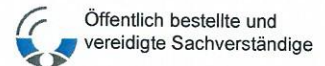


## **Anlage 2:**

Ingenieursozietät Prof. Dr.-Ing. Katzenbach GmbH:  
Sachverständigengutachten Nr. IK1713/01 K+S Kali  
GmbH, Werk Werra, Standort Hattorf, Numerische  
Untersuchungen zur Standsicherheit und  
Gebrauchstauglichkeit für die geplante  
Haldenerweiterung. Darmstadt, 10.02.2017

**INGENIEURSOZIENTÄT PROFESSOR DR.-ING. KATZENBACH GMBH**  
VEREIDIGTE UND NACH BAUORDNUNGSRECHT ANERKANNTE SACHVERSTÄNDIGE FÜR GEOTECHNIK



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

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

**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/Le/Te  
IK1713  
10.02.2017

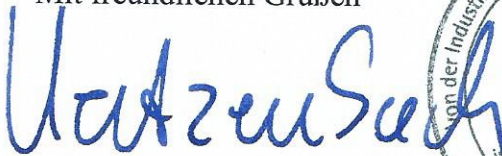
**K+S KALI GmbH · Werk Werra · Standort Hattorf**

hier: Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1713/01 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. IK1713/01 vom 10.02.2017 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  
-Institutsdirektor-



  
Dipl.-Ing. Steffen Leppla  
-Projektleiter-



**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



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/Le/Te  
IK1713  
10.02.2017

## SACHVERSTÄNDIGEN-GUTACHTEN Nr. IK1713/01

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

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

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

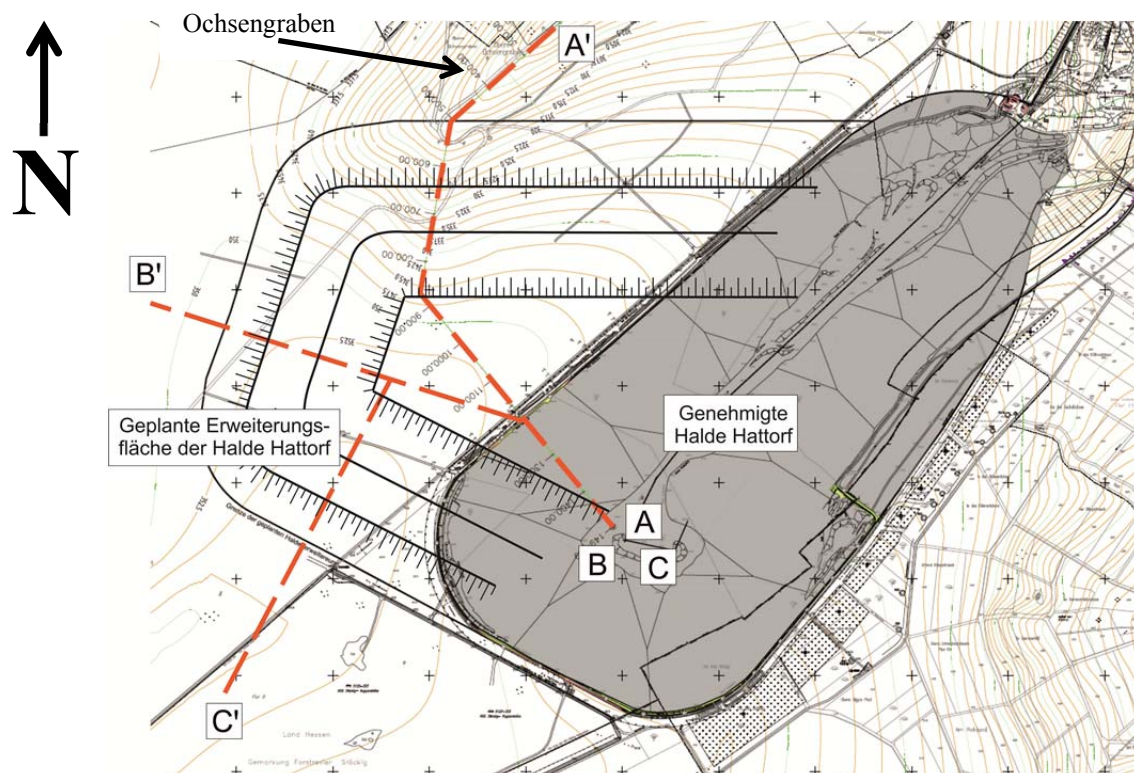
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
<b>1 Vorgang</b>	<b>4</b>
<b>2 Unterlagen</b>	<b>6</b>
<b>3 Geplante Erweiterung</b>	<b>9</b>
3.1 Topographie	9
3.2 Baugrundverhältnisse	11
3.3 Abmessungen und Geometrie	12
<b>4 Numerische Modellbildung</b>	<b>13</b>
<b>5 Materialkennwerte für die numerischen Untersuchungen</b>	<b>18</b>
5.1 Baugrund	18
5.2 Salzmechanische Parameter des Rückstandssalzes	21
<b>6 Kalibrierung des numerischen Modells</b>	<b>23</b>
<b>7 Nachweis- und Sicherheitskonzept</b>	<b>25</b>
<b>8 Numerische Basisuntersuchungen</b>	<b>27</b>
8.1 Numerische Basisuntersuchungen zur Standsicherheit	28
8.2 Numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit	29
8.2.1 Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes A-A' für das KSV	30
8.2.1.1 Vertikale Spannungen und Verformungen	30
8.2.1.2 Schubspannungen	33
8.2.1.3 Horizontale Spannungen, Verschiebungen und Dehnungen	33
8.2.2 Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes A-A' für das FSV	36
8.2.2.1 Vertikale Spannungen und Verformungen	36
8.2.2.2 Schubspannungen	39
8.2.2.3 Horizontale Spannungen, Verformungen und Dehnungen	39
8.2.3 Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes B-B' für das KSV	42
8.2.3.1 Vertikale Spannungen und Verformungen	42
8.2.3.2 Schubspannungen	45
8.2.3.3 Horizontale Spannungen, Verformungen und Dehnungen	45
8.2.4 Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes B-B' für das FSV	48
8.2.4.1 Vertikale Spannungen und Verformungen	48
8.2.4.2 Schubspannungen	51

	8.2.4.3 Horizontale Spannungen, Verformungen und Dehnungen	51
8.2.5	Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes C-C' <sub>2016</sub> für das KSV	54
	8.2.5.1 Vertikale Spannungen und Verformungen	54
	8.2.5.2 Schubspannungen	57
	8.2.5.3 Horizontale Spannungen, Verschiebungen und Dehnungen	57
8.2.6	Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes C-C' <sub>2017</sub> für das KSV	60
	8.2.6.1 Vertikale Spannungen und Verformungen	60
	8.2.6.2 Schubspannungen	63
	8.2.6.3 Horizontale Spannungen, Verschiebungen und Dehnungen	63
8.3	Vergleich der Berechnungsergebnisse	66
<b>9</b>	<b>Ergänzende numerische Untersuchungen</b>	<b>67</b>
9.1	Ergänzende numerische Untersuchungen der Standsicherheit	69
9.2	Ergänzende numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit	70
<b>10</b>	<b>Vorgaben zur Bemessung des Systems Basisabdichtung und der Entwässerungselemente sowie zur Beschüttungsphase</b>	<b>72</b>
10.1	Charakteristische Setzungs- und Dehnungsverteilungen	72
10.2	Monitoring im Rahmen der Beobachtungsmethode	77
10.3	Anschüttung an die bestehende Rückstandshalde	79
10.4	Überprüfung der Baugrundsituation der einzelnen Beschüttungsabschnitte	79
<b>11</b>	<b>Schlussbemerkung / Zusammenfassung</b>	<b>79</b>

## 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 2017 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', B-B' und C-C'

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.

Mit dem Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1312/01 vom 10.06.2014 [U5.3] wurden die Standsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit für den Schnitt A-A' mit einem vereinfachten Modell mit stark auf der sicheren Seite liegenden Parametern (Geometrie, boden- und salzmechanische Kennwerte, Modellierungstechnik) nachgewiesen.

Im gegenständlichen Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1713/01 sind die Ergebnisse unserer 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'.

## 2 Unterlagen

[U1] K+S KALI GmbH, Werk Werra:

1. Sonderbetriebsplan HA-27/12, DVS-Nr.: 3002699 vom 05.10.2012, an Regierungspräsidium Kassel, Dezernat Bergaufsicht
2. Sonderbetriebsplan HA 25/11 „Errichtung der Grundwassermessstelle GWM 22/2011 HA als Ersatz für die GWM 7 Halde Hattorf im westlichen Umfeld der ESTA-Rückstandshalde Hattorf“, DVS Nr. 3000112 vom 11.10.2011, an Regierungspräsidium Kassel, Dezernat Bergaufsicht
3. Notiz zu den Bewegungen an der Halde Hattorf vom 02.08.2013
4. Tageriss vom 29.04.2014
5. E-Mail zu den Ergebnissen der Inklinometermessungen vom 26.05.2014
6. E-Mail zu den Baugrundverhältnissen auf der Ruppersthöhe vom 05.01.2016
7. E-Mail mit Profil des Berechnungsschnittes C-C' vom 19.01.2016
8. E-Mail mit Profil des Berechnungsschnittes C-C' vom 19.12.2016

[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] upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH, Stendal:

1. Kombiniertes Schüttverfahren (KSV), idealisierter Schnitt A-A' vom Dezember 2012
2. Kombiniertes Schüttverfahren (KSV), idealisierter Schnitt B-B' vom Dezember 2012
3. Flankenschüttverfahren (KSV), idealisierter Schnitt A-A' vom Dezember 2012
4. Flankenschüttverfahren (KSV), idealisierter Schnitt B-B' vom Dezember 2012
5. Umsetzung eines nachhaltigen Rückstandsmanagements am Standort Hattorf (Haldenerweiterung Hattorf). Band 1.1.1 der Antragsunterlage, Ausführliche Vorhabensbeschreibung
  - System Basisabdichtung
  - Oberflächenabdeckung

[U4] Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach, Institutsdirektor, Vereidigter Sachverständiger, Darmstadt:

1. Sachverständigengutachten zur Langzeitstabilität von Salzhalden auf söhlig gelagertem Buntsandstein vom 18.01.1996
2. Prüfbericht VA96022-01 „Langzeitstabilität Salzhalde Hattorf“ vom 12.02.1998
3. Prüfbericht VA96022-02 „Langzeitstabilität Salzhalde Hattorf“ vom 26.03.1998
4. Prüfbericht VA97044-01 „Grundsatzstudie zur Langzeitstabilität von Salzhalden“ vom 24.08.1998
5. Sachverständigengutachten zur Langzeitstabilität der Halde Hattorf unter Berücksichtigung der geplanten Haldenerweiterung (K96012) vom 20.08.1998
6. Sachverständigen-Gutachten zu den Grundbruch- und Böschungsbruchberechnungen im Bereich der Erdgasleitung (IK0192) vom 09.11.2001
7. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK0262/01 „Grundsatzstudie zur Langzeitstabilität von Salzhalden auf Fels und Lockergestein“ vom 30.04.2003
8. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK0231/01 zur Kalibrierung der Stoffparameter anhand der vorliegenden Verformungsmessungen am Inklinometer 1 für den Haldenquerschnitt, Entwurf vom 25.06.2013

[U5] Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH, Darmstadt:

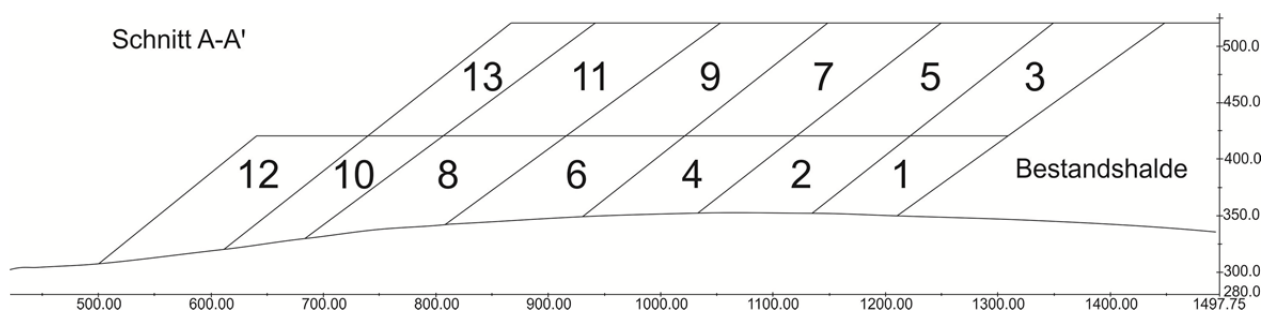
1. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1156/01 zur Beurteilung der aktuellen Standsicherheit der Haldenflanke respektive des Untergrundes im Haldenvorfeld auf der Basis der durchgeführten messtechnischen Überwachung sowie der bisher im Rahmen von Haldenbegutachtungen angefertigten Sachverständigen-Gutachten vom 02.08.2012
2. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1311/01 zu den Kernbohrungen des Festgesteins für die geplante Haldenerweiterung vom 28.05.2014
3. Sachverständigen-Gutachten Nr. IK1312/01 zu den numerischen Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit für die geplante Haldenerweiterung vom 10.06.2014
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. 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, Entwurf vom Februar 2017

- 
- [U6] Wachter, S. (2009):  
Dreidimensionale, zeitvariante stoffliche Modellierung von granularem Steinsalz.  
Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen  
Universität Darmstadt, Heft 82
- [U7] Hessisches Landesamt für Bodenforschung:  
Gutachten über die Erweiterung der Rückstandshalde des Kaliwerkes Hattorf,  
Philippsthal (Werra), Kreis Hersfeld-Rotenburg vom 13.09.1977

### 3 Geplante Erweiterung

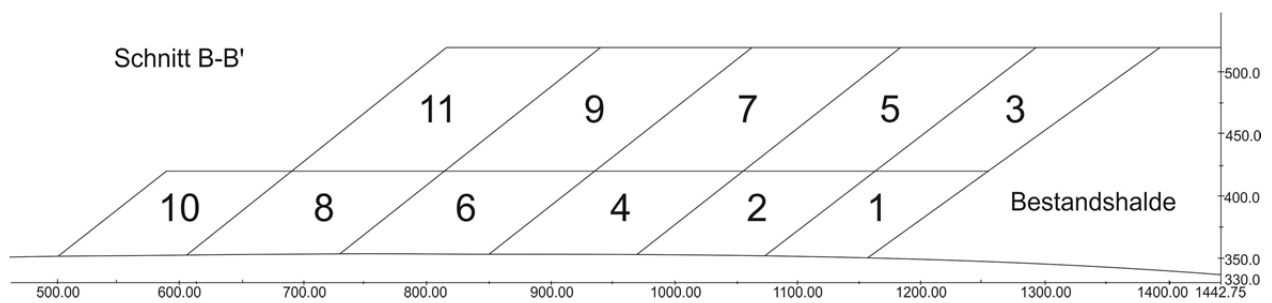
#### 3.1 Topographie

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. Die Absoluthöhe der Haldenaufstandsfläche befindet sich im südlichen Bereich bei bis zu rd. 355 mNN und im nördlichen Bereich bei rd. 305 mNN. Der Untersuchungsschnitte A-A', B-B' und C-C'<sub>2016</sub> sind [U1] und [U3] entnommen und in den Bildern 2 bis 4 zusammen mit einer möglichen Schütreihenfolge der Blöcke 1 bis 13 (Schnitt A-A' in Bild 2), 1 bis 11 (Schnitt B-B' in Bild 3) bzw. 1 bis 10 (Schnitt C-C'<sub>2016</sub> in Bild 4) dargestellt. Den Untersuchungsschnitten A-A', B-B' und C-C'<sub>2016</sub> liegt die ursprüngliche Planung der Haldenerweiterung mit einem Abstand zwischen Böschungsfuß und Vorhabensgrenze von 25 m und der Aufhaldung in 2 Schüttscheiben zugrunde. Der Schnitt C-C'<sub>2017</sub>, dem die neue Planung der Haldenerweiterung mit einem Abstand zwischen Böschungsfuß und Vorhabensgrenze von 65 m und die Aufhaldung in 3 Schüttscheiben zugrunde liegt, ist in Bild 5 dargestellt.



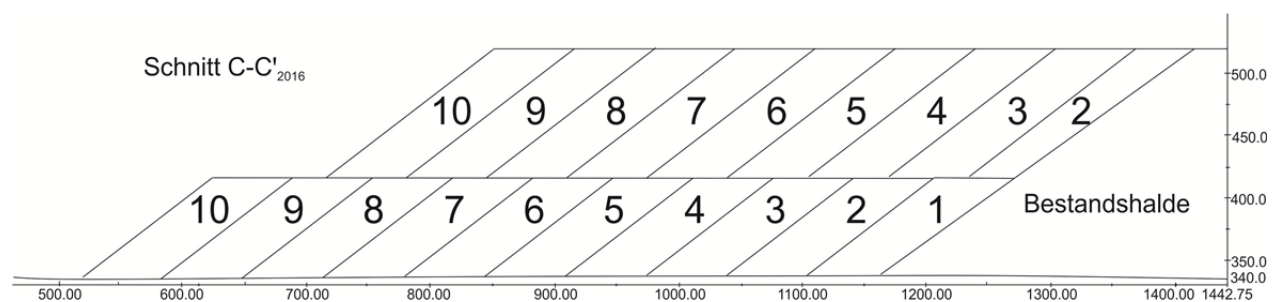
**Bild 2:** Untersuchungsschnitt A-A' mit Darstellung der blockweisen Schüttgeometrie und -reihenfolge im kombinierten Schüttverfahren (KSV)

Die Geländeneigung des Schnittes A-A' 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 B-B' mit Darstellung der blockweisen Schüttgeometrie und -reihenfolge im kombinierten Schüttverfahren (KSV)

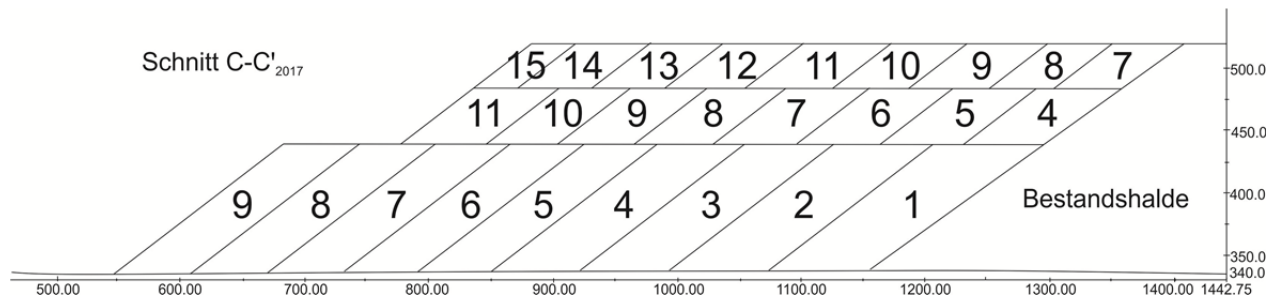
Die Geländeneigung des Schnittes B-B' beträgt am westlichen Rand der geplanten Haldenerweiterung maximal ca. 2 % (Bild 3, linker Bildrand). Dies entspricht einer maximalen Geländeneigung der Aufstandsfläche von rd. 1 Grad.



**Bild 4:** Untersuchungsschnitt C-C'\_{2016} mit Darstellung der blockweisen Schüttgeometrie und -reihenfolge im kombinierten Schüttverfahren (KSV)

Das Gelände im Schnitt C-C'\_{2016} (Bild 4) verläuft nahezu horizontal.

Infolge einer angepassten Planung der Haldengeometrie und Schüttabfolge wurde der Untersuchungsschnitt C-C'\_{2017} ergänzend untersucht. Der Schnitt C-C'\_{2017} ist [U1.8] entnommen und in Bild 5 mit einer möglichen Schütreihenfolge der Blöcke 1 bis 15 dargestellt. Das Gelände im Schnitt C-C'\_{2017} (Bild 5) verläuft nahezu horizontal. Für die Schnitte A-A' und B-B' ergeben die Berechnungen, die auf der ursprünglichen Planung basieren, für die neue Planung auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse.



**Bild 5:** Untersuchungsschnitt C-C'<sub>2017</sub> mit Darstellung der blockweisen Schüttgeometrie und -reihenfolge im kombinierten Schüttverfahren (KSV)

### 3.2 Baugrundverhältnisse

Ergänzend zu den für frühere Fragestellungen im Bereich der Halden aus Rückstandssalz realisierten Maßnahmen zur Baugrunderkundung [U4] wurden die in [U2] und [U5.2] dokumentierten projektspezifischen Baugrunduntersuchungen durchgeführt.

Gemäß den in [U2] und [U5.2] 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 und Rammsondierungen in der Tiefenlage definiert werden kann. Der Buntsandstein wurde durch die in [U5.2] beschriebenen Kernbohrungen aufgeschlossen.

Nach [U2] und [U5.2] 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.

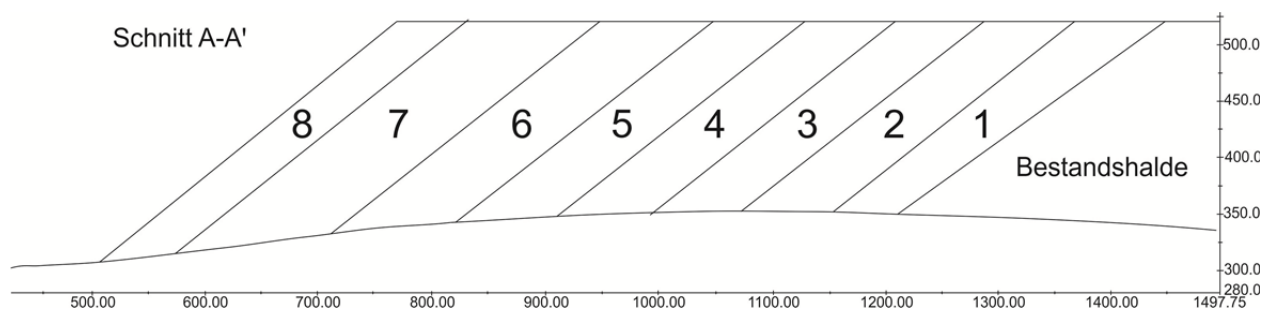
Unter der quartären Lockergesteinszone folgt der Mittlere Buntsandstein der Solling-, Hardeggen-, Detfurth- und Volpriehausenfolge (von oben nach unten). Es handelt sich im Wesentlichen um Wechselfolgen aus Sandstein und Ton-/Schluffstein [U5.2], [U7].

Im Hinblick auf die bisher in dieser Deutlichkeit ausschließlich im Inklinometer INK 1 detektierten Schwächezonen [U4.8] ist 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 [U5.4] und [U5.5] gesondert bewertete Situation an der Südwestflanke der bestehenden Halde.

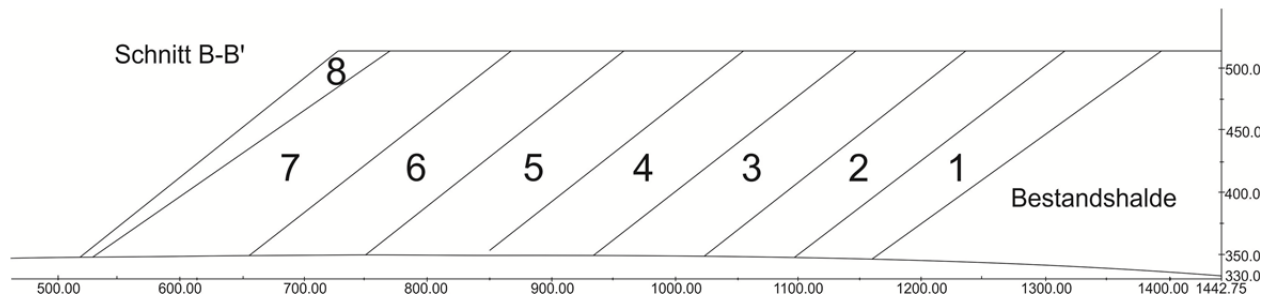
### 3.3 Abmessungen und Geometrie

Die ursprünglich geplante Haldenerweiterung ist im Grundriss in Bild 1 dargestellt. Gemäß aktueller Planung besitzt die Erweiterungsfläche eine Größe von 62 ha. Die Bilder 2 bis 5 zeigen die Untersuchungsschnitte A-A', B-B' und C-C'. 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) von Osten nach Westen (in den Bildern 2 bis 5 von rechts nach links). Das geplante Niveau des Haldentops liegt bei rd. 520 mNN. Geplant ist, dass die Kontur der Haldenböschungen im kombinierten Schüttverfahren (KSV) eine 100 m breite Berme beinhaltet. In den Bildern 2 bis Bild 5 sind die untersuchten Blockschüttungen im KSV der drei Schnitte dargestellt. Alternativ zur Aufschüttung der Halde im kombinierten Schüttverfahren wurde eine Aufschüttung im Flankenschüttverfahren (FSV) untersucht. Die Bilder 6 und 7 zeigen die Untersuchungsschnitte A-A' und B-B' für eine Aufschüttung der Haldenerweiterung im Flankenschüttverfahren (FSV).



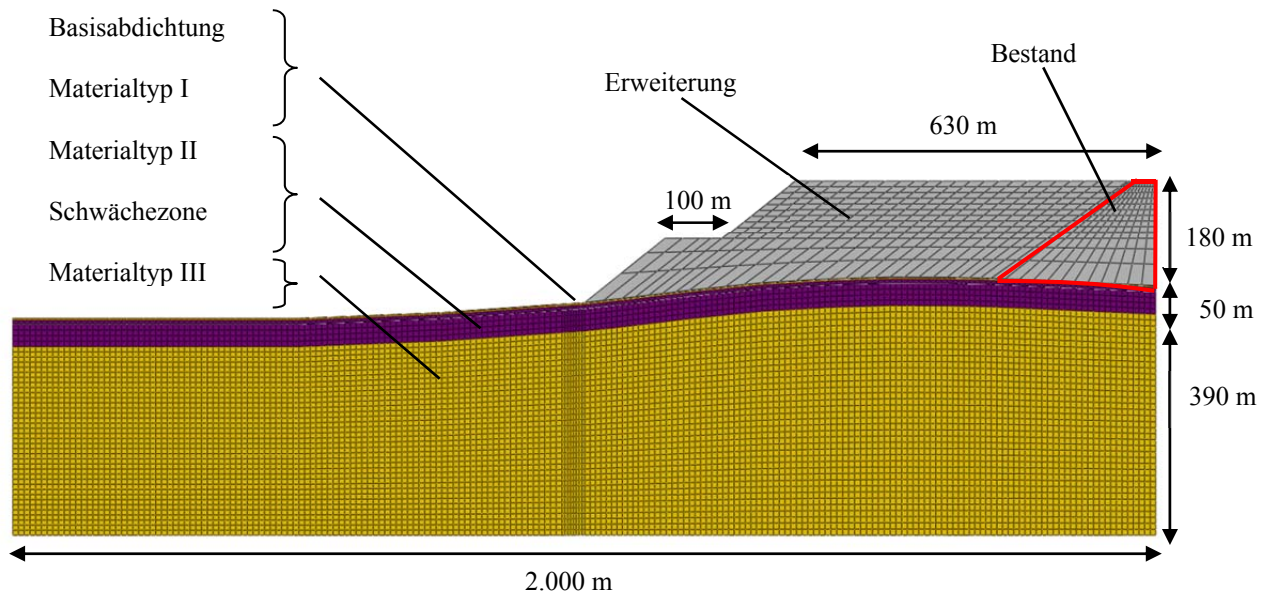
**Bild 6:** Untersuchungsschnitt A-A' mit Darstellung einer möglichen Schüttgeometrie und Schütreihenfolge im Flankenschüttverfahren (FSV)



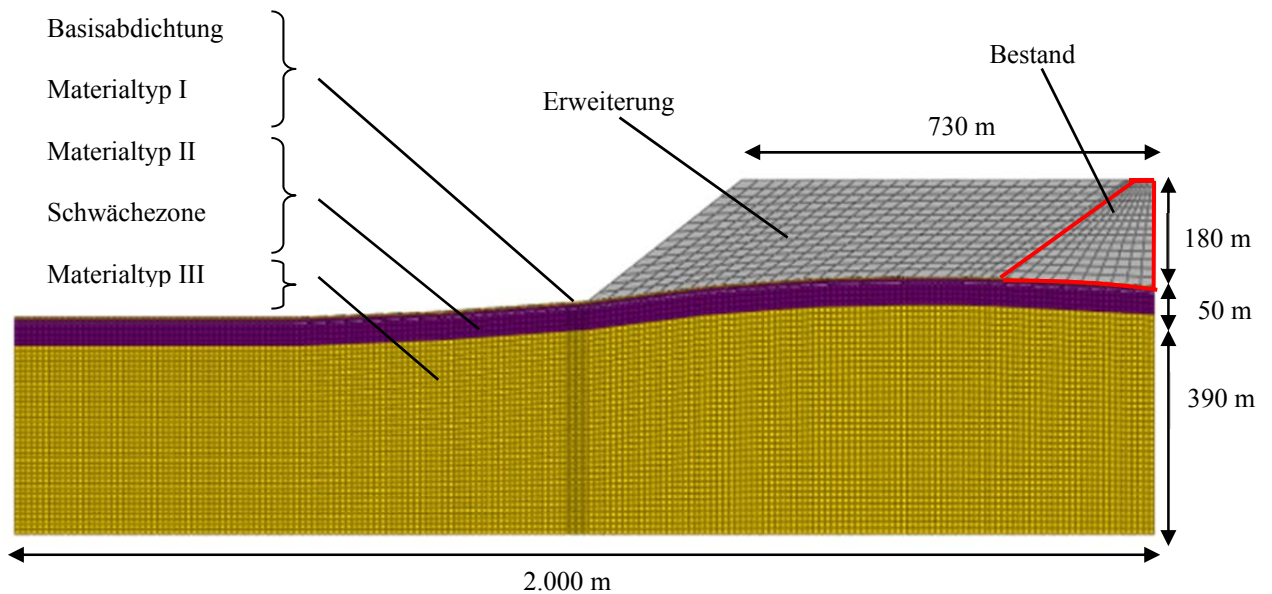
**Bild 7:** Untersuchungsschnitt B-B' mit Darstellung einer möglichen Schüttgeometrie und Schüttreihenfolge im Flankenschüttverfahren (FSV)

#### 4 Numerische Modellbildung

Die für die Untersuchung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit entwickelten numerischen Modelle des Schnittes A-A' für das kombinierte Schüttverfahren (KSV) und das Flankenschüttverfahren (FSV) sind für den Endzustand der geplanten Haldenerweiterung in den Bildern 8 und 9 dargestellt. Die Schüttabfolge wird in den Bildern 2 und 6 gezeigt.

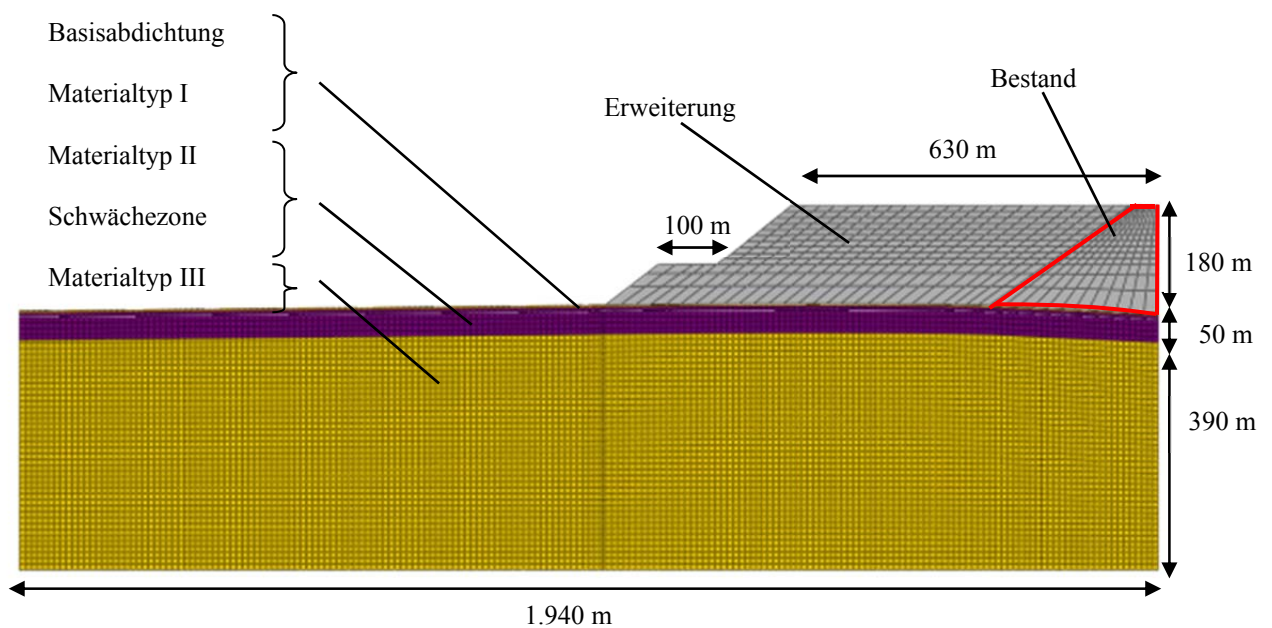


**Bild 8:** Numerisches Modell zur Untersuchung des Endzustandes der geplanten Haldenerweiterung im Schnitt A-A' mit kombiniertem Schüttverfahren (KSV)

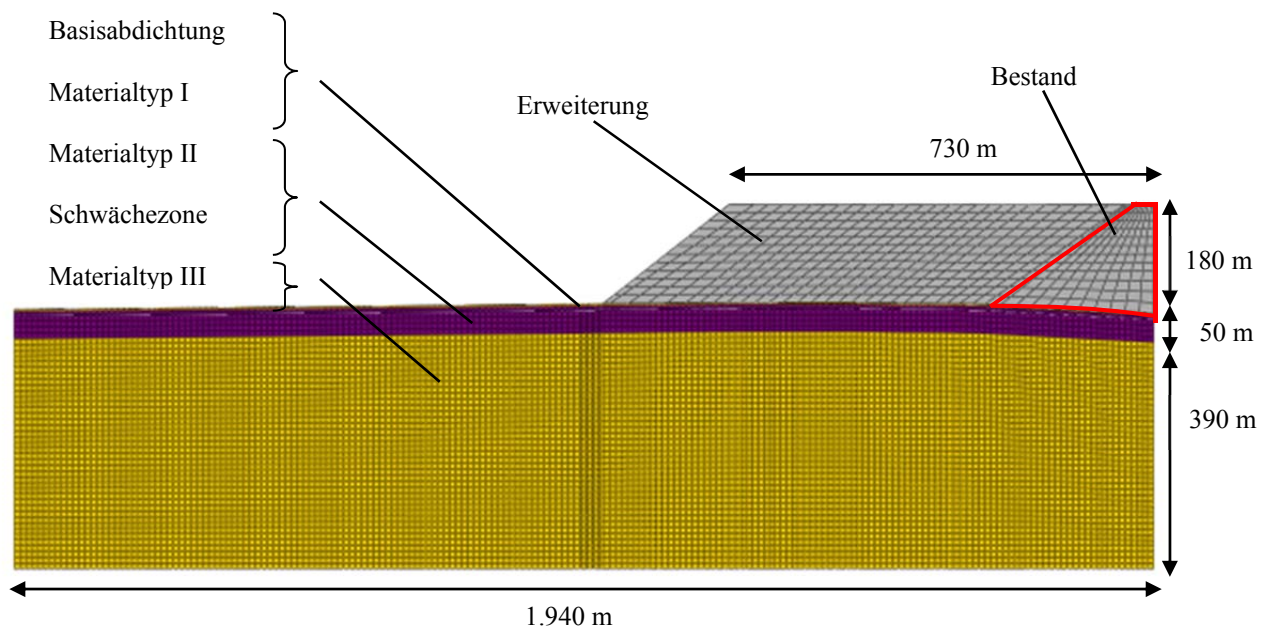


**Bild 9:** Numerisches Modell zur Untersuchung des Endzustandes der geplanten Haldenerweiterung im Schnitt A-A' mit Flankenschüttverfahren (FSV)

Die für die Untersuchung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit entwickelten numerischen Modelle des Schnittes B-B' für das KSV und das FSV sind für den Endzustand der geplanten Haldenerweiterung in den Bildern 10 und 11 dargestellt. Die Schüttabfolge wird in den Bildern 3 und 7 gezeigt.

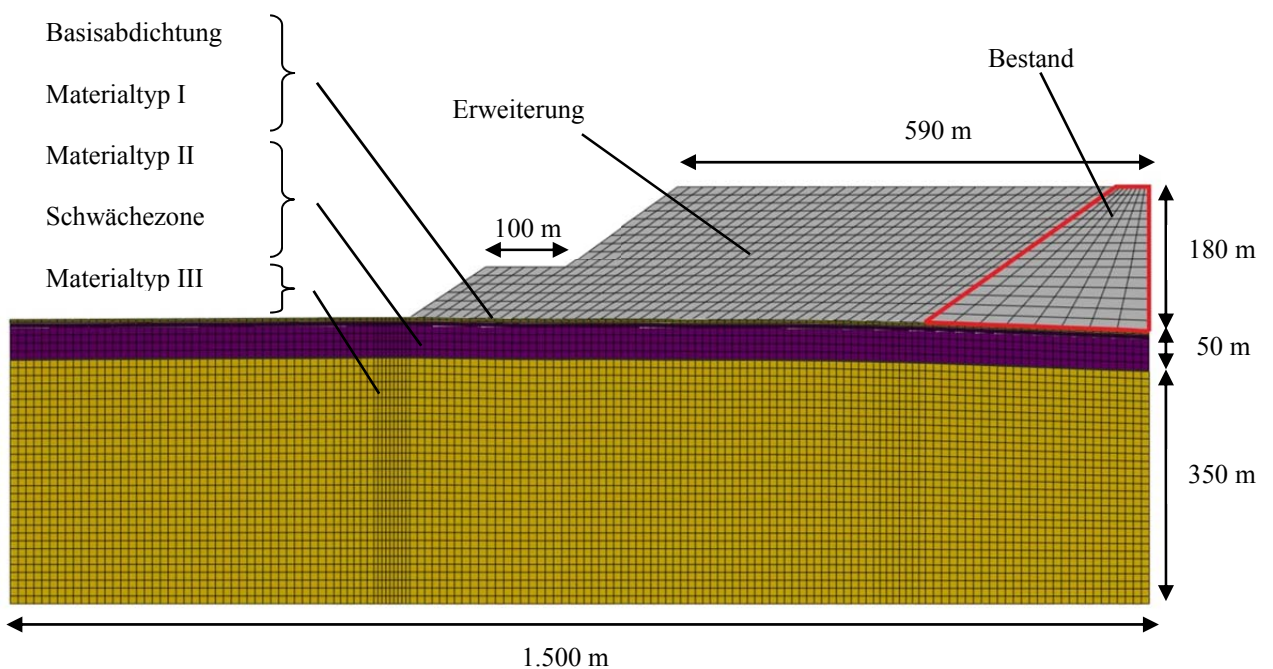


**Bild 10:** Numerisches Modell zur Untersuchung des Endzustandes der geplanten Haldenerweiterung im Schnitt B-B' mit kombinierten Schüttverfahren (KSV)

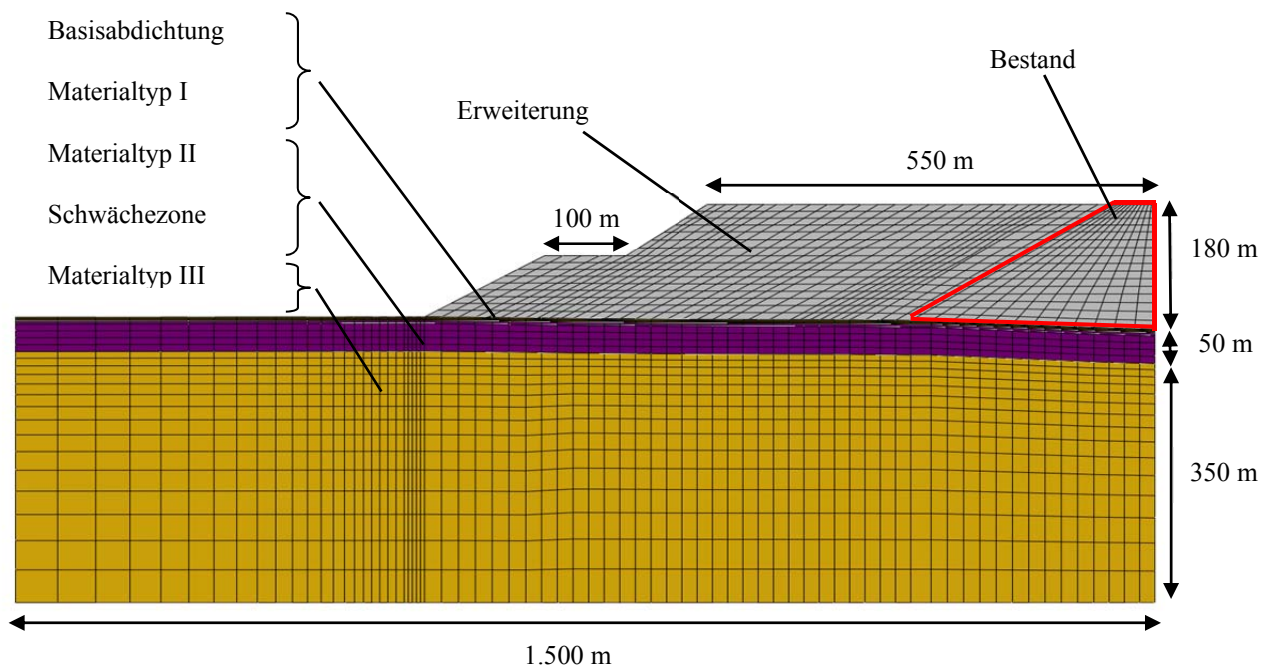


**Bild 11:** Numerisches Modell zur Untersuchung des Endzustandes der geplanten Haldenerweiterung im Schnitt B-B' mit Flankenschüttverfahren (FSV)

Die für die Untersuchung der Standsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit entwickelten numerischen Modelle der Schnitte C-C'<sub>2016</sub> und C-C'<sub>2017</sub> für das KSV sind für den Endzustand der geplanten Haldenerweiterung in den Bildern 12 und 13 dargestellt. Die Schüttabfolge wird in den Bildern 4 (C-C'<sub>2016</sub>) und 5 (C-C'<sub>2017</sub>) gezeigt.



**Bild 12:** Numerisches Modell zur Untersuchung des Endzustandes der geplanten Haldenerweiterung im Schnitt C-C'<sub>2016</sub> mit kombiniertem Schüttverfahren (KSV)



**Bild 13:** Numerisches Modell zur Untersuchung des Endzustandes der geplanten Haldenerweiterung im Schnitt C-C'<sub>2017</sub> mit kombiniertem Schüttverfahren (KSV)

Begleitend bzw. untersetzend zu den in [U5.3] dokumentierten numerischen Untersuchungen wurden die FE-Netze verfeinert, die Betrachtungszeiträume der Nachbetriebsphase auf 50 Jahre vergrößert sowie Kontaktflächen gemäß dem Master-Slave-Prinzip in der Aufstandsfläche der Halde sowie in der Schwächezone implementiert. Durch die vergrößerten Betrachtungszeiträume der Nachbetriebsphase beträgt die Gesamtbetrachtungsdauer bis zu 85 Jahre für das KSV und bis zu 90 Jahre für das FSV. Im Ergebnis dieser Untersuchungen werden nur die Endzustände der Schüttungen im Rahmen der geplanten Haldenerweiterung ausgewertet. Die Betrachtungsdauern in Jahren [a] der einzelnen Schnitte sind wie folgt:

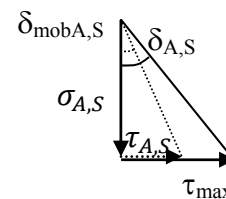
- Schnitt A-A' mit KSV: 35 a Schüttphase und 50 a Nachbetriebsphase
- Schnitt A-A' mit FSV: 40 a Schüttphase und 50 a Nachbetriebsphase
- Schnitt B-B' mit KSV: 35 a Schüttphase und 50 a Nachbetriebsphase
- Schnitt B-B' mit FSV: 40 a Schüttphase und 50 a Nachbetriebsphase
- Schnitt C-C'<sub>2016</sub> mit KSV: 35 a Schüttphase und 50 a Nachbetriebsphase
- Schnitt C-C'<sub>2017</sub> 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. 15 und 27 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  $\tau_{\max}$  proportional zu den Normalspannungen  $\sigma$ . 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:

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



mit:  $\delta_{\text{mob } A,S}$  mobilisierter Reibungswinkel  
 $\tau_{A,S}$  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

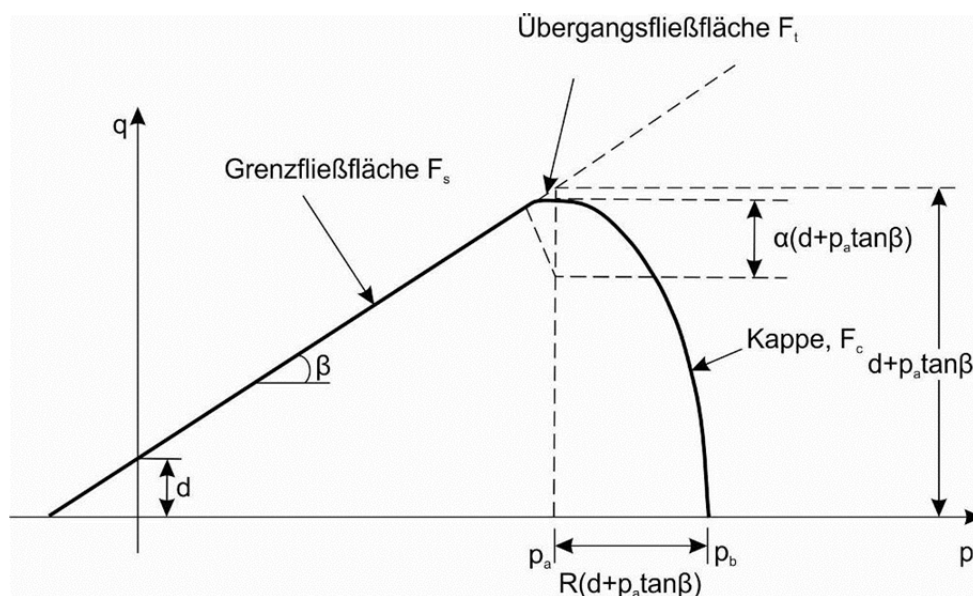
Der Reibungswinkel  $\delta_A$  in der Aufstandsfläche der Halde ist gleich dem inneren Reibungswinkel  $\varphi'$  der Basisabdichtung und beträgt  $\delta_A = 30^\circ$ . Gemäß [U4.8] beträgt der Reibungswinkel in der Schwächezone  $\delta_S = 22,5^\circ$ .

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. Gegenüber dieser Vorgehensweise ist die Aufbringung der gesamten Halde in einem statischen Rechenschritt mit anschließender Kriechphase ein sehr konservativer Ansatz, der zu deutlich ungünstigeren Ergebnissen führt (siehe [U5.3]).

## 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 14 zeigt das modifizierte Drucker-Prager-Modell in der Meridianebene.



**Bild 14:** Modifiziertes Drucker-Prager-Modell

Auf Basis der Unterlagen [U2], [U4] und [U5.2] und der darin dokumentierten Erkundungsergebnisse wird den numerischen Untersuchungen im Schnitt A-A' und B-B' das in Tabelle 1 dargestellte Baugrundmodell auf der sicheren Seite liegend zugrunde gelegt. Dabei stellt die oberflächennahe Lockergesteinszone 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.

<b>Tiefe unter Gelände- oberfläche</b>	<b>Materialtyp</b>
0 m – 4 m	I
4 m – 50 m	II
50 m – 400 m	III

**Tabelle 1:** Baugrundmodell der numerischen Untersuchungen im Schnitt A-A' und B-B'

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

	<b>Materialtyp I 0 – 4 m</b>	<b>Materialtyp II 4 – 50 m</b>	<b>Materialtyp III 50 – 400 m</b>
Dichte $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,95	1,95	2,1
Reibungswinkel $\phi'$ [°]	27,5	28	35
Kohäsion $c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	30	100
Elastizitätsmodul $E$ [MN/m <sup>2</sup> ]	20	200	500
Querdehnzahl $\nu$ [-]	0,3	0,3	0,3
Kappenexzentrizität $R$ [-]	0,02	0,02	0,02
Radius Übergangsbereich $\alpha$ [-]	0,001	0,001	0,001
Fließflächenformfaktor $K$ [-]	0,78	0,78	0,78

**Tabelle 2:** Charakteristische Werte der boden- und felsmechanischen Parameter der Materialtypen I bis III im Schnitt A-A' und B-B'

Abweichend zu den Berechnungsschnitten A-A' und B-B' kann im Bereich der Südflanke der geplanten Haldenerweiterung (Schnitt C-C') die Lockergesteins- und Zersatzzone eine Schichtdicke von bis zu 6 m, höhere Feinkornanteile ( $< 0,06$  mm) und geringere Scherfestigkeiten aufweisen [U2]. Die Haldengeometrie und die Geländeneigung im Bereich des Schnittes C-C' sind günstiger als im Untersuchungsschnitt A-A'.

Auf Basis der Unterlagen [U2], [U4] und [U5.2] und der darin dokumentierten Erkundungsergebnisse wird den numerischen Untersuchungen im Schnitt C-C' das in Tabelle 3 dargestellte Baugrundmodell auf der sicheren Seite liegend zugrunde gelegt.

<b>Tiefe unter Gelände- oberfläche</b>	<b>Materialtyp</b>
0 m – 6 m	I
6 m – 50 m	II
50 m – 400 m	III

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

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

	<b>Materialtyp I 0 – 6 m</b>	<b>Materialtyp II 6 – 50 m</b>	<b>Materialtyp III 50 – 400 m</b>
Dichte $\rho$ [kg/dm <sup>3</sup> ]	1,95	1,95	2,1
Reibungswinkel $\phi'$ [°]	22,5	28	35
Kohäsion $c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	10	30	100
Elastizitätsmodul $E$ [MN/m <sup>2</sup> ]	20	200	500
Querdehnzahl $\nu$ [-]	0,3	0,3	0,3
Kappenexzentrizität $R$ [-]	0,02	0,02	0,02
Radius Übergangsbereich $\alpha$ [-]	0,001	0,001	0,001
Fließflächenformfaktor $K$ [-]	0,78	0,78	0,78

**Tabelle 4:** Charakteristische Werte der boden- und felsmechanischen Parameter der Materialtypen I bis III im Schnitt C-C'

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 [U3.2]. Die bodenmechanischen Parameter der Basisabdichtung, die dem oberen Meter des Baugrundes zugewiesen wurden sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

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

**Tabelle 5:** Bodenmechanische Parameter der Basisabdichtung in den Schnitten A-A', B-B' und C-C'

Die Schwächezone wurde in allen Untersuchungsschnitten als Kontaktfläche in 10 m Tiefe unter GOF abgebildet. Der Reibungswinkel in der Schwächezone beträgt  $\delta_s = 22,5^\circ$ . Auf der sicheren Seite liegend wurde für die Kontaktfläche keine Kohäsion angesetzt.

## 5.2 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]. 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  $\nu$  bestimmt. Der instantan und damit zeitinvariante, plastische Verformungsanteil wird mit Hilfe des Kappenmodells modelliert (Bild 12).

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.

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

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

Die viskoplastische Volumenänderungsrate wird mit Gleichung (4) beschrieben.

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

Die experimentell bestimmten und in Tabelle 6 zusammengestellten salzmechanischen Parameter basieren auf [U4] bis [U6]. Dabei werden die Vorzeichen der einzelnen Parameter durch die Konventionen des verwendeten Stoffgesetzes bzw. numerischen Programmsystems bestimmt.

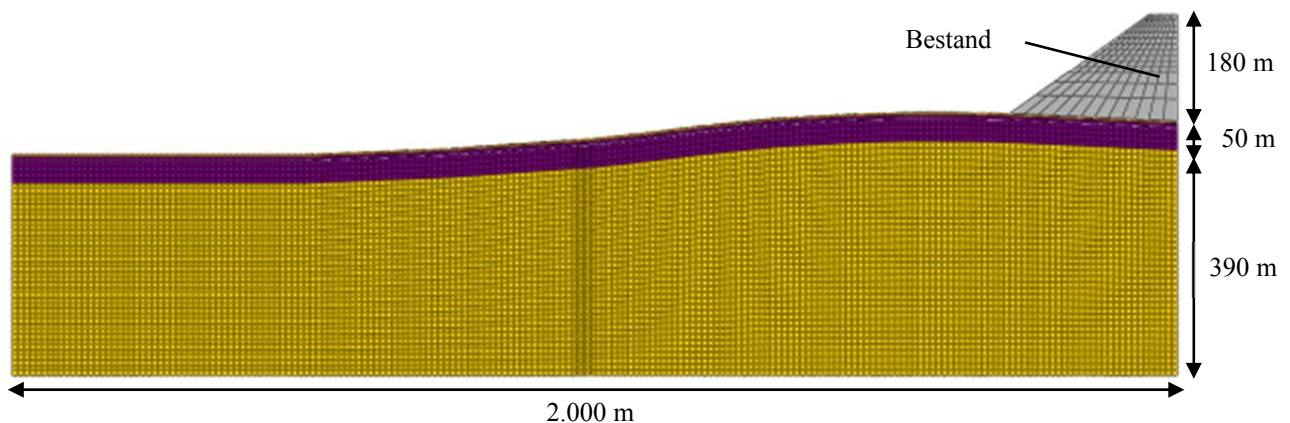
	Formelzeichen	Zahlenwert	Einheit
Dichte	$\rho$	1,9	[kg/dm <sup>3</sup> ]
Elastizitätsmodul	E	1.500.000	[kN/m <sup>2</sup> ]
Querdehnzahl	$\nu$	0,25	[-]
Beiwerte der Konusfließfunktion	$\alpha$	4.600	[kN/m <sup>2</sup> ]
	$\lambda$	3.611,83	[kN/m <sup>2</sup> ]
	$\beta^{*)}$	$-2 \cdot 10^{-5}$	[m <sup>2</sup> /kN]
	$\theta^{*)}$	-0,61	[-]
Halbmesserverhältnis	$R^{*)}$	-0,35	[-]
Anfangkonuskappenschnittpunkt	$\kappa_0^{*)}$	-5	[kN/m <sup>2</sup> ]
Max. Porenanteil	$n_{\text{max}}^{*)}$	-0,3	[-]
Beiwerte der Kappenfließfunktion	$d^{*)}$	-0,0006	[m <sup>2</sup> /kN]
	$w^{*)}$	-0,01	[-]
Regressionsparameter der stationären Verformungsrate	B <sub>1</sub>	150	[m <sup>2</sup> /kNs]
	B <sub>2</sub>	1	[m <sup>2</sup> /kNs]
	B <sub>3</sub>	$1 \cdot 10^{-5}$	[m <sup>2</sup> /kN]
	B <sub>4</sub>	1	[-]

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 <sup>2</sup> /kN]
Aktivierungsenergie	$Q$	79	[kJ/mol]
*) Transformation des Vorzeichens im Rahmen der Regressionsanalyse			

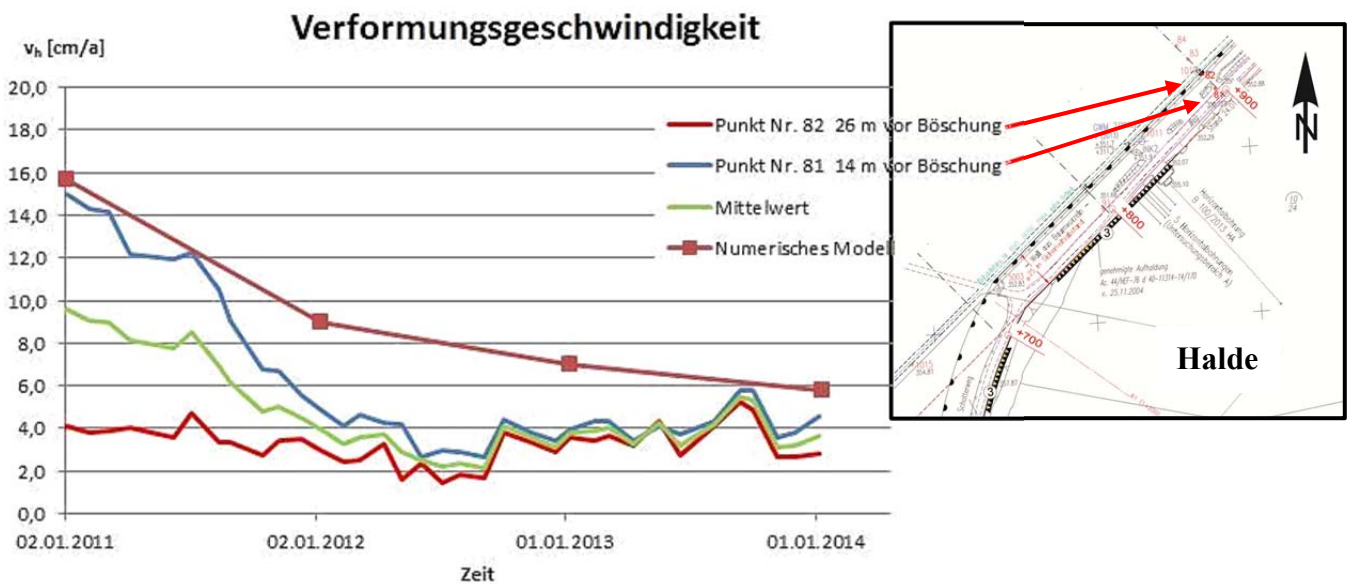
**Tabelle 6:** Salzmechanische Parameter des Rückstandssalzes

## 6 Kalibrierung des numerischen Modells

Analog zur in [U5.3] dokumentierten Kalibrierung erfolgte auch für die verfeinerte Netzgeometrie in den Schnitten A-A' und B-B' sowie für den Untersuchungsschnitt C-C' eine Kalibrierung 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. Bild 15 zeigt das für die Kalibrierung verwendete FE-Modell. Die Grundlagen und Randbedingungen der Kalibrierung sind in [U5.3] beschrieben.

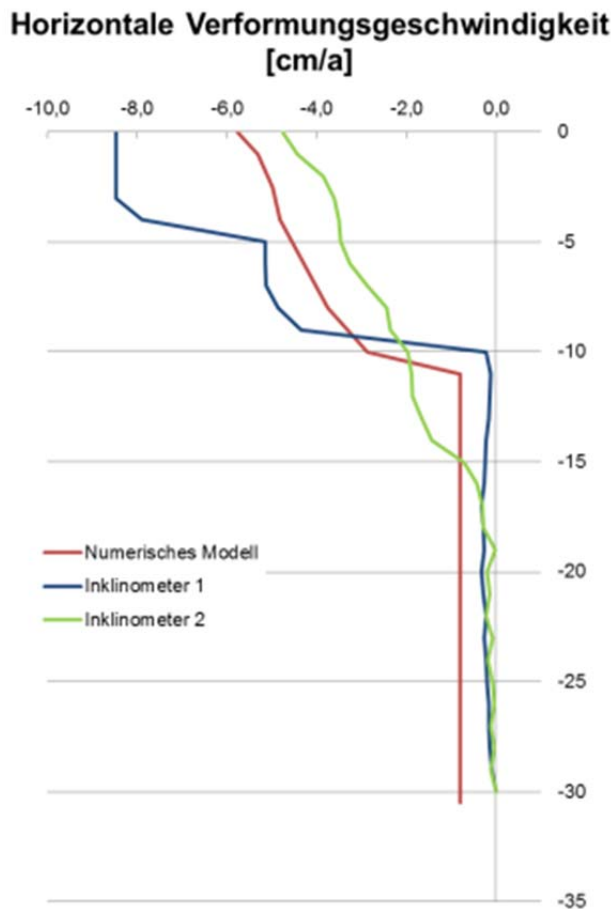
**Bild 15:** Numerisches Modell zur Kalibrierung der gesamten Modellbildung

Die gemessenen und die numerisch berechneten horizontalen Verformungsgeschwindigkeiten sind in Bild 16 dargestellt. Der Vergleich zeigt in der Tendenz und in den Werten für den stationären Zustand der horizontalen Verformungsgeschwindigkeiten eine gute Übereinstimmung, wobei auf der sicheren Seite liegend, eine Überschätzung der Verformungsgeschwindigkeit in Kauf genommen wird.



**Bild 16:** Gemessene und berechnete horizontale Verformungsgeschwindigkeiten  $v_h$  in [cm/a], aufgetragen über die Zeit

Zusätzlich zu den horizontalen Verformungsgeschwindigkeiten an der Geländeoberfläche wurden die gemessenen und die numerisch berechneten Verformungsgeschwindigkeiten über eine Tiefe von 30 m verglichen. Die gemessenen und die numerisch berechneten horizontalen Verformungsgeschwindigkeiten über die Tiefe sind in Bild 17 dargestellt. Der Vergleich zeigt in der Tendenz und in den Werten für den stationären Zustand der horizontalen Verformungsgeschwindigkeiten eine gute Übereinstimmung.



**Bild 17:** Gemessene und berechnete horizontale Verformungsgeschwindigkeiten  $v_h$  in [cm/a], aufgetragen über die Tiefe der Inklinometer in [m]

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. IK1713/01 werden für die Schnitte A-A', B-B' und C-C' 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.

tern. Diese Vorgehensweise wurde bereits bei früheren Untersuchungen angewandt [U4], [U5]. Zur Berücksichtigung des zeitvarianten Materialverhaltens des Rückstandssalzes wurde ein Untersuchungszeitraum von mehr als 70 Jahren 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. Das System ist dann im Gleichgewicht, wenn die Berechnungen zu jedem Zeitpunkt konvergieren, d.h. 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  $\Delta t_j$  bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes. Kann für die abgeminderten Scherparameter in jedem Zeitinkrement im Untersuchungszeitraum der Gleichgewichtszustand erreicht werden, so ist der Nachweis der Standsicherheit für die ständige Bemessungssituation mit der Sicherheit  $\gamma = 1,25$  erbracht. Kann für eine Parameterkombination in einem Zeitinkrement  $\Delta t_j$  kein Gleichgewichtszustand erreicht werden, so bricht die Finite-Element-Berechnung den Berechnungsvorgang ab. In diesem Fall ist die Standsicherheit lediglich bis zum Ende des vorhergehenden Zeitinkrements  $\Delta t_{j-1}$  gegeben. Für den gesamten Untersuchungszeitraum ist die Standsicherheit mit einer Sicherheit von  $\gamma = 1,25$  in diesem Fall nicht gegeben. Das Nichterreichen eines Gleichgewichtszustandes ist somit eindeutig berechenbar.

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit 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 Verformungsgeschwindigkeiten liefert die für andere Untersuchungen notwendigen Eingangsparameter, die z.B. für die 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. Verformungsgeschwindigkeiten im Bereich der Nordwestflanke der bestehenden Halde. Die Kalibrierung des entwickelten numerischen Modells und der zugrunde liegenden Materialkennwerte sind in Kapitel 6 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, eingestuft.

rigkeitsgrad, 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. Die Ausführungen in [U5.3] sind diesbezüglich zu beachten.

## 8 Numerische Basisuntersuchungen

Die numerischen Basisuntersuchungen wurden für folgende Schnitte und Schüttverfahren durchgeführt:

- |   |   |   |
|---|---|---|
| - Schnitt A-A' mit KSV (Kap. 8.2.1)                 | } | ursprüngliche Planung mit 25 m zwischen Böschungsfuß und Vorhabensgrenze sowie 2 Schüttscheiben |
| - Schnitt A-A' mit FSV (Kap. 8.2.2)                 |   |   |
| - Schnitt B-B' mit KSV (Kap. 8.2.3)                 |   |   |
| - Schnitt B-B' mit FSV (Kap. 8.2.4)                 |   |   |
| - Schnitt C-C' <sub>2016</sub> mit KSV (Kap. 8.2.5) | } | neue Planung mit 65 m zwischen Böschungsfuß und Vorhabensgrenze sowie 3 Schüttscheiben          |
| - Schnitt C-C' <sub>2017</sub> mit KSV (Kap. 8.2.6) |   |   |

Mit den numerischen Basisuntersuchungen wird das zu erwartende Spannungs-Verformungsverhalten der Rückstandshalde in den drei Schnitten A-A', B-B' und C-C' abgedeckt. Dabei werden die Ergebnisse der Baugrunderkundung im Bereich der Haldenerweiterung sowie die Konzeptionen zur Basisabdichtung und zur Beschüttung mit auf der sicheren Seite liegenden Eingangswerten berücksichtigt.

Die im nachfolgenden Kapitel 9 dokumentierten ergänzenden numerischen Untersuchungen für den Schnitt C-C' erfolgen im Sinne einer Extremwertbetrachtung. Dazu werden die Ergebnisse der Ursachenforschung an der bestehenden Südwestflanke berücksichtigt [U5.4], [U5.5].

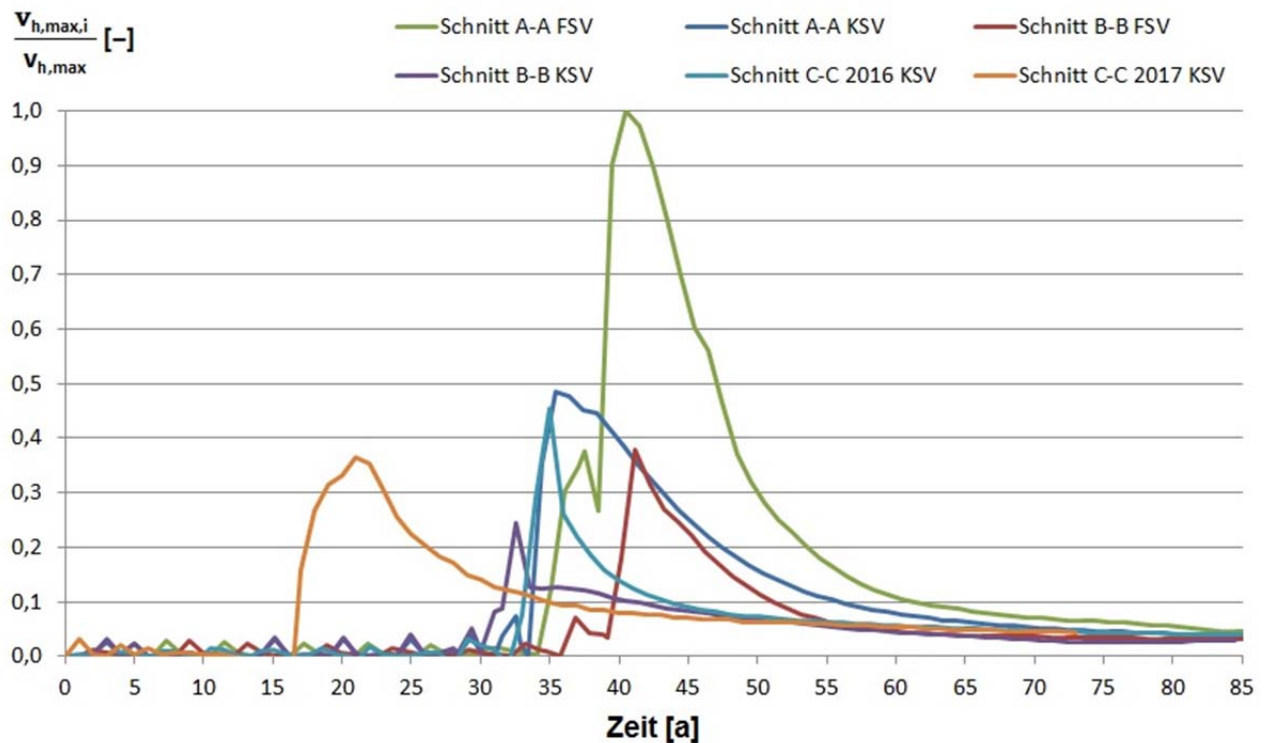
## 8.1 Numerische Basisuntersuchungen zur Standsicherheit

Zur numerischen Untersuchung der Standsicherheit wurden für die Berechnungen in den Schnitten A-A', B-B' und C-C' 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. 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.

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 8.2.1 bis 8.2.6 aufgeführt sind, deutlich überschätzt. Die im Zuge der Standsicherheitsbetrachtung berechneten, horizontalen Verformungsgeschwindigkeiten  $v_h$  betragen am Haldenfuß im Endzustand das ca. 1,5- bis 2,8-fache der im Zuge der Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit berechneten horizontalen Verformungsgeschwindigkeiten.

In Bild 18 sind die Verläufe der normierten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten dargestellt. Die horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit  $v_{h,i}$  aus den Schnitten A-A' bzw. B-B' mit den Schüttverfahren KSV bzw. FSV und C-C'<sub>2016</sub> (KSV) bzw. C-C'<sub>2017</sub> (KSV) wird mit der maximalen horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeit  $v_{h,max}$  ins Verhältnis gesetzt. Die Auswertung erfolgte am Haldenfußpunkt als Ort der maximalen Verschiebungsgeschwindigkeit. Die maximalen Verschiebungsraten treten unmittelbar vor Erreichen der beantragten Aufhaldungsgrenze auf. Je nach Schüttkonzept in der jeweiligen Schnittlage wird dieser Haldenfußpunkt zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht (Kap. 4).



**Bild 18:** Normierte horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten im Grenzzustand der Standsicherheit am Haldenfuß

Mit den numerischen Berechnungen des Gesamtsystems bestehend aus Halde, Basisabdichtung und Baugrund wird eine dem o.g. Nachweiskonzept entsprechende Standsicherheit nachgewiesen. Anzeichen für die Entstehung von Grenzzuständen der Tragfähigkeit sind nicht erkennbar. Die geplante Erweiterung im kombinierten Schüttverfahren (KSV) auf zwei Ebenen mit einer Bermenbreite von 100 m reduzieren die Beanspruchungen der Haldenböschungen sowie im Baugrund gegenüber der vergleichbaren Situation im Flankenschüttverfahren (FSV).

## 8.2 Numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit

Zur numerischen Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit in den Schnitten A-A', B-B' und C-C' 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 mehr als 70 Jahre.

Die aus den numerischen Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit resultierenden Prognosen der sich zeitlich verändernden Spannungen, Verformungen und Verformungsgeschwindigkeiten 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, Verformungen, Verformungsgeschwindigkeiten und Dehnungen für die Schnitte A-A', B-B' und C-C' untersucht:

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

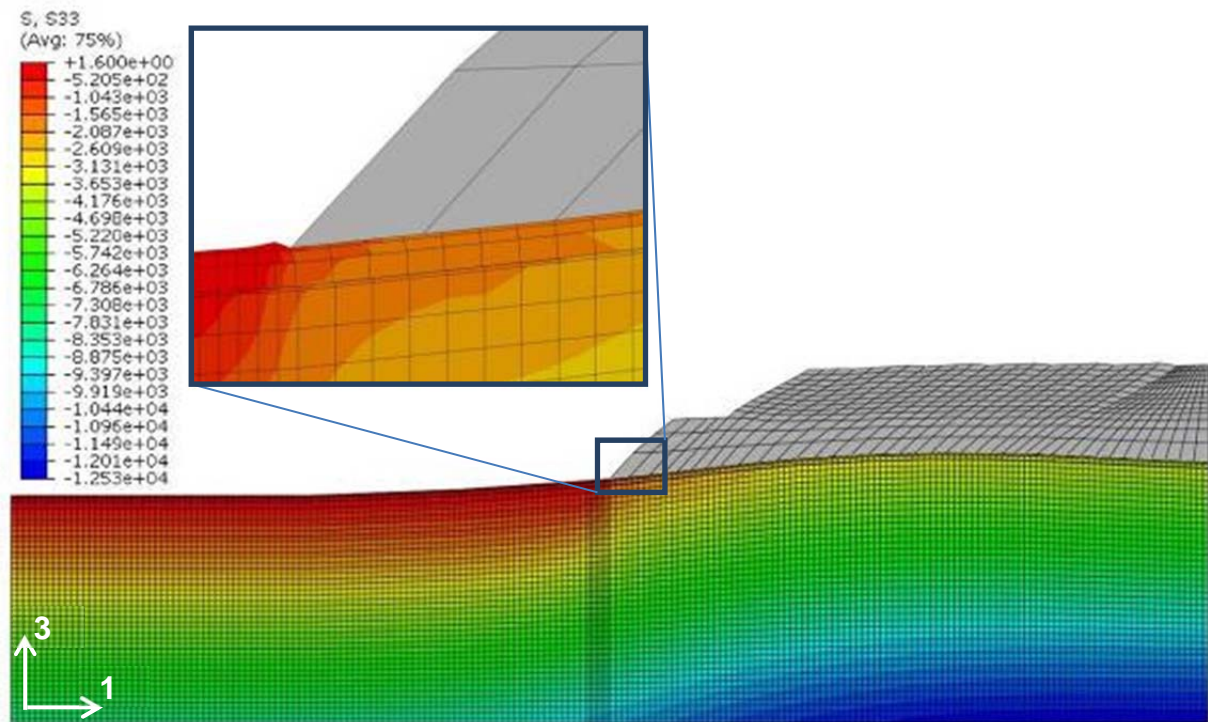
Die Darstellung der Berechnungsergebnisse erfolgt in Konturplots und Diagrammen. In den Konturplots sind die Spannungen des Rückstandssalzes ausgeblendet, um die wichtigen Informationen über die Verhältnisse im Baugrund detaillierter darstellen zu können.

Analog zu den bisherigen, für die K+S KALI GmbH erstellten Sachverständigen-Gutachten, werden in diesem Kapitel des gegenständlichen Sachverständigen-Gutachtens Nr. IK1713/01 die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen dargestellt.

## **8.2.1 Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes A-A' für das KSV**

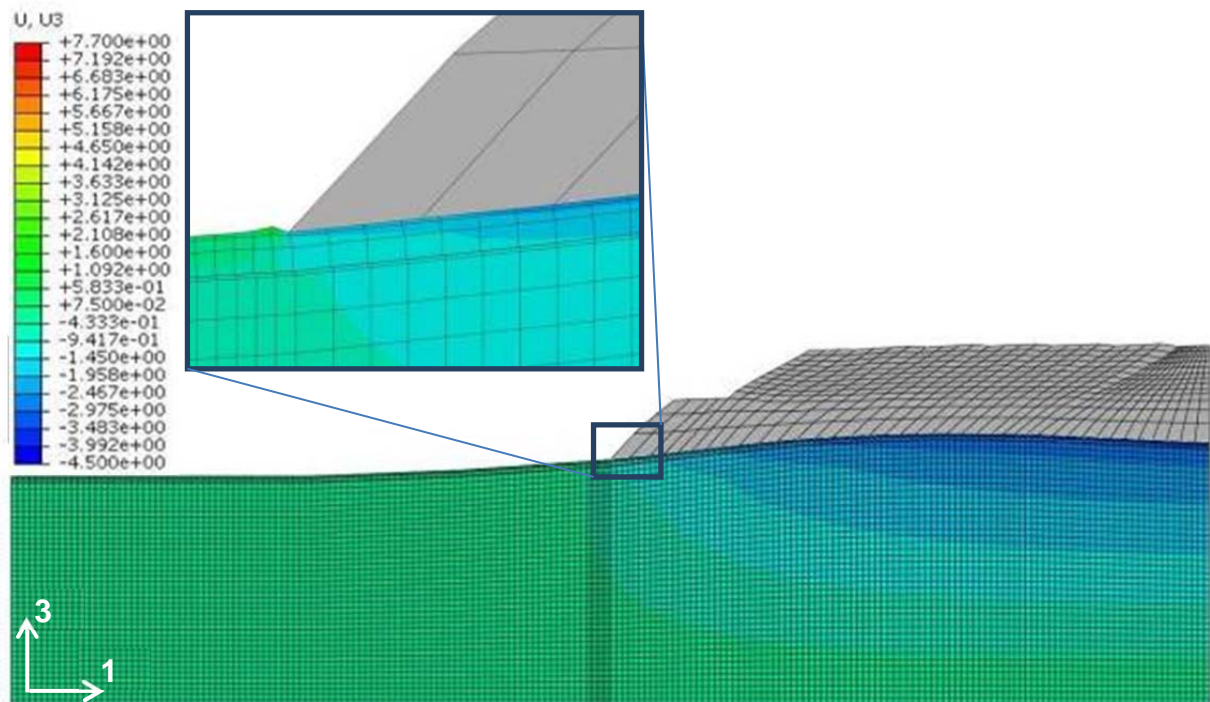
### **8.2.1.1 Vertikale Spannungen und Verformungen**

Die berechneten vertikalen Spannungen am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 19 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale Vertikalspannung beträgt rd. 920 kN/m<sup>2</sup>.

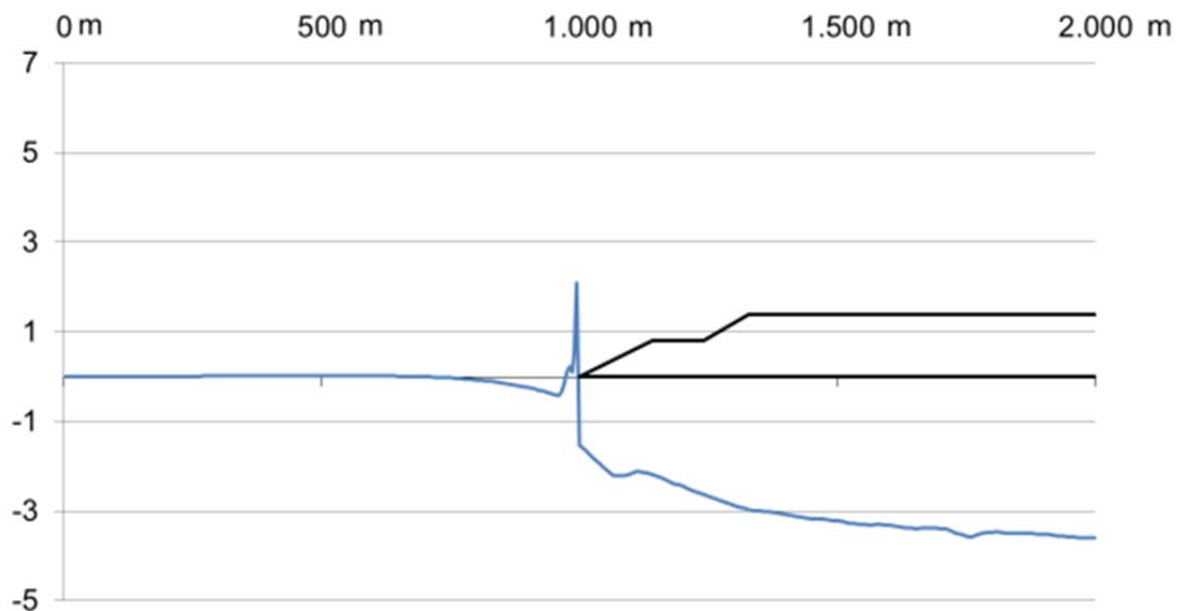


**Bild 19:** Vertikale Spannungen in  $[\text{kN/m}^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A' für das KSV

In den Bildern 20 und 21 sind die berechneten vertikalen Verformungen des Baugrundes und der Basisabdichtung für das Ende des Untersuchungszeitraumes dargestellt. Die berechneten maximalen Setzungen unter der Halde betragen bis zu 3,6 m. Im Bereich des Haldenfußes betragen die Setzungen rd. 1,7 m. Die rechnerischen Hebungen betragen bis zu 2,1 m. Der Bereich der Hebungen liegt vor dem Haldenfußpunkt.



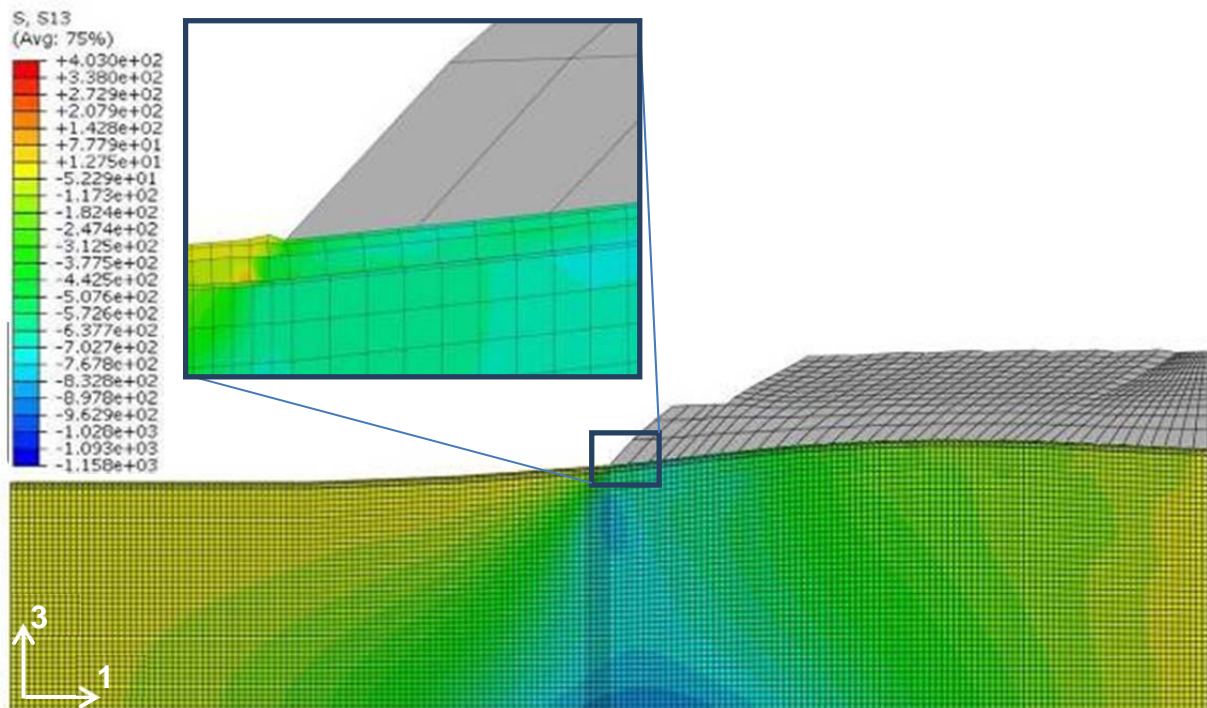
**Bild 20:** Vertikale Verformungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A' für das KSV



**Bild 21:** Vertikale Verformungen der Geländeoberfläche/Aufstandsfläche in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A' für das KSV, Setzungen negativ

### 8.2.1.2 Schubspannungen

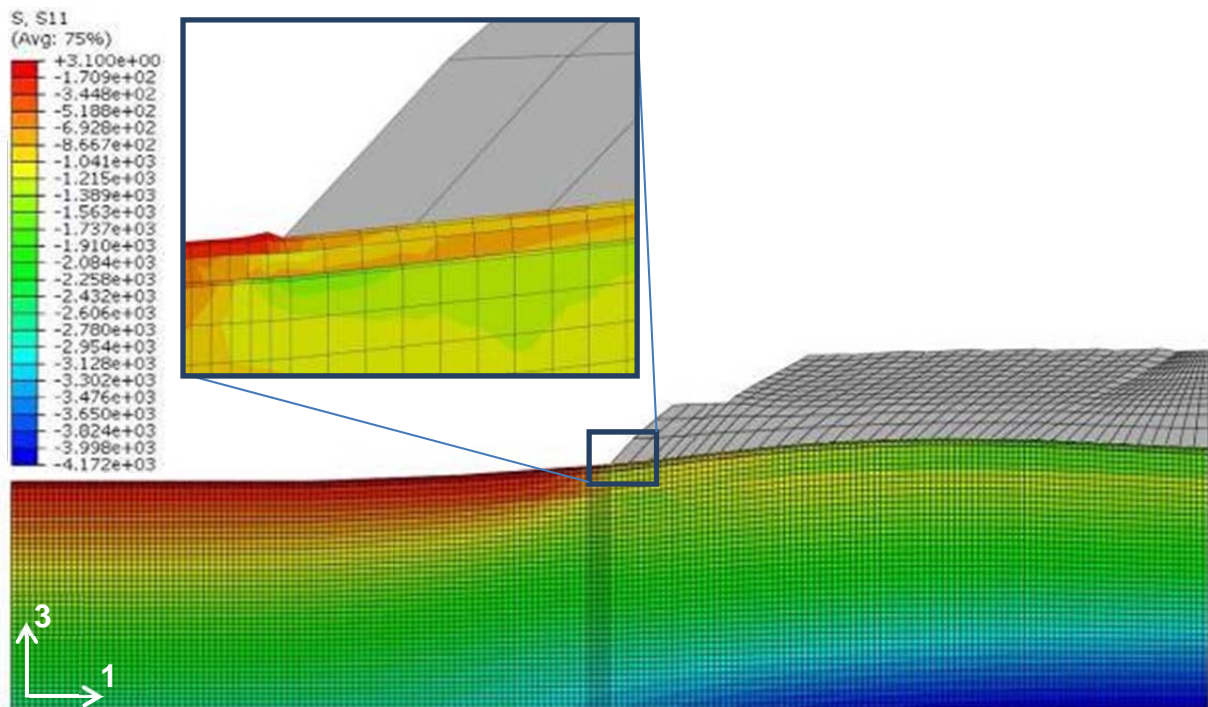
Die berechneten Schubspannungen im Baugrund am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 22 dargestellt. Die in der Haldenaufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale Schubspannung beträgt rd. 660 kN/m<sup>2</sup>.



**Bild 22:** Schubspannungen in [kN/m<sup>2</sup>] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A' für das KSV

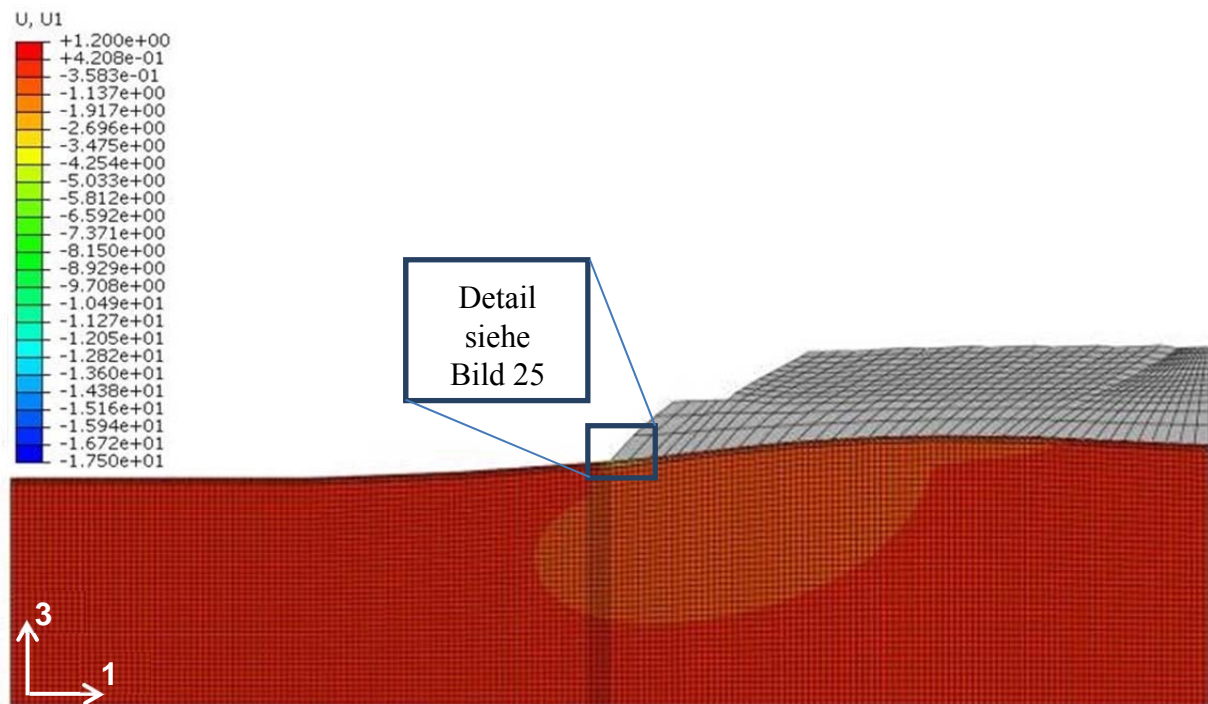
### 8.2.1.3 Horizontale Spannungen, Verschiebungen und Dehnungen

Die berechneten horizontalen Spannungen des Baugrundes und der Basisabdichtung sind als Konturplot in Bild 23 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale horizontale Spannung beträgt rd. 1.780 kN/m<sup>2</sup>.

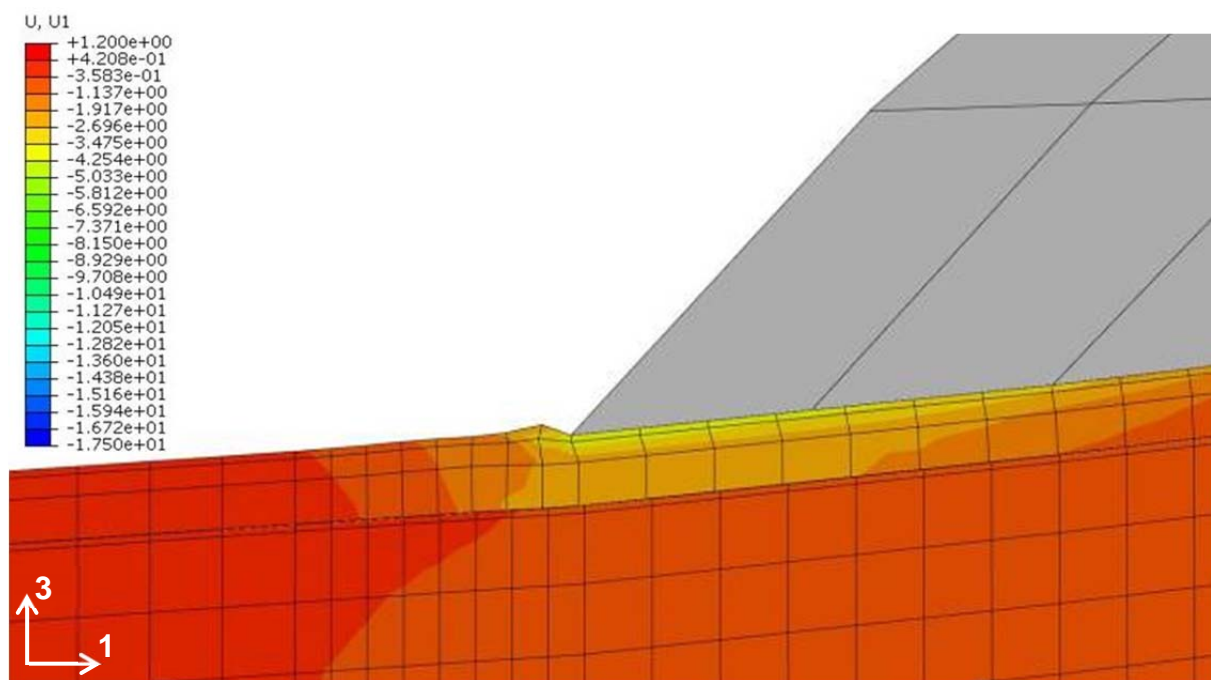


**Bild 23:** Horizontale Spannungen in  $[\text{kN/m}^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A' für das KSV

Die berechneten horizontalen Verformungen des Baugrundes sind in den Bildern 24 und 25 als Konturplots dargestellt. Die maximale horizontale Verschiebung des Haldenfußpunktes in der Aufstandsfläche beträgt rd. 4,2 m. Die berechneten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten  $v_h$  betragen am Ende des Untersuchungszeitraumes rd. 3 cm/a.

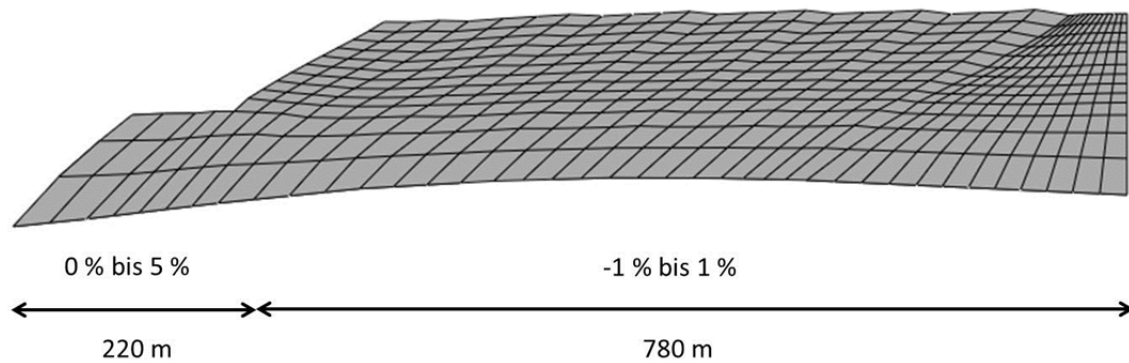


**Bild 24:** Horizontale Verschiebungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A' für das KSV



**Bild 25:** Detail: Horizontale Verformungen des Baugrundes in [m] im Bereich des Haldenfußes am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A' für das KSV

In Bild 26 sind die Bereiche horizontaler Dehnungen (positiv) und Stauchungen (negativ) im Baugrund unterhalb der Rückstandshalde am Ende des Untersuchungszeitraumes als Bandbreiten dargestellt. Sie betragen zwischen 1 % Stauchung und 5 % Dehnung.

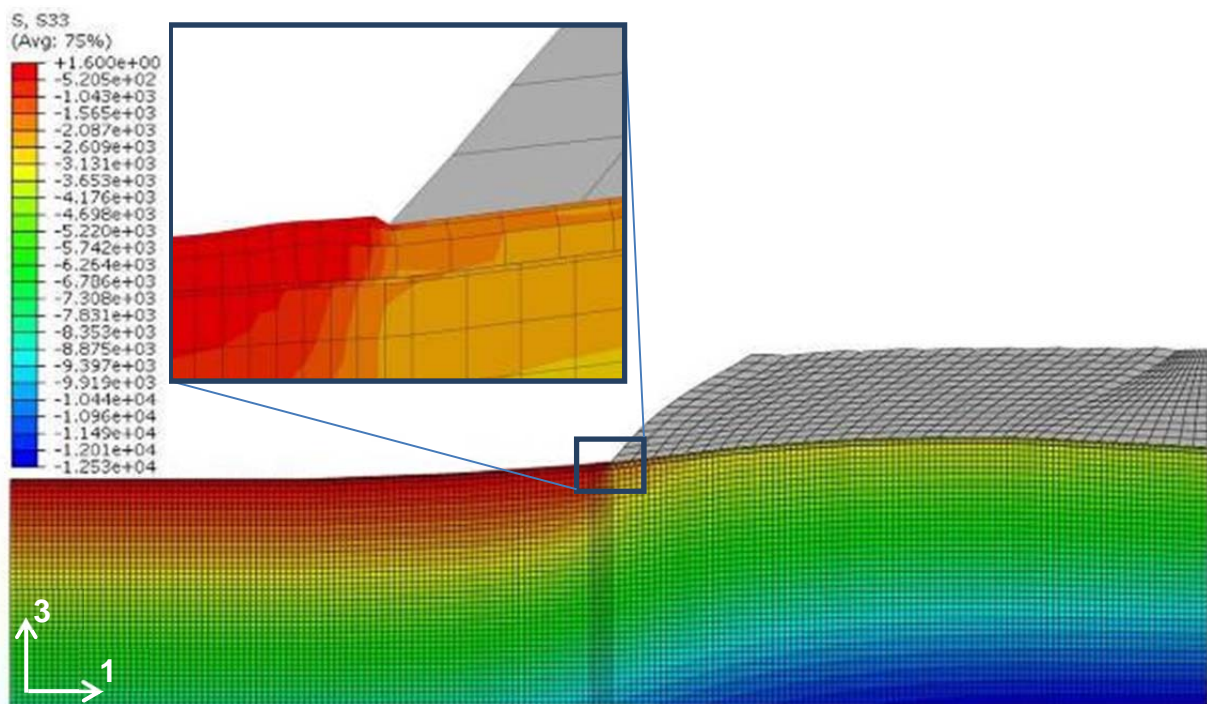


**Bild 26:** Horizontale Dehnungen und Stauchungen der Basisabdichtung unterhalb der Halde des Schnittes A-A' für das KSV

## 8.2.2 Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes A-A' für das FSV

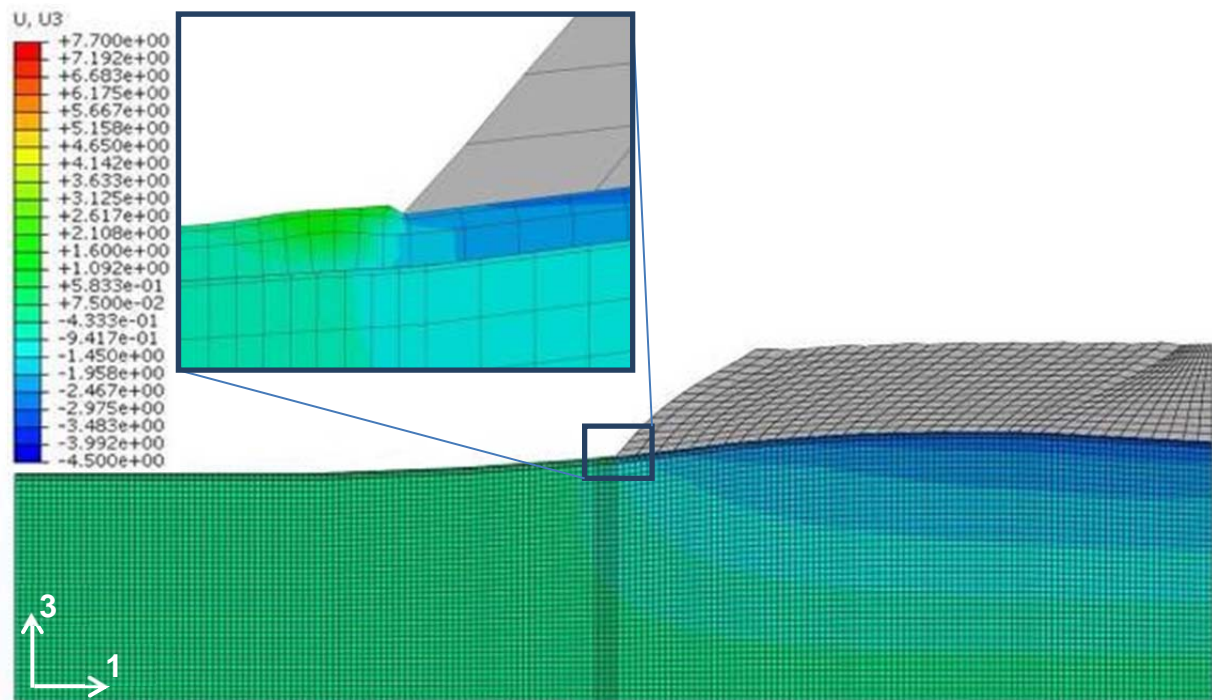
### 8.2.2.1 Vertikale Spannungen und Verformungen

Die berechneten vertikalen Spannungen am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 27 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale Vertikalspannung beträgt rd. 1.150 kN/m<sup>2</sup>

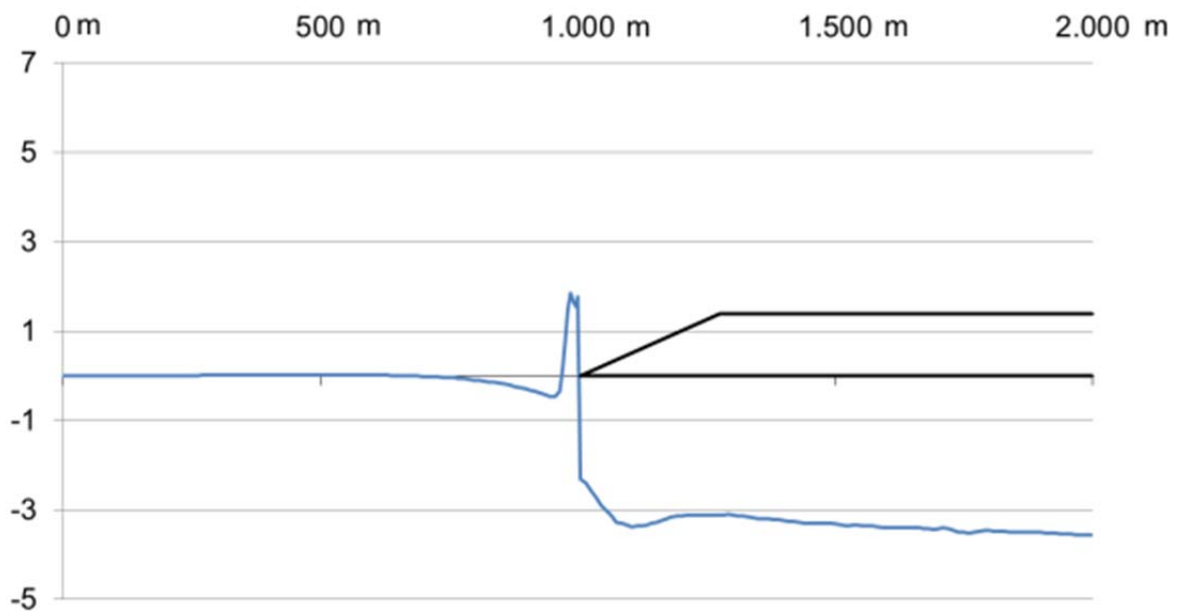


**Bild 27:** Vertikale Spannungen in  $[\text{kN/m}^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A' für das FSV

In den Bildern 28 und 29 sind die berechneten vertikalen Verformungen des Baugrundes und der Basisabdichtung für das Ende des Untersuchungszeitraumes dargestellt. Die berechneten maximalen Setzungen unter der Halde betragen bis zu 3,6 m. Im Bereich des Haldenfußes betragen die Setzungen rd. 2,4 m. Die rechnerischen Hebungen betragen modellbedingt bis zu 1,9 m. Der Bereich der Hebungen liegt vor dem Haldenfußpunkt.



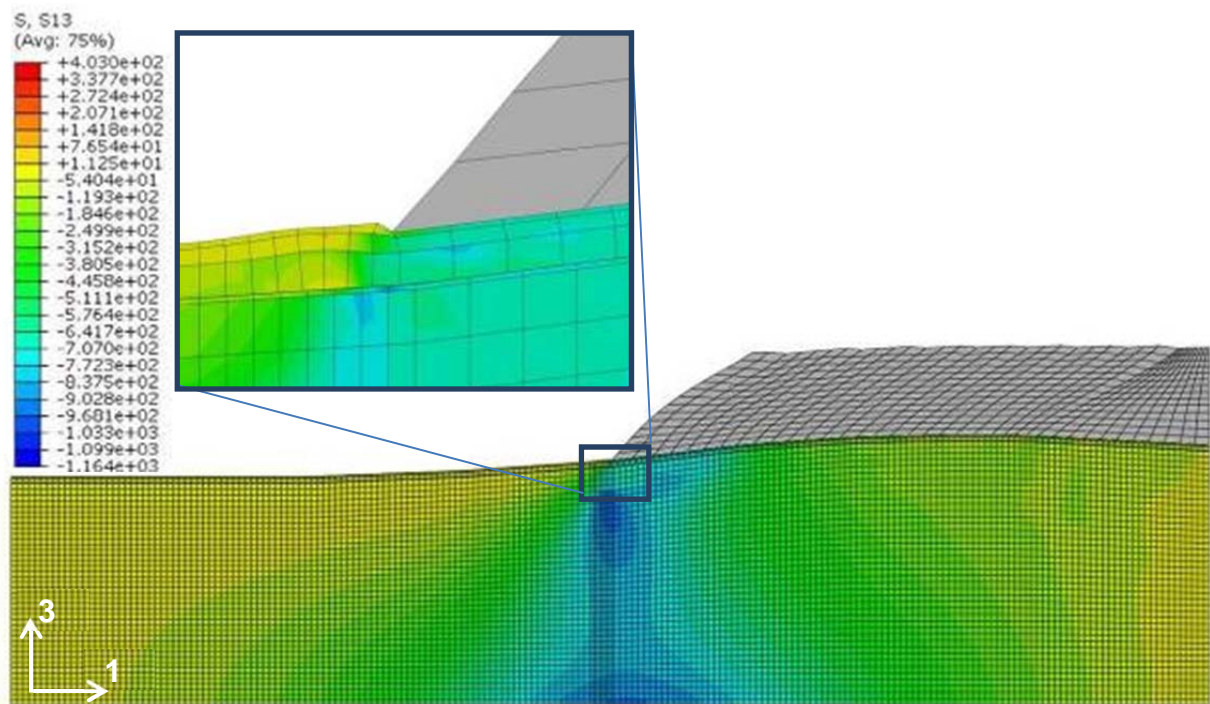
**Bild 28:** Vertikale Verschiebungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A' für das FSV



**Bild 29:** Vertikale Verformungen der Geländeoberfläche/Aufstandsfläche in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A' für das FSV, Setzungen negativ

### 8.2.2.2 Schubspannungen

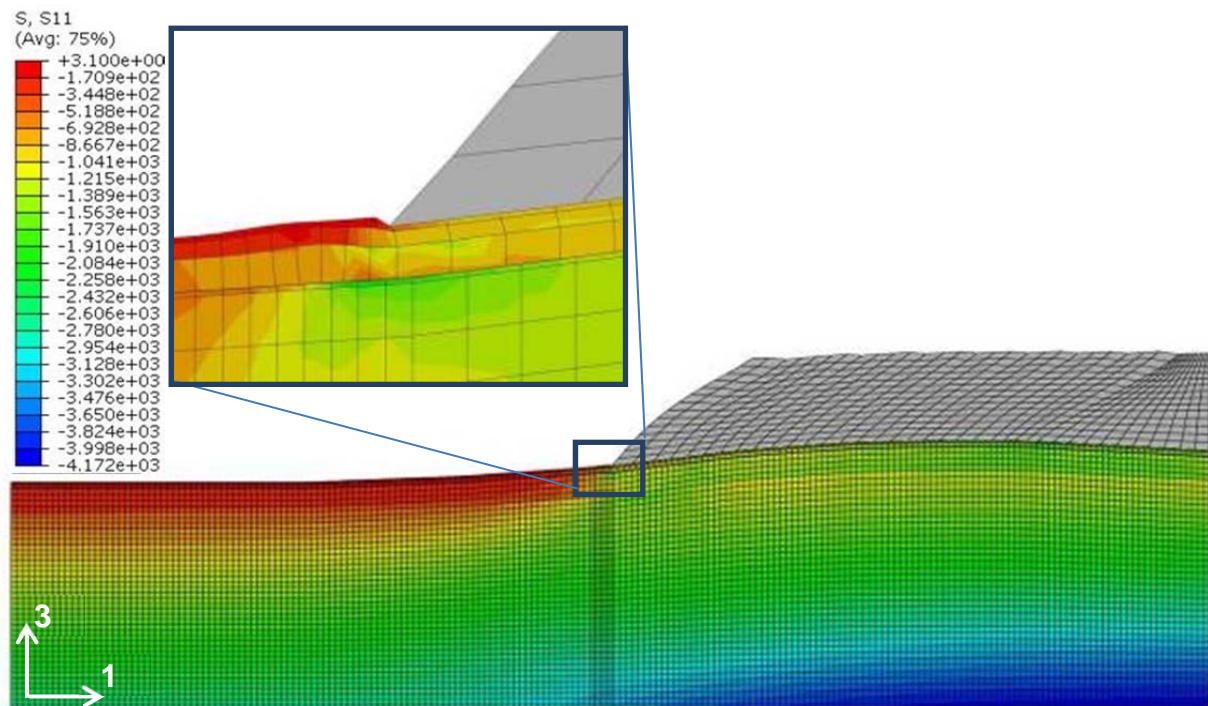
Die berechneten Schubspannungen im Baugrund am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 30 dargestellt. Die in der Haldenaufstandsfläche im Bereich am Haldenfußpunkt ermittelte maximale Schubspannung beträgt rd.  $790 \text{ kN/m}^2$ .



**Bild 30:** Schubspannungen in  $[\text{kN/m}^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A' für das FSV

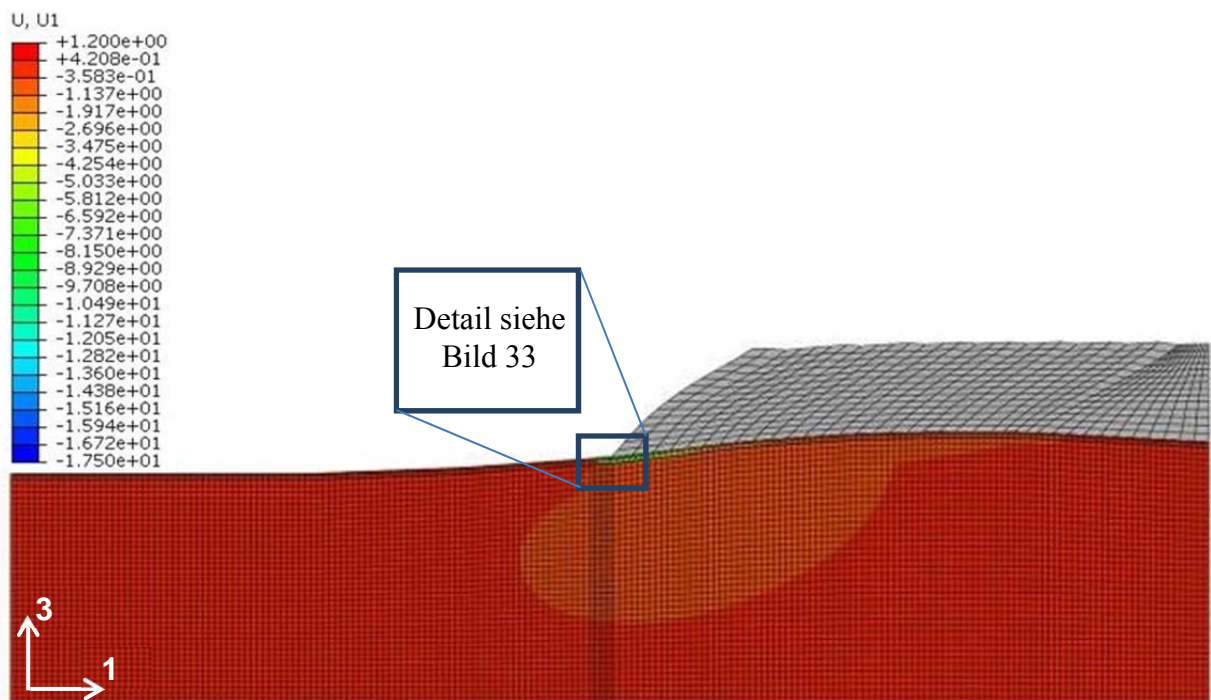
### 8.2.2.3 Horizontale Spannungen, Verformungen und Dehnungen

Die berechneten horizontalen Spannungen des Baugrundes und der Basisabdichtung sind als Konturplot in Bild 31 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale horizontale Spannung beträgt rd.  $2.150 \text{ kN/m}^2$ .

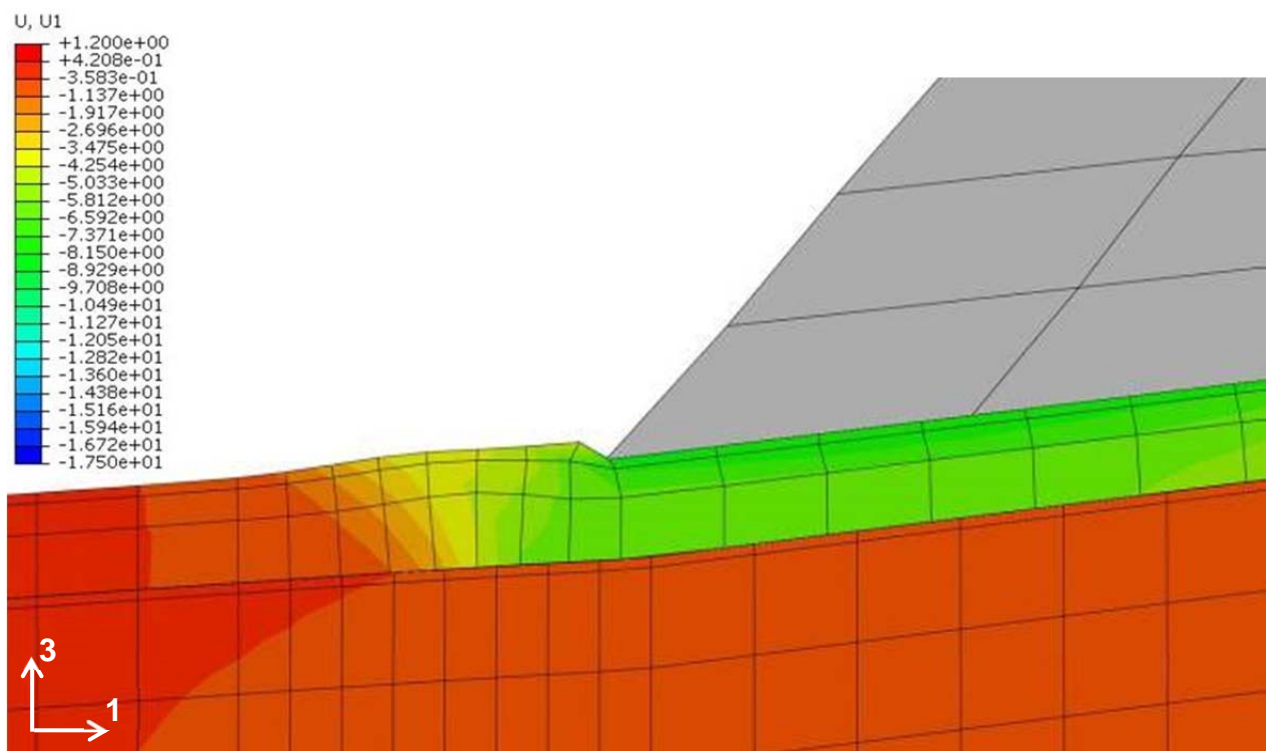


**Bild 31:** Horizontale Spannungen in  $[\text{kN/m}^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A' für das FSV

Die berechneten horizontalen Verformungen des Baugrundes sind in den Bildern 32 und 33 als Konturplots dargestellt. Die maximale horizontale Verschiebung des Haldenfußpunktes in der Aufstandsfläche beträgt rd. 8,6 m. Die berechnete horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit  $v_h$  beträgt am Ende des Untersuchungszeitraumes rd. 3 cm/a.

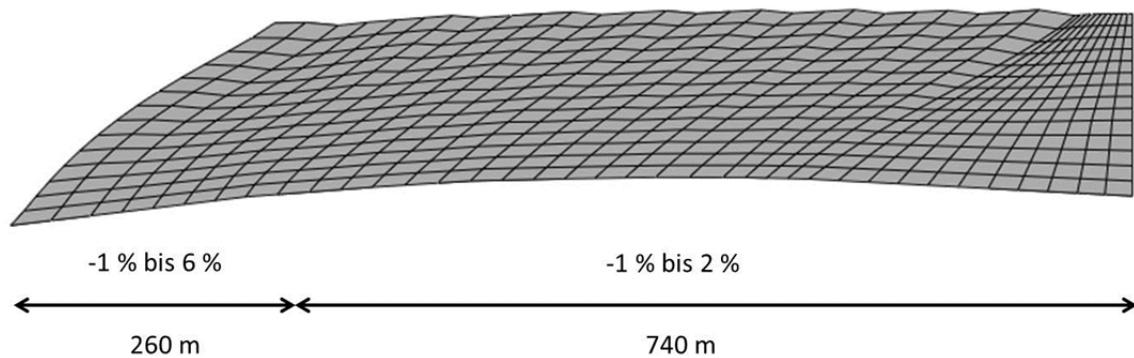


**Bild 32:** Horizontale Verformungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A' für das FSV



**Bild 33:** Detail: Horizontale Verformungen in [m] im Bereich des Haldenfußes am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes A-A' für das FSV

In Bild 34 sind die Bereiche horizontaler Dehnungen (positiv) und Stauchungen (negativ) im Baugrund unterhalb der Rückstandshalde am Ende des Untersuchungszeitraumes als Bandbreiten dargestellt. Sie betragen zwischen 1 % Stauchung und 6 % Dehnung.

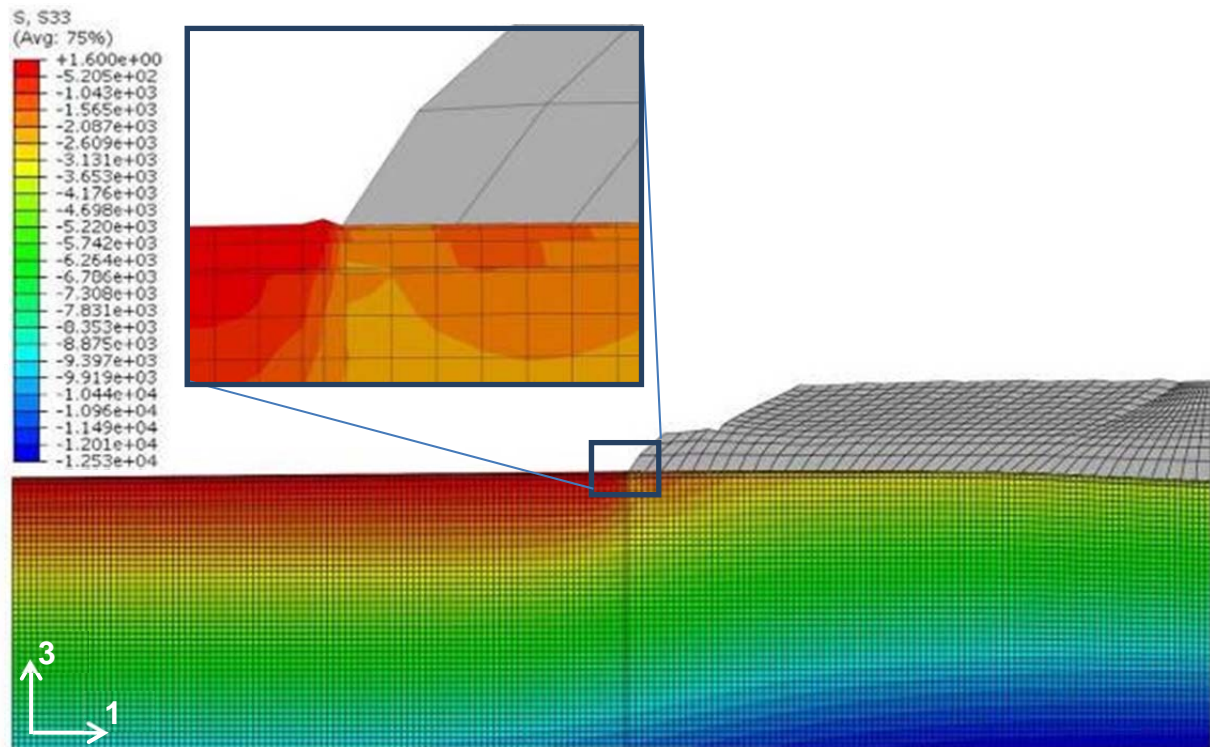


**Bild 34:** Horizontale Dehnungen und Stauchungen der Basisabdichtung unterhalb der Halde des Schnittes A-A' für das FSV

## 8.2.3 Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes B-B' für das KSV

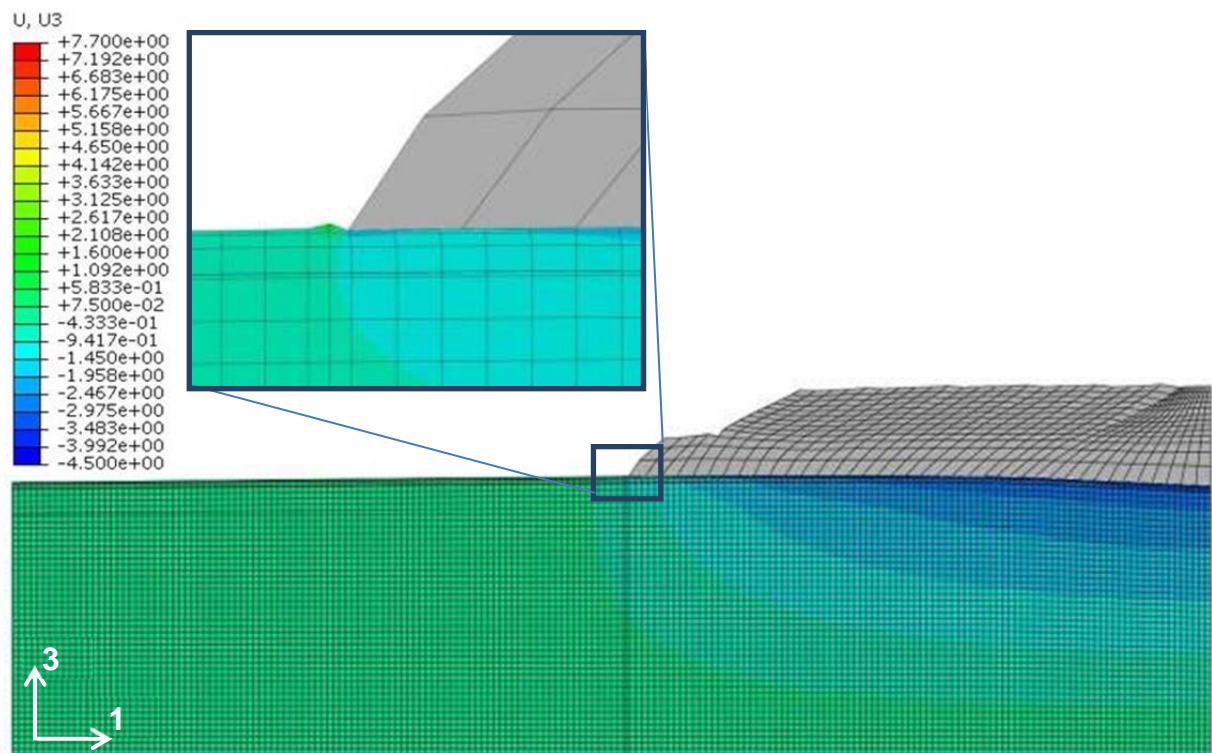
### 8.2.3.1 Vertikale Spannungen und Verformungen

Die berechneten vertikalen Spannungen am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 35 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale Vertikalspannung beträgt rd. 1.110 kN/m<sup>2</sup>.

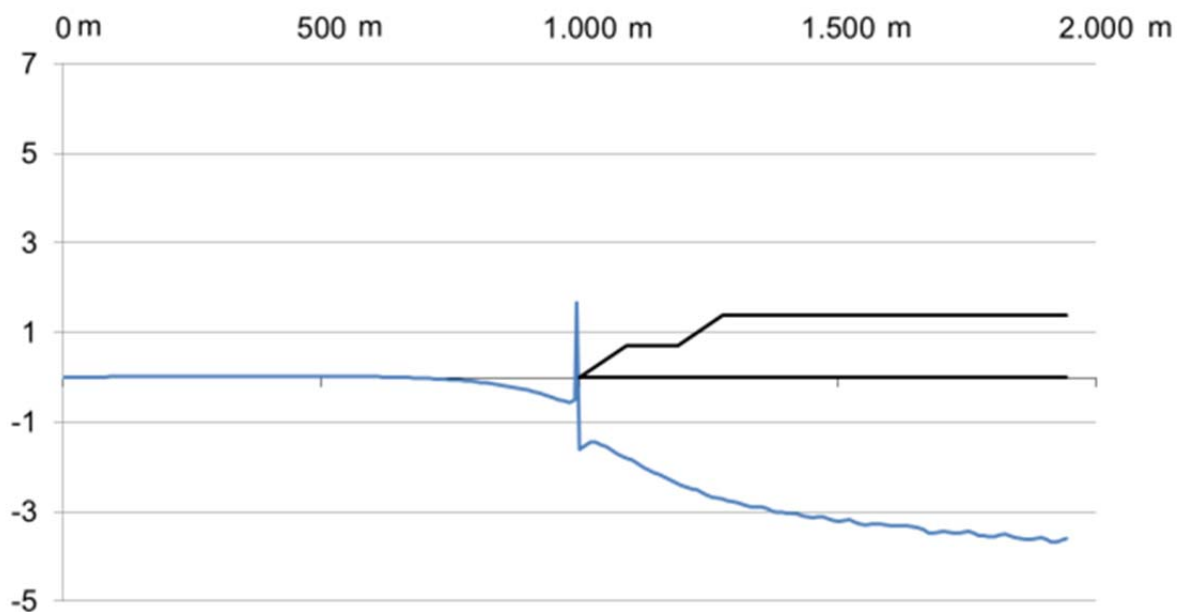


**Bild 35:** Vertikale Spannungen in  $[\text{kN/m}^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes B-B' für das KSV

In den Bildern 36 und 37 sind die berechneten vertikalen Verformungen 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. 1,6 m. Die rechnerischen Hebungen betragen bis zu 1,7 m. Der Bereich der Hebungen liegt vor dem Haldenfußpunkt.



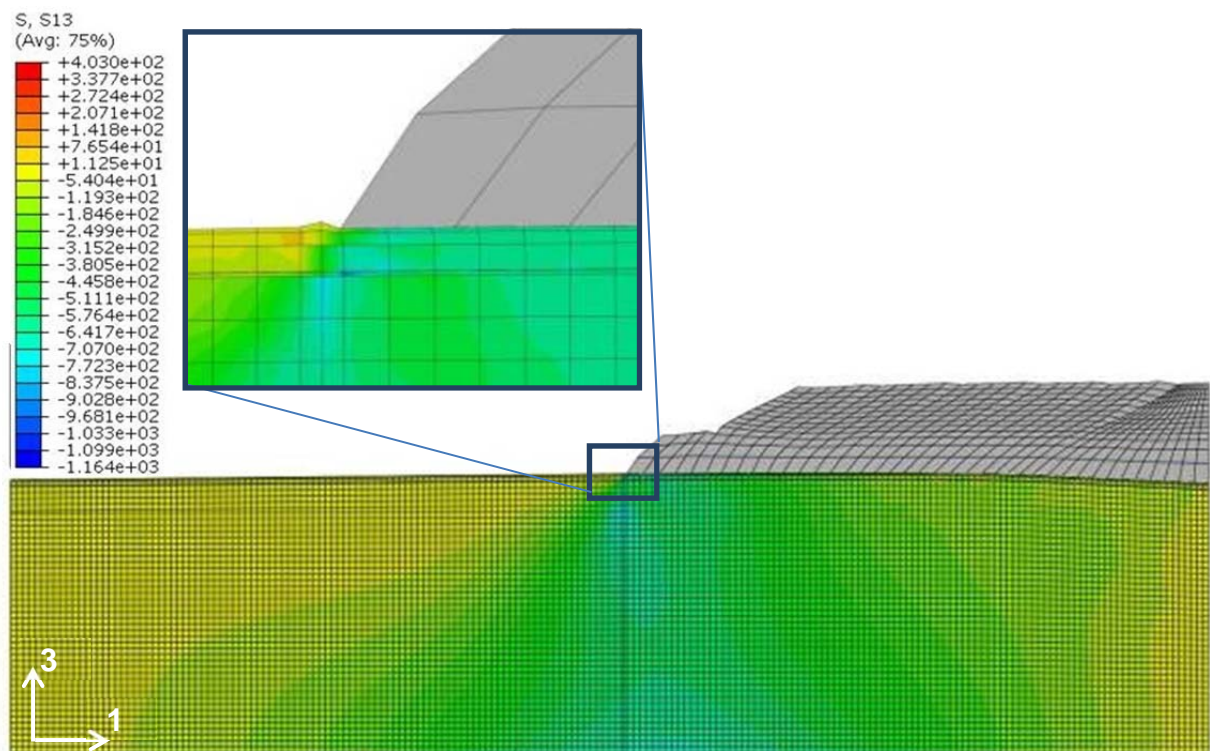
**Bild 36:** Vertikale Verformungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes B-B' für das KSV



**Bild 37:** Vertikale Verschiebungen der Geländeoberfläche/Aufstandsfläche in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes B-B' für das KSV

### 8.2.3.2 Schubspannungen

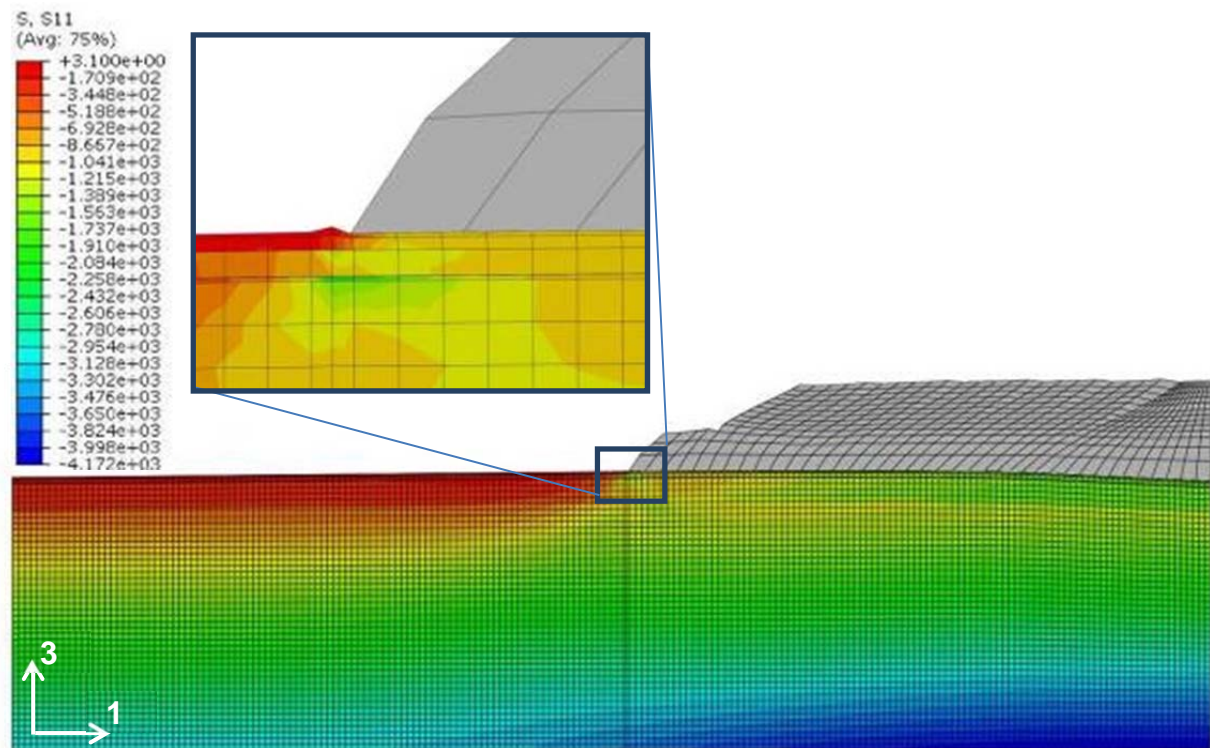
Die berechneten Schubspannungen im Baugrund am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 38 dargestellt. Die in der Haldenaufstandsfläche im Bereich am Haldenfußpunkt berechnete maximale Schubspannung beträgt rd.  $770 \text{ kN/m}^2$ .



**Bild 38:** Schubspannungen in  $[\text{kN/m}^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes B-B' für das KSV

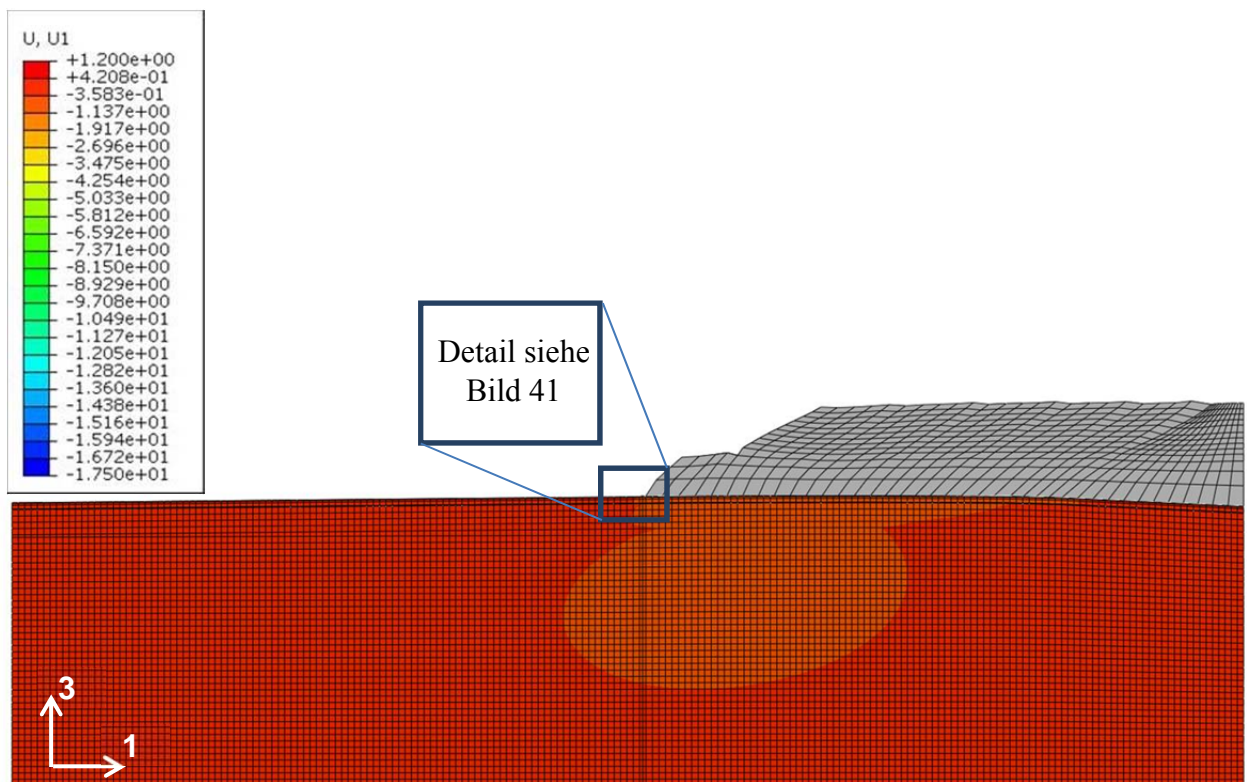
### 8.2.3.3 Horizontale Spannungen, Verformungen und Dehnungen

Die berechneten horizontalen Spannungen des Baugrundes und der Basisabdichtung sind als Konturplot in Bild 39 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale horizontale Spannung beträgt rd.  $2.050 \text{ kN/m}^2$ .

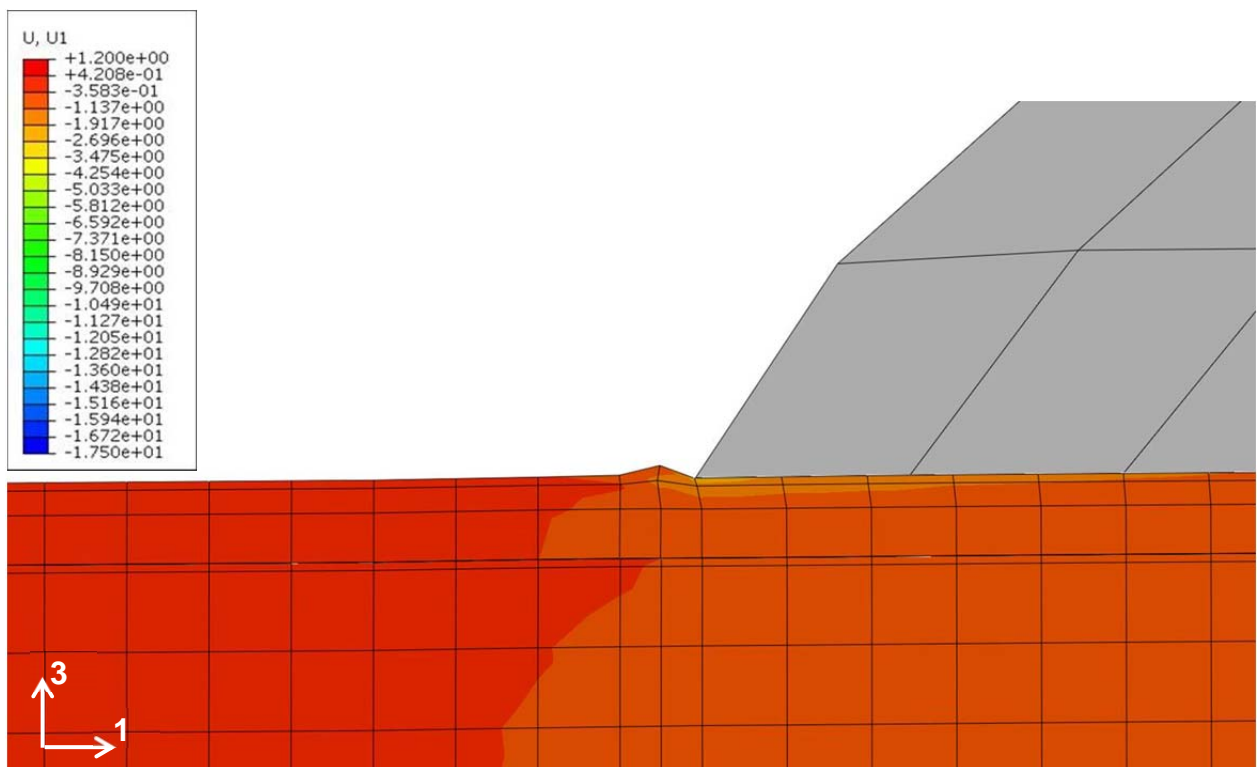


**Bild 39:** Horizontale Spannungen in  $[kN/m^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes B-B' für das KSV

Die berechneten horizontalen Verformungen des Baugrundes sind in den Bildern 40 und 41 als Konturplots dargestellt. Die maximale horizontale Verschiebung des Haldenfußpunktes in der Aufstandsfläche beträgt rd. 2,4 m. Die berechnete horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit  $v_h$  beträgt am Ende des Untersuchungszeitraumes rd. 2 cm/a.

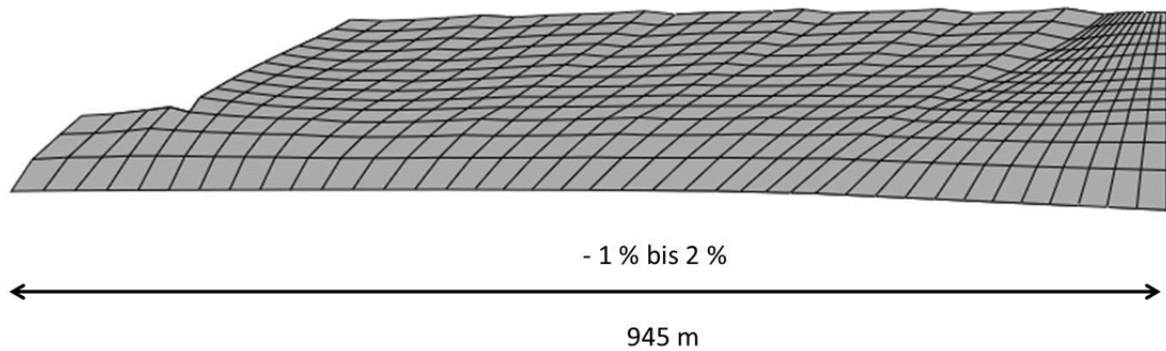


**Bild 40:** Horizontale Verformungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes B-B' für das KSV



**Bild 41:** Detail: Horizontale Verformungen in [m] im Bereich des Haldenfußes am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnitt B-B' für das KSV

In Bild 42 sind die Bereiche horizontaler Dehnungen (positiv) und Stauchungen (negativ) im Baugrund unterhalb der Rückstandshalde am Ende des Untersuchungszeitraumes als Bandbreiten dargestellt. Sie betragen zwischen 1 % Stauchung und 2 % Dehnung.

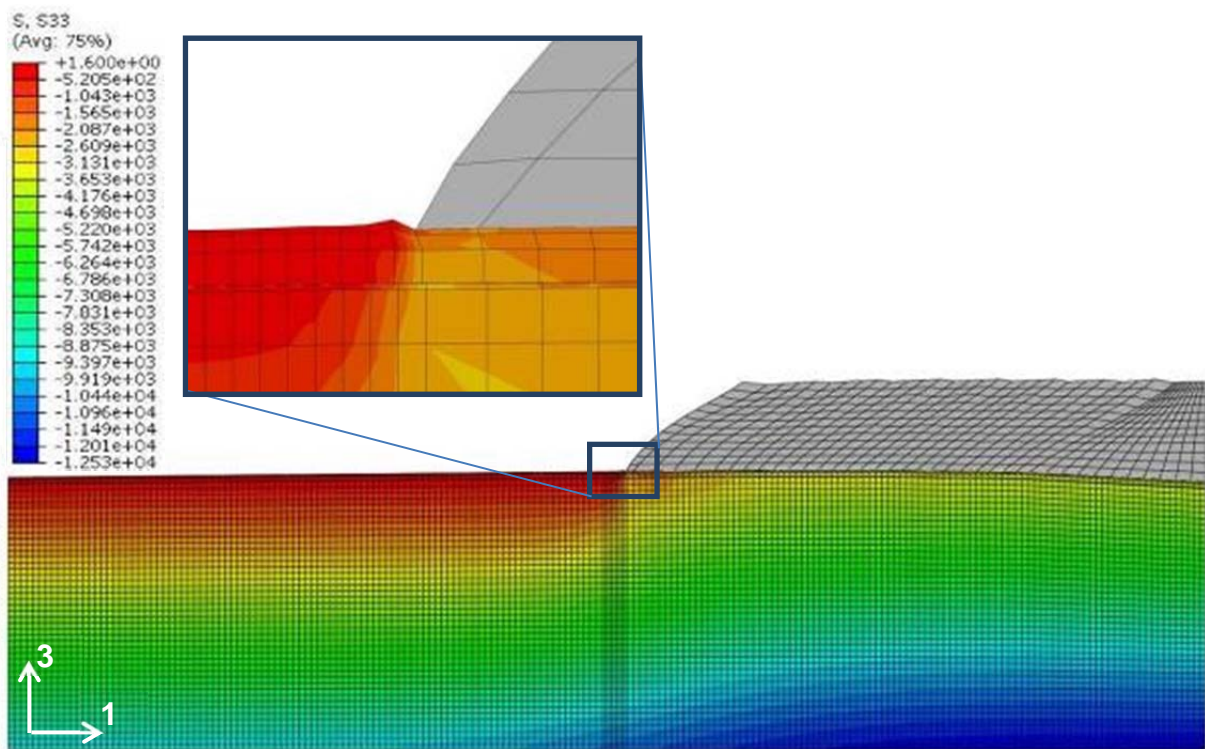


**Bild 42:** Horizontale Dehnungen und Stauchungen der Basisabdichtung unterhalb der Halde des Schnittes B-B' für das KSV

## 8.2.4 Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes B-B' für das FSV

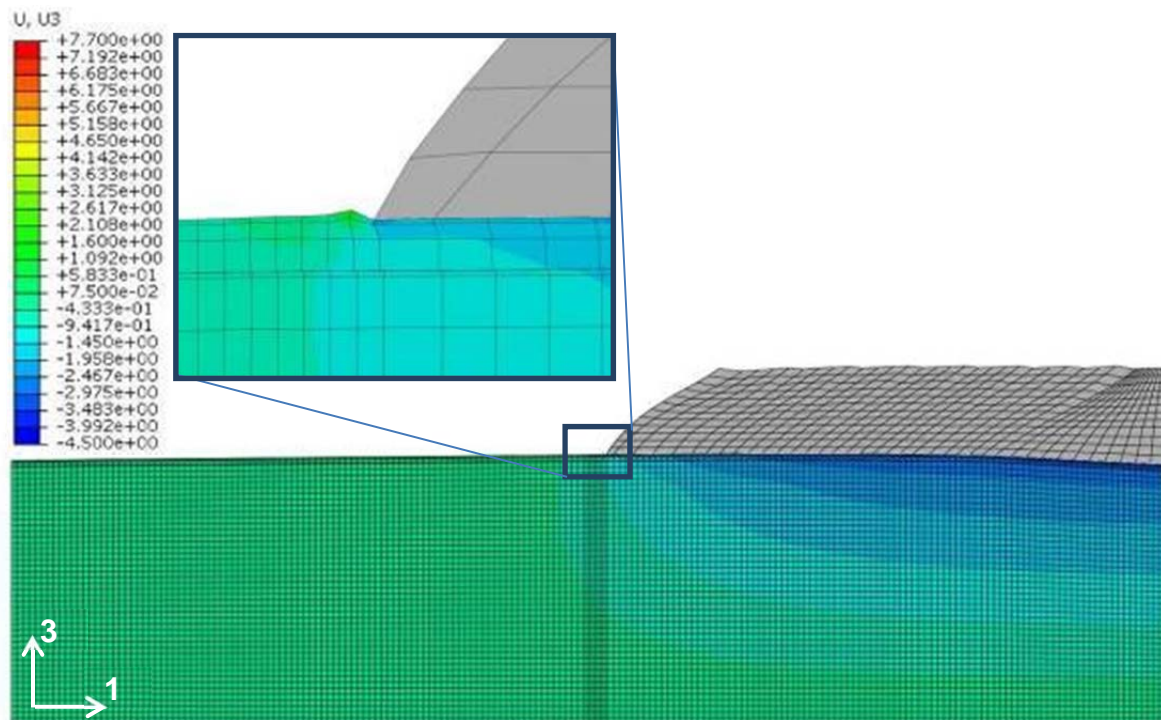
### 8.2.4.1 Vertikale Spannungen und Verformungen

Die berechneten vertikalen Spannungen am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 43 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale Vertikalspannung beträgt rd. 1.050 kN/m<sup>2</sup>

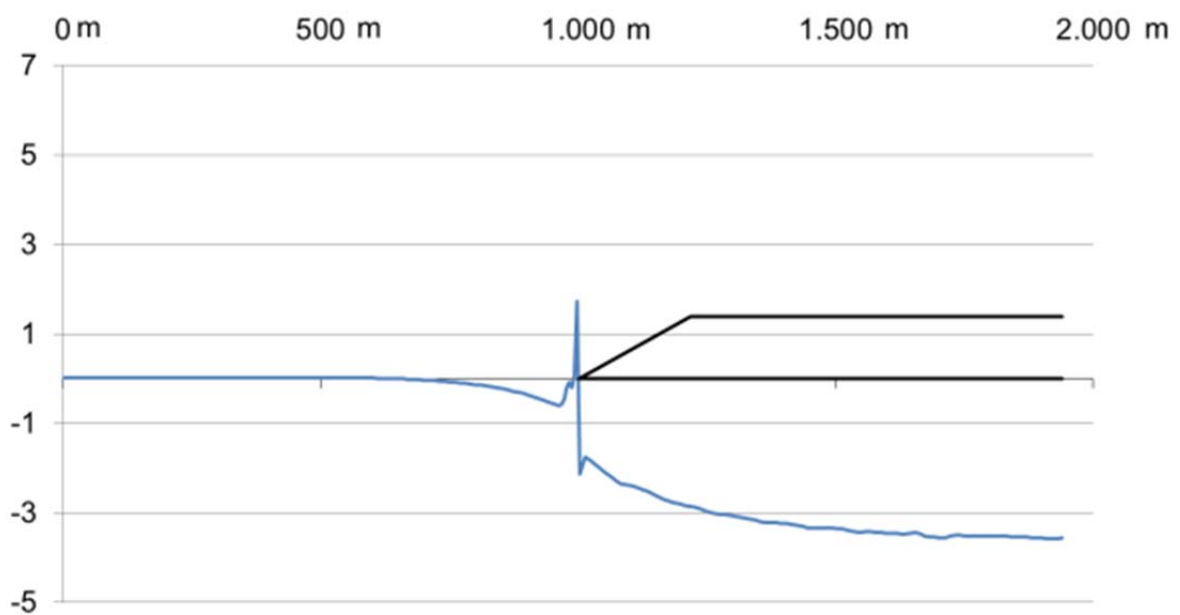


**Bild 43:** Vertikale Spannungen in  $[\text{kN/m}^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes B-B' für das FSV

In den Bildern 44 und 45 sind die berechneten vertikalen Verformungen des Baugrundes und der Basisabdichtung für das Ende des Untersuchungszeitraumes dargestellt. Die berechneten maximalen Setzungen unter der Halde betragen bis zu 3,6 m. Im Bereich des Haldenfußes betragen die Setzungen rd. 2,0 m. Die rechnerischen Hebungen betragen bis zu 1,7 m. Der Bereich der Hebungen liegt vor dem Haldenfußpunkt.



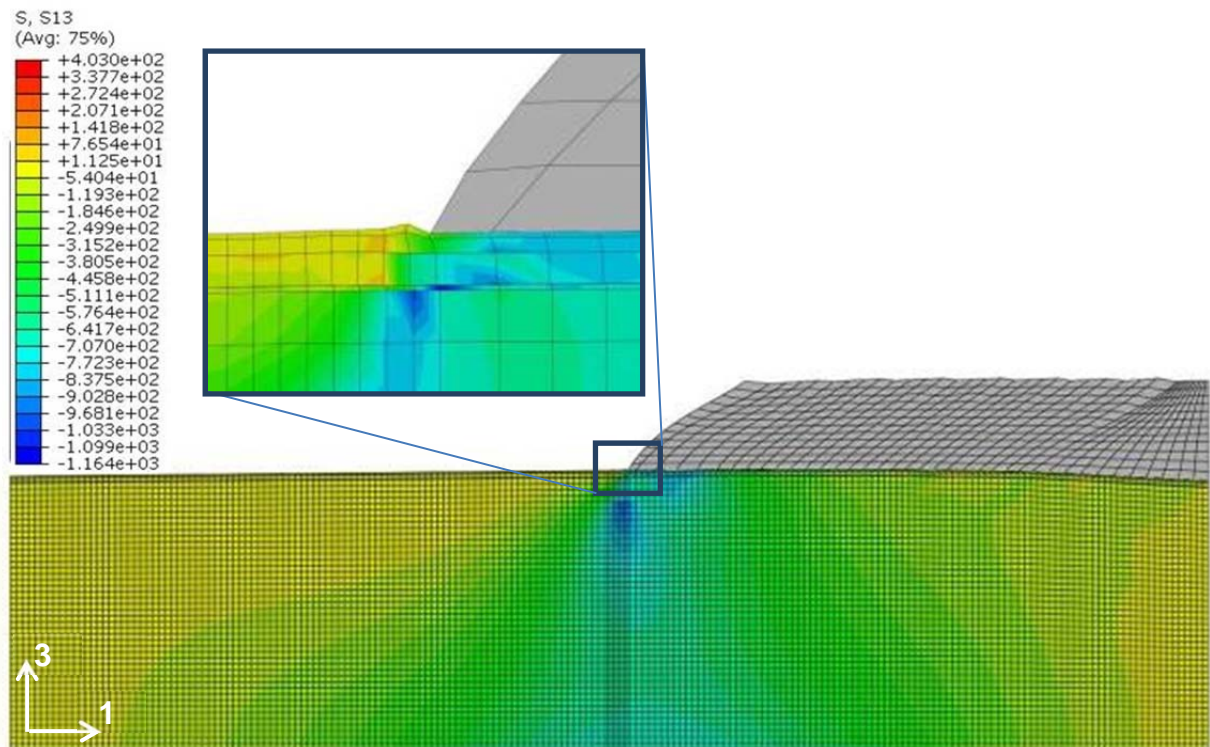
**Bild 44:** Vertikale Verformungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes B-B' für das FSV



**Bild 45:** Vertikale Verformungen der Geländeoberfläche/Aufstandsfläche in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes B-B' für das FSV

### 8.2.4.2 Schubspannungen

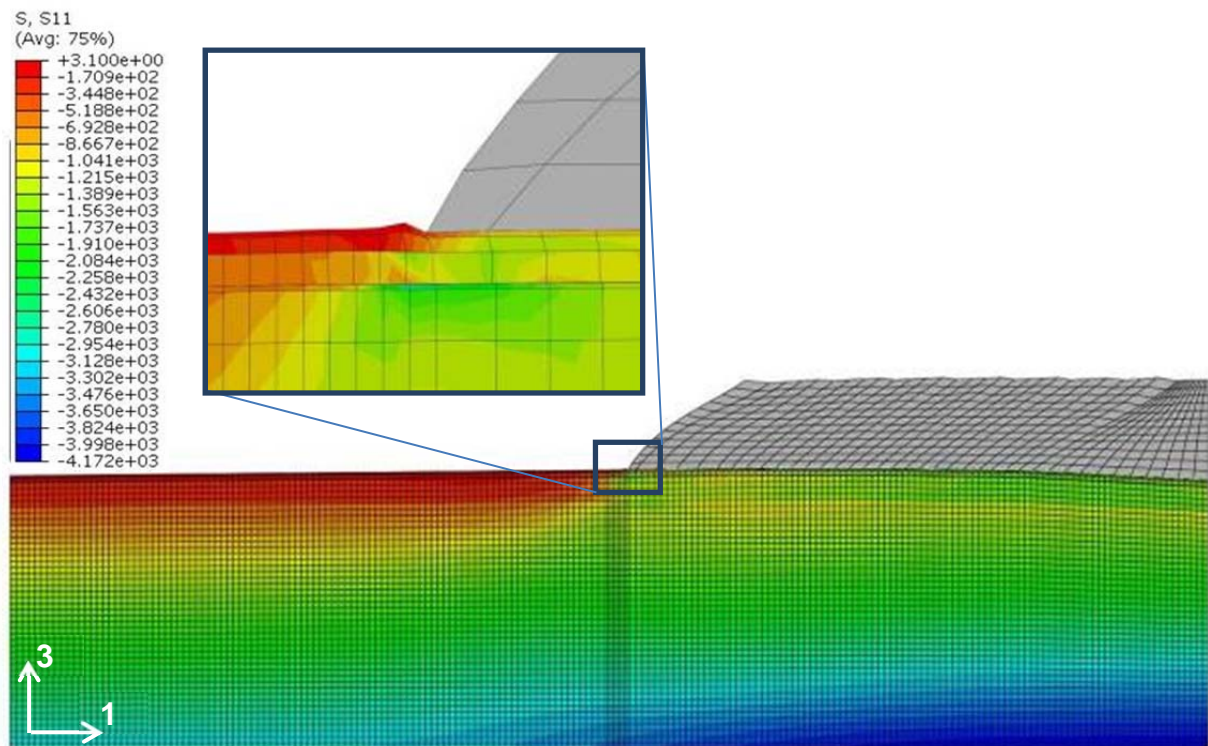
Die berechneten Schubspannungen im Baugrund am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 46 dargestellt. Die in der Haldenaufstandsfläche im Bereich am Haldenfußpunkt berechnete maximale Schubspannung beträgt rd.  $850 \text{ kN/m}^2$ .



**Bild 46:** Schubspannungen in  $[\text{kN/m}^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes B-B' für das FSV

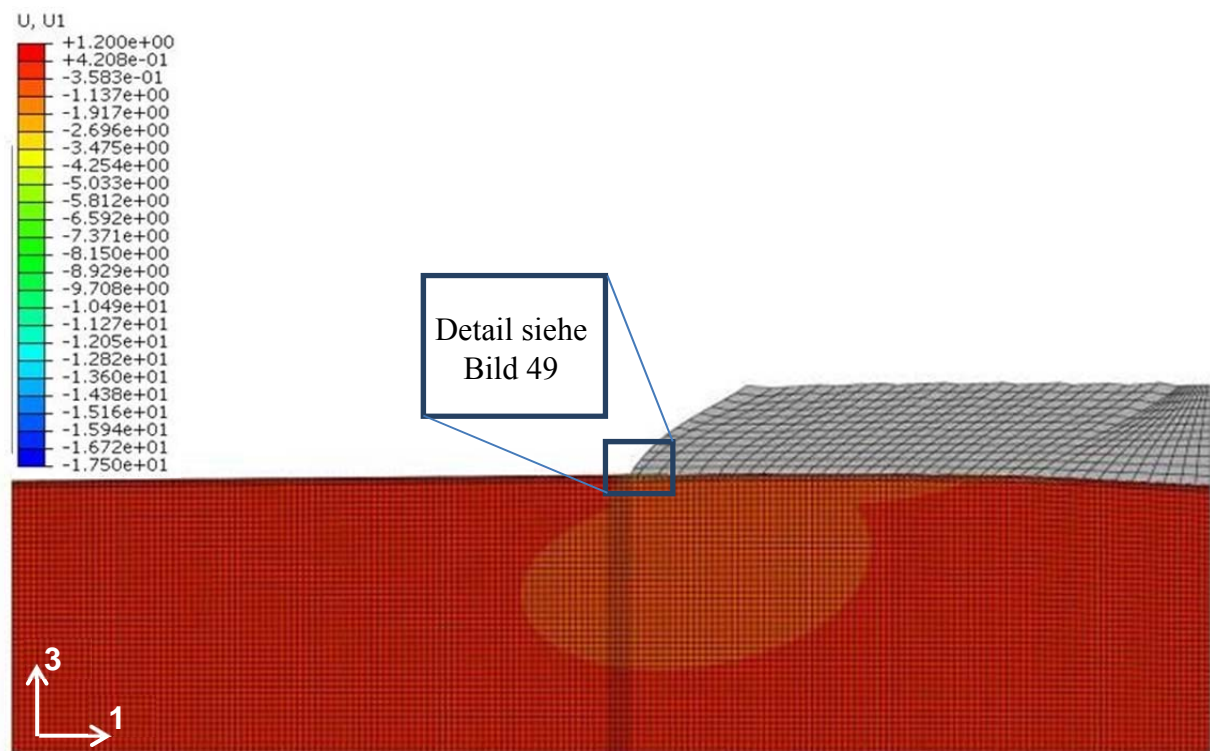
### 8.2.4.3 Horizontale Spannungen, Verformungen und Dehnungen

Die berechneten horizontalen Spannungen des Baugrundes und der Basisabdichtung sind als Konturplot in Bild 47 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale horizontale Spannung beträgt rd.  $2.610 \text{ kN/m}^2$ .

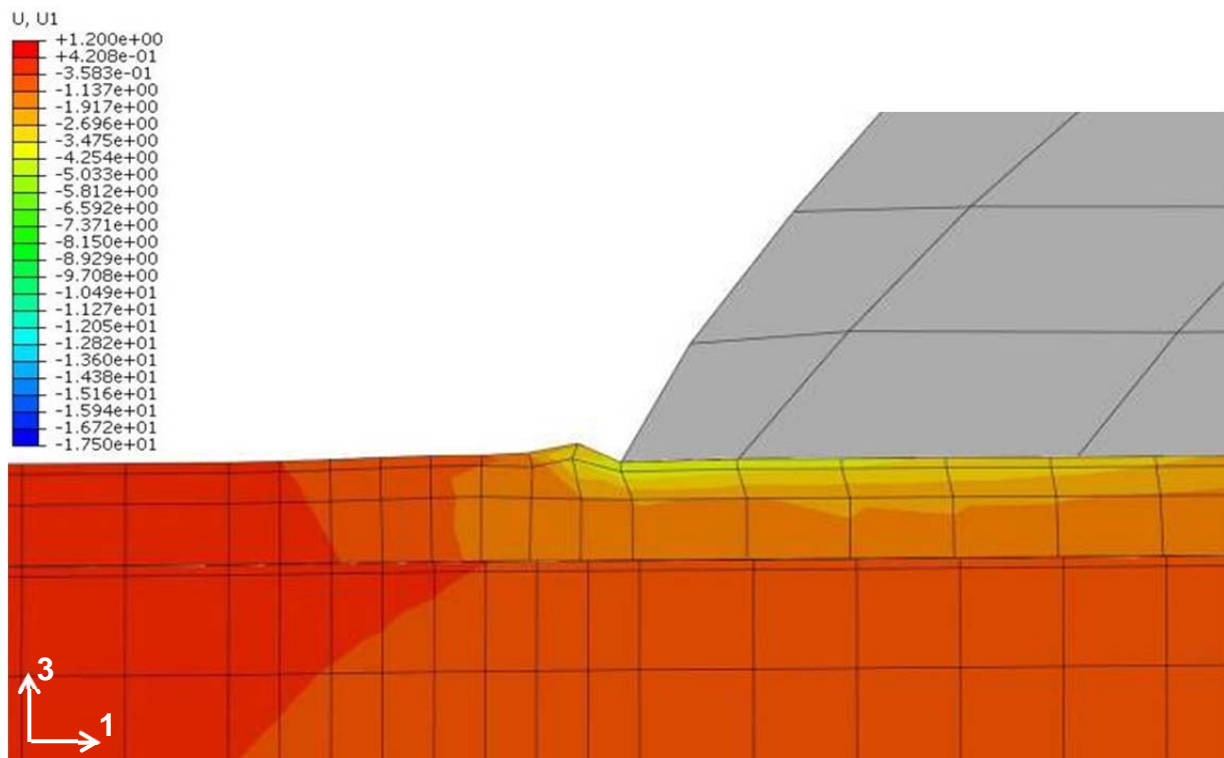


**Bild 47:** Horizontale Spannungen in  $[\text{kN/m}^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes B-B' für das FSV

Die berechneten horizontalen Verformungen des Baugrundes sind in den Bildern 48 und 49 als Konturplots dargestellt. Die maximale horizontale Verschiebung des Haldenfußpunktes in der Aufstandsfläche beträgt rd. 4,3 m. Die berechnete horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit  $v_h$  beträgt am Ende des Untersuchungszeitraumes rd. 3 cm/a.

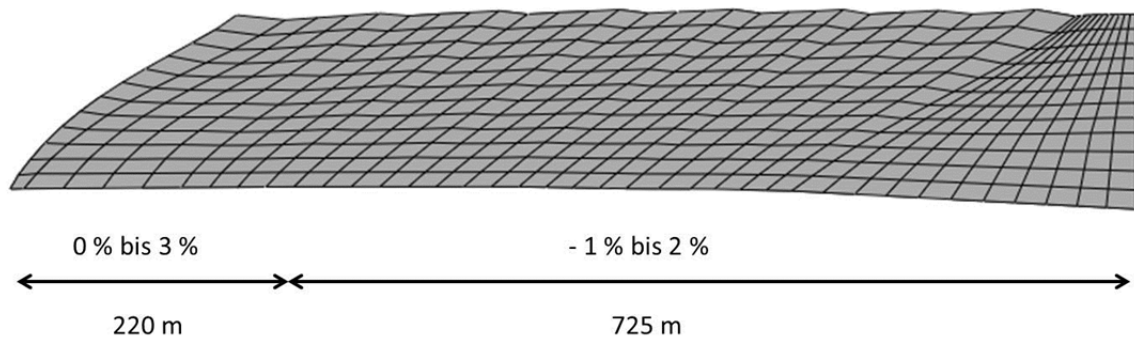


**Bild 48:** Horizontale Verformungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes B-B' für das FSV



**Bild 49:** Detail: Horizontale Verformungen in [m] im Bereich des Haldenfußes am Ende des Untersuchungszeitraumes des Schnittes B-B' für das FSV

In Bild 50 sind die Bereiche horizontaler Dehnungen (positiv) und Stauchungen (negativ) im Baugrund unterhalb der Rückstandshalde am Ende des Untersuchungszeitraumes als Bandbreiten dargestellt. Sie betragen zwischen 1 % Stauchung und 3 % Dehnung.

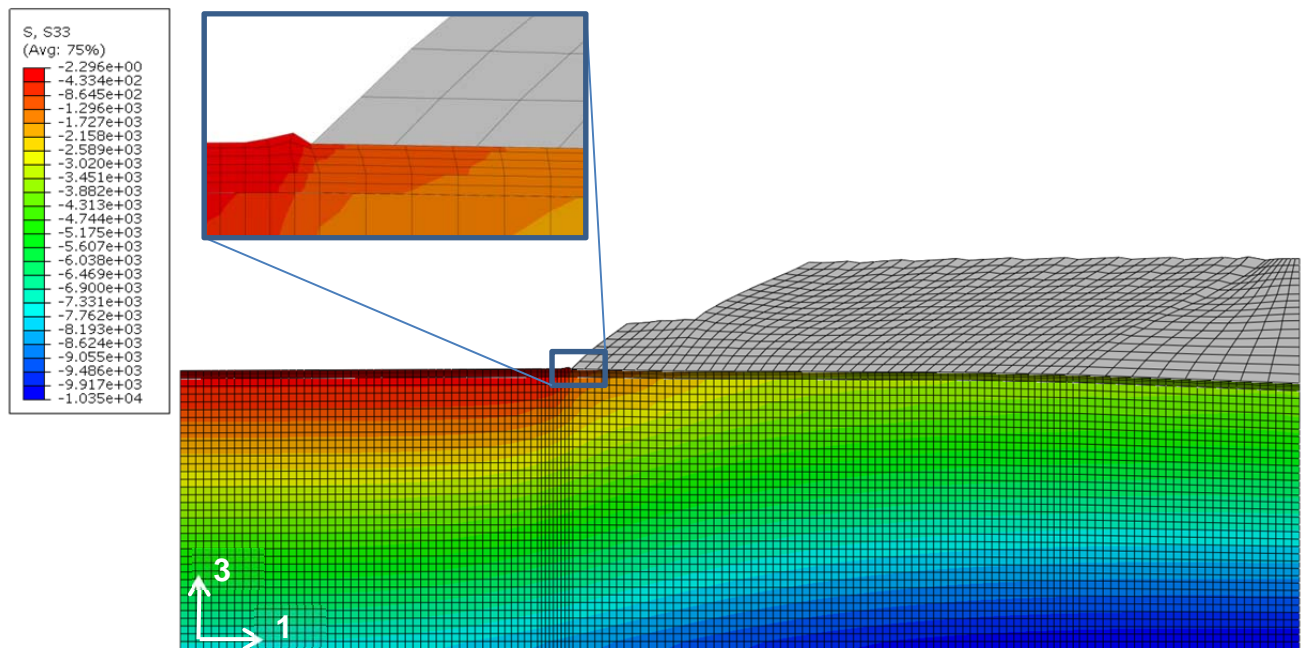


**Bild 50:** Horizontale Dehnungen und Stauchungen der Basisabdichtung unterhalb der Halde des Schnittes B-B' für das FSV

## 8.2.5 Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes C-C' 2016 für das KSV

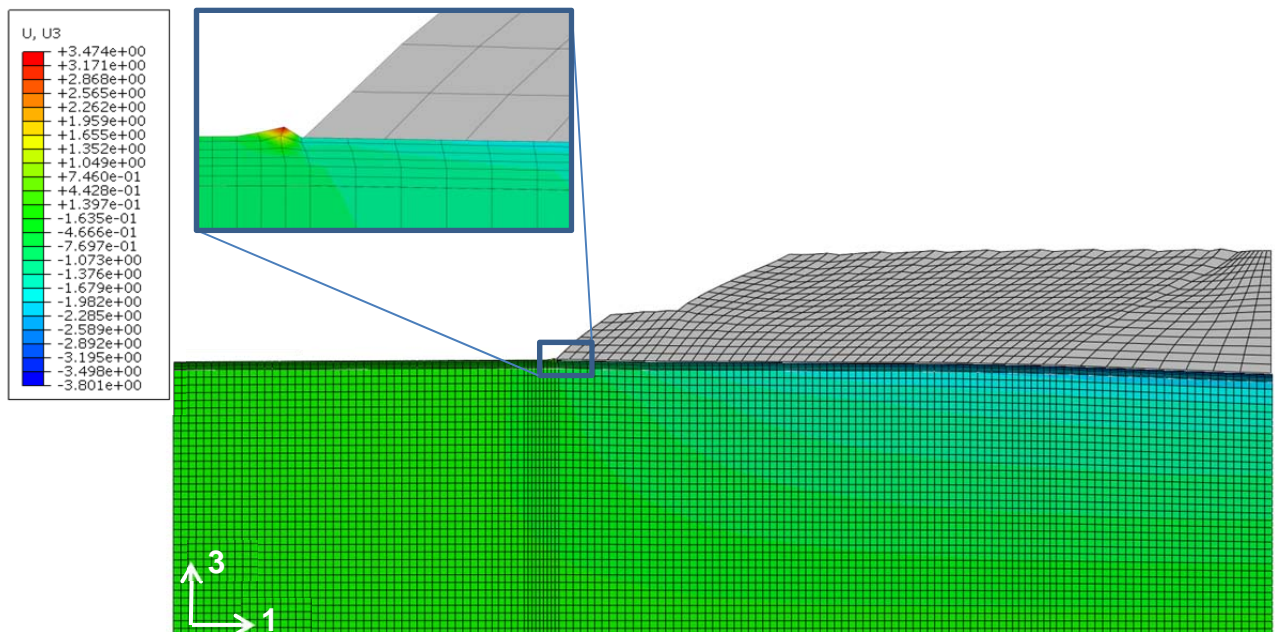
### 8.2.5.1 Vertikale Spannungen und Verformungen

Die berechneten vertikalen Spannungen am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 51 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale Vertikalspannung beträgt rd. 870 kN/m<sup>2</sup>.

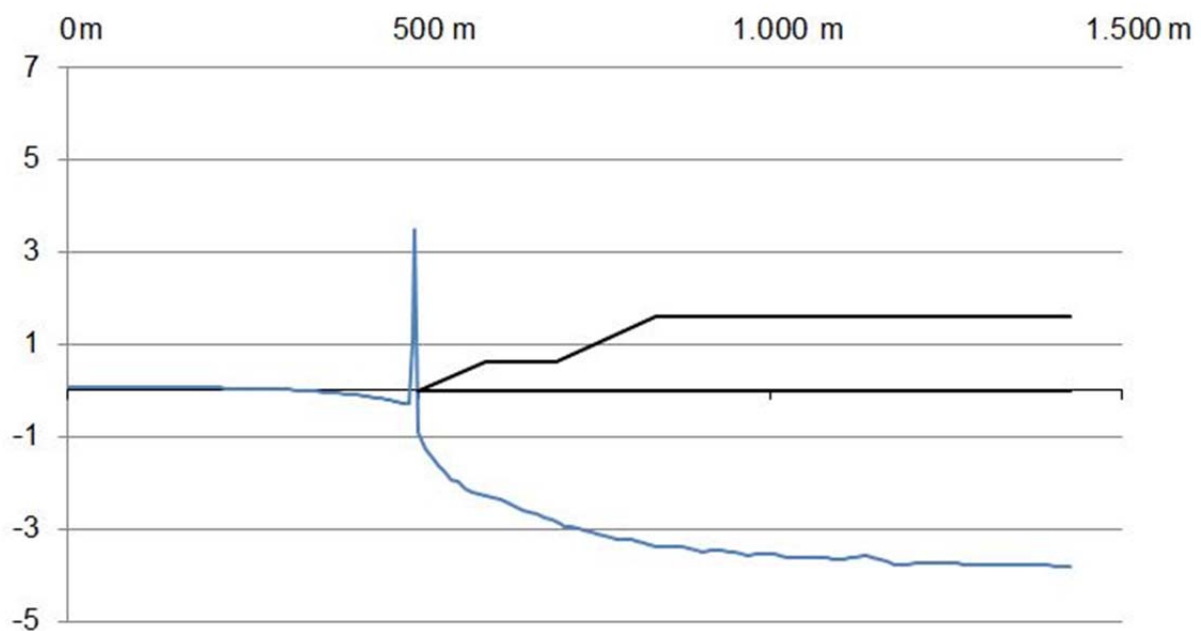


**Bild 51:** Vertikale Spannungen in  $[\text{kN/m}^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'<sub>2016</sub> für das KSV

In den Bildern 52 und 53 sind die berechneten vertikalen Verformungen 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. 1,3 m. Die rechnerischen Hebungen betragen bis zu 3,5 m. Der Bereich der maximalen Hebungen liegt vor dem Haldenfußpunkt.



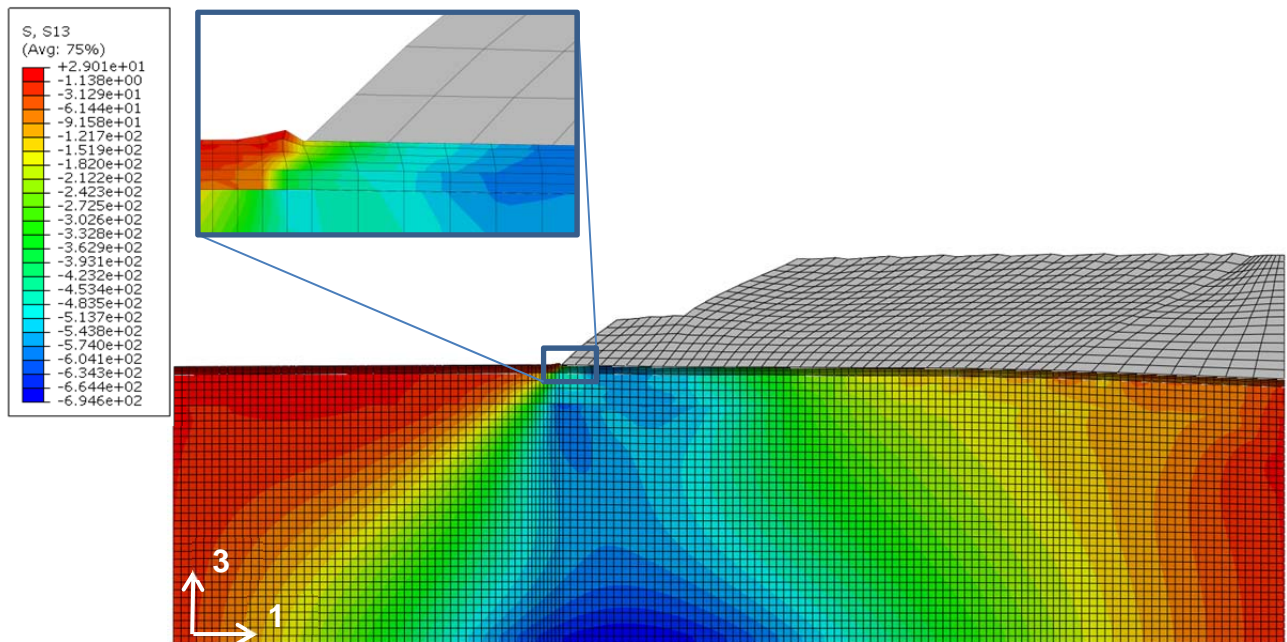
**Bild 52:** Vertikale Verformungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes im



**Bild 53:** Vertikale Verformungen der Geländeoberfläche/Aufstandsfläche in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'<sub>2016</sub> für das KSV, Setzungen negativ

### 8.2.5.2 Schubspannungen

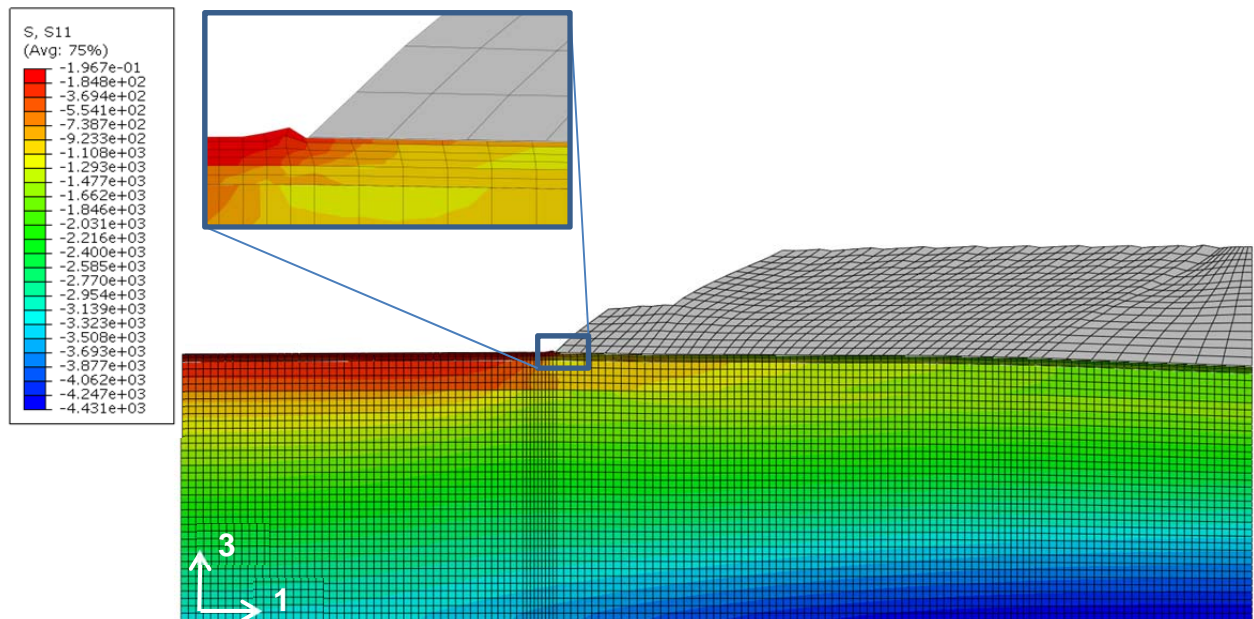
Die berechneten Schubspannungen im Baugrund am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 54 dargestellt. Die in der Haldenaufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale Schubspannung beträgt rd. 630 kN/m<sup>2</sup>.



**Bild 54:** Schubspannungen in [kN/m<sup>2</sup>] am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'<sub>2016</sub> für das KSV

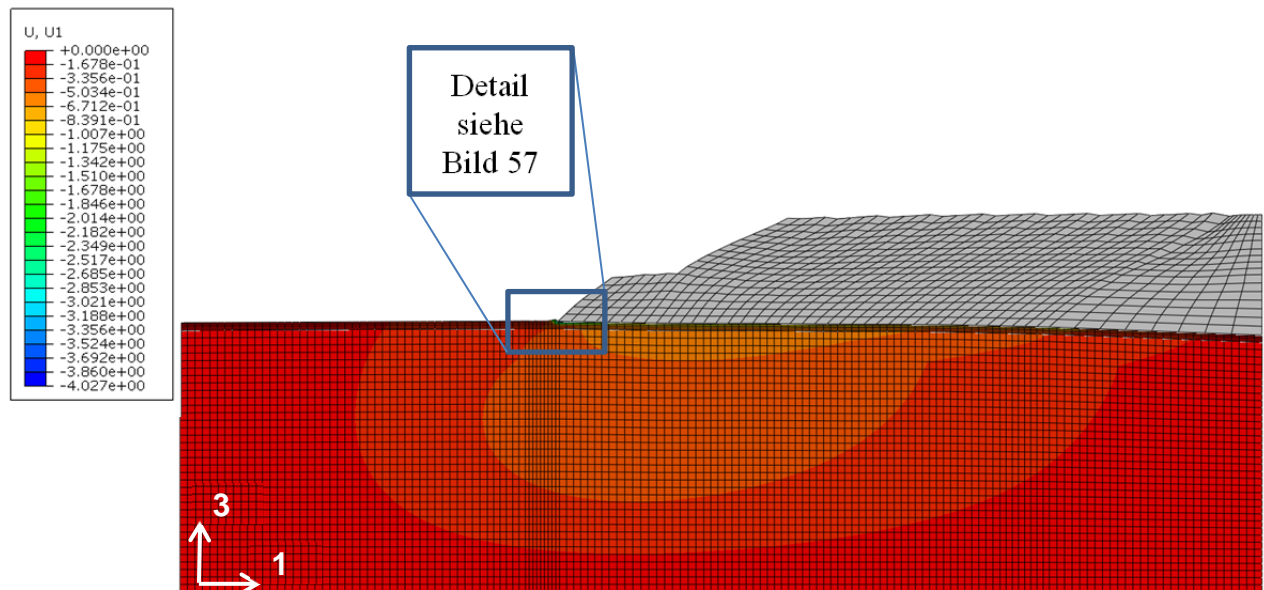
### 8.2.5.3 Horizontale Spannungen, Verschiebungen und Dehnungen

Die berechneten horizontalen Spannungen des Baugrundes und der Basisabdichtung sind als Konturplot in Bild 55 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale horizontale Spannung beträgt rd. 1.420 kN/m<sup>2</sup>.

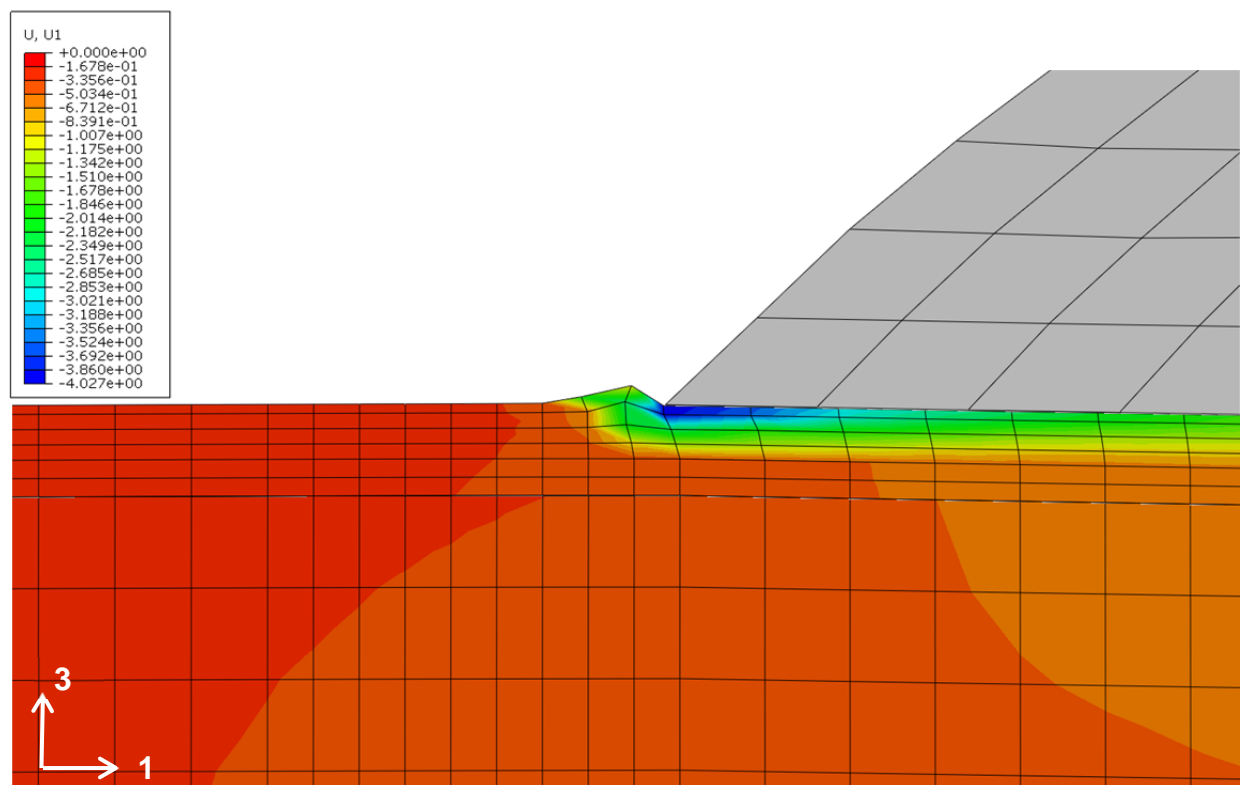


**Bild 55:** Horizontale Spannungen in  $[\text{kN/m}^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'<sub>2016</sub> für das KSV

Die berechneten horizontalen Verformungen des Baugrundes sind in den Bildern 56 und 57 als Konturplots dargestellt. Die maximale horizontale Verschiebung des Haldenfußpunktes in der Aufstandsfläche beträgt rd. 4,0 m. Die berechnete maximale horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit  $v_{h,\max}$  beträgt rd. 25 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.

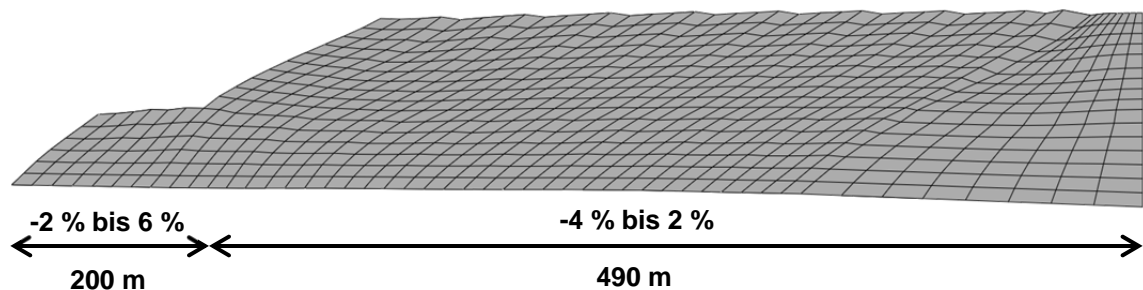


**Bild 56:** Horizontale Verschiebungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'<sub>2016</sub> für das KSV



**Bild 57:** Detail: Horizontale Verformungen des Baugrundes in [m] im Bereich des Haldenfußes am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'<sub>2016</sub> für das KSV

In Bild 58 sind die Bereiche horizontaler Dehnungen (positiv) und Stauchungen (negativ) im Baugrund unterhalb der Rückstandshalde am Ende des Untersuchungszeitraumes als Bandbreiten dargestellt. Die Bandbreite liegt zwischen 2 % Stauchung und 6 % Dehnung.

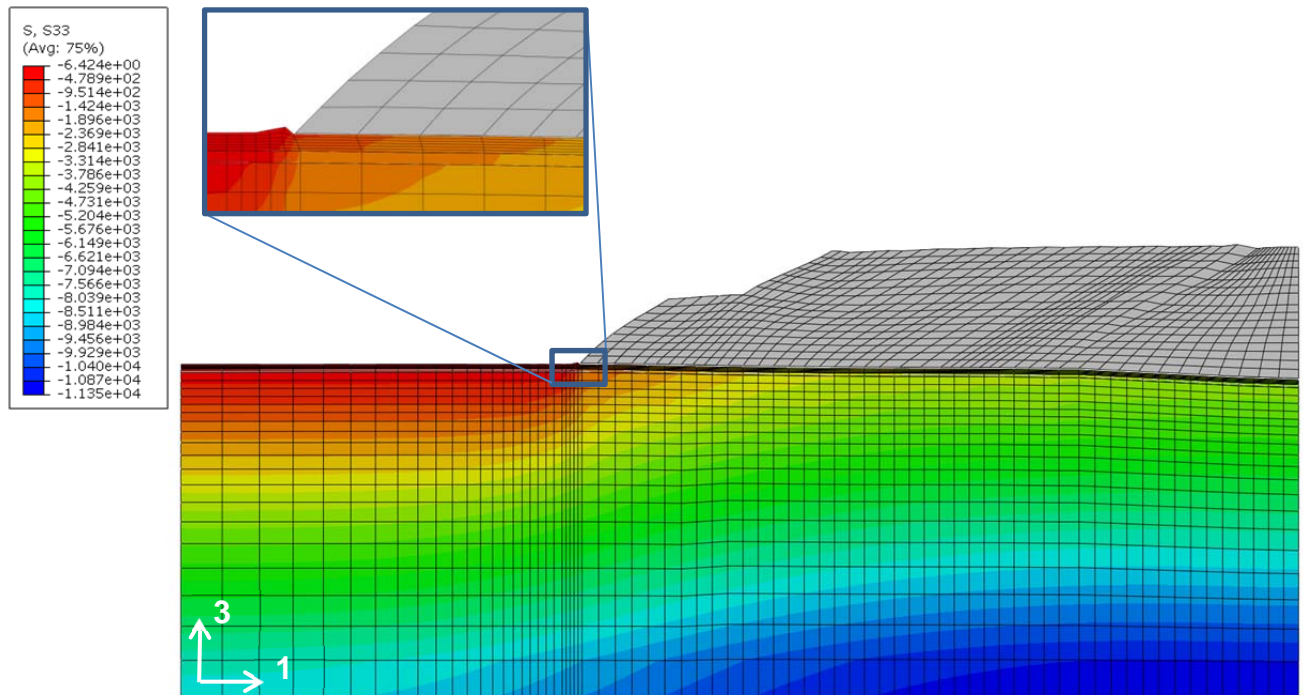


**Bild 58:** Horizontale Dehnungen und Stauchungen der Basisabdichtung im Bereich des Haldenfußes unterhalb der Halde im Schnitt C-C'<sub>2016</sub>, Endzustand

## 8.2.6 Ergebnisse der Gebrauchstauglichkeitsuntersuchungen des Schnittes C-C'<sub>2017</sub> für das KSV

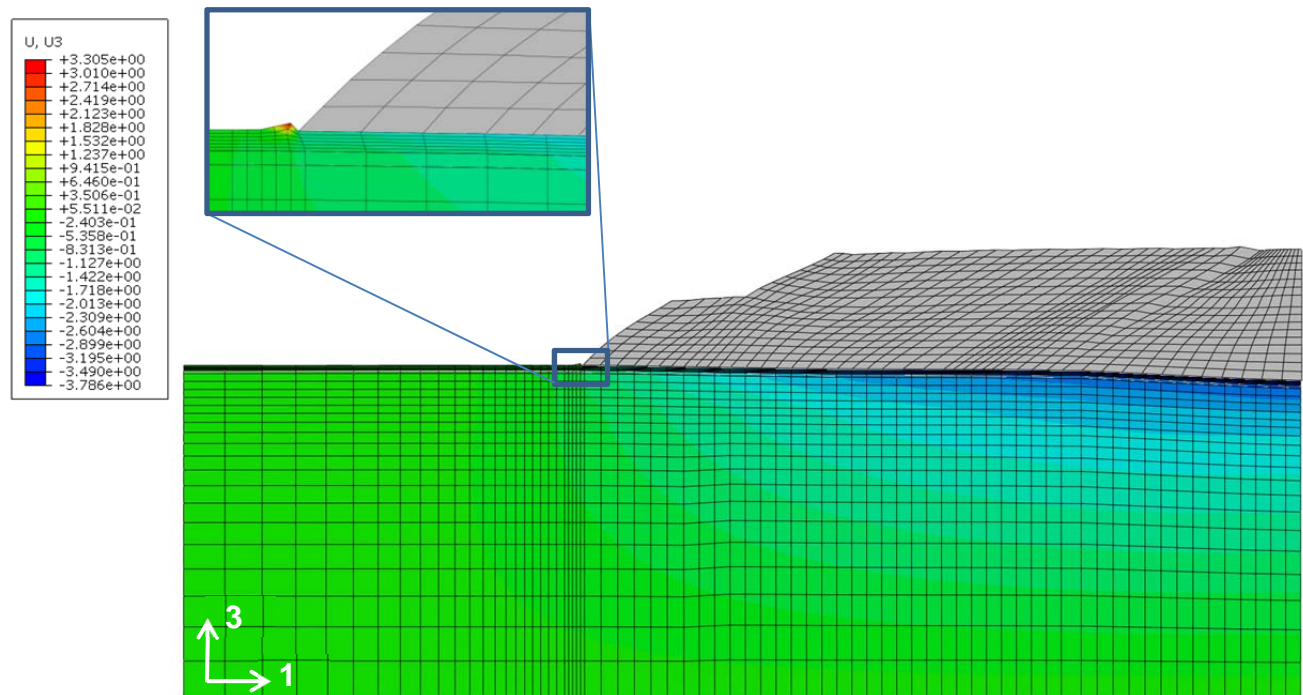
### 8.2.6.1 Vertikale Spannungen und Verformungen

Die berechneten vertikalen Spannungen am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 59 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale Vertikalspannung beträgt rd. 1.000 kN/m<sup>2</sup>.

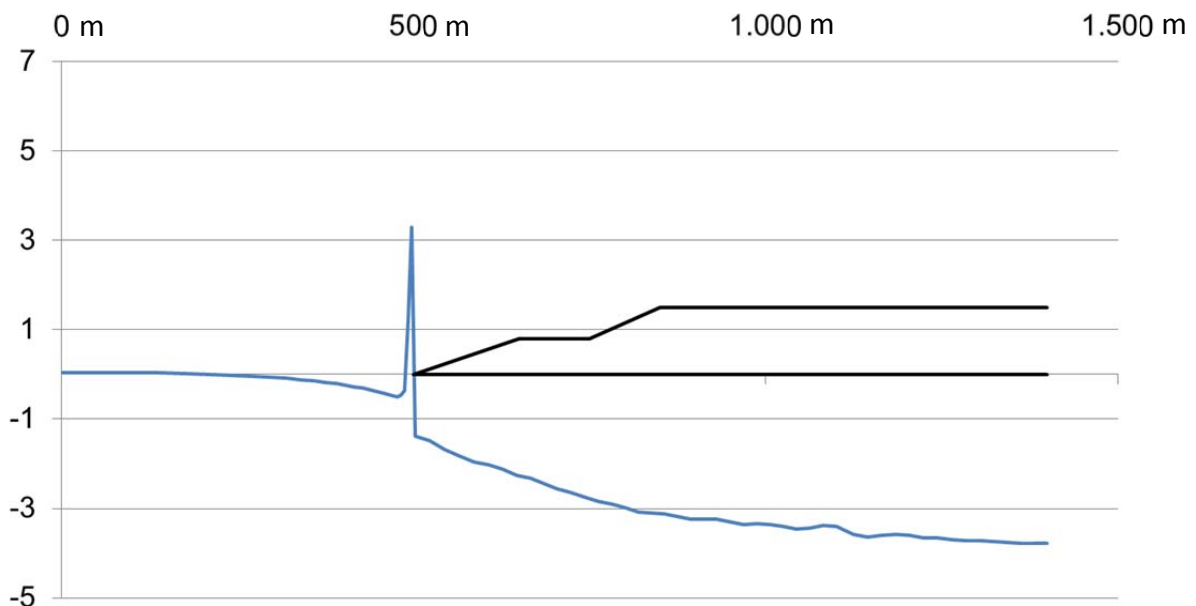


**Bild 59:** Vertikale Spannungen in  $[\text{kN/m}^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'<sub>2017</sub> für das KSV

In den Bildern 60 und 61 sind die berechneten vertikalen Verformungen 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. 1,4 m. Die rechnerischen Hebungen betragen bis zu 3,3 m. Der Bereich der maximalen Hebungen liegt vor dem Haldenfußpunkt.



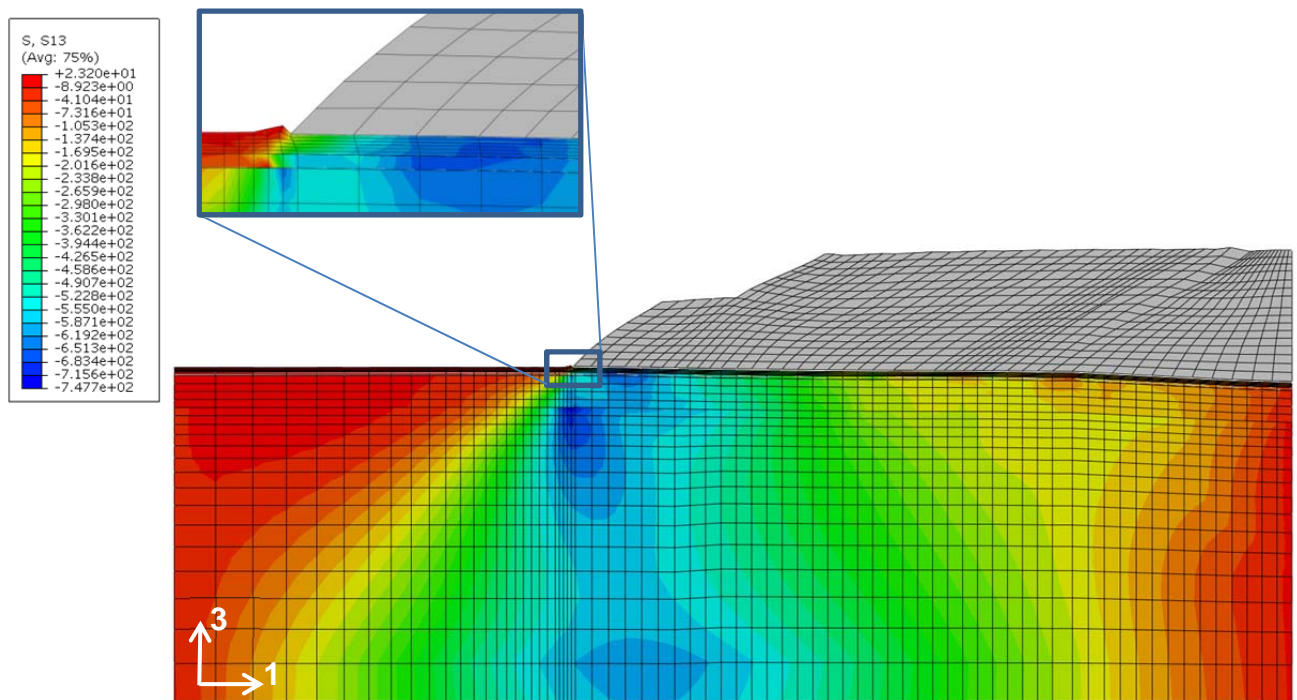
**Bild 60:** Vertikale Verformungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'<sub>2017</sub> für das KSV



**Bild 61:** Vertikale Verformungen der Geländeoberfläche/Aufstandsfläche in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'<sub>2017</sub> für das KSV, Setzungen negativ

### 8.2.6.2 Schubspannungen

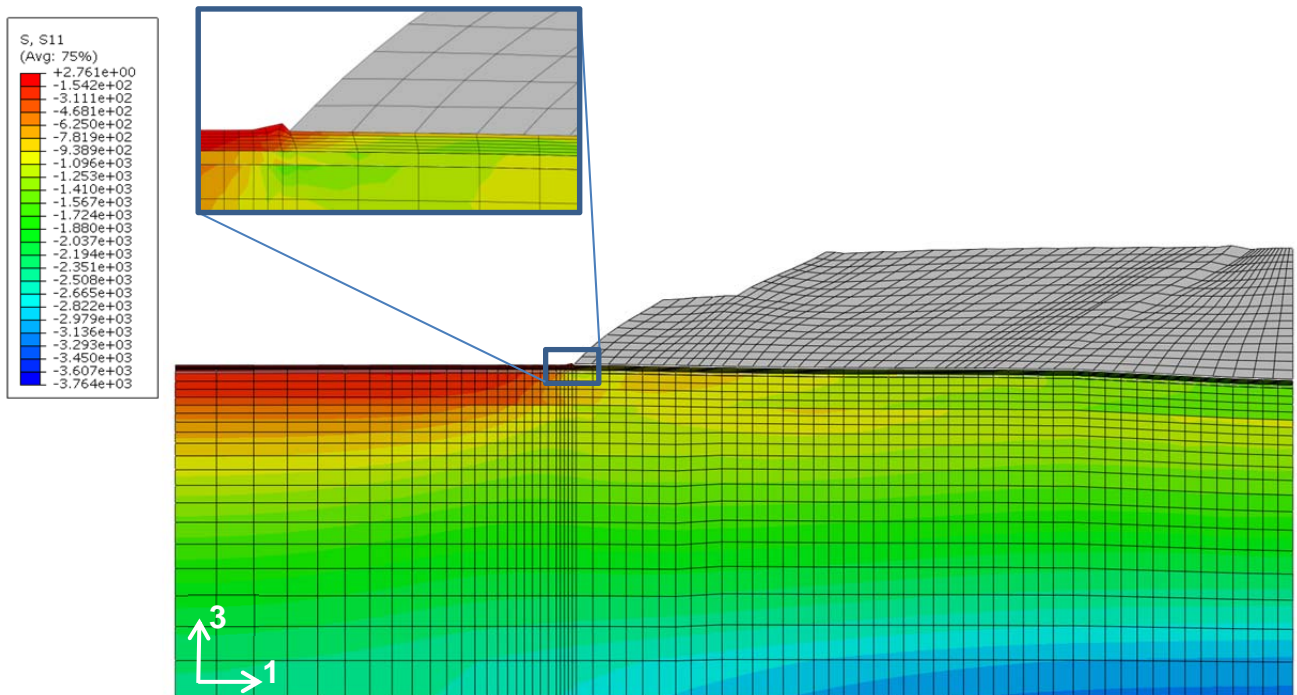
Die berechneten Schubspannungen im Baugrund am Ende des Untersuchungszeitraumes sind in Bild 62 dargestellt. Die in der Haldenaufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale Schubspannung beträgt rd. 890 kN/m<sup>2</sup>.



**Bild 62:** Schubspannungen in [kN/m<sup>2</sup>] am Ende des Untersuchungszeitraumes Schnitt C-C'<sub>2017</sub> für das KSV

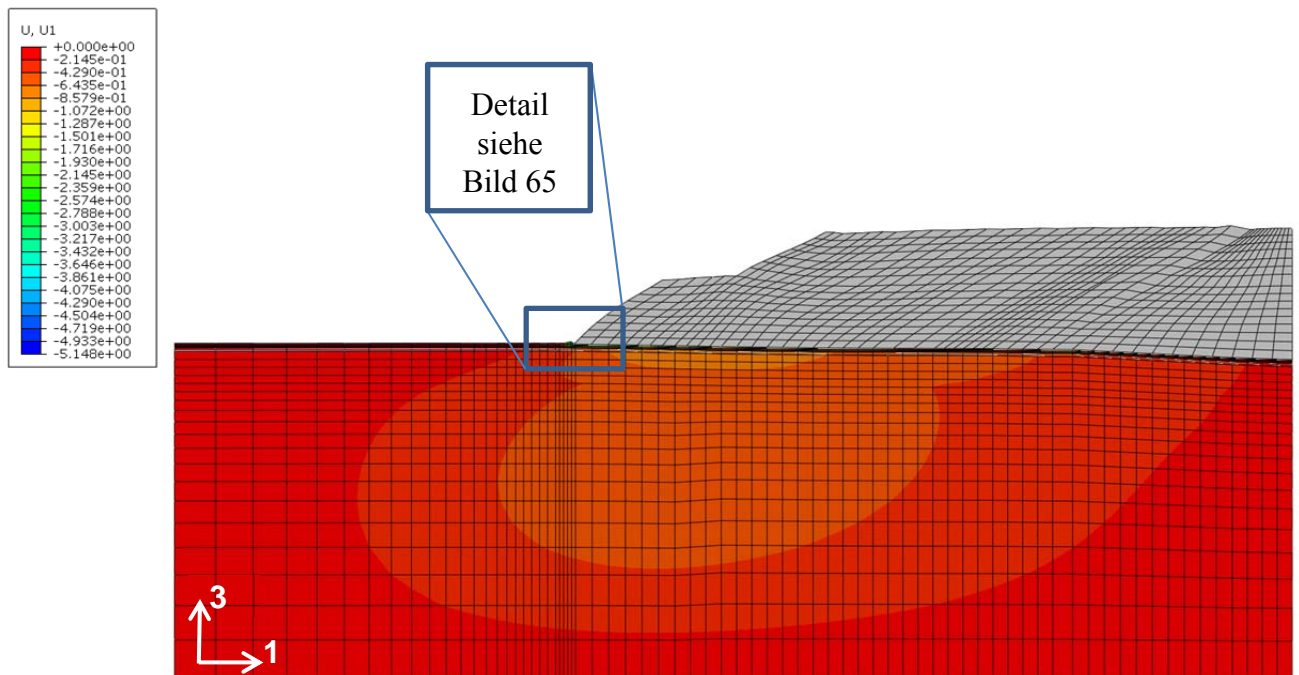
### 8.2.6.3 Horizontale Spannungen, Verschiebungen und Dehnungen

Die berechneten horizontalen Spannungen des Baugrundes und der Basisabdichtung sind als Konturplot in Bild 63 dargestellt. Die in der Aufstandsfläche im Bereich des Haldenfußpunktes berechnete maximale horizontale Spannung beträgt rd. 1.600 kN/m<sup>2</sup>.

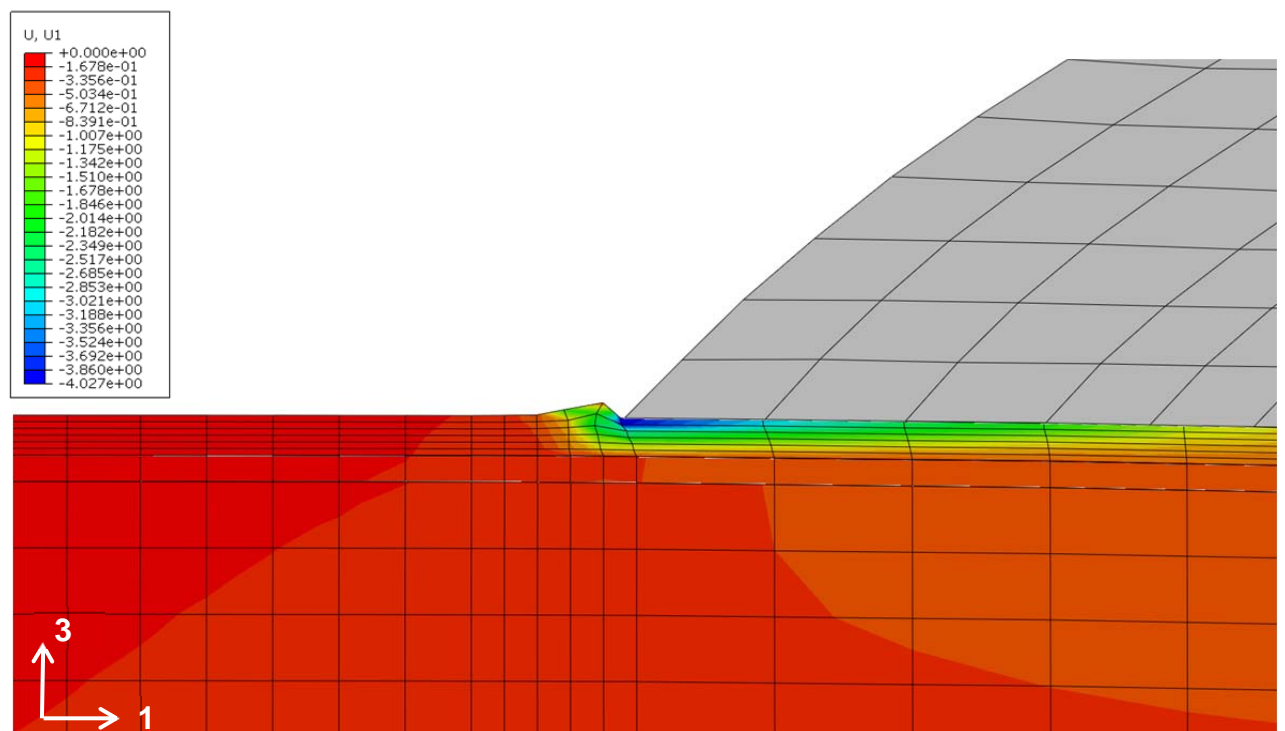


**Bild 63:** Horizontale Spannungen in  $[\text{kN/m}^2]$  am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'<sub>2017</sub> für das KSV

Die berechneten horizontalen Verformungen des Baugrundes sind in den Bildern 64 und 65 als Konturplots dargestellt. Die maximale horizontale Verschiebung des Haldenfußpunktes in der Aufstandsfläche beträgt rd. 4,2 m. Die berechnete maximale horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit  $v_{h,\max}$  beträgt rd. 28 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.

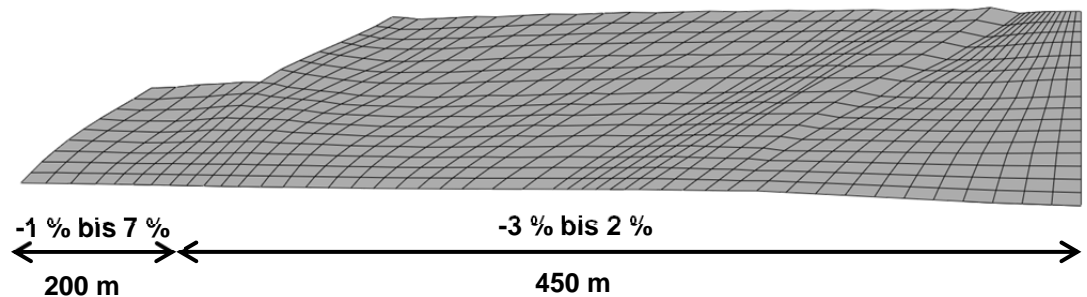


**Bild 64:** Horizontale Verschiebungen in [m] am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'<sub>2017</sub> für das KSV



**Bild 65:** Detail: Horizontale Verformungen des Baugrundes in [m] im Bereich des Haldenfußes am Ende des Untersuchungszeitraumes im Schnitt C-C'<sub>2017</sub> für das KSV

In Bild 66 sind die Bereiche horizontaler Dehnungen (positiv) und Stauchungen (negativ) im Baugrund unterhalb der Rückstandshalde am Ende des Untersuchungszeitraumes als Bandbreiten dargestellt. Die Bandbreite liegt zwischen 1 % Stauchung und 7 % Dehnung.



**Bild 66:** Horizontale Dehnungen und Stauchungen der Basisabdichtung im Bereich des Haldenfußes unterhalb der Halde im Schnitt C-C'<sub>2017</sub>, Endzustand

### 8.3 Vergleich der Berechnungsergebnisse

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse für die Untersuchungsschnitte A-A' und B-B' nach einem Betrachtungszeitraum von 85 Jahren zeigt, dass für das kombinierte Schüttverfahren (KSV) günstigere Prognosewerte als für das Flankenschüttverfahren (FSV) zu erwarten sind. Dies gilt insbesondere für die maßgebenden Werte für horizontale Verschiebungen, Verschiebungsgeschwindigkeiten und Dehnungen. Die maßgebenden Werte der Schnitte A-A' (KSV und FSV), B-B' (KSV und FSV), C-C'<sub>2016</sub> (KSV) und C-C'<sub>2017</sub> (KSV) sind in Tabelle 7 dargestellt.

	<b>Schnitt A-A'</b>		<b>Schnitt B-B'</b>		<b>Schnitt C-C'</b>	
	<b>KSV</b>	<b>FSV</b>	<b>KSV</b>	<b>FSV</b>	<b>2016 (KSV)</b>	<b>2017 (KSV)</b>
<b>Horizontale Verformung U1 [m]</b>	4,2	8,6	2,4	4,3	4,0	4,2
<b>Horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit <math>v_{h,max,Schüttende}</math> [cm/a]</b>	23	58	19	37	25	28
<b>Horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit <math>v_{h, &gt; 70a}</math> [cm/a]</b>	3	3	2	3	5	5
<b>Dehnung [%]</b>	5	6	2	3	6	7

**Tabelle 7:** Vergleich der Berechnungsergebnisse

## 9 Ergänzende numerische Untersuchungen

Im Zuge der Erfassung der Ursachen der großen Verschiebungen und zum Nachweis der Standsicherheit der Haldenböschung der Südwestflanke der bestehenden Rückstandshalde Hattorf wurden umfangreiche Maßnahmen zur Baugrunderkundung sowie numerische Berechnungen ausgeführt [U5.4], [U5.5].

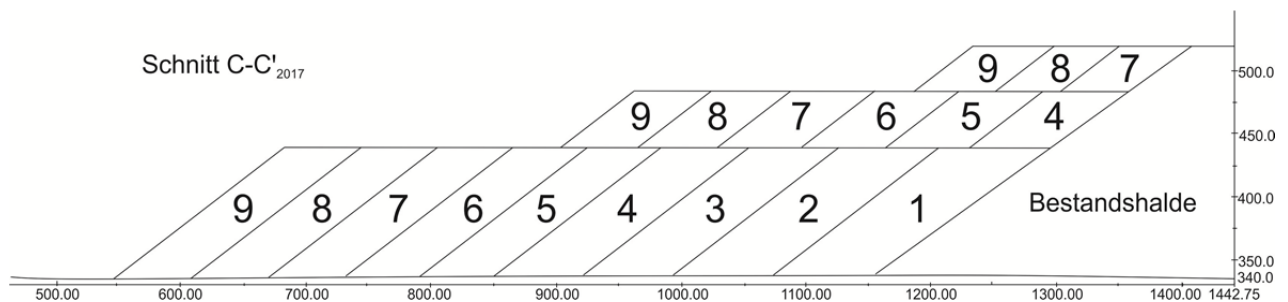
Die durchgeführten bodenmechanischen Untersuchungen bestätigen in der Größenordnung die in Kapitel 5 angegebenen Parameter. Abweichend hiervon lieferten die Laborergebnisse der Rahmenscherversuche für die Lockergesteins- und Zersatzzone deutlich höhere Festigkeiten als sie in den numerischen Untersuchungen des Kapitels 8 angesetzt wurden.

In den Bohrkernen der ausgeführten Inklinometermessstellen wurden im Verwitterungs- und Zersatzhorizont des Festgesteins in dünnen Lagen stark verwitterte bzw. zersetzte Ton-/Schluffsteine festgestellt, beprobt und auf ihre Scherfestigkeit untersucht. Einige Bodenproben entstammen Tiefenbereichen, in denen in den Inklinometermessstellen (z.B. INK 24) signifikante Verschiebungshorizonte (Schwächezone) detektiert wurden. Die Laborergebnisse an diesen Bodenproben ergaben im ungünstigsten Fall einen Reibungswinkel dieser Schwächezone von  $\varphi_s' = 12,9^\circ$ . In den Horizonten der geringen Scherfestigkeiten wurden bei den Kamerabefahrungen Wasserzutritte festgestellt.

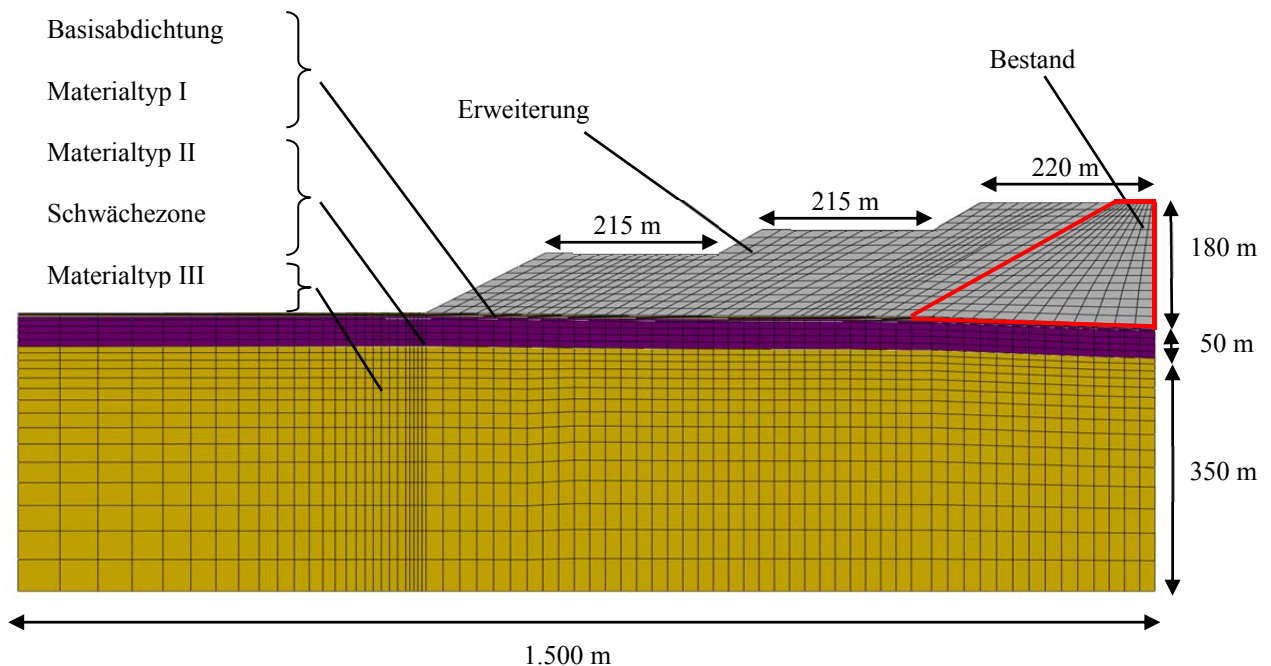
Auf der Grundlage dieser neuen Erkenntnisse wurden im Sinne einer Extremwertbetrachtung ergänzende numerische Untersuchungen für den Schnitt C-C'<sub>2017</sub> durchgeführt. Der Schnitt C-

$C'_{2017}$  wurde mit den in den Kapiteln 4 und 5 angegebenen Materialparametern für den Baugrund und das Rückstandssalz erneut untersucht. Die Schwächezone wurde für die ergänzenden numerischen Untersuchungen über eine Kontaktfläche mit einem Reibungswinkel von  $\delta_s = 12,5^\circ$  abgebildet.

Für den Untersuchungsschnitt C-C'<sub>2017</sub> wurden 2 Schüttabläufe untersucht. Bei Schüttablauf 2017a erfolgt eine kontinuierliche Beschüttung der Erweiterungsfläche (Schnitt C-C'<sub>2017a</sub>). D.h., dass alle Blöcke 1 bis 15 in der in Bild 5 dargestellten Reihenfolge aufgebracht werden. Das zugehörige numerische Modell ist in Bild 13 dargestellt. Bei Schüttablauf 2017b werden nur die Blöcke 1 bis 9 in der in Bild 67 dargestellten Reihenfolge aufgebracht. Das zugehörige numerische Modell ist in Bild 68 dargestellt. Diese Variante wurde untersucht, um die Auswirkungen bei Einstellung der Beschüttung an der beantragten Aufhaltungsgrenze zu erfassen.



**Bild 67:** Untersuchungsschnitt C-C'<sub>2017b</sub> mit Darstellung der blockweisen Schüttgeometrie und -reihenfolge der Blöcke 1 bis 9 im kombinierten Schüttverfahren (KSV)



**Bild 68:** Numerisches Modell zur Untersuchung des Endzustandes der geplanten Haldenerweiterung im Schnitt C-C'<sub>2017b</sub> mit kombiniertem Schüttverfahren (KSV)

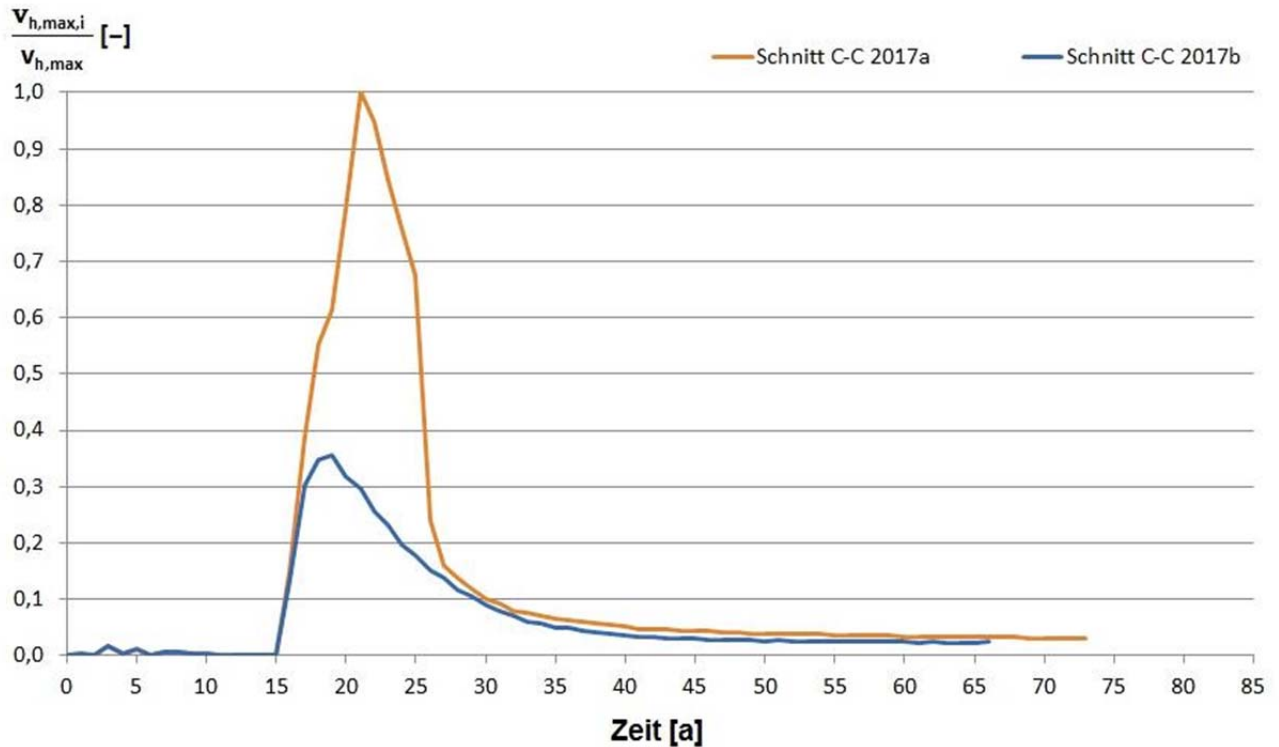
## 9.1 Ergänzende numerische Untersuchungen der Standsicherheit

Zur numerischen Untersuchung der Standsicherheit wurden für die ergänzenden Berechnungen im Schnitt C-C'<sub>2017</sub> 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. konvergiert. Außerdem gilt für alle Berechnungen, dass die Verschiebungsgeschwindigkeiten einen degressiven bis konstanten Verlauf bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes nehmen. Damit befindet sich das jeweils untersuchte System zu jedem Zeitpunkt im Gleichgewicht und gilt somit als standsicher im Sinne des oben beschriebenen Nachweiskonzeptes.

Da die Untersuchung der Standsicherheit mit abgeminderten Scherparametern erfolgt, werden die berechneten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten im Vergleich zu den tatsächlich möglichen horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten deutlich überschätzt. Die im Zuge der

Stand sicherheitsbetrachtung berechneten, horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten  $v_h$  betragen am Haldenfuß im Endzustand nach Schüttende ca. 1,2- bis 1,5-fache der im Zuge der Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit berechneten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten.



**Bild 69:** Normierte horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten im Grenzzustand der Standsicherheit am Haldenfuß

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

## 9.2 Ergänzende numerische Untersuchungen der Gebrauchstauglichkeit

Zur numerischen Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit in den Schnitten C-C'<sub>2017a</sub> und C-C'<sub>2017b</sub> wurden die in den Kapiteln 4 und 5 aufgeführten charakteristischen Materialkennwerte für Baugrund und Rückstandssalz verwendet. Wie für die Untersuchung der Standsicherheit auch, beträgt der Untersuchungszeitraum für die Gebrauchstauglichkeit ebenfalls mehr als 70 Jahre.

Die maßgebenden Berechnungsergebnisse der ergänzenden Untersuchungen für die Schnitte C-C'<sub>2017a</sub> und C-C'<sub>2017b</sub> nach einem Betrachtungszeitraum von mehr als 70 Jahren sind in Tabelle 8 dargestellt.

	<b>Schnitt C-C'<sub>2017</sub></b>	
	<b>2017a</b>	<b>2017b</b>
<b>Horizontale Verformung U1 [m]</b>	16,5	4
<b>Horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit <math>v_{h,max,Schüttende}</math> [cm/a]</b>	126	35
<b>Horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit <math>v_{h, &gt; 70a}</math> [cm/a]</b>	7	3
<b>Dehnung [%]</b>	9	5

**Tabelle 8:** Vergleich der Berechnungsergebnisse

Die ergänzenden numerischen Untersuchungen zeigen, dass bei einer existenten Schwächezone mit kleinem Reibungswinkel die entstehenden Dehnungen nur geringfügig größer sind als bei Schwächezonen mit großem Reibungswinkel. Dies liegt darin begründet, dass die Basisabdichtung auf den darunter liegenden Schichten „mitschwimmt“ und damit die Dehnungen vom Bereich des Böschungsfußes weit unter die Halde umgelagert werden.

Erwartungsgemäß zeigen die Berechnungsergebnisse, dass eine Schwächezone mit kleinem Reibungswinkel zu verhältnismäßig großen horizontalen Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten führt (Schnitt C-C'<sub>2017a</sub>). Wird bei Auftreten hoher Verschiebungsgeschwindigkeiten die Beschüttung eingestellt, ergeben sich deutlich geringere Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten. Dem Monitoring kommt also erhebliche Bedeutung zu.

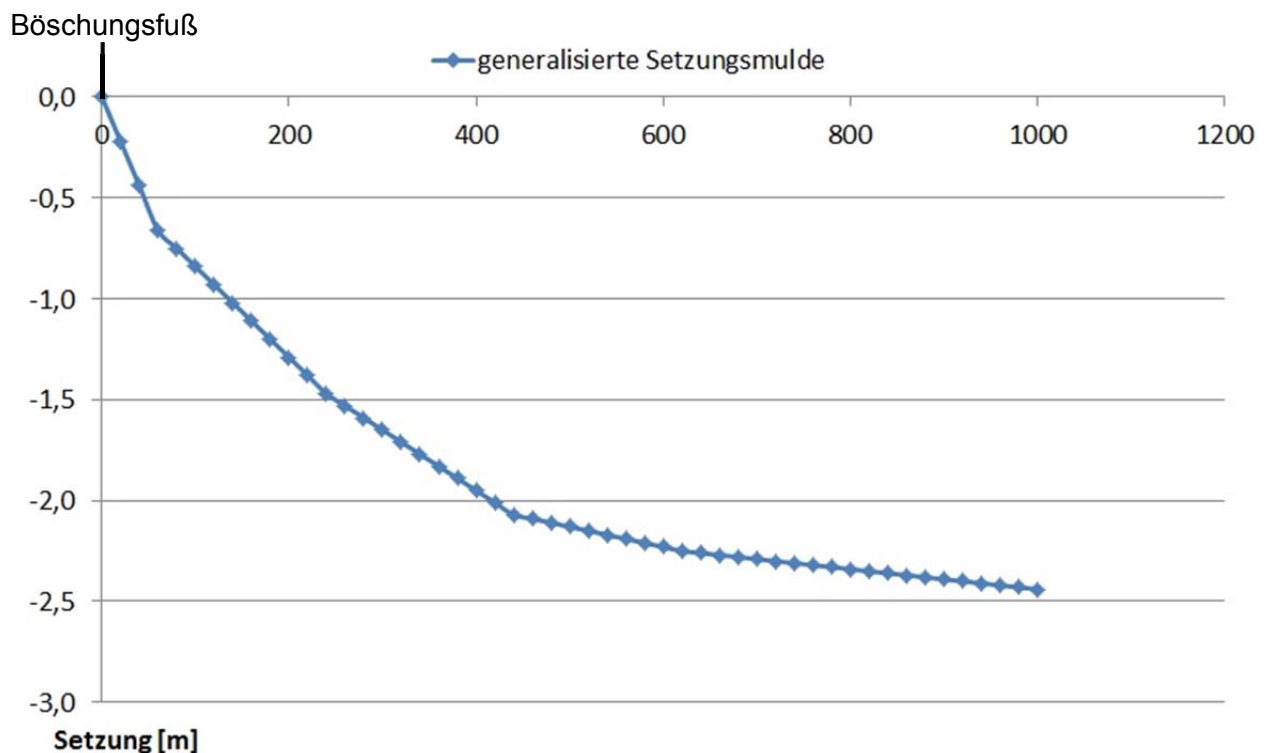
## 10 Vorgaben zur Bemessung des Systems Basisabdichtung und der Entwässerungselemente sowie zur Beschüttungsphase

### 10.1 Charakteristische Setzungs- und Dehnungsverteilungen

Zur Bemessung des Systems Basisabdichtung und der 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' (KSV), B-B' (KSV), C-C'<sub>2016</sub> (KSV) und C-C'<sub>2017</sub> (KSV) die prognostizierten Setzungs- und Dehnungsverteilungen in der Aufstandsfläche der geplanten Haldenerweiterung dokumentiert. Betrachtet wird dabei jeweils der maßgebende Bereich am Ende der Gesamtbetrachtungsdauer (mehr als 70 Jahre). 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.

Bild 70 zeigt die generalisierte Setzungsmulde für die Erweiterungsfläche der Rückstandshalde Hattorf, die der Bemessung der Entwässerungselemente zugrunde gelegt werden kann. Für Detailplanungen wird in Tabelle 9 die Kurve in Bild 70 als Zahlenwerte dargestellt.

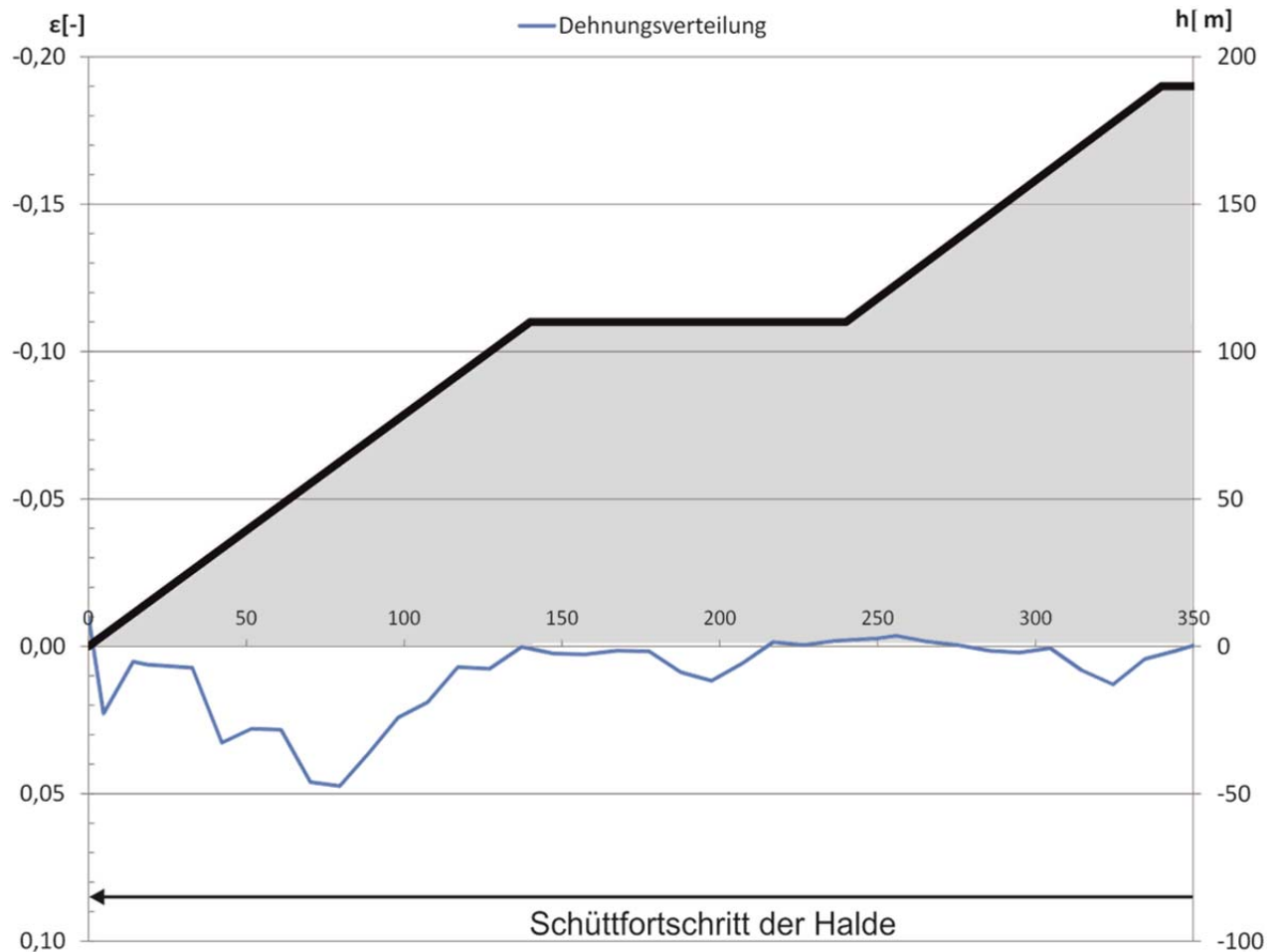


**Bild 70:** Generalisierte Setzungsmulde

<b>Station unter der Halde in [m], beginnend am Böschungsfuß</b>	<b>Setzung [m]</b>
0	0,00
20	-0,22
40	-0,44
60	-0,66
80	-0,75
100	-0,84
120	-0,93
140	-1,02
160	-1,11
180	-1,20
200	-1,29
220	-1,38
240	-1,47
260	-1,53
280	-1,59
300	-1,65
320	-1,71
340	-1,77
360	-1,83
380	-1,89
400	-1,95
420	-2,01
440	-2,07
460	-2,09
480	-2,11
500	-2,13
520	-2,15
540	-2,17
560	-2,19
580	-2,21
600	-2,23

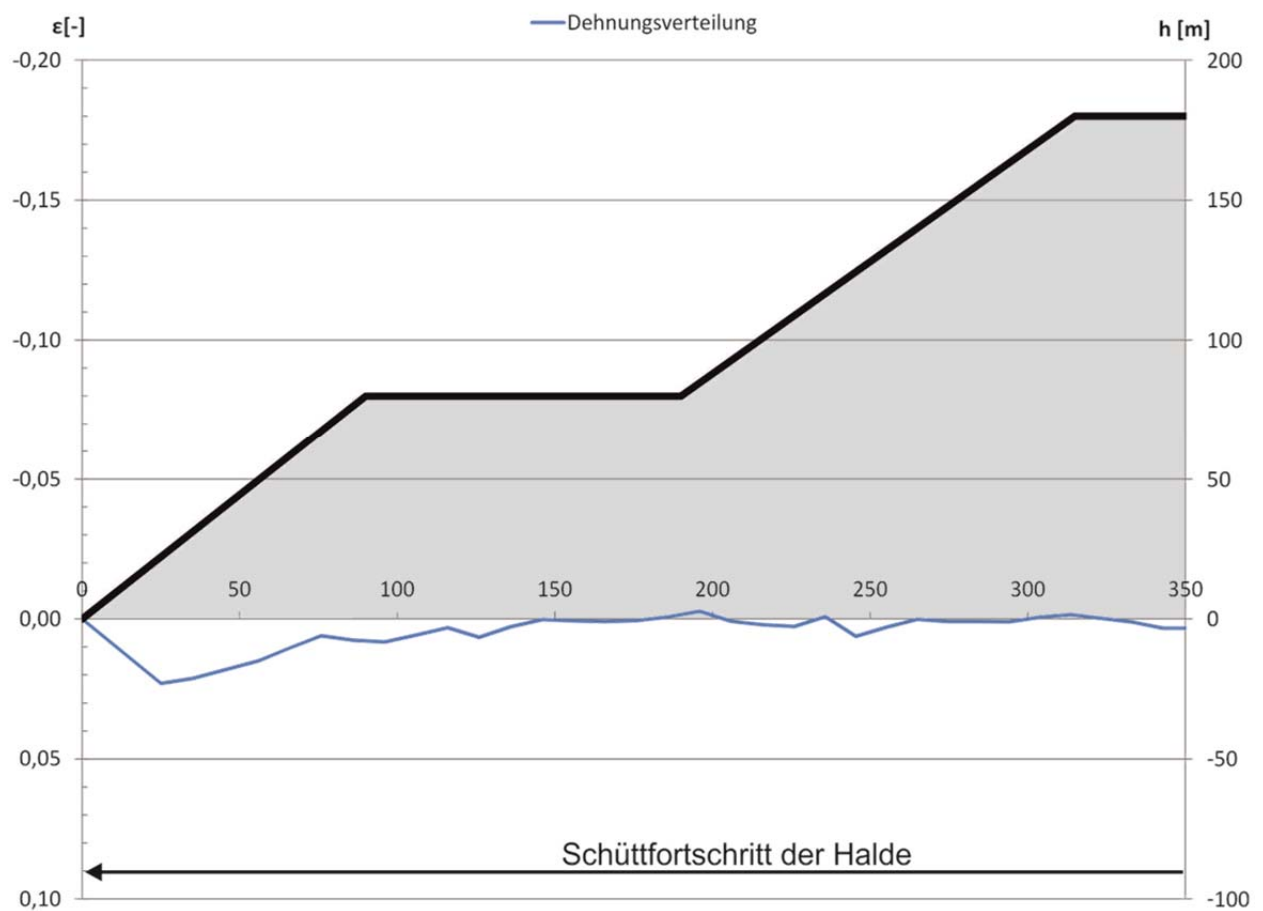
**Tabelle 9:** Generalisierte Setzungsmulde

Bild 71 zeigt die Dehnungsverteilungen für den Schnitt A-A' für das KSV. Die maximale Dehnung beträgt rd. 5 % und liegt unter der Rückstandshalde rd. 75 m vom Böschungsfuß entfernt.



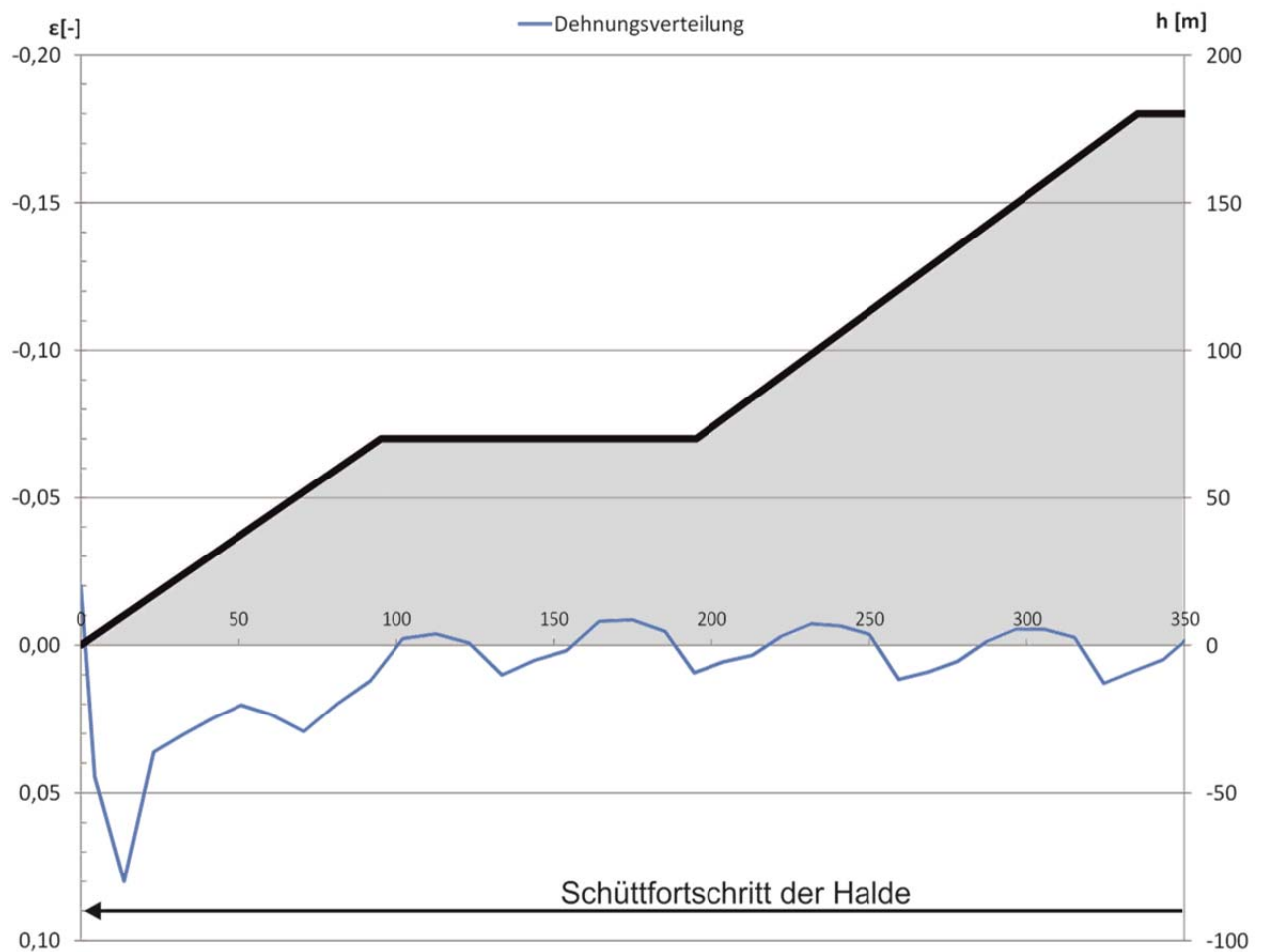
**Bild 71:** Dehnungsverteilung im Schnitt A-A' beim KSV

Bild 72 zeigt die Dehnungsverteilungen für den Schnitt B-B' für das KSV. Die maximale Dehnung beträgt rd. 2 % und liegt unter der Rückstandshalde rd. 25 m vom Böschungsfuß entfernt.



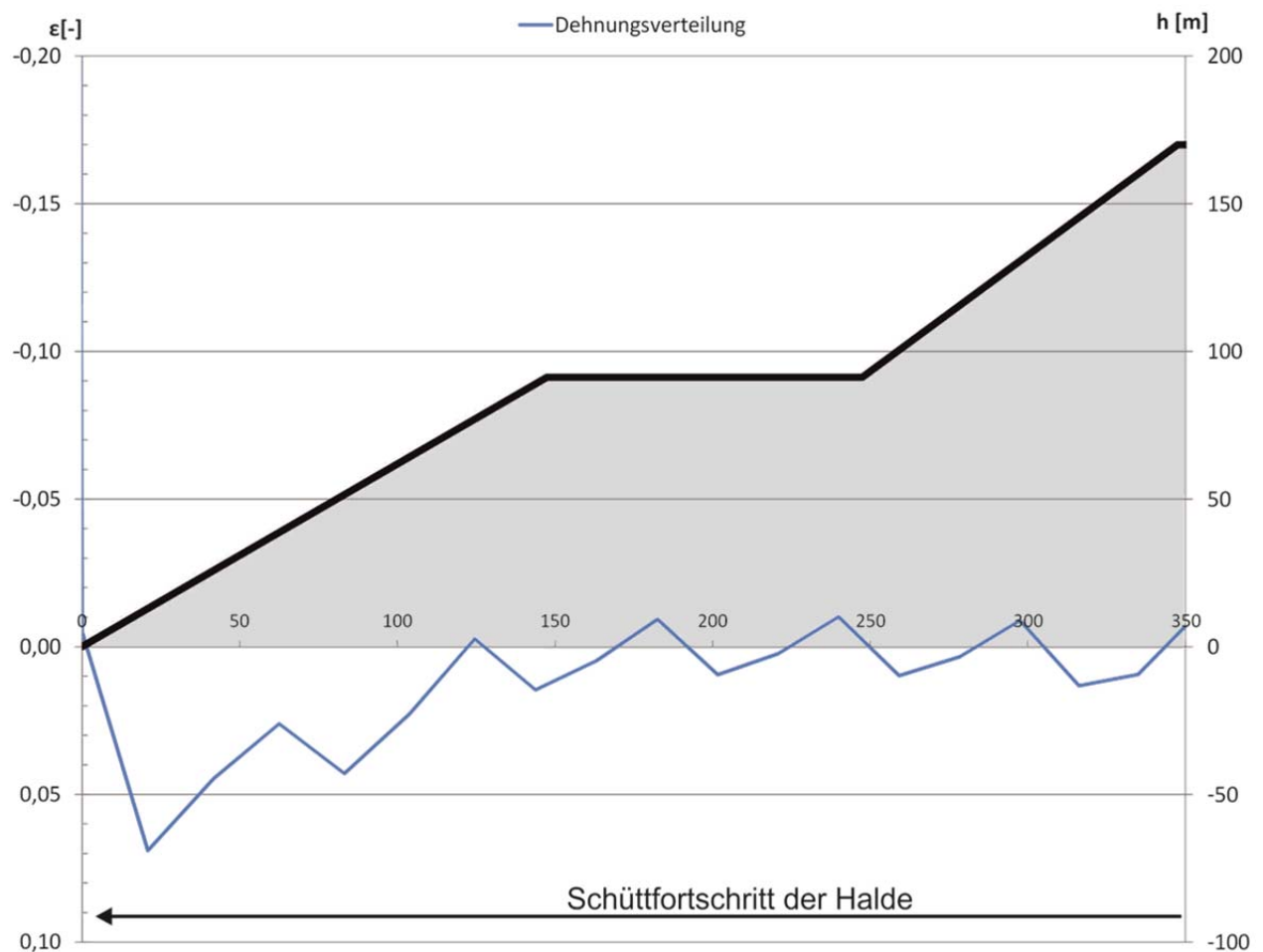
**Bild 72:** Dehnungsverteilung im Schnitt B-B' beim KSV

Bild 73 zeigt die Dehnungsverteilung für den Schnitt C-C'<sub>2016</sub> für das KSV. Die maximale Dehnung beträgt rd. 6 % und liegt unter der Rückstandshalde rd. 15 m vom Böschungsfuß entfernt.



**Bild 73:** Dehnungsverteilung im Schnitt C-C'2016 beim KSV

Bild 74 zeigt die Dehnungsverteilung für den Schnitt C-C'2017 für das KSV. Die maximale Dehnung beträgt rd. 7 % und liegt unter der Rückstandshalde rd. 20 m vom Böschungsfuß entfernt.



**Bild 74:** Dehnungsverteilung im Schnitt C-C'<sub>2017</sub> beim KSV

Die Berechnungsergebnisse für das KSV zeigen, dass in der Aufstandsfläche Dehnungen zwischen 2 % und 7 % zu erwarten sind. Der Bereich der maximalen Dehnungen liegt unter der Rückstandshalde bis maximal rd. 80 m vom Böschungsfuß entfernt.

## 10.2 Monitoring im Rahmen der Beobachtungsmethode

Wie in [U5.3] erläutert, ist das gesamte Projekt 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 geodätisches 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/Verformungen an der Geländeoberfläche erfassen, insbesondere im Bereich des (endgültigen) Haldenfußes. Die Intervalle sind abhängig vom Schüttbetrieb 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 Basisuntersuchungen (Kap. 8) heranzuziehen. Die berechneten Verschiebungsraten der ergänzenden Untersuchungen (Kap. 9) sind nicht maßgebend, da genau diese durch rechtzeitige Detektion ausgeschlossen werden sollen. Tabelle 10 fasst die berechneten horizontalen Verschiebungsgeschwindigkeiten für das KSV der unterschiedlichen Schnitte nochmals zusammen.

	<b>Schnitt A-A'</b>	<b>Schnitt B-B'</b>	<b>Schnitt C-C'</b>	
	<b>KSV</b>	<b>KSV</b>	<b>2016 (KSV)</b>	<b>2017 (KSV)</b>
<b>Horizontale Verschiebungsgeschwindigkeit</b> <b><math>v_{h,max,Schüttende}</math> [cm/a]</b>	23	19	25	28

**Tabelle 10:** Berechnete horizontale Verschiebungsgeschwindigkeiten für das KSV

Die geotechnischen Messungen bestehen im Wesentlichen aus Inklinometermessungen zur Feststellung der horizontalen Verschiebungen unterhalb der Geländeoberfläche. Die Messintervalle sind in Abhängigkeit vom Schüttbetrieb und von den jeweils gemessenen Verschiebungsgrößen und -geschwindigkeiten festzulegen. Die Inklinometermessstellen sind an der Geländeoberfläche regelmäßig 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 insgesamt 5 Beschüttungsabschnitten, ggf. untergliedert in Teilabschnitte, 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 Sachverständigen die den Nachweisen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit zugrunde liegenden geometrischen und stofflichen Randbedingungen für jeden Beschüttungsabschnitt überprüfen. 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. IK1713/01 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 90 Jahre und setzt sich aus der bis zu 40 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 Basisdichtung und der Entwässerungselemente sowie für die Ausgestaltung des Monitoringprogramms.

Die vorgenannten Untersuchungsergebnisse zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit stimmen in der Größenordnung mit den in [U4] und [U5] dokumentierten Ergebnissen und Erfahrungen überein. Die mit [U5.3] dokumentierten numerischen Untersuchungen stellen diesbezüglich den konservativsten Berechnungs- bzw. Bemessungsansatz dar.

Die Untersuchungen zeigen auch, dass die Errichtung der Halde im kombinierten Schüttverfahren (KSV) mit einer 100 m breiten Berme deutlich geringere horizontale Verschiebungen, Verschiebungsgeschwindigkeiten und geringere Dehnungen erzeugen als die Errichtung der Halde im Flankenschüttverfahren (FSV).

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

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

Projektbearbeitung: Eva Teutsch M.Sc.

*Handwritten signature: Rolf Katzenbach*

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



*Handwritten signature: S. Leppla*

Dipl.-Ing. Steffen Leppla  
-Projektleiter-



#### Verteiler:

- K+S KALI GmbH
- K+S Aktiengesellschaft, Kassel
- upi UmweltProjekt Ingenieurgesellschaft mbH
- z.d.A. (IK1713, Vo)

- 5 x Kopie
- 1 x Kopie
- 1 x Kopie
- 2 x Kopie