftübertragung 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 den Schnitt C-C'. In [U6.5] wurde der bis Februar 2017 gültige Planungsstand berücksichtigt.

Im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1754/01 sind ergänzende numerische Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der geplanten Haldenerweiterung dokumentiert. Diese numerischen Untersuchungen berücksichtigen ein System Basisabdichtung, bestehend aus Witterungsschutzschicht, Flächenfilter und Dichtung unterhalb der geplanten Haldenerweiterung in insgesamt 2 unterschiedlichen Untersuchungsschnitten (A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈, Bild 1), eine hydraulische Trennung zwischen Bestandshalde und Haldenerweiterung gemäß [U1.2], den aktuell geplanten Aufhaldungsprozess, die veränderliche Geometrie der Halde während des Schüttprozesses sowie eine Kontaktformulierung zur Schubkraftübertragung in der Aufstandsfläche und in der Schwächezone.

2 Unterlagen

- [U1] K+S KALI GmbH, Werk Werra:
1. E-Mail zu den Baugrundverhältnissen auf der Ruppertshöhe vom 05.01.2016
 2. Nachhaltiges Rückstandsmanagement am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf, Anhang 3 zu Band 1.1 der Antragsunterlage, Erweitertes Technisches Konzept, Stand 08.2017 – Konzeptstudie vom 22.09.2017
 3. E-Mail mit Profil des Berechnungsschnittes A-A' vom 16.11.2017
 4. E-Mail mit Freigabe des Berechnungsschnittes C-C' vom 10.01.2018
- [U2] 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
- [U3] Hessisches Landesamt für Bodenforschung:
Gutachten über die Erweiterung der Rückstandshalde des Kaliwerkes Hattorf, Philippsthal (Werra), Kreis Hersfeld-Rotenburg vom 13.09.1977
- [U4] upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH, Stendal:
Umsetzung eines nachhaltigen Rückstandsmanagements am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf). Band 1.1.1 der Antragsunterlage, Technisches Konzept
- [U5] Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach, Institutsdirektor, Vereidigter Sachverständiger, Darmstadt:
1. Sachverständigengutachten zur Langzeitstabilität von Salzhalden auf sölilig gelagertem Buntsandstein vom 18.01.1996
 2. Sachverständigengutachten 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. 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
 3. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1655/01 zur Ursachenforschung an der Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde Hattorf vom 23.06.2017
 4. 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
 5. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1713/01 zu den numerischen Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit für die geplante Haldenerweiterung vom 10.02.2017
 6. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1811/01 zur Baugrunderkundung am nördlichen Rand der Haldenerweiterung Hattorf im Bereich Ochsengraben, Entwurf vom 27.04.2018
 7. 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
- [U7] Leppla, S. (2017):
Zeitvariantes Materialverhalten von granularem Steinsalz und Simulation in numerischen Modellen. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 103 vom Dezember 2017

3 Geplante Erweiterung

3.1 Topographie

Einen Überblick über die gesamte Fläche der geplanten Haldenerweiterung 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 nördlichen Bereich bei rd. 305 mNN. Die Untersuchungsschnitte A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ sind [U1.3] und [U1.4] entnommen und in den Bildern 2 und 3 zusammen mit einer mög-

lichen Schüttreihenfolge der Blöcke 1 bis 13 (Schnitt A-A'₂₀₁₈ in Bild 2) bzw. 1 bis 15 (Schnitt C-C'₂₀₁₈ in Bild 3) dargestellt. Den Untersuchungsschnitten A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ liegt die neue Planung der Haldenerweiterung mit einem Abstand zwischen Böschungsfuß und Vorhabengrenze von 65 m, eine hydraulische Trennung gemäß [U1.2] und der Aufhaldung in 3 Schüttscheiben zugrunde.

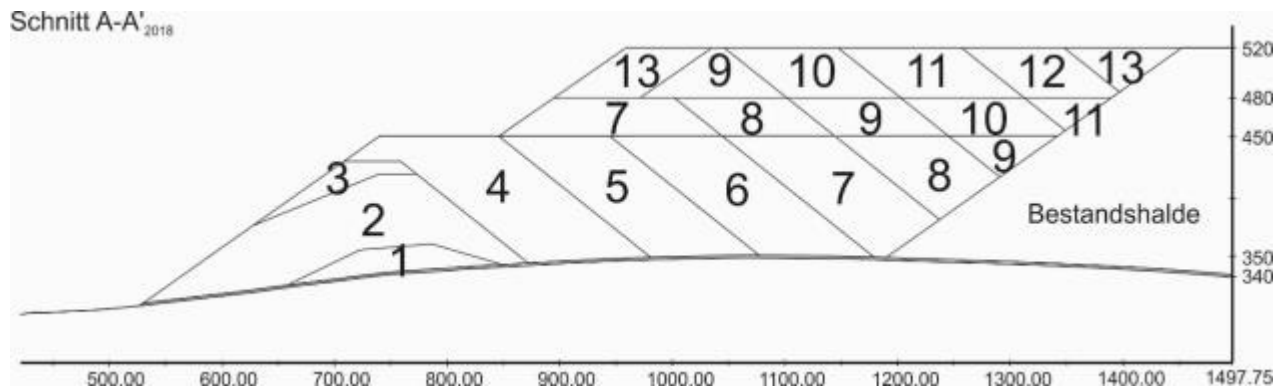


Bild 2: Untersuchungsschnitt A-A'₂₀₁₈ mit Darstellung der blockweisen Schüttgeometrie und -reihenfolge im kombinierten Schüttverfahren (KSV)

Die Geländeneigung des Schnittes A-A'₂₀₁₈ beträgt am nördlichen Rand der geplanten Haldenerweiterung in der Tallinie des Ochsengrabens maximal ca. 15 % (Bild 2, linker Bildrand). Dies entspricht einer maximalen Geländeneigung der Aufstandsfläche von rd. 8,5 Grad.

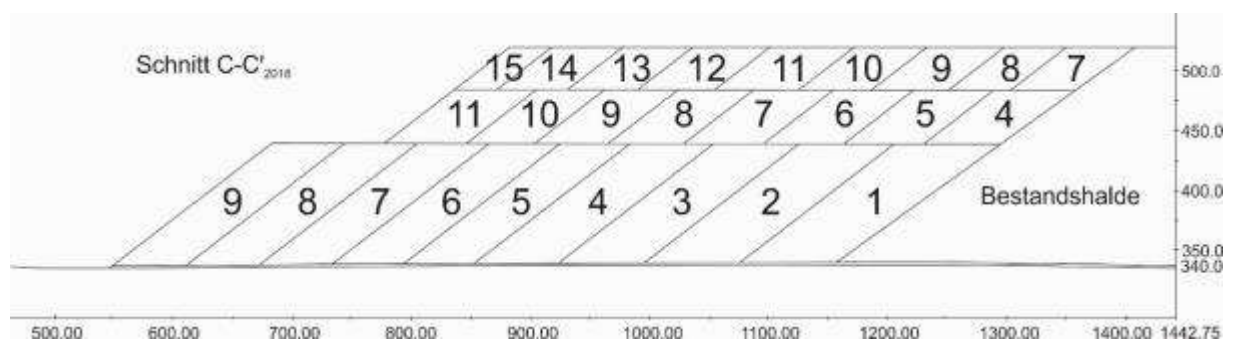


Bild 3: Untersuchungsschnitt C-C'₂₀₁₈ mit Darstellung der blockweisen Schüttgeometrie und -reihenfolge im kombinierten Schüttverfahren (KSV)

Das Gelände im Schnitt C-C'₂₀₁₈ verläuft nahezu horizontal.

3.2 Baugrundverhältnisse

Ergänzend zu den für frühere Fragestellungen im Bereich der Halden aus Rückstandssatz realisierten Maßnahmen zur Baugrunderkundung [U5] wurden die in [U2], [U3], [U6.1] und [U6.3] dokumentierten projektspezifischen Baugrunduntersuchungen durchgeführt.

Gemäß den in [U2], [U6.1] und [U6.3] 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

Das Liegende der Verwitterungszone bildet den Übergang zum anstehenden, geklüfteten Fels des Buntsandsteins, der durch die Baggerschürfe, Rammkernsondierungen und Rammsondierungen in der Tiefenlage definiert werden kann. Der Buntsandstein wurde durch die in [U6.1] und [U6.3] beschriebenen Kernbohrungen aufgeschlossen.

Nach [U1.1], [U2], [U6.1] und [U6.3] reicht der Verwitterungshorizont lokal bis minimal 0,7 m bzw. bis maximal 7,0 m unter die Geländeoberfläche. Im Durchschnitt ist die Lockergesteinszone 1,5 - 2,5 m dick.

Unter der quartären Lockergesteinszone folgt der Mittlere Buntsandstein der Solling-, Hardeggen-, Detfurth- und Volpriehausenfolge (von oben nach unten). Es handelt sich im Wesentlichen um Wechselfolgen aus Sandstein und Ton-/Schluffstein [U3], [U6.1], [U6.3].

Im Bereich der Erweiterungsfläche ist im Hinblick auf die bisher in dieser Deutlichkeit ausschließlich im Inklinometer INK 1 detektierten Schwächezonen [U5.4] bei allen Bohrkernen festzustellen, dass eine Zone, die auf deutlich verminderte Scherparametern hinweist, weder visuell bei der Bohrkernansprache noch im Labor während der Durchführung der geotechnischen Laborversuche detektiert wurde. Abzugrenzen davon ist die in [U6.2] bis [U6.4] gesondert bewertete Situation an der Südwestflanke der bestehenden Halde.

3.3 Abmessungen und Geometrie

Die aktuell geplante Haldenerweiterung ist im Grundriss in Bild 1 dargestellt. Gemäß aktueller Planung besitzt die Erweiterungsfläche eine Größe von rd. 62 ha. Die Bilder 2 und 3 zeigen die Untersuchungsschnitte A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈. 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 beträgt in Abhängigkeit des Niveaus der Geländeoberfläche maximal etwa 180 m. Die Schüttung der geplanten Erweiterung erfolgt im kombinierten Schüttverfahren (KSV). Die Schüttung im Schnitt A-A'₂₀₁₈ erfolgt von Norden nach Südosten an die bestehende Halde heran (siehe Bild 2). Die Schüttung im Schnitt C-C'₂₀₁₈ erfolgt von Osten nach Westen (siehe Bild 3). Das geplante Niveau des Haldentops liegt bei rd. 520 mNN. Geplant ist, dass die Kontur der Haldenböschungen durch Anwendung des kombinierten Schüttverfahrens (KSV) eine 100 m breite Berme beinhaltet. In den Bildern 2 und 3 sind die untersuchten Blockschüttungen im KSV der zwei Schnitte dargestellt.

4 Numerische Modellbildung

Das für die Untersuchung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit entwickelte numerische Modell des Schnittes A-A'₂₀₁₈ ist für den Endzustand der geplanten Haldenerweiterung in Bild 4 dargestellt. Die Schüttabfolge wird in Bild 2 gezeigt.

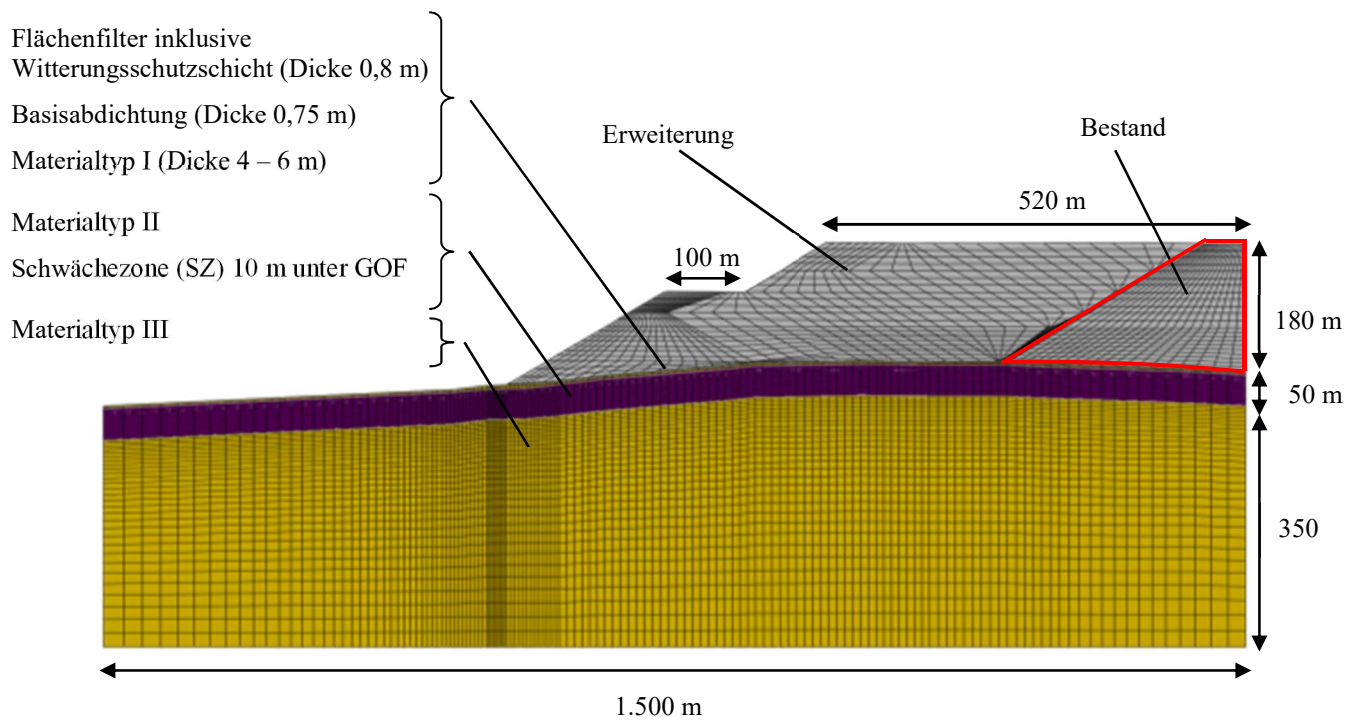


Bild 4: Numerisches Modell zur Untersuchung des Endzustandes der geplanten Haldenerweiterung im Schnitt A-A'₂₀₁₈ mit kombiniertem Schüttverfahren (KSV)

Das für die Untersuchung der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit entwickelte numerische Modell des Schnittes C-C'₂₀₁₈ ist für den Endzustand der geplanten Haldenerweiterung in Bild 5 dargestellt. Die Schüttabfolge wird in Bild 3 gezeigt.

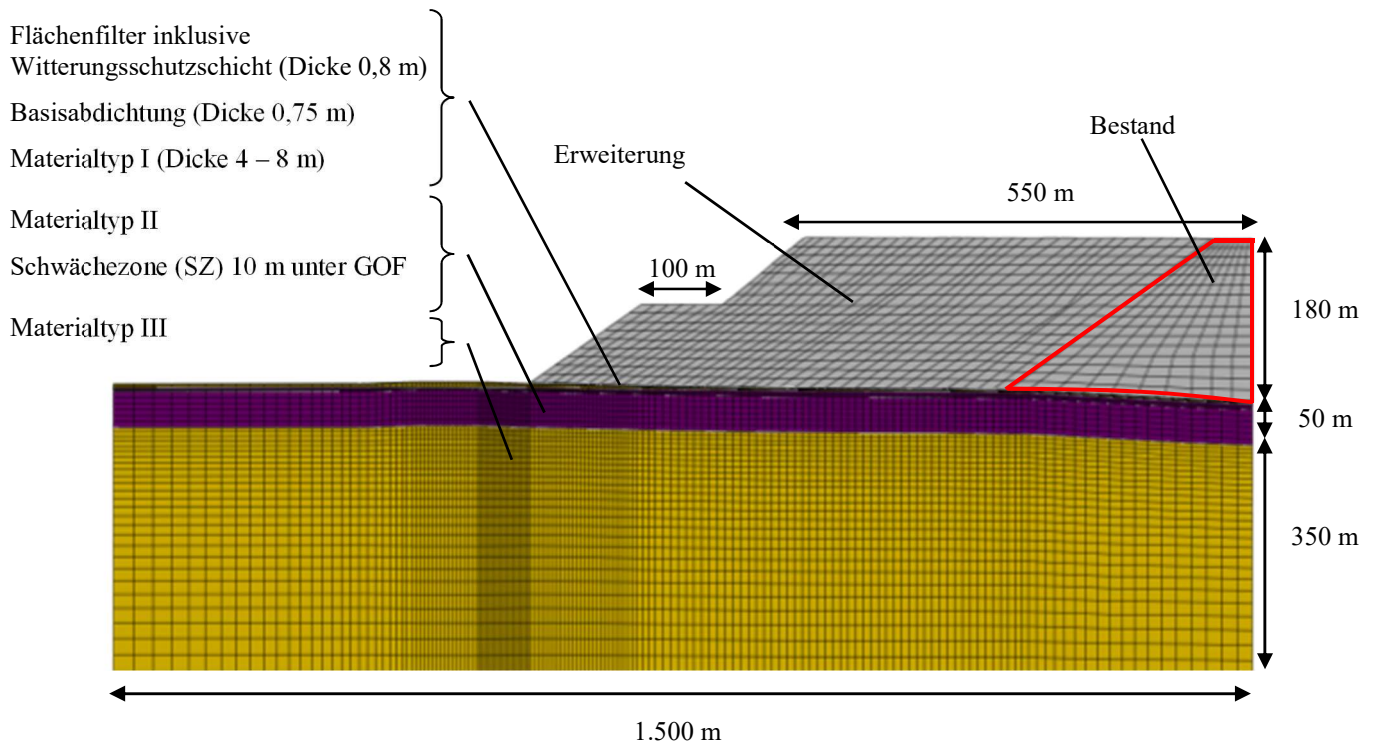


Bild 5: Numerisches Modell zur Untersuchung des Endzustandes der geplanten Haldenerweiterung im Schnitt C-C'₂₀₁₈ mit kombiniertem Schüttverfahren

Die Betrachtungszeiträume der Nachbetriebsphase betragen 50 Jahre. Die Gesamtbetrachtungsdauer beträgt einschließlich der Beschüttungsphase bis zu 73 Jahre. Die Kontaktflächen sind gemäß dem Master-Slave-Prinzip in der Aufstandsfläche der Halde sowie in der Schwächezone innerhalb des Materialtyps II implementiert.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen werden nur die Endzustände der Schüttungen im Rahmen der geplanten Haldenerweiterung ausgewertet. Die Betrachtungszeiträume in Jahren der einzelnen Schnitte sind wie folgt:

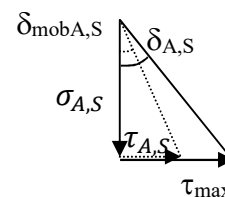
- Schnitt A-A'₂₀₁₈ mit KSV: 21 a Schüttphase und 50 a Nachbetriebsphase
- Schnitt C-C'₂₀₁₈ mit KSV: 23 a Schüttphase und 50 a Nachbetriebsphase

Bei der Modellierung der Schüttphasen wurde das Aufbringen der Bestandshalde berücksichtigt. Die Schüttung der Haldenerweiterung beträgt je nach Schnitt und Planungsstand zwischen rd. 13 und 15 Jahren.

Zur Berücksichtigung möglicher Relativverschiebungen zwischen Halde und Baugrund bzw. im Bereich der Schwächezone wurde eine Kontaktfläche nach dem Master-Slave-Prinzip implementiert. Die Scherfestigkeit in den Kontaktflächen ist durch das Reibungsgesetz von Coulomb definiert. Demnach sind in der Kontaktfläche die aufnehmbaren Schubspannungen τ_{\max} proportional zu den Normalspannungen σ . Die Proportionalitätskonstante ist der Tangens des Reibungswinkels in der Aufstandsfläche bzw. der Schwächezone $\tan \delta_A$ bzw. $\tan \delta_S$.

Die Gleitbedingung in diesen Kontaktflächen (Aufstandsfläche und Schwächezone) 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
 $\tau_{A,S}$ 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 ist gleich dem minimalen inneren Reibungswinkel φ' der Basisabdichtung und beträgt $\delta_A = 30^\circ$. Gemäß [U5.4] beträgt der Reibungswinkel in der Schwächezone $\delta_S = 22,5^\circ$.

Rückstandshalden sind durch den Schüttprozess einer permanenten Änderung der Geometrie unterworfen und stellen so ein System mit veränderlicher Gliederung dar. Der Schüttprozess wird in den FE-Berechnungen durch eine Folge alternierender Berechnungsschritte 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.

Gemäß [U6.7] sind standsicherheitsmindernde Einflüsse einer hydraulischen Trennung auf das gesamte System, bestehend aus Bestandshalde, Haldenerweiterung und Baugrund bei Einhalten eines notwendigen Randabstands der KDB zur Schnittlinie zwischen Bestandshalde und Halden-

erweiterung (Kehle) nicht zu besorgen. Dies gilt auch für die berechneten Verschiebungen und Dehnungen, die als Grundlage zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit dienen. Für die Modellbildung der Untersuchungsschnitte A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ ist die Berücksichtigung einer hydraulischen Trennung nicht erforderlich.

5 Materialkennwerte für die numerischen Untersuchungen

5.1 Baugrund

Der Baugrund wird wirklichkeitsnah als elasto-plastisches 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 6 zeigt das modifizierte Drucker-Prager-Modell in der Meridianebene.

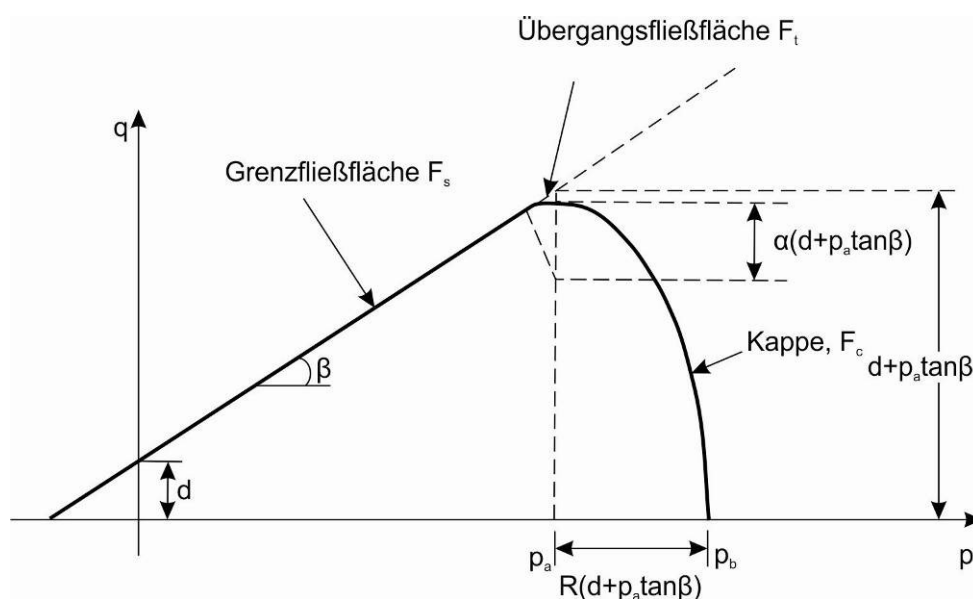


Bild 6: Modifiziertes Drucker-Prager-Modell

Auf Basis der Unterlagen [U1.1], [U2], [U5] und [U6] und der darin dokumentierten Erkundungsergebnisse wird den numerischen Untersuchungen im Schnitt A-A'₂₀₁₈, auf der sicheren Seite liegend, 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 Festgesteinsschichten des Bunt-

sandsteins. Diese Schichten bestehen im Wesentlichen aus Sandstein und Ton-/Schluffstein und wurden zu den Materialtypen II und III zusammengefasst.

Die Schwächezone wurde in allen Untersuchungsschnitten als Kontaktfläche in 10 m Tiefe unter der Geländeoberfläche geländeparallel modelliert und liegt damit im Bereich des Materialtyps II. Der Reibungswinkel in der Schwächezone beträgt $\delta_s = 22,5^\circ$. Auf der sicheren Seite liegend wurde für die Kontaktfläche keine Kohäsion angesetzt.

Schnitt A-A '2018

Um die lokalen Baugrundverhältnisse im Schnitt A-A'₂₀₁₈ hinreichend genau abzubilden wurde im Bereich des endgültigen Haldenfußes eine größere Schichtdicke für den Materialtyp I von 6 m modelliert. Dies resultiert aus Baugrunderkundungen im Bereich des Ochsengrabens in denen die Unterkante der oberflächennahen Lockergesteins- und Zersatzzone überwiegend bei rd. 5 m detektiert wurde [U2], [U6.6]. Die größere Dicke des Materialtyps I reicht bis rd. 75 m unter die geplante Haldenerweiterung und rd. 75 m ins Haldenvorland.

Tiefe unter Gelände- oberfläche	Materialtyp
0 m – max. 6 m	I
min. 4 m – 50 m	II
50 m – 400 m	III

Tabelle 1: Baugrundmodell der numerischen Untersuchungen im Schnitt A-A'₂₀₁₈

Die charakteristischen Werte der boden- und felsmechanischen Parameter der Materialtypen I bis III im Schnitt A-A'₂₀₁₈ sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

	Materialtyp I	Materialtyp II	Materialtyp III
Dichte ρ [kg/dm ³]	1,95	1,95	2,1
Reibungswinkel ϕ' [°]	27,5	28	35
Kohäsion c' [kN/m ²]	5	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 im Schnitt A-A'₂₀₁₈

Schnitt C-C' 2018

Abweichend zum Berechnungsschnitt A-A' 2018 kann im Bereich der Südflanke der geplanten Haldenerweiterung (Schnitt C-C' 2018) die Lockergesteins- und Zersatzzone eine Schichtdicke von bis zu 7 m, höhere Feinkornanteile ($< 0,06$ mm) und geringere Scherfestigkeiten aufweisen [U2]. Die Haldengeometrie und die Geländeneigung im Bereich des Schnittes C-C' 2018 sind günstiger als im Untersuchungsschnitt A-A' 2018.

Um die lokalen Baugrundverhältnisse im Schnitt C-C' 2018 hinreichend genau abzubilden wurde im Bereich des endgültigen Haldenfußes eine größere Schichtdicke für den Materialtyp I von 8 m modelliert. Dies resultiert aus Baugrunderkundungen im südwestlichen Bereich der geplanten Haldenerweiterung in denen die Unterkante der oberflächennahen Lockergesteinszone lokal bei rd. 7 m detektiert wurde [U2]. Konservativ angesetzt reicht die größere Dicke des Materialtyps I bis rd. 200 m unter die geplante Haldenerweiterung und rd. 200 m ins Haldenvorland.

Auf Basis der Unterlagen [U2] und [U6.3] und der darin dokumentierten Erkundungsergebnisse wird den numerischen Untersuchungen im Schnitt C-C' 2018, auf der sicheren Seite liegend, das in Tabelle 3 dargestellte Baugrundmodell zugrunde gelegt.

Tiefe unter Gelände- oberfläche	Materialtyp
0 m – max. 8 m	I
min. 4 m – 50 m	II
50 m – 400 m	III

Tabelle 3: Baugrundmodell der numerischen Untersuchungen im Schnitt C-C' 2018

Die charakteristischen Werte der boden- und felsmechanischen Parameter der Materialtypen I bis III im Schnitt C-C' 2018 sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

	Materialtyp I	Materialtyp II	Materialtyp III
Dichte ρ [kg/dm ³]	1,95	1,95	2,1
Reibungswinkel ϕ' [°]	22,5	28	35
Kohäsion c' [kN/m ²]	10	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 4: Charakteristische Werte der boden- und felsmechanischen Parameter der Materialtypen I bis III im Schnitt C-C'₂₀₁₈

5.2 Bodenmechanische Parameter in der Aufstandsfläche

Die Aufstandsfläche wird vor der Beschüttung 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 liegend festgelegt [U4]. Die bodenmechanischen Parameter der Basisabdichtung, die dem oberen Meter des Baugrundes zugewiesen wurden, sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Zwischen Basisabdichtung und Haldenkörper wird zudem ein vollflächiges Drainagesystem in Form eines Flächenfilters eingebaut. Basisabdichtung und Flächenfilter werden durch eine mindestens 0,30 m dicke Witterungsschutzschicht abgedeckt, die aus Rückstand oder Baustoffen vergleichbar zum Flächenfilter bestehen wird. In Abstimmung mit der upi UmweltProjekte Ingenieurgesellschaft mbH wurden die bodenmechanischen Parameter des Flächenfilters für die numerischen Berechnungen auf Basis von Erfahrungswerten auf der sicheren Seite liegend festgelegt. Die bodenmechanischen Parameter des Flächenfilters (incl. Witterungsschutzschicht), die einer zusätzlichen Elementlage zwischen Baugrund und Haldenkörper zugewiesen wurden, sind in Tabelle 5 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 5: Bodenmechanische Parameter der Basisabdichtung und des Flächenfilters in den Schnitten A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈

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

5.3 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 [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 modelliert (Bild 6).

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.

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

$$\dot{\epsilon}^{\text{vpl,tr}} = \frac{D_1 \cdot n_{\text{max}}}{C_1} \cdot e^{-\frac{t}{c_1}} \quad (3)$$

Die viskoplastische Volumenänderungsrate wird mit Gleichung (4) beschrieben.

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

mit:

e	Euler-Zahl
$\dot{\epsilon}^{\text{vpl,st}}$	viskoplastische stationäre Gestaltsänderungsrate
$\dot{\epsilon}^{\text{vpl,tr}}$	viskoplastische transiente Gestaltsänderungsrate
$\dot{\epsilon}_{\text{kk}}^{\text{vpl,tr}}$	viskoplastische transiente Volumenänderungsrate
ϵ_{kk}	Volumenänderung
I_1	erste Invariante
R	universelle Gaskonstante
s	Deviatorspannung
T	Temperatur
t	Zeit

Die experimentell bestimmten und in Tabelle 6 zusammengestellten salzmechanischen Parameter basieren auf [U5] bis [U7]. Dabei werden die Vorzeichen der einzelnen Parameter durch die Konventionen des verwendeten Stoffgesetzes bzw. numerischen Programmsystems bestimmt.

	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	[-]
Anfangskonuskappenschnittpunkt	$\kappa_0^{*)}$	-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	[-]
Regressionsparameter der transienten Verformungsrate	C ₁	1.728.000	[s]
	D ₁ ^{*)}	-0,015	[-]
Regressionsparameter der vis- koplastischen Volumenänderungs- rate	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 6: Salzmechanische Parameter des Rückstandssalzes

6 Kalibrierung des numerischen Modells

Die Kalibrierung des numerischen Modells erfolgte anhand der geodätischen und geotechnischen Messungen, wobei im Wesentlichen die Messpunkte im Vorfeld der bestehenden Halde sowie die Inklinometer INK 1 und INK 2 verwendet wurden. Die Kalibrierung erfolgte bereits für die in [U6.5] dokumentierten numerischen Berechnungen. Es wird festgestellt, dass die gewählten Ansätze bzgl. Geometrie und Materialkennwerten in der Größenordnung zutreffende Berechnungsergebnisse liefern, die tendenziell gegenüber den Messergebnissen auf der sicheren Seite liegen.

7 Nachweis- und Sicherheitskonzept

Im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1754/01 werden für die Schnitte A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ sowohl die Standsicherheit als auch die Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen.

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 Scherparametern. Diese Vorgehensweise wurde bereits bei früheren Untersuchungen angewandt [U5], [U6.4], [U6.5]. Zur Berücksichtigung des zeitvarianten Materialverhaltens des Rückstandssalzes wurde ein Untersuchungszeitraum von mindestens 71 Jahren (21 Jahre Beschüttung und 50 Jahre Nachbetriebsphase) angesetzt. Der Untersuchungszeitraum beginnt mit der Beschüttung der Erweiterungsfläche und endet ca. 50 Jahre nach Schüttende.

Für den Nachweis der Standsicherheit wurden die Scherparameter aller Materialien einschließlich des Rückstandssalzes mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma = 1,25$ für eine 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 Verformungsgeschwindigkeiten 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 erfolgen 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 liefert 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 bestimmten Materialkennwerte wurden die numerischen Berechnungen kalibriert. Die Kalibrierung erfolgt anhand der in-situ gemessenen Verformungen bzw. Verschiebungsgeschwindigkeiten im Bereich der Nordwestflanke der bestehenden Halde. Die Kalibrierung des entwickelten numerischen Modells und der zugrunde liegenden Materialkennwerte sind in Kapitel 6 bzw. in [U6.5] 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 ist im Sinne der Beobachtungsmethode nach DIN EN 1997-1, Abs. 2.1, ein geodätisches und geotechnisches Monitoringprogramm für die Betriebs- und die Nachbetriebsphase der Haldenerweiterung zu entwickeln und mit den Sachverständigen und Fachgutachtern abzustimmen.

8 Numerische Untersuchungen zur Standsicherheit

Zur numerischen Untersuchung der Standsicherheit wurden für die Berechnungen in den Schnitten A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ der geplanten Haldenerweiterung die in den Kapiteln 4 und 5 aufgeführten Materialkennwerte 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 gilt somit als standsicher im Sinne des oben beschriebenen Nachweiskonzeptes [U7].

Da die Untersuchung der Standsicherheit mit abgeminderten Scherparametern erfolgt, werden die berechneten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten im Vergleich zu den tatsächlich möglichen horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten, die in den Kapiteln 9.1 bis 9.3 aufgeführt sind, deutlich überschätzt. Die im Zuge der Standsicherheitsbetrachtung berechneten, horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten v_h betragen am Haldenfuß im Endzustand das ca. 2,0- bis 2,6-fache der im Zuge der Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit berechneten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten.

In Bild 7 sind daher die Verläufe der normierten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten dargestellt. Die Bezugsgröße ist dabei die maximale horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit des Schnittes A-A' 2018. Die horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit $v_{h,i}$ aus den Schnitten A-A' 2018 und C-C' 2018 wird mit der 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 Verschiebungsgeschwindigkeiten. Die maximalen Verschiebungsraten treten unmittelbar vor Erreichen der beantragten Aufhaltungsgrenze auf. Je nach Schüttkonzept in der jeweiligen Schnittlage wird dieser Haldenfußpunkt zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht (Kap. 4).

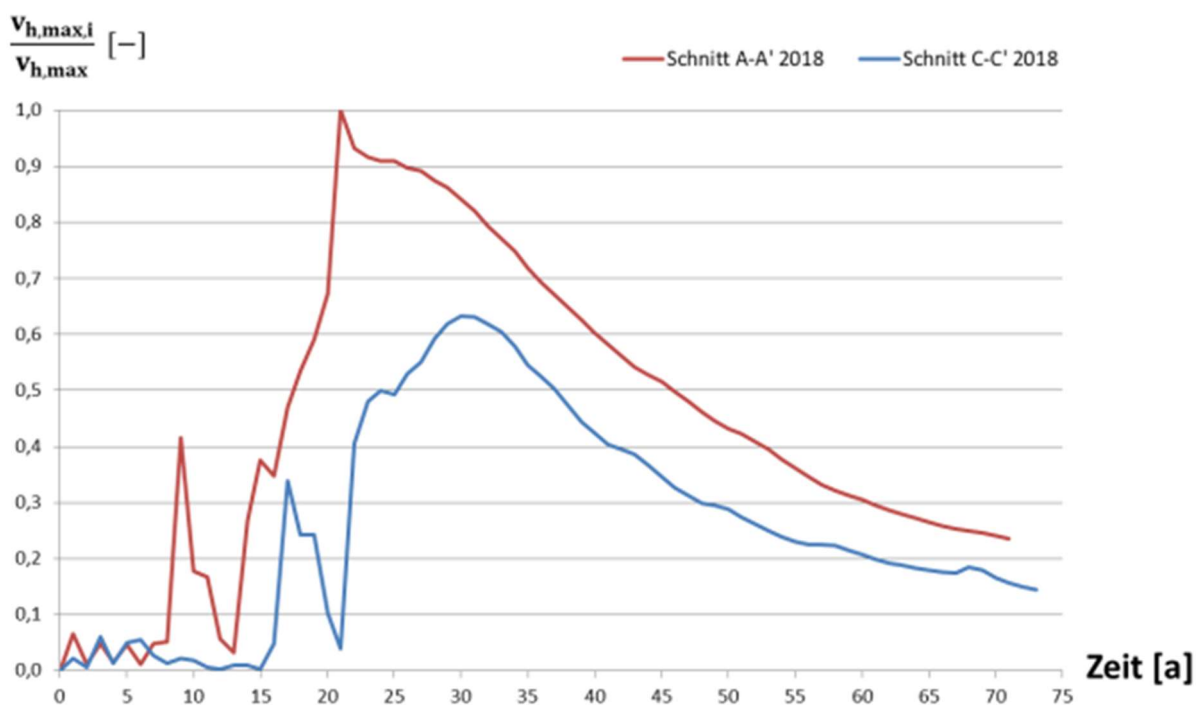


Bild 7: Normierte horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten im Grenzzustand der Standsicherheit am Haldenfuß

Mit den numerischen Berechnungen des Gesamtsystems bestehend aus Halde, Flächenfilter, Basisabdichtung und Baugrund wird eine dem o.g. Nachweiskonzept entsprechende Standsicherheit nachgewiesen. Anzeichen für die Entstehung von Grenzzuständen der Tragfähigkeit sind nicht erkennbar.

9 Numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit

Zur numerischen Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit in den Schnitten A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ wurden die in den Kapiteln 4 und 5 aufgeführten charakteristischen Materialkennwerte für Baugrund und Rückstandssalz verwendet. Wie für die Untersuchungen der Standsicherheit auch, beträgt der Untersuchungszeitraum für die Gebrauchstauglichkeit ebenfalls mindestens 71 Jahre (21 Jahre Beschüttung und 50 Jahre Nachbetriebsphase).

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

Im Rahmen 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'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ untersucht:

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

Die Darstellung der Berechnungsergebnisse erfolgt in Konturplots und Diagrammen. In den Konturplots sind die Spannungen des Rückstandssalzes ausgeblendet, um die wichtigen Informationen über die Verhältnisse im Baugrund detaillierter darstellen zu können. Die oberen beiden Elementlagen in den Konturplots stellen die Entwässerungs- und Dichtungsschicht dar.

Analog zu den bisherigen, für die K+S KALI GmbH erstellten Sachverständigen-Gutachten, werden in diesem Kapitel des gegenständlichen Sachverständigen-Gutachtens Nr. IK1754/01 die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen dargestellt.

Der Schwerpunkt der Ergebnisdarstellung liegt im Bereich des endgültigen Haldenfußpunktes bei den unter der Halde liegenden Elementen im Bereich des Haldenmantels der unteren Schüttscheibe (rd. 50 m horizontal zur Haldenböschung). Bei der Dokumentation der Ergebnisse in Form von Zahlenwerten werden numerische Singularitäten nicht berücksichtigt.

9.1 Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes A-A'2018

9.1.1 Vertikale Spannungen und Verschiebungen

Die berechneten vertikalen Spannungen am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 8 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenmantels der unteren Schüttscheibe gemittelte rechnerische Vertikalspannung beträgt rd. 1.100 kN/m².

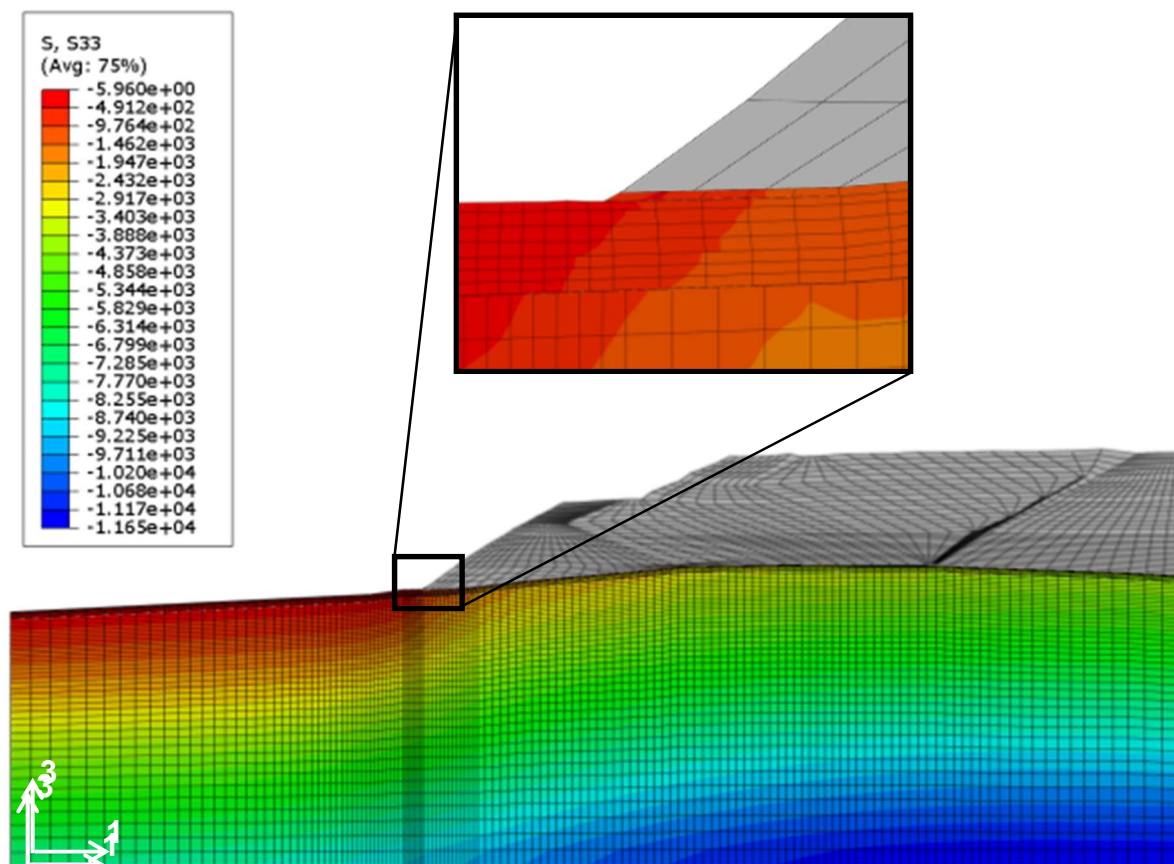


Bild 8: Vertikale Spannungen in [kN/m²] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A'2018

In den Bildern 9 und 10 sind die berechneten vertikalen Verschiebungen des Baugrundes und der Basisabdichtung für das Ende des Untersuchungszeitraumes dargestellt. Die berechneten maximalen Setzungen unter der Halde betragen bis zu 3,7 m. Im Bereich des Haldenfußes betragen die Setzungen rd. 1,3 m. Die rechnerischen Hebungen betragen, bezogen auf die Ausgangskoordinaten, bis zu 0,5 m. Der Bereich der Hebungen liegt vor dem Haldenfußpunkt.

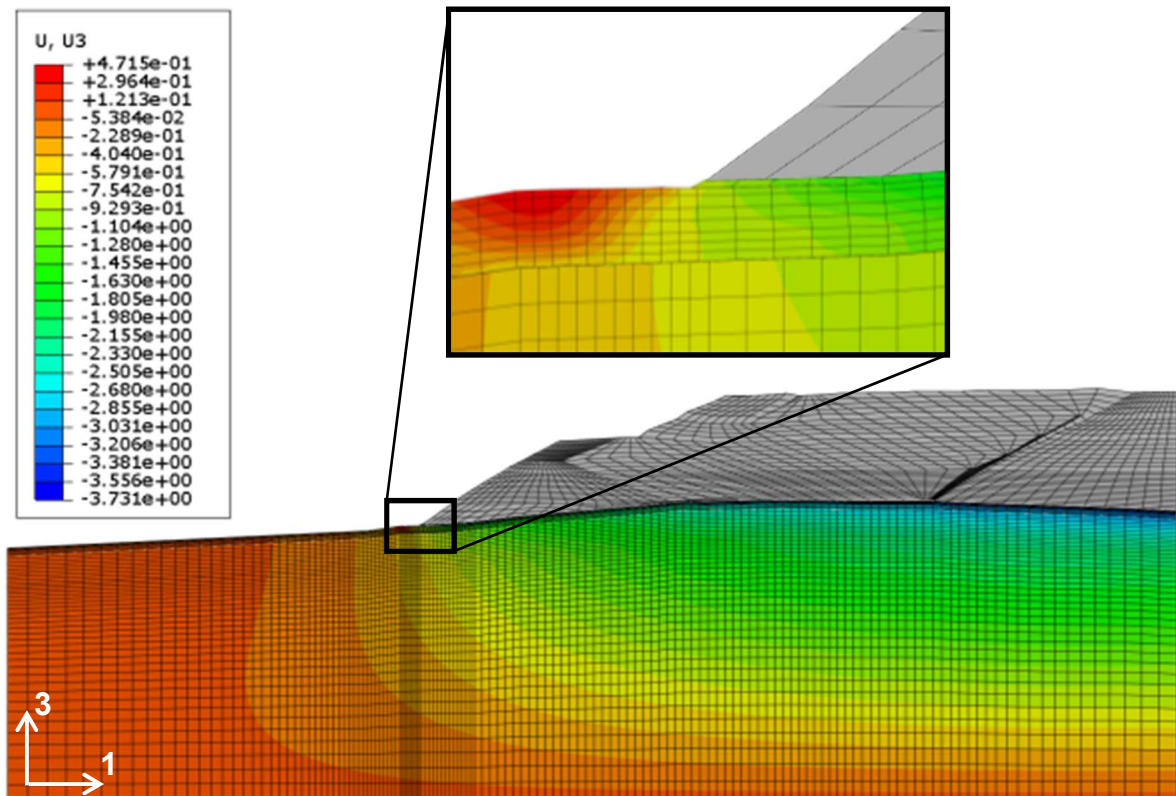


Bild 9: Vertikale Verschiebungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A'2018

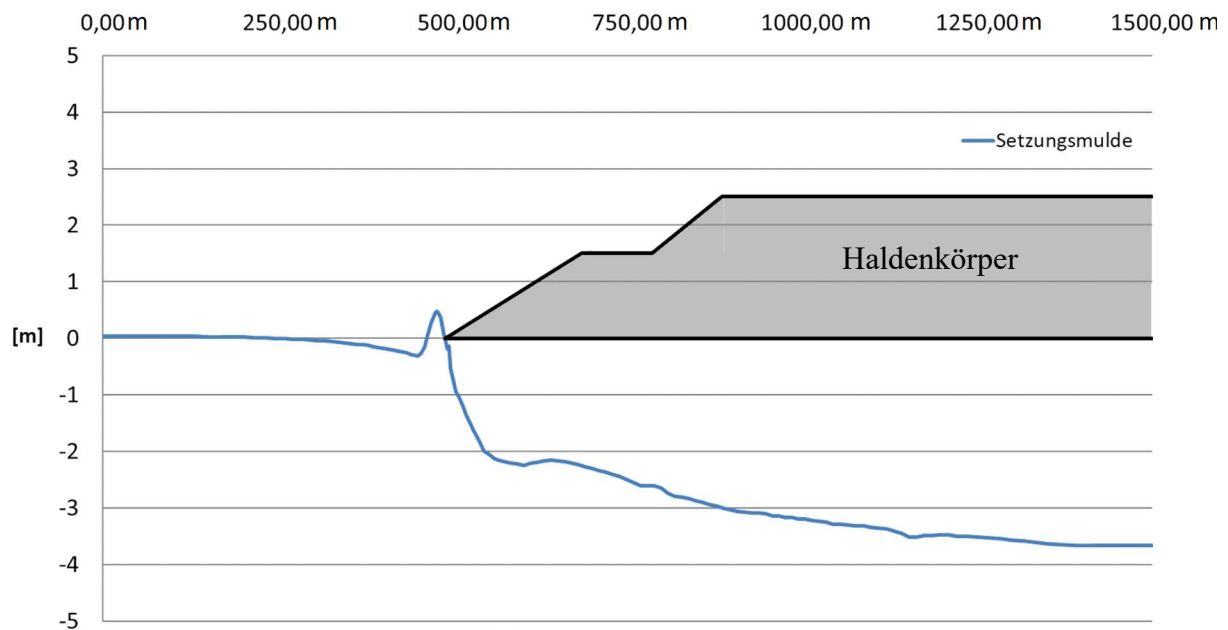


Bild 10: Vertikale Verschiebungen der Aufstandsfläche in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A'₂₀₁₈, Setzungen negativ

9.1.2 Schubspannungen

Die berechneten Schubspannungen im Baugrund am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 11 dargestellt. Die in der Haldenaufstandsfläche im Bereich des Haldenmantels der unteren Schüttscheibe gemittelte rechnerische Schubspannung beträgt rd. 550 kN/m².

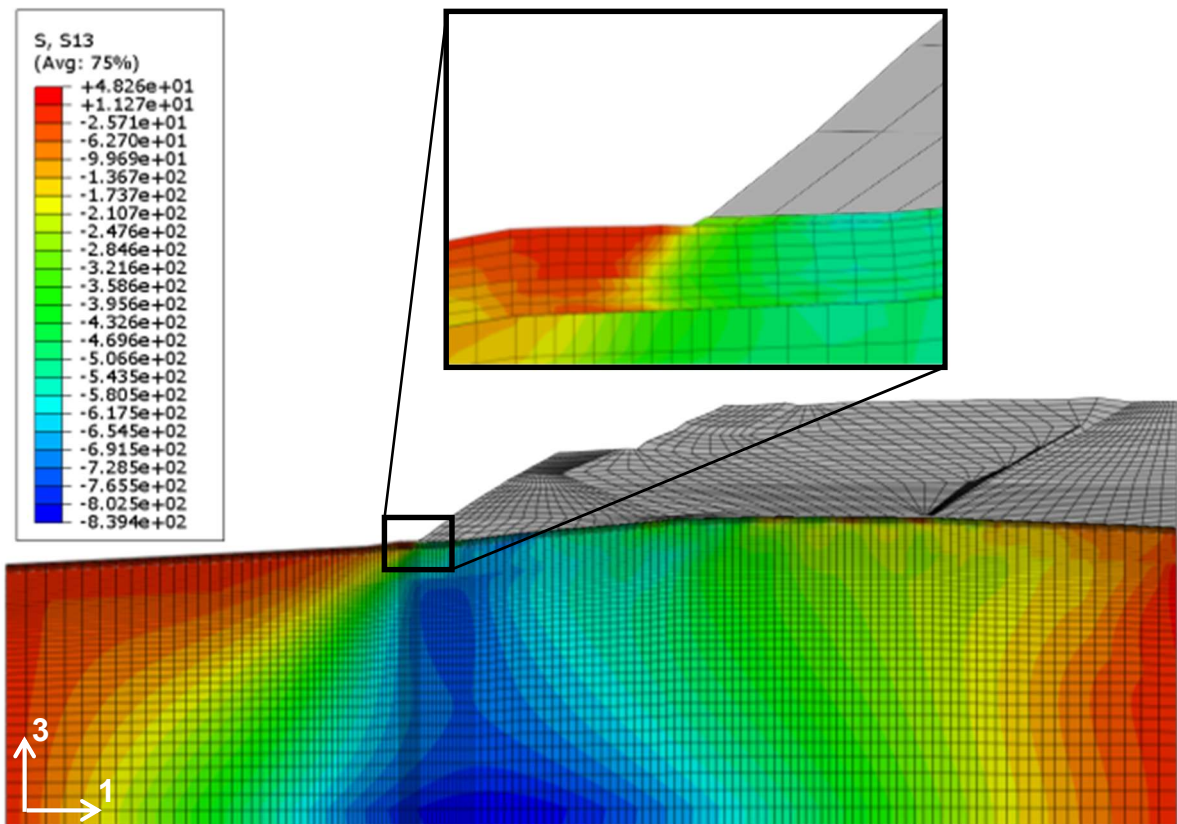


Bild 11: Schubspannungen in $[\text{kN/m}^2]$ am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A'₂₀₁₈

9.1.3 Horizontale Spannungen, Verschiebungen und Dehnungen

Die berechneten horizontalen Spannungen des Baugrundes und der Basisabdichtung sind als Konturplot in Bild 12 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenmantels der unteren Schüttscheibe gemittelte rechnerische horizontale Spannung beträgt rd. 900 kN/m^2 .

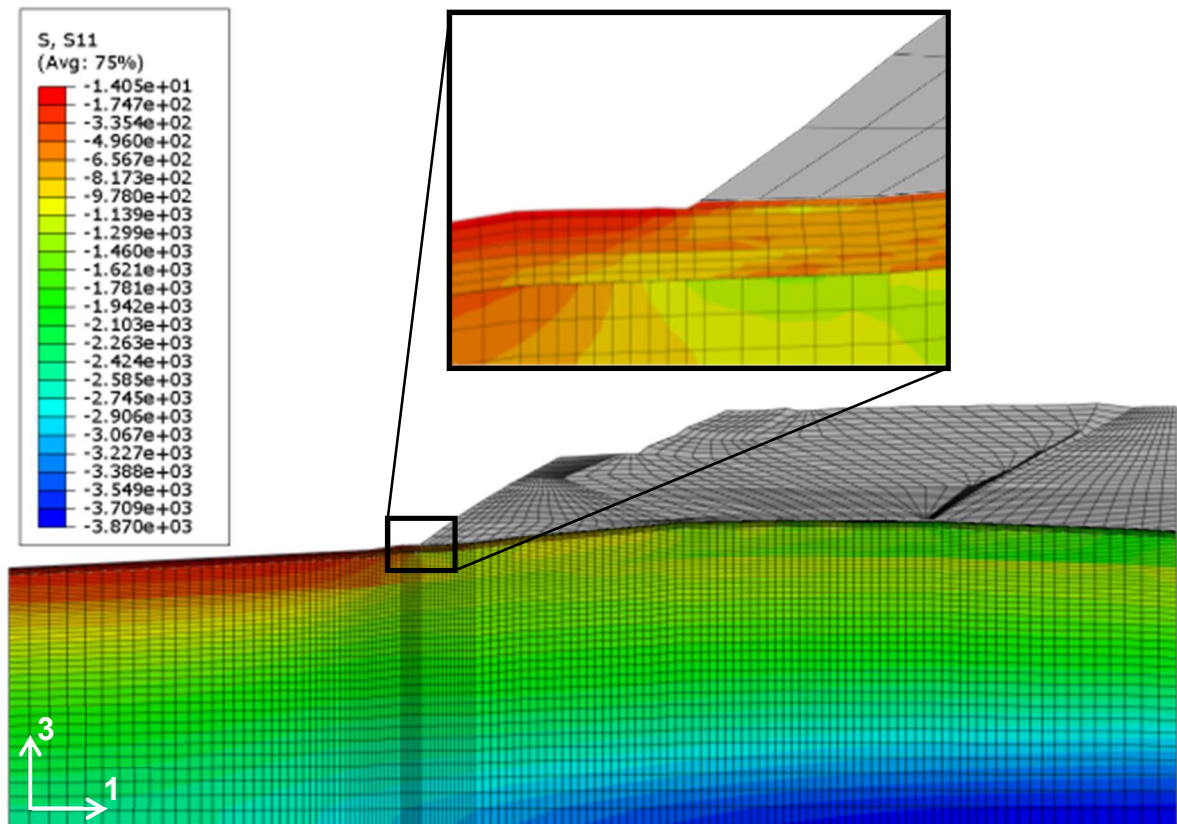


Bild 12: Horizontale Spannungen in $[\text{kN/m}^2]$ am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A'₂₀₁₈

Die berechneten horizontalen Verschiebungen des Baugrundes sind in den Bildern 13 und 14 als Konturplots dargestellt. Die maximale horizontale Verschiebung des Haldenfußpunktes in der Aufstandsfläche beträgt rd. 5,1 m. Die berechnete maximale horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit $v_{h,\max}$ beträgt rd. 18 cm/a und tritt im ersten Jahr nach Schüttung des endgültigen Haldenfußes (Blöcke 1 bis 4) auf. Bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes, d.h. 50 Jahre nach Schüttende, stellt sich ein degressiver bis konstanter Verlauf der horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeit mit Werten rd. 4 cm/a ein.

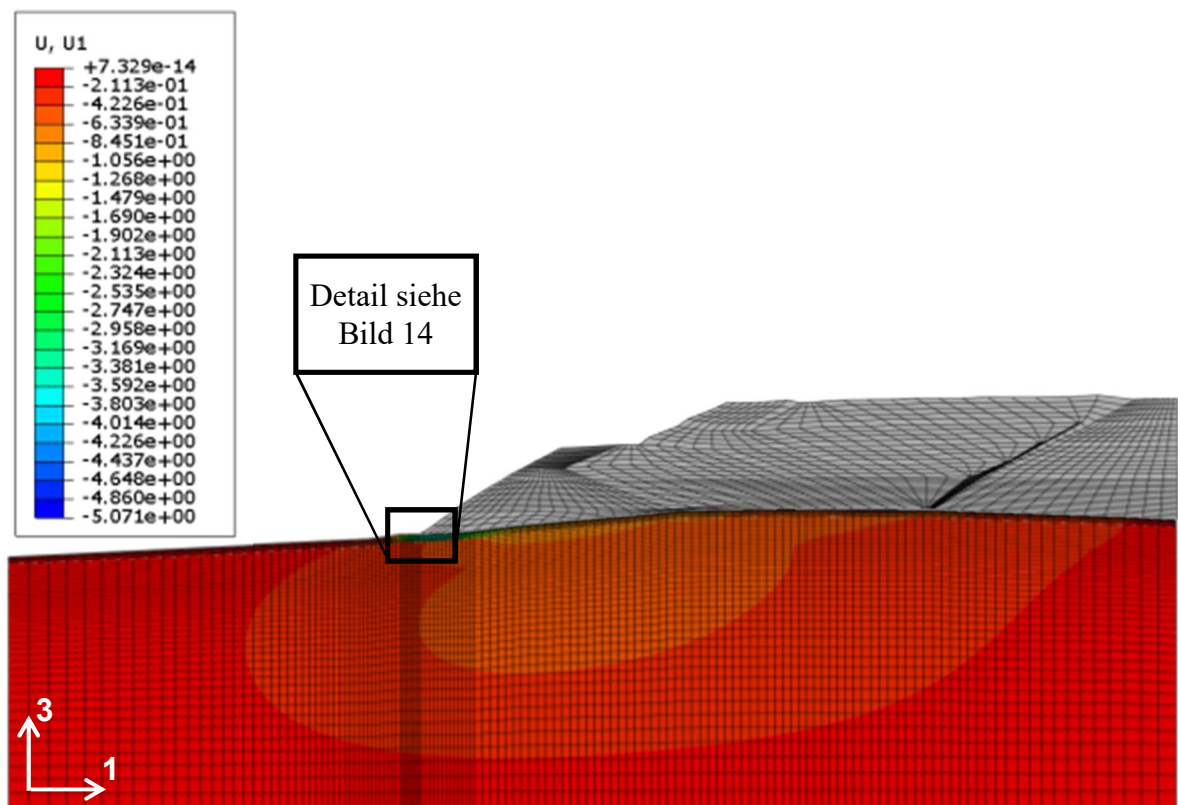


Bild 13: Horizontale Verschiebungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A'₂₀₁₈

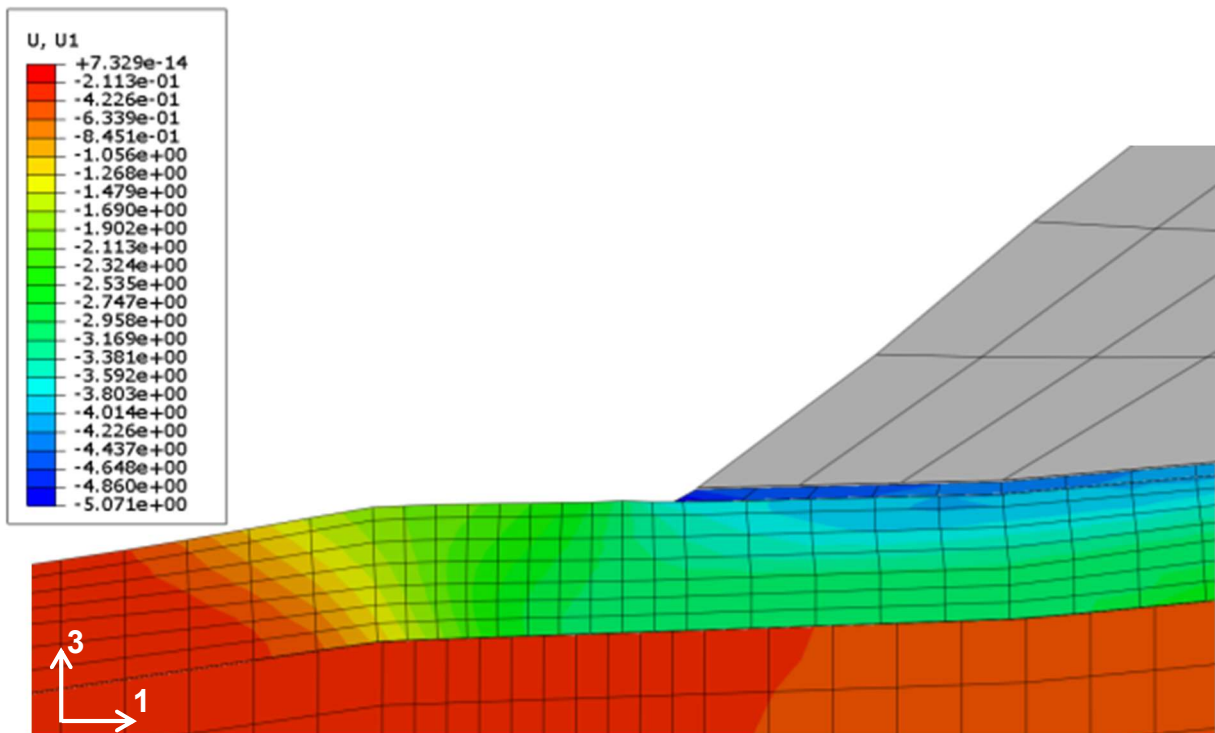


Bild 14: Detail: Horizontale Verschiebungen des Baugrundes in [m] im Bereich des Haldenfußes am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A'₂₀₁₈

In Bild 15 sind die Bereiche horizontaler Dehnungen (positiv) und Stauchungen (negativ) in der Basisabdichtung unterhalb der Rückstandshalde am Ende des Untersuchungszeitraumes als Bandbreiten dargestellt. Sie betragen zwischen 2 % Stauchung und 4 % Dehnung. Eine detailliertere Darstellung der Dehnungen befindet sich in Kapitel 10.1.

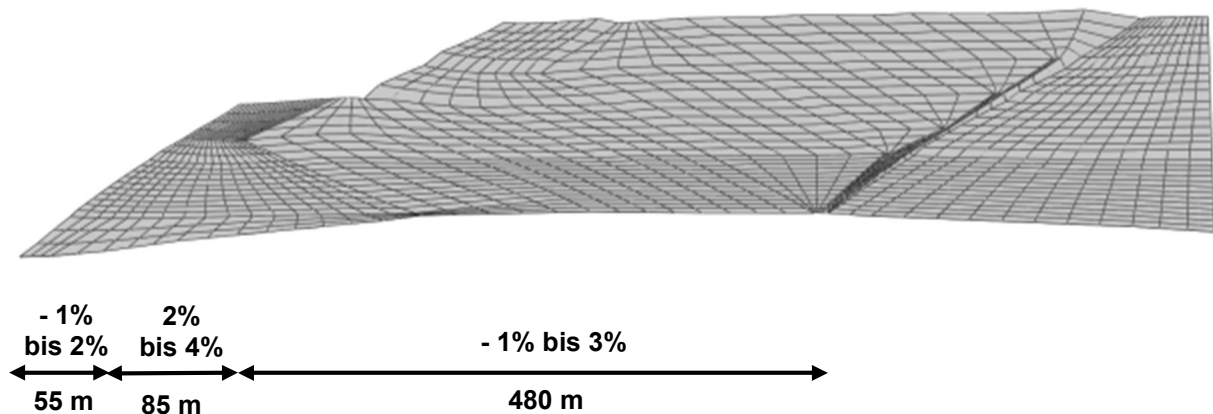


Bild 15: Horizontale Dehnungen und Stauchungen der Basisabdichtung unterhalb der Halde des Schnittes A-A'₂₀₁₈

9.2 Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes C-C'₂₀₁₈

9.2.1 Vertikale Spannungen und Verschiebungen

Die berechneten vertikalen Spannungen am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 16 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenmantels der unteren Schüttscheibe gemittelte rechnerische Vertikalspannung beträgt rd. 1.400 kN/m².

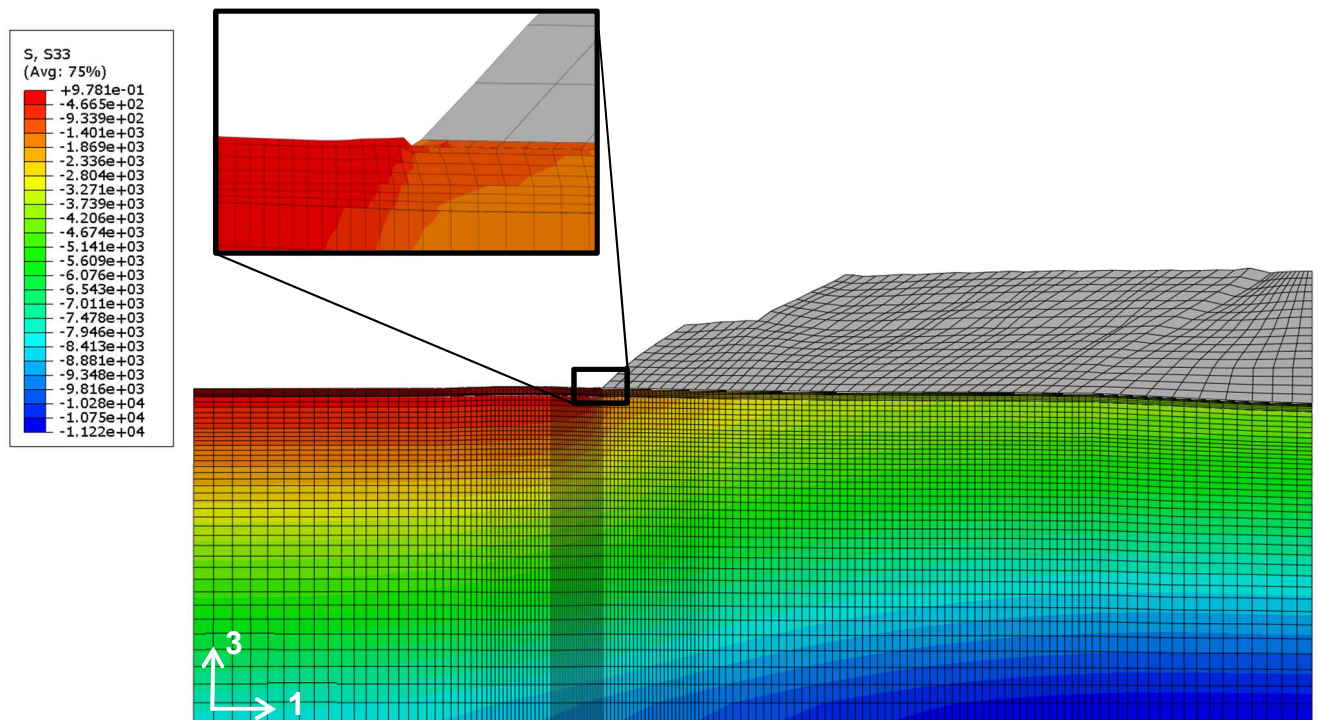


Bild 16: Vertikale Spannungen in $[\text{kN/m}^2]$ am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'₂₀₁₈

In den Bildern 17 und 18 sind die berechneten vertikalen Verschiebungen des Baugrundes und der Basisabdichtung für das Ende des Untersuchungszeitraumes dargestellt. Die berechneten maximalen Setzungen unter der Halde betragen bis zu 3,8 m. Im Bereich des Haldenfußes betragen die Setzungen rd. 1,1 m. Die rechnerischen Hebungen betragen, bezogen auf die Ausgangskoordinaten, bis zu 1,3 m. Der Bereich der maximalen Hebungen liegt vor dem Haldenfußpunkt.

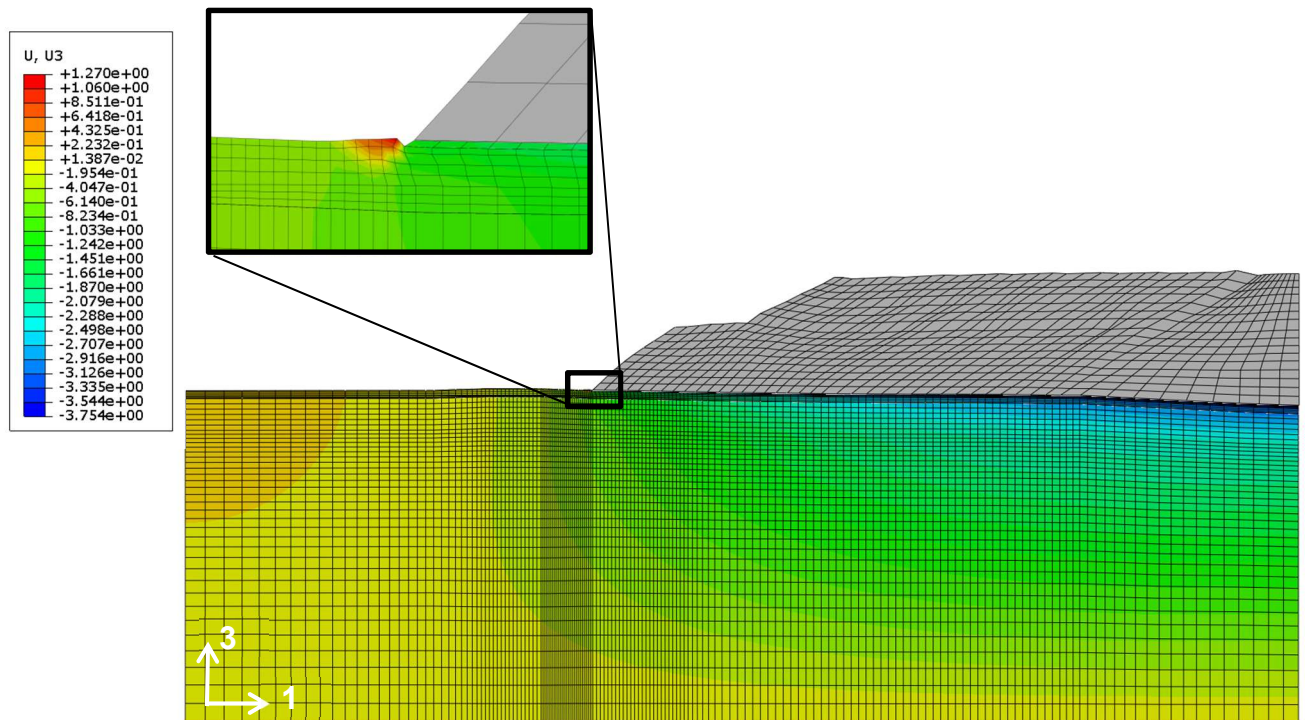


Bild 17: Vertikale Verschiebungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes C-C'₂₀₁₈

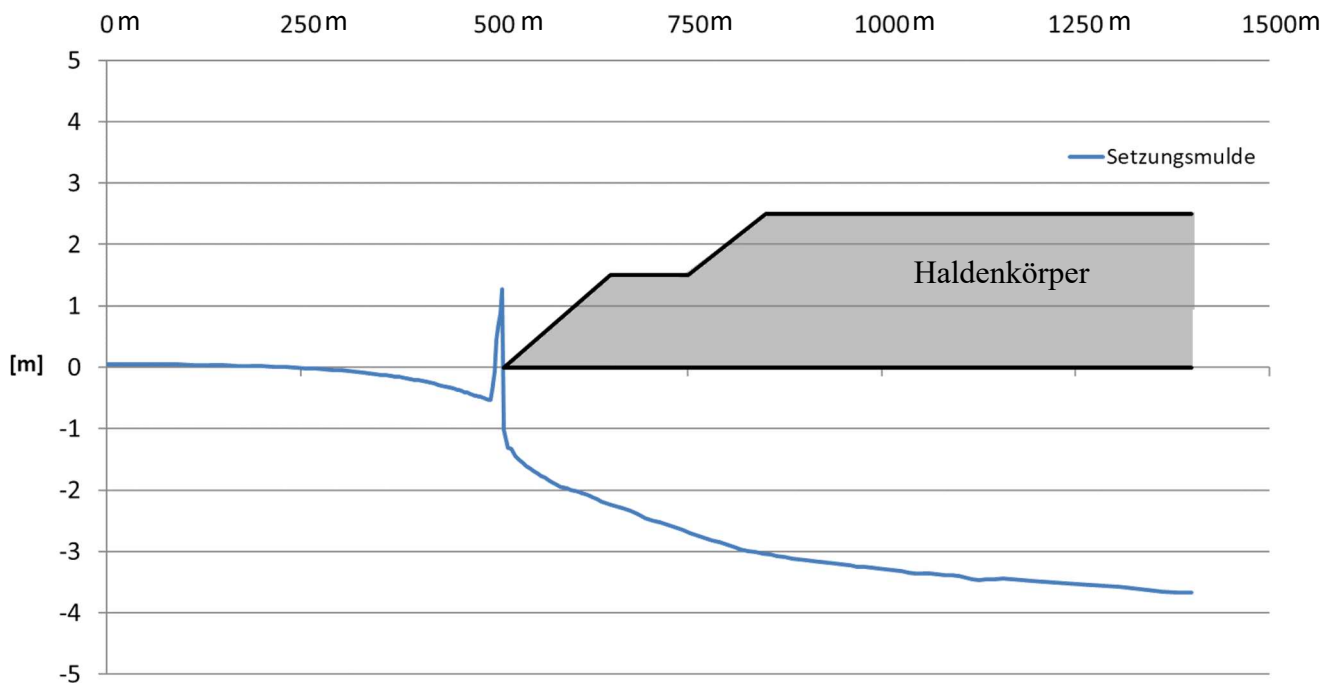


Bild 18: Vertikale Verschiebungen der Geländeoberfläche/Aufstandsfläche in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'₂₀₁₈, Setzungen negativ

9.2.2 Schubspannungen

Die berechneten Schubspannungen im Baugrund am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 19 dargestellt. Die in der Haldenaufstandsfläche im Bereich des Haldenmantels der unteren Schüttscheibe gemittelte rechnerische Schubspannung beträgt rd. 550 kN/m².

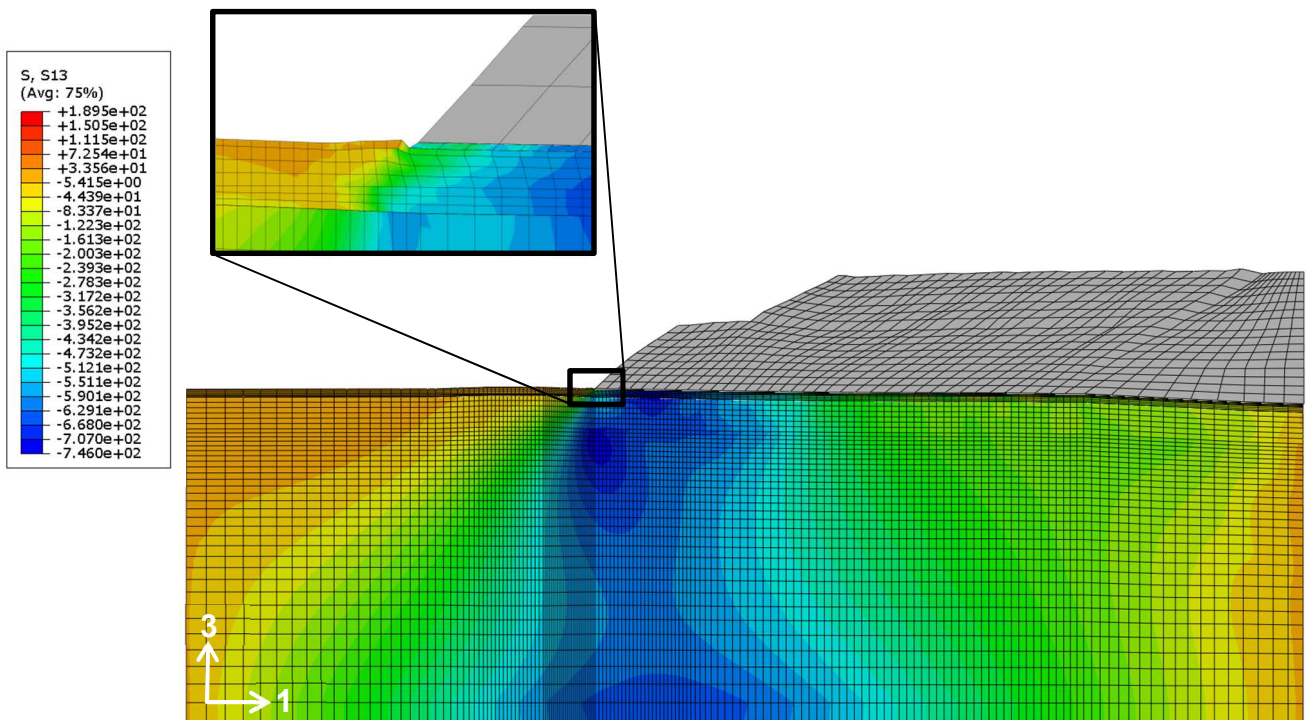


Bild 19: Schubspannungen in [kN/m²] am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'₂₀₁₈

9.2.3 Horizontale Spannungen, Verschiebungen und Dehnungen

Die berechneten horizontalen Spannungen des Baugrundes und der Basisabdichtung sind als Konturplot in Bild 20 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenmantels der unteren Schüttscheibe gemittelte rechnerische horizontale Spannung beträgt rd. 1.065 kN/m^2 .

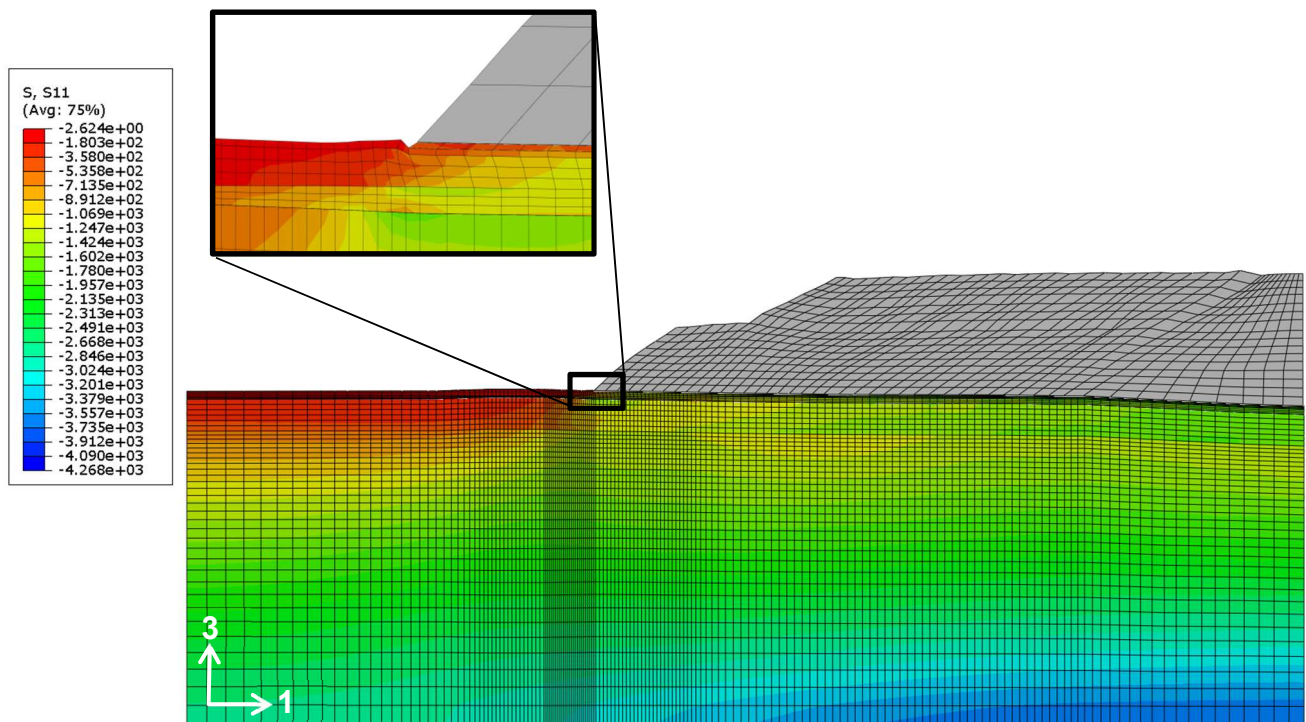


Bild 20: Horizontale Spannungen in $[\text{kN/m}^2]$ am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'2018

Die berechneten horizontalen Verschiebungen des Baugrundes sind in den Bildern 21 und 22 als Konturplots dargestellt. Die maximale horizontale Verschiebung des Haldenfußpunktes in der Aufstandsfläche beträgt rd. 4,5 m. Die berechnete maximale horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit $v_{h,\max}$ beträgt rd. 21 cm/a und tritt im ersten Jahr nach Schüttende auf. Bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes 50 Jahre nach Schüttende stellt sich ein degressiver bis konstanter Verlauf der horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeit mit Werten rd. 5 cm/a ein.

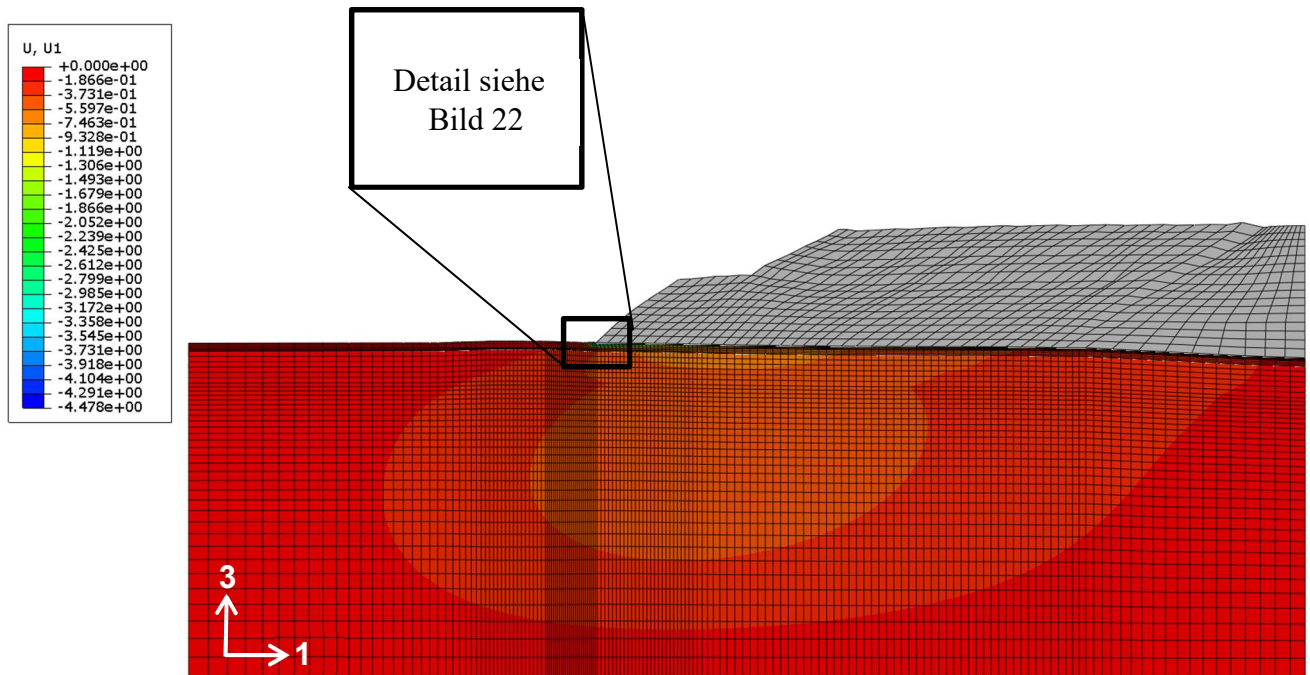


Bild 21: Horizontale Verschiebungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'₂₀₁₈

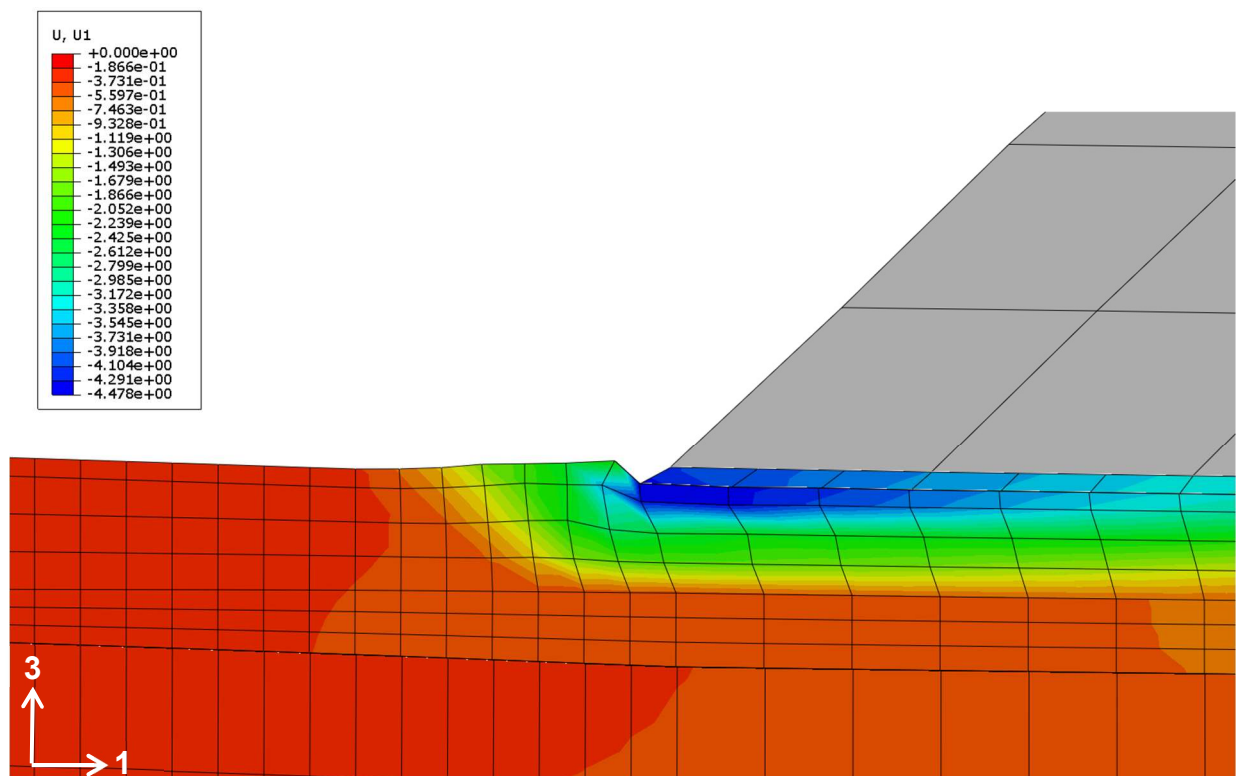


Bild 22: Detail: Horizontale Verschiebungen des Baugrundes in [m] im Bereich des Haldenfußes am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'₂₀₁₈

In Bild 23 sind die Bereiche horizontaler Dehnungen (positiv) und Stauchungen (negativ) in der Basisabdichtung unterhalb der Rückstandshalde am Ende des Untersuchungszeitraumes als Bandbreiten dargestellt. Die Bandbreite liegt zwischen 1 % Stauchung und 5 % Dehnung. Eine detailliertere Darstellung der Dehnungen befindet sich in Kapitel 10.1.

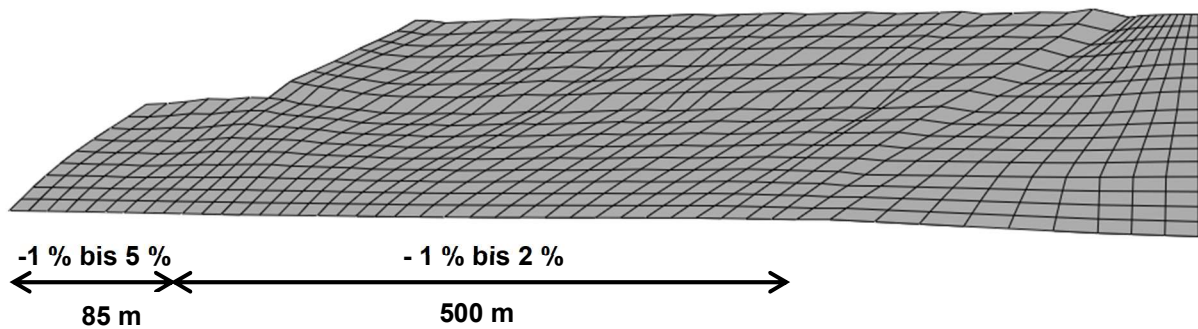


Bild 23: Horizontale Dehnungen und Stauchungen der Basisabdichtung im Bereich des Haldenfußes unterhalb der Halde im Schnitt C-C'₂₀₁₈, Endzustand

9.3 Vergleich der Berechnungsergebnisse

Die maßgebenden Werte der Schnitte A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ sind in Tabelle 7 dargestellt.

	Schnitt A-A' ₂₀₁₈	Schnitt C-C' ₂₀₁₈
Horizontale Verformung am Ende des Betrachtungszeitraumes am Haldenfuß U1 [m]	5,1	4,5
Horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit V_{h,max,Schüttende} [cm/a]	18	21
Horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit V_{h, > 70a} [cm/a]	4	5
Max. Dehnung der Basisabdichtung am Ende des Betrachtungszeitraums [%]	4	5

Tabelle 7: Vergleich der Berechnungsergebnisse

10 Vorgaben zur Bemessung des Systems Basisabdichtung sowie zum Monitoring im Rahmen der Beobachtungsmethode

10.1 Charakteristische Setzungs- und Dehnungsverteilungen

Zur Bemessung des Systems Basisabdichtung (Dichtungsschicht und Entwässerungselemente) benötigt die upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH (upi) Angaben zu den charakteristischen Setzungs- und Dehnungsverteilungen.

Aus den vorgenannten Untersuchungen (Kap. 8 und 9) werden für die Schnitte A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ die prognostizierten Setzungs- und Dehnungsverteilungen in der Aufstandsfläche der geplanten Haldenerweiterung dokumentiert. Betrachtet wird dabei jeweils der maßgebende Bereich am Ende der Gesamtbetrachtungsdauer von mindestens 71 Jahren (21 Jahre Beschüttung und 50 Jahre Nachbetriebsphase). Dieser Bereich liegt unabhängig vom betrachteten Schnitt unterhalb der Halde im Bereich des Böschungsfußes. Dehnungen werden mit positivem Vorzeichen, Stauchungen mit negativem Vorzeichen dargestellt. Die Dehnungen und Stauchungen sind dimensionslos.

Die generalisierte Setzungsmulde für die Erweiterungsfläche der Rückstandshalde Hattorf basiert auf den Setzungskurven der Schnitte A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ (Bild 10 und 18). Zur Erstellung der generalisierten Setzungsmulde werden die vertikalen Verschiebungen bedingt durch fallendes oder ansteigendes Gelände (Bild 24) sowie der Anteil der gleichmäßigen Setzungen unter der Halde von den berechneten Setzungen abgezogen.

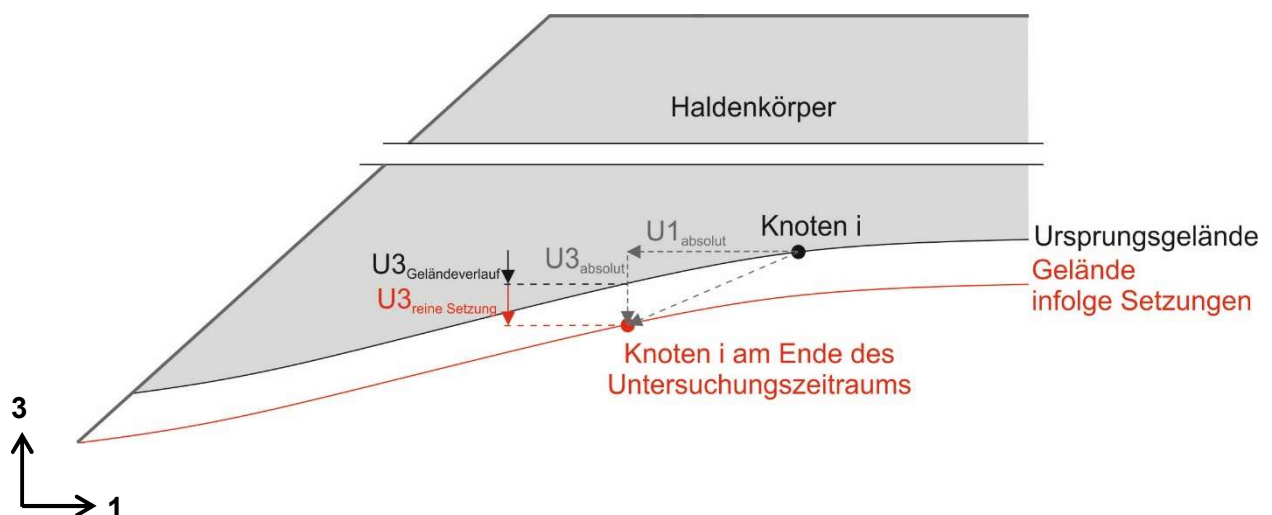


Bild 24: Berücksichtigung der Geländeneigung

Bild 25 zeigt die daraus resultierenden Setzungskurven der Schnitte A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ sowie die generalisierte Setzungsmulde. Die generalisierte Setzungsmulde ist v.a. für die Bemessung der Entwässerung der Haldenerweiterung von Bedeutung. Daher wird die generalisierte Setzungsmulde nur unter der geplanten Erweiterungsfläche dargestellt. Für die Entwässerungsplanung wird der Haldenfuß der Schnitte A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈ in den Nullpunkt verschoben.

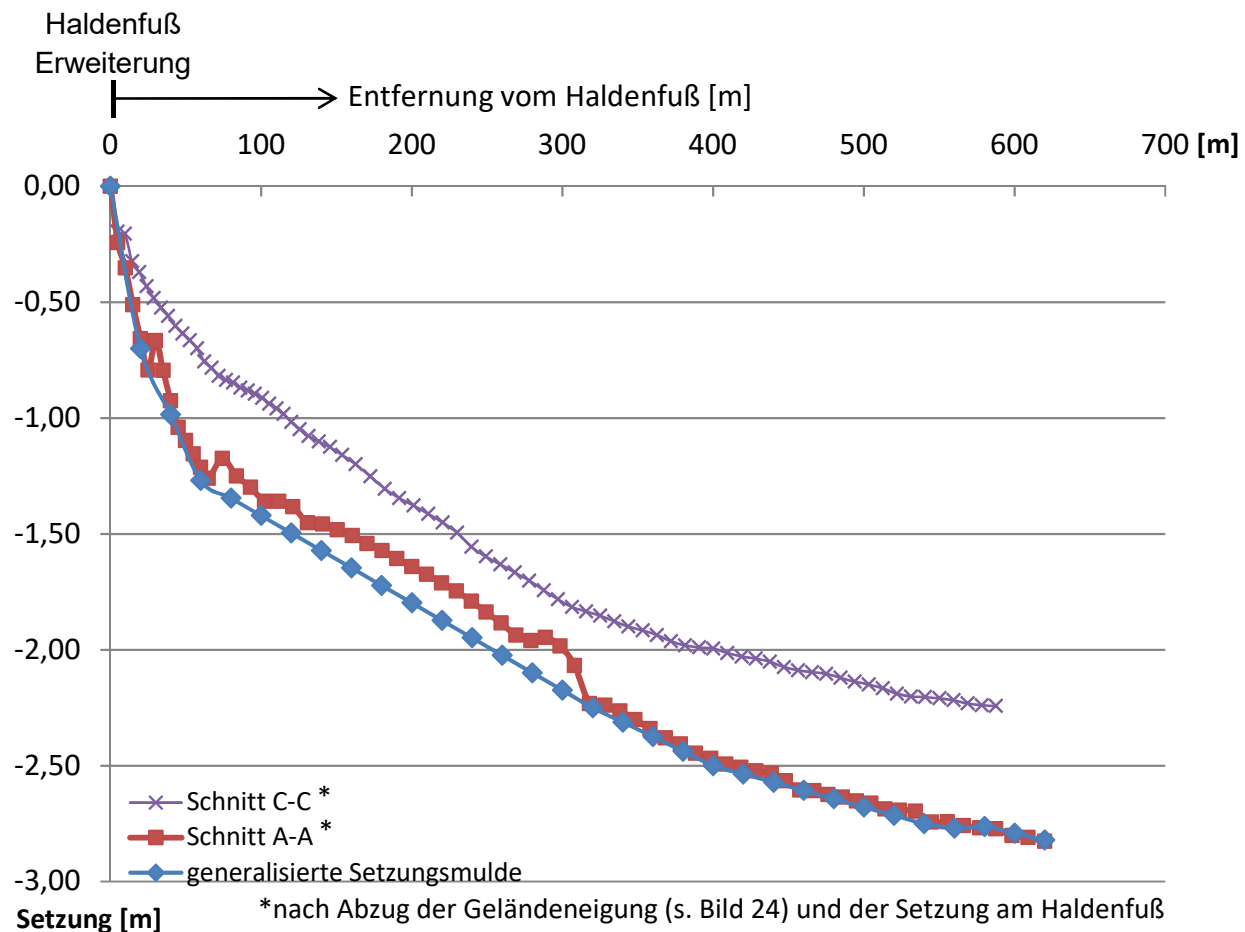


Bild 25: Generalisierte Setzungsmulde und zu Grunde liegende vertikale Verschiebungen der Geländeoberfläche/Aufstandsfläche in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes der Schnitte A-A'₂₀₁₈ und C-C'₂₀₁₈, Setzungen negativ

Bild 26 zeigt die generalisierte Setzungsmulde für die Erweiterungsfläche der Rückstandshalde Hattorf, die der Bemessung der Entwässerungselemente mit Kennzeichnung deren setzungsbedingter Neigungsänderung zugrunde gelegt werden kann. Für Detailplanungen werden die Zahlenwerte der Kurve aus Bild 26 in Tabelle 8 angegeben.

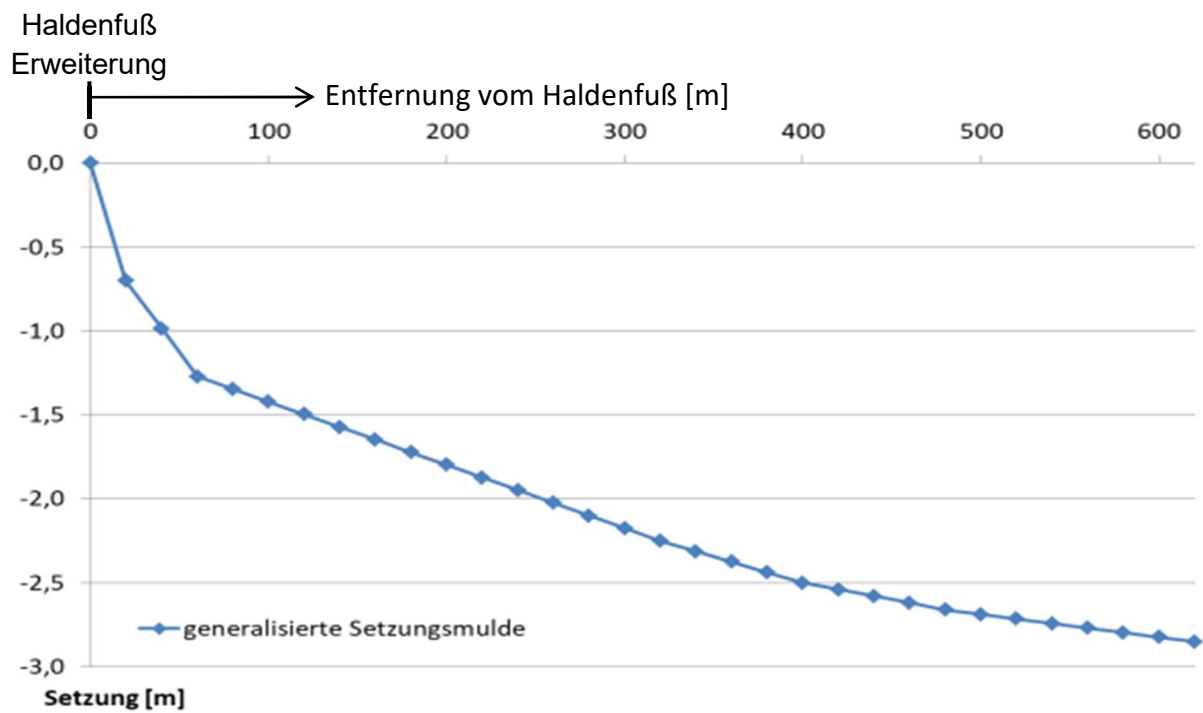


Bild 26: Generalisierte Setzungsmulde unter der geplanten Haldenerweiterung

Station unter der Halde in [m], beginnend am Böschungsfuß	Setzung [m]
0	0,00
20	-0,70
40	-0,99
60	-1,27
80	-1,35
100	-1,42
120	-1,50
140	-1,57
160	-1,65
180	-1,72
200	-1,80
220	-1,87
240	-1,95
260	-2,02
280	-2,10
300	-2,17
320	-2,25
340	-2,31
360	-2,38
380	-2,44
400	-2,50
420	-2,54
440	-2,58
460	-2,62
480	-2,66
500	-2,69
520	-2,71
540	-2,74
560	-2,77
580	-2,80
600	-2,82
620	-2,85

Tabelle 8: Generalisierte Setzungsmulde

Bild 27 zeigt die Dehnungsverteilungen für den Schnitt A-A'₂₀₁₈. Die maximale Dehnung beträgt rd. 4 % und liegt unter der Rückstandshalde rd. 75 m vom Böschungsfuß entfernt.

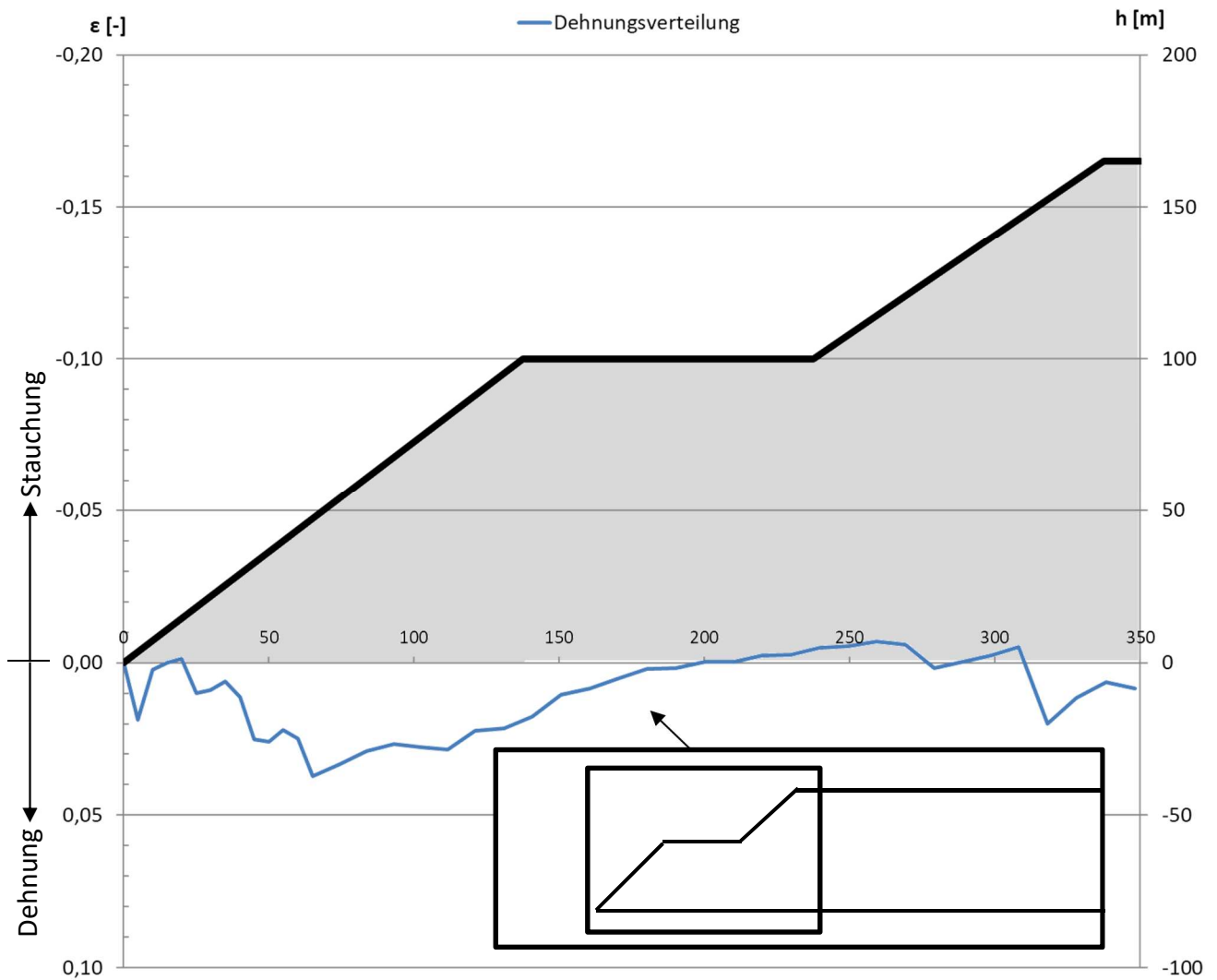


Bild 27: Dehnungsverteilung im Schnitt A-A'₂₀₁₈

Bild 28 zeigt die Dehnungsverteilung für den Schnitt C-C'₂₀₁₈. Die maximale Dehnung beträgt rd. 5 % und liegt unter der Rückstandshalde rd. 20 m vom Böschungsfuß entfernt.

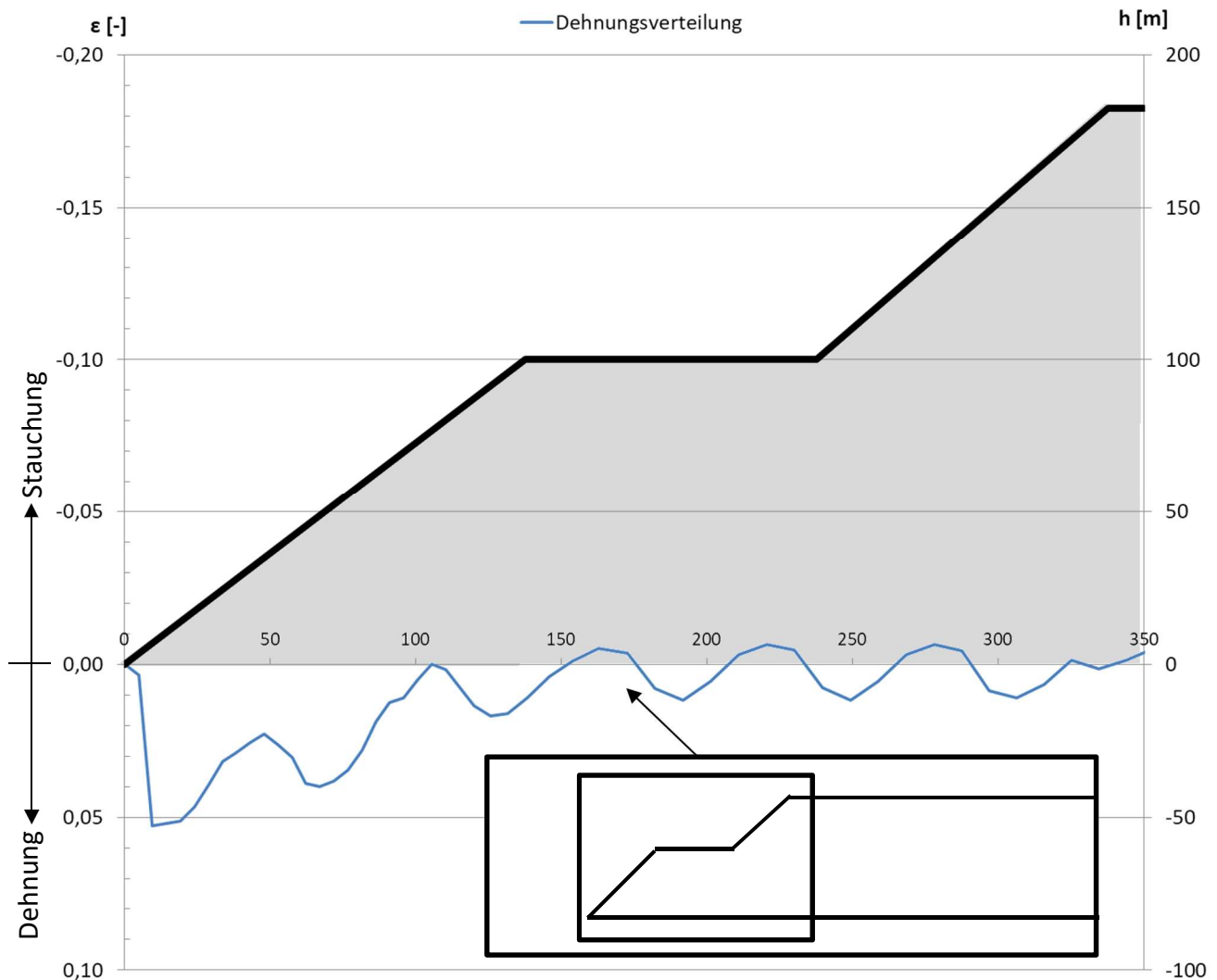


Bild 28: Dehnungsverteilung im Schnitt C-C'₂₀₁₈

10.2 Monitoring im Rahmen der Beobachtungsmethode

Das gesamte Projekt ist gemäß DIN EN 1997-1 in die Geotechnische Kategorie GK 3, dies ist die Kategorie mit dem höchsten Schwierigkeitsgrad, einzuordnen.

Daher ist im Sinne der Beobachtungsmethode, aufbauend auf den aktuell durchzuführenden Messungen und den jahrzehntelangen Erfahrungen mit den installierten Messpunkten, ein geodäti-

sches und geotechnisches Monitoringprogramm für die Betriebs- und die Nachbetriebsphase der Haldenerweiterung zu entwickeln und mit den Sachverständigen und Fachgutachtern abzustimmen.

Die geodätischen Messungen müssen in regelmäßigen Intervallen die horizontalen und vertikalen Verschiebungen an der Geländeoberfläche erfassen, insbesondere im Bereich des (endgültigen) Haldenfußes. Die Intervalle sind abhängig vom Schüttnbetrieb und von den jeweils gemessenen Verschiebungsgrößen und -geschwindigkeiten. Ggf. sind besondere Schutzgüter intensiver zu überwachen. Zu erfassen sind an der Geländeoberfläche die horizontalen und vertikalen Verschiebungen sowie die jeweiligen Verschiebungsgeschwindigkeiten.

Zur Bewertung kritischer Zustände sind die horizontalen Verschiebungsraten der numerischen Untersuchungen (Kap. 9) heranzuziehen. Tabelle 9 fasst die berechneten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten für das KSV der unterschiedlichen Schnitte nochmals zusammen.

	Schnitt A-A'₂₀₁₈	Schnitt C-C'₂₀₁₈
Horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit $v_{h,max,Schüttende}$ [cm/a]	18	21

Tabelle 9: Berechnete horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten

Die geotechnischen Messungen bestehen im Wesentlichen aus Inklinometermessungen zur Feststellung der horizontalen Verschiebungen unterhalb der Geländeoberfläche. Die Messintervalle sind in Abhängigkeit vom Schüttnbetrieb und von den jeweils gemessenen Verschiebungsgrößen und -geschwindigkeiten festzulegen. Die Köpfe der Inklinometer sind bei jeder Inklinometermessung geodätisch einzumessen, damit Rückschlüsse auf die Verschiebungen des Inklinometerfußpunktes möglich sind.

Die Festlegung der Überwachungswerte des Monitoringprogramms kann auf Basis von Tabelle 9 erfolgen. Bei anhaltenden, signifikanten Abweichungen der Messwerte von den prognostizierten Werten ist durch einen Sachverständigen eine Bewertung der Situation vorzunehmen. Ggf. sind aus dieser Bewertung dann weitere Maßnahmen abzuleiten.

10.3 Anschüttung an die bestehende Rückstandshalde

Die geplante Haldenerweiterung schließt an die Westseite der bestehenden Rückstandshalde an. Im südlichen Bereich erfolgt dies etwa bei der bestehenden Stationierung + 460. Das Heranschütten an die Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde erfolgt aus nordwestlicher bis westlicher Richtung. Geschüttet wird nur eine untere Scheibe mit einer Höhe von rd. 100 m. Die untere Schüttscheibe, die eine Höhe von nur rd. 60 % der Höhe der bestehenden Halde aufweist, dient als stabilisierende Vorschüttung der bestehenden Südwestflanke. Die bisher verformten Bereiche werden überschüttet. Dadurch, dass diese Schüttscheibe eine deutlich geringere Höhe als die bestehende Halde aufweist, sind Verschiebungen, wie sie an der bestehenden Südwestflanke gemessen wurden, nicht zu erwarten (Kap. 8 und 9). Im Bereich östlich der Stationierung +460 ändert die Haldenerweiterung an der bestehenden Situation nichts.

10.4 Überprüfung der Baugrundsituation der einzelnen Beschüttungsabschnitte

Die geplante Haldenerweiterung soll in einzelnen Abschnitten beschüttet werden. Aufgrund der Komplexität des Systems Halde, Basisabdichtung und Baugrund sowie der Größe des Vorhabensgebietes sind die in unsere Untersuchungen eingegangenen Parameter zum Baugrund (Schichtdicken, bodenmechanische Kennwerte etc.) zu überprüfen. Dies soll abschnittsweise im Zuge der Flächenvorbereitung erfolgen. K+S lässt durch einen geotechnischen Sachverständigen überprüfen, ob die den Nachweisen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1754/01 zugrunde liegenden geometrischen und stofflichen Randbedingungen den Verhältnissen in den einzelnen Beschüttungsabschnitten angemessen entsprechen. Im Bedarfsfall sind für einzelne Teilbereiche der Erweiterungsfläche zusätzliche Untersuchungen durchzuführen. Dieser Vorgehensweise wird aus fachlicher Sicht ausdrücklich zugestimmt.

11 Schlussbemerkung / Zusammenfassung

Im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1754/01 wurden für geplante Haldenerweiterung die Standsicherheit nachgewiesen und Verformungsprognosen erstellt. Dazu erfolgten umfangreiche numerische, zeitvariante Berechnungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM). Der Gesamtbetrachtungszeitraum beträgt bis zu 73 Jahre und setzt sich aus der bis zu 23 Jahre dauernden Schüttphase sowie der rd. 50 Jahre dauernden Nachbetrachtungsphase zusammen. Damit wird ein ausreichend langer Zeitraum für die Nachbetriebsphase zur Beurteilung des Verformungsverhaltens untersucht.

Auf Basis der Randbedingungen wird mit den numerischen Untersuchungen gezeigt, dass die geplante Haldenerweiterung im Sinne des in Kapitel 7 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 können die zu erwartenden Verformungen und -geschwindigkeiten sowie Dehnungen abgeleitet bzw. prognostiziert werden. Sie bilden die Basis für die Bemessung des Systems Basisabdichtung sowie für die Ausgestaltung des Monitoringprogramms.

Die vorgenannten Untersuchungsergebnisse zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit stimmen in der Größenordnung mit den in [U5] und [U6.5] dokumentierten Ergebnissen und Erfahrungen überein.

Im Rahmen der Beobachtungsmethode ist ein geodätisches und geotechnisches Monitoringprogramm zu erarbeiten und mit dem geotechnischen Sachverständigen sowie Fachgutachtern abzustimmen.

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

Projektbearbeitung: Annemarie Netthöfel M.Sc.

Eva Teutsch M.Sc.

Projektleitung: Dr.-Ing. Steffen Leppla


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




 Dipl.-Ing. Matthias Seip
 -Geschäftsführender Gesellschafter

Verteiler:

- | | |
|---|--------------|
| - K+S KALI GmbH | 5 x Original |
| - K+S Aktiengesellschaft, Kassel | 1 x Kopie |
| - upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH | 1 x Kopie |
| - z.d.A. (IK1754, Se) | 2 x Kopie |