

---

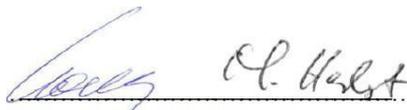
**Antrag auf Planfeststellung**  
**Hartsalzwerk Siegfried-Giesen**  
**Planfeststellungsunterlage zum**  
**Rahmenbetriebsplan**

---

**Unterlage I – Bearbeitungsgrundlagen**

I-28 Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit

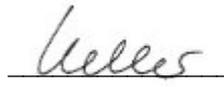
Erstellung der Unterlage:



(Prof. Dr.-Ing. habil. Konietzky)  
(Dr. rer. nat. M. Herbst)

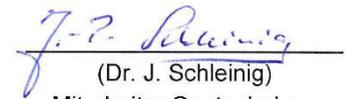


TU Bergakademie Freiberg  
Institut für Geotechnik  
Gustav-Zeuner-Straße 1  
09599 Freiberg



(H. Keller)  
Sustainability

K+S KALI GmbH  
Projektgruppe  
Siegfried-Giesen  
Kardinal-Bertram-Straße 1  
31134 Hildesheim



(Dr. J. Schleinig)  
Mitarbeiter Geotechnics

K+S Aktiengesellschaft  
Bertha-von-Suttner-Straße 7  
34131 Kassel

Aufgestellt:  
Hildesheim, den 17.12.2014

---

Antragsteller / Vorhabensträger

**K+S Aktiengesellschaft**  
Bertha-von-Suttner-Straße 7  
34131 Kassel/Deutschland



K+S Aktiengesellschaft

vertreten durch:

**K+S KALI GmbH**  
**Projektgruppe Siegfried-Giesen**  
Kardinal-Bertram-Straße 1  
31134 Hildesheim

# Hartzalzwerk Siegfried-Giesen

## Planfeststellungsunterlage zum Rahmenbetriebsplan



### Unterlage I – Bearbeitungsgrundlagen

#### I-28 Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit

Antragsteller/  
Vorhabensträger:

**K+S Aktiengesellschaft**  
Bertha-von-Suttner-Straße 7  
34131 Kassel/Deutschland



vertreten durch:

**K + S KALI GmbH**  
**Projektgruppe Siegfried-Giesen**  
Kardinal-Bertram-Straße 1  
31134 Hildesheim

Erstellung der Unterlage:

**TU Bergakademie Freiberg**  
Institut für Geotechnik  
LS Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau  
Gustav-Zeuner-Straße 1  
09599 Freiberg



Datum:

Freiberg, den 09.12.2014

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	II
Tabellenverzeichnis .....	III
Abbildungsverzeichnis .....	III
Anhangsverzeichnis .....	III
Abkürzungsverzeichnis / Glossar .....	VII
<b>1 Ausgangssituation .....</b>	<b>8</b>
1.1 Veranlassung und Aufgabenstellung .....	8
1.2 Generelle Vorgehensweise .....	9
1.3 Grundlagen .....	10
<b>2 Qualitative Bewertung .....</b>	<b>11</b>
<b>3 Numerische Berechnungen .....</b>	<b>14</b>
3.1 Generelle Vorgehensweise .....	14
3.2 Verifizierung des Materialgesetzes für das Haldenmaterial .....	15
3.3 Modellkalibrierung (Halde Zielitz-1) .....	17
3.4 Geplante Neuhalde Siegfried-Giesen .....	20
3.4.1 Entwicklung des numerischen Modells .....	20
3.4.2 Vorgehen zur Nachweisführung .....	23
3.4.3 Darstellung der Ergebnisse .....	25
<b>4 Gesamtbewertung .....</b>	<b>29</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>30</b>

## Tabellenverzeichnis

Tab. 2-3.4.3.1-1: Vergleich charakteristischer Daten verschiedener Salzhalden der K+S KALI GmbH	12
Tab. 2-3.4.3.1-2: Vergleich der Festigkeitseigenschaften des Rückstandssalzes.....	13
Tab. 3.4.3.1-1: Materialparameter Haldenmodell Zielitz-1 .....	18
Tab. 3.4.3.1-1: Verwendete Materialparameter Haldenmodell Siegfried-Giesen .....	21
Tab. 3.4.3.1-2: Verwendete Materialparameter Baugrundmodell unter der Halde Siegfried-Giesen .....	22
Tab. 3.4.3.2-1: Betriebsphase: Berechnete maximale Setzungen und Dehnungen.....	26
Tab. 3.4.3.3-1: Nachbetriebsphase (30 Jahre nach Ende der Betriebsphase): Berechnete Verformungen unter Ansatz realer Viskosität für das Haldenmaterial (Anhang D) .....	27
Tab. 3.4.3.3-2: Nachbetriebsphase (30 Jahre nach Ende der Betriebsphase): Berechnete Verformungen unter Ansatz erhöhter Viskosität für das Haldenmaterial (Anhang E) ..	28

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Lage der geplante Neuhalde Siegfried-Giesen [nach Unterlage E-10] .....	8
Abb. 3.2-1: Zylindrische Probe mit Symmetrieachse und modelliertem Ausschnitt (links), abgeleitete Modelle aus einem (Mitte) bzw. 25 Elementen (rechts) .....	15
Abb. 3.2-2: 1-Zonen-Modell (links) und 25-Zonen-Modell (rechts) mit Verschiebungsvektoren in der sekundären Kriechphase bei Nutzung des ‚crushed-salt-model‘ .....	16
Abb. 3.2-3: Kriechrate als Funktion der Deviatorspannung für das 1- und das 25-Zonen-Modell unter Ansatz verschiedener WIPP-D-Werte .....	16

## Anhangsverzeichnis

### **ANHANG A:** Kalibrierungsmodell Halde Zielitz-1

Abb. A1: Netz [m]

Abb. A2: Detailbild geologischer Aufbau [m]

Abb. A3: Durch Kriechen bedingte Horizontalverschiebungen [m], 30 Jahre nach Ende Betriebsphase

Abb. A4: Horizontalverschiebungsraten [mm/a] vs. Zeit [Tagen] für den Böschungsschulter (No. 26) und die Böschungssfuß (No. 27)

### **ANHANG B:** Modellaufbau

Abb. B1: Modell-1, -2 und -3: Netz [m], flache Böschung mit Lage der History-Punkte

Abb. B2: Modell-1, -2 und -3: Netz [m], steile Böschung mit Lage der History-Punkte

Abb. B3: Modell-1, -2 und -3: Netzdetail [m], flache Böschung

Abb. B4: Modell-1, -2 und -3: Netzdetail [m], steile Böschung

Abb. B5: Modell-1: Steifemodul [MPa], flache Böschung

Abb. B6: Modell-2: Steifemodul [MPa], flache Böschung

Abb. B7: Modell-3: Steifemodul [MPa], flache Böschung

### **ANHANG C:** Betriebsphase

#### Modell 1 - Standsicherheit

Abb. C1: Modell-1: Maximale Ungleichgewichtskraft [N] vs. Rechenschritte, Betriebsphase, steile Böschung, SF=1.25

Abb. C2: Modell-1: Vertikalspannungsverteilung [Pa] in Halde und Untergrund

Modell 1 - Gebrauchstauglichkeit

Abb. C3: Modell-1: Vertikalverschiebungen [m], Betriebsphase, steile Böschung

Abb. C4: Modell-1: Setzungen Unterkante Halde [m] vs. horizontale Position [m], Bet Abb. C5: Modell-1: Dehnungen [%] entlang Basisabdichtung [m], Betriebsphase, steile Böschung

Modell 2 - Standsicherheit

Abb. C6: Modell-2: Maximale Ungleichgewichtskraft [N] vs. Rechenschritte, Betriebsphase, steile Böschung, SF=1.25

Abb. C7: Modell-2: Vertikalspannungsverteilung [Pa] in Halde und Untergrund

Modell 2 - Gebrauchstauglichkeit

Abb. C8: Modell-2: Vertikalverschiebungen [m], Betriebsphase, steile Böschung

Abb. C9: Modell-2: Setzungen Unterkante Halde [m] vs. horizontale Position [m], Betriebsphase, steile Böschung

Abb. C10: Modell-2: Dehnungen [%] entlang Basisabdichtung [m], Betriebsphase, steile Böschung

Modell 3 - Standsicherheit

Abb. C11: Modell-3: Maximale Ungleichgewichtskraft [N] vs. Rechenschritte, Betriebsphase, steile Böschung, SF=1.25

Abb. C12: Modell-3: Vertikalspannungsverteilung [Pa] in Halde und Untergrund

Modell 3 - Gebrauchstauglichkeit

Abb. C13: Modell-3: Vertikalverschiebungen [m], Betriebsphase, steile Böschung

Abb. C14: Modell-3: Setzungen Unterkante Halde [m] vs. horizontale Position [m], Betriebsphase, steile Böschung

Abb. C15: Modell-3: Dehnungen [%] entlang Basisabdichtung [m], Betriebsphase, steile Böschung

**ANHANG D: Ende Nachbetriebsphase, reale Viskosität**

Modell 1 - Standsicherheit

Abb. D1: Modell-1: Maximale Ungleichgewichtskraft [N] vs. Rechenschritte, 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase, SF=1.25

Abb. D2: Modell-1: Vertikalspannungsverteilung [MPa] in Halde und Untergrund

Modell 1 - Gebrauchstauglichkeit

Abb. D3: Modell-1: Durch Kriechen verursachte- Horizontalverschiebungen [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

Abb. D4: Modell-1: Horizontale Kriechraten für ausgewählte Beobachtungspunkte (mm/Jahr) vs. Zeit (Jahren)

Abb. D5: Modell-1: Vertikalverschiebungen [m], 30 Jahre nach Ende Betriebsphase

Abb. D6: Modell-1: Setzungen Unterkante Halde [m] vs. horizontale Position [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

Abb. D7: Modell-1: Dehnungen [%] entlang Basisabdichtung [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

Modell 2 - Standsicherheit

Abb. D8: Modell-2: Maximale Ungleichgewichtskraft [N] vs. Rechenschritte, 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase, SF=1.25

Abb. D9: Modell-2: Vertikalspannungsverteilung [MPa] in Halde und Untergrund

Modell 2 - Gebrauchstauglichkeit

Abb. D10: Modell-2: Durch Kriechen verursachte- Horizontalverschiebungen [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

Abb. D11: Modell-2: Horizontale Kriechraten für ausgewählte Beobachtungspunkte (mm/Jahr) vs. Zeit (Jahren)

Abb. D12: Modell-2: Vertikalverschiebungen [m], 30 Jahre nach Ende Betriebsphase

Abb. D13: Modell-2: Setzungen Unterkante Halde [m] vs. horizontale Position [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

Abb. D14: Modell-2: Dehnungen [%] entlang Basisabdichtung [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

#### Modell 3 - Standsicherheit

Abb. D15: Modell-3: Maximale Ungleichgewichtskraft [N] vs. Rechenschritte, 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase, SF=1.25

Abb. D16: Modell-3: Vertikalspannungsverteilung [MPa] in Halde und Untergrund

#### Modell 3 - Gebrauchstauglichkeit

Abb. D17: Modell-3: Durch Kriechen verursachte- Horizontalverschiebungen [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

Abb. D18: Modell-3: Horizontale Kriechraten für ausgewählte Beobachtungspunkte (mm/Jahr) vs. Zeit (Jahren)

Abb. D19: Modell-3: Vertikalverschiebungen [m], 30 Jahre nach Ende Betriebsphase

Abb. D20: Modell-3: Setzungen Unterkante Halde [m] vs. horizontale Position [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

Abb. D21: Modell-3: Dehnungen [%] entlang Basisabdichtung [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

### **ANHANG E: Ende Nachbetriebsphase, erhöhte Viskosität**

#### Modell 1 - Standsicherheit

Abb. E1: Modell-1: Maximale Ungleichgewichtskraft [N] vs. Rechenschritte, 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase, SF=1.25

Abb. E2: Modell-1: Vertikalspannungsverteilung [MPa] in Halde und Untergrund

#### Modell 1 - Gebrauchstauglichkeit

Abb. E3: Modell-1: Durch Kriechen verursachte- Horizontalverschiebungen [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

Abb. E4: Modell-1: Horizontale Kriechraten für ausgewählte Beobachtungspunkte (mm/Jahr) vs. Zeit (Jahren)

Abb. E5: Modell-1: Vertikalverschiebungen [m], 30 Jahre nach Ende Betriebsphase

Abb. E6: Modell-1: Setzungen Unterkante Halde [m] vs. horizontale Position [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

Abb. E7: Modell-1: Dehnungen [%] entlang Basisabdichtung [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

#### Modell 2 - Standsicherheit

Abb. E8: Modell-2: Maximale Ungleichgewichtskraft [N] vs. Rechenschritte, 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase, SF=1.25

Abb. E9: Modell-2: Vertikalspannungsverteilung [MPa] in Halde und Untergrund

#### Modell 2 - Gebrauchstauglichkeit

Abb. E10: Modell-2: Durch Kriechen verursachte- Horizontalverschiebungen [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

Abb. E11: Modell-2: Horizontale Kriechraten für ausgewählte Beobachtungspunkte (mm/Jahr) vs. Zeit (Jahren)

Abb. E12: Modell-2: Vertikalverschiebungen [m], 30 Jahre nach Ende Betriebsphase

Abb. E13: Modell-2: Setzungen Unterkante Halde [m] vs. horizontale Position [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

Abb. E14: Modell-2: Dehnungen [%] entlang Basisabdichtung [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

#### Modell 3 - Standsicherheit

- Abb. E15: Modell-3: Maximale Ungleichgewichtskraft [N] vs. Rechenschritte, 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase, SF=1.25
- Abb. E16: Modell-3: Vertikalspannungsverteilung [MPa] in Halde und Untergrund
- Modell 3 - Gebrauchstauglichkeit
- Abb. E17: Modell-3: Durch Kriechen verursachte- Horizontalverschiebungen [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase
- Abb. E18: Modell-3: Horizontale Kriechraten für ausgewählte Beobachtungspunkte (mm/Jahr) vs. Zeit (Jahren)
- Abb. E19: Modell-3: Vertikalverschiebungen [m], 30 Jahre nach Ende Betriebsphase
- Abb. E20: Modell-3: Setzungen Unterkante Halde [m] vs. horizontale Position [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase
- Abb. E21: Modell-3: Dehnungen [%] entlang Basisabdichtung [m], 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase

## Abkürzungsverzeichnis / Glossar

BS-T, LF2	Belastungssituation temporär, Lastfall 2
BS-P, LF1	Belastungssituation permanent, Lastfall 1
DIN 1054:2010-12	Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erdbau und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1(Ausgabe 2010-12)
GOK	Geländeoberkante
EC-7	Eurocode 7
E-Modul	Elastizitätsmodul
ESTA	Elektrostatische Aufbereitung (eigene Entwicklung von K+S)
Produktionsrückstand	Rückstand aus der Aufbereitung von Kalisalz, der nicht als Produkt vermarktbar ist und entweder durch Versatz im Bergwerk und/oder durch Aufhaldung entsorgt werden muss
SLS	Serviceability Limit State (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit)
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant (Testsite für nukleare Endlagerung im Salz in den USA)

# 1 Ausgangssituation

## 1.1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Im Rahmen der Untersuchungen zur Wiederinbetriebnahme des Bergwerkes Siegfried-Giesen wurden die Möglichkeiten einer übertägigen Aufhaltung untersucht. Im Ergebnis dieser Untersuchungen wird eine Flachhalde mit ca. 46 ha Grundfläche, einer Höhe von ca. 80 m und flachen Böschungen mit Neigungen von ca. 1:3 [Unterlage E-10] geplant. Das geplante Ablagerungsvolumens beträgt ca. 17,17 Mio. m<sup>3</sup>. Abbildung 1-1 zeigt den Standort der geplanten Neuhalde Siegfried-Giesen.

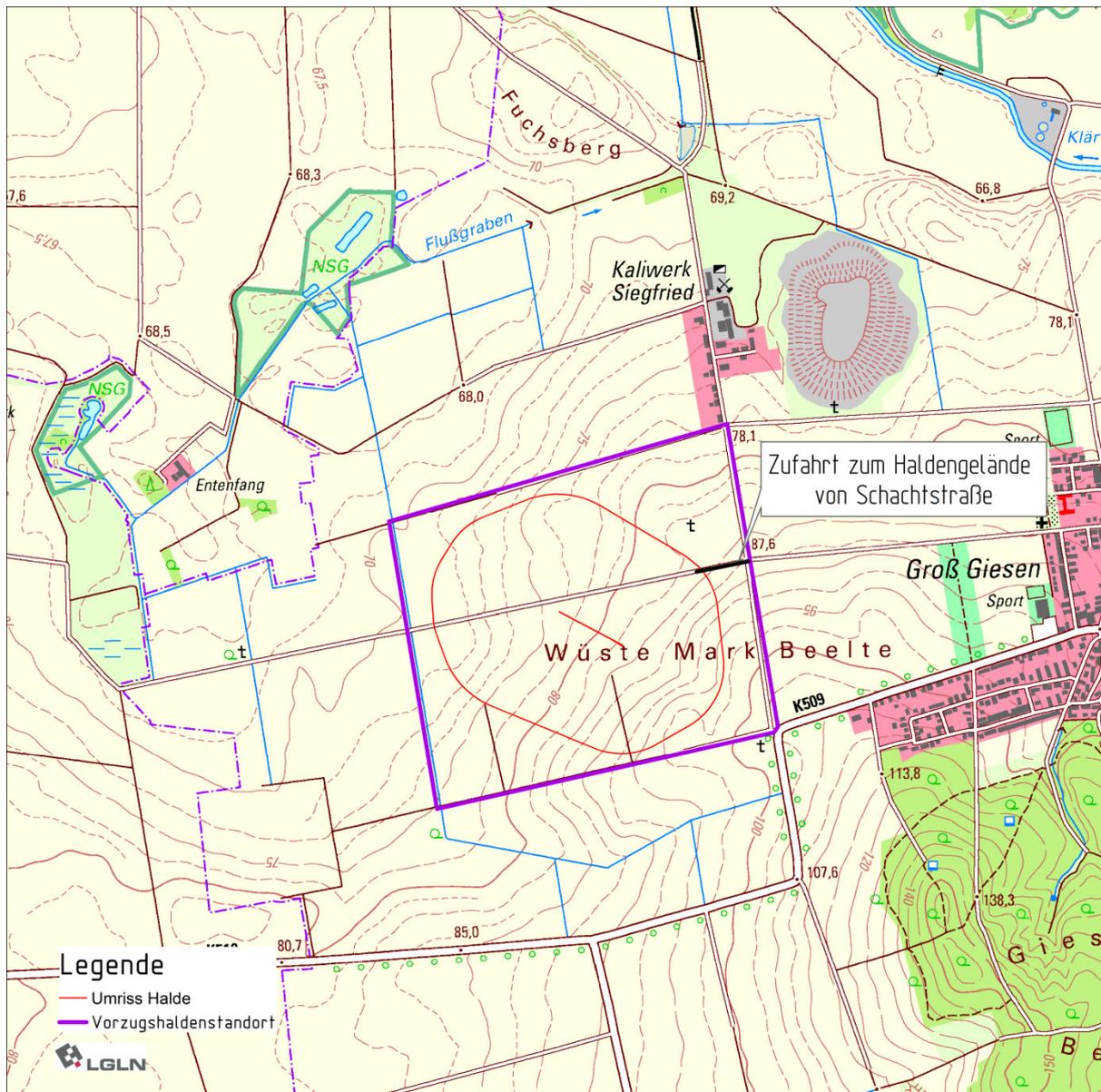


Abb. 1-1: Lage der geplante Neuhalde Siegfried-Giesen [nach Unterlage E-10]

Die Produktionsrückstände liegen in trockener, pulverförmiger Konsistenz vor und bestehen aus einem Gemisch von:

ca. 80 bis 85 %	Halit (NaCl)
ca. 5-7 %	Sylvin (KCl)
ca. 7-10 %	Kieserit ( $MgSO_4+H_2O$ )
ca. 0,4-0,6 %	Anhydrit ( $CaSO_4$ )
< 0,3 %	Carnallit ( $KCl+MgCl_2*6 H_2O$ )
< 0,05 %	Langbeinit ( $2 MgSO_4+K_2SO_4$ )

Zur Staubbindung müssen die Rückstandssalze vor dem Aufhalden angefeuchtet werden. Es wird ein Feuchtegehalt von ca. 3 % bis 5 % gewährleistet. Hierzu wird der Rückstand vor der Aufhaldung in einem Mischer mit Haldenwasser gemischt.

Vorbereitend für die geplante Haldenentwicklung wird die Haldenaufstandsfläche profiliert, ggf. eine Überhöhung des Untergrundes zum Setzungsausgleich aufgebracht und eine Basisabdichtung errichtet. Begleitend zur Haldenschüttung sind abschnittsweise die Herstellung einer Oberflächenabdeckung sowie geeignete Rekultivierungsmaßnahmen geplant.

Im Rahmen der Erarbeitung der Antragsunterlagen für das Planfeststellungsverfahren zur Planung und Errichtung der neuen Rückstandshalde werden nachfolgend zwei Nachweise geführt:

- Standsicherheitsnachweis
- Gebrauchstauglichkeitsnachweis

Der Standsicherheitsnachweis bezieht sich im Wesentlichen auf den Nachweis der Standsicherheit der Rückstandshaldenböschungen sowie des Untergrundes. Die Untersuchungen zur Gebrauchstauglichkeit konzentrieren sich auf die Auswirkungen der Rückstandshalde auf die Umgebung und schaffen damit die Grundlagen für die Erhaltung der Wirksamkeit der Basisabdichtung, der Oberflächenabdeckung, der Haldeninfrastruktur (Randgräben, Verkehrswege etc.) sowie der Verträglichkeit der haldeninduzierten Deformationen des Untergrundes insgesamt.

## 1.2 Generelle Vorgehensweise

Rückstandshalden der Kaliindustrie unterscheiden sich in ihrem phänomenologischen Verhalten gegenüber anderen geotechnischen Bauwerken durch Kriechverformungen. Diese Verformungen werden besonders im Bereich des Haldentops durch verdichtungsbedingte Setzungen verstärkt. Verursacht durch das Eigengewicht des Rückstandes führen beide Prozesse zu einem Verformungsverhalten, das über längere Zeiträume durch konstante bzw. langfristig degressiv verlaufende Raten gekennzeichnet ist. Diese Verformungen, die an Rückstandshalden anderer Standorte seit vielen Jahren messtechnisch beobachtet und bewertet werden, beschreiben standsichere Verhältnisse der Rückstandshalden.

Aufgrund der Komplexität des Systems Rückstandshalde, Basisabdichtung und Untergrund erfolgen die Untersuchungen von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der geplanten Halde auf zwei Wegen:

- qualitative, verbale Bewertung auf Basis vergleichender Betrachtungen mit anderen Rückstandshalden und
- quantitative Bewertung auf Basis numerischer Berechnungen durch Prognose und Bewertung des zukünftigen Verhaltens von Rückstandshalden.

Da im Kali- und Steinsalzbergbau Deutschlands eine Vielzahl von Rückstandshalden unterschiedlicher Größe, Geometrie und Aufhaltungstechnologie existieren, ist es naheliegend, die zur Verfügung stehenden Daten und Erfahrungen auszuwerten und prognostisch für das geplante Haldenprojekt einzusetzen. Mit diesem Vorgehen kann die generelle Machbarkeit gezeigt werden.

Die im zweiten Bearbeitungsschritt durchzuführenden numerischen Berechnungen erfolgen an repräsentativen 2D-Schnitten und berücksichtigen das visko-elasto-plastische Verhalten des aufgehaldeten Salzes und das elasto-plastische Verhalten von Basisabdichtung und Untergrund. Damit können räumlich-zeitliche Prognosen als Grundlage für die Bemessung weiterer Bestandteile des Systems Halde und für das haldenbegleitende Monitoring erarbeitet werden. Die den Nachweisen zugrunde gelegte Standzeit der Rückstandshalde beträgt 0 Jahre (Betriebsphase) bzw. ca. 30 Jahre nach Ende der Betriebsphase (Nachbetriebsphase). Basis für die Wahl des Zeitraums der Nachbetriebsphase sind Erfahrungen aus Untersuchungen von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Rückstandshalden an anderen Standorten. Werden über diese Zeiten standsichere Verhältnisse und konstante bzw. degressiv verlaufende Verformungsraten prognostiziert, so können diese in die Zukunft extrapoliert werden, da in der Nachbetriebsphase die Belastungen des Systems Halde-Basisabdichtung-Untergrund nicht mehr verändert werden.

### 1.3 Grundlagen

Aus dem Baugrundgutachten [Unterlage I-27] lässt sich für den Haldenstandort folgende generalisierte Untergrundbeschreibung ableiten:

- Der ca. 0,4 m, mächtige Oberboden ist ein Schluff, feinsandig tonig, dunkelbraun bis schwarz, humos bis organogen, halbfest und enthält Pflanzenreste. Er wird separat abgetragen, als oberste Schicht der Rückstandshaldenabdeckung wieder eingebaut und daher im Folgenden nicht als separate Baugrundsicht ausgewiesen.
- Lockergesteine unterschiedlicher Kornzusammensetzung, Lagerungsdichte und Zustandsform unterlagern den Oberboden mit einer Gesamtmächtigkeit von 20 - 60 m.
  - Der oberste Horizont ist ein Lehm, ausgebildet als Hang-, Geschiebe- oder Lößlehm bzw. Löß, in Mächtigkeiten bis zu 3,0 m. Es handelt sich hierbei um einen Schluff, feinsandig. Er wird bei der Geländeprofilierung in Anspruch genommen und hat im Wesentlichen bautechnische Bedeutung.

- Den Hauptteil bilden feinkörnige Böden quartärer und tertiärer Ablagerungen unterschiedlicher Genese und Zusammensetzung. Es sind Gemische aus Schluffen und Tonen, sandig, z. T. leicht kiesig. In diese bindigen Sedimente eingebettet sind gemischtkörnige Böden in mitteldichter bis dichter Lagerung, die keine durchgängig verbreiteten Schichten darstellen.
- Unterhalb der quartären und tertiären Ablagerungen stehen Schichten höherer Festigkeit und unterschiedlicher Zusammensetzung (veränderlich festes Gestein: Röt, Zechstein, Buntsandstein, Muschelkalk) an.

Bei den Untersuchungen müssen keine signifikanten Einwirkungen aus dem Grubengebäude auf die geplante Halde berücksichtigt werden, da:

- unterhalb der geplanten Halde kein Abbau vorhanden ist und die nördlich der Haldenaufstandsfläche liegenden Abbaue versetzt sind und
- die durch den bestehenden, an die geplante Haldengrundfläche angrenzenden Abbau induzierten, konvergenzbedingten Senkungen sehr gering und großflächig sind. Der resultierende Senkungstrog an der Tagesoberfläche weist sehr flach einfallende Flanken auf. Die hier zwischen 2006 und 2012 durchgeführten Senkungsmessungen zeigen über dem Grubengebäude Senkungen von unter 1 cm sowie daraus abgeleitete Senkungsraten von ca. 1 mm/a (siehe Senkungsprognose Unterlage I-29). Die über einen Zeitraum von 200 Jahren prognostizierten Senkungen unter der Halde sind sehr gering und müssen deshalb nicht berücksichtigt werden.

Darüber hinaus bleiben auch dynamische Einwirkungen wie Erdbeben unberücksichtigt, da der Standort der Halde und seiner Erweiterung außerhalb von Erdbebenzonen liegt (GFZ, 2014).

## 2 Qualitative Bewertung

Zur Bewertung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der geplanten Halde kann von den langjährigen praktischen Erfahrungen, die beim Anlegen und Betreiben von Rückstandshalden in Deutschland gewonnen wurden, Kredit genommen werden. Für eine vergleichende Betrachtung wurden in Tabelle 2-1 prinzipielle Halden- und Untergrunddaten der Großhalden der K + S-Standorte Zielitz und Siegfried-Giesen betrachtet. Grundlagen dafür sind im Wesentlichen das Baugrundgutachten [Unterlage I-27], die seitens K+S [K+S 2013] zur Verfügung gestellten Daten zu den existierenden Rückstandshalden sowie die entsprechenden Sachverständigengutachten.

Alle bestehenden Halden sind seit ihrer Schüttung standsicher, für sie liegen gutachterliche Bewertungen zum Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit vor. Daraus kann abgeleitet werden, dass auch die geplante Neuhalde in Siegfried-Giesen standsicher ist. Gründe dafür sind:

- Die geplante Neuhalde in Siegfried-Giesen ist im Vergleich mit den Halden Zielitz und der Althalde Siegfried-Giesen den Halden mit geringerer Höhe zuzuordnen. Für die oben genannten Halden ist die Standsicherheit aus Erfahrungen bzw. gutachterlich nachgewiesen.

- Bzgl. der komplexen Halden-Baugrundsituation, d. h. der Standsicherheit der Böschungen sowie der Einschätzung der Grundbruchgefahr kann die geplante Neuhalde mit der Althalde Siegfried-Giesen und der Halde Zielitz 1 verglichen werden.
  - Die Althalde besitzt zwar ein geringeres Volumen, weist aber eine fast identische Höhe und steilere Böschungswinkel auf. Die nun über etwa 100 Jahre geschüttete und stehende Halde zeigt keine Böschungsinstabilitäten, obwohl die Böschungen mit Winkeln von ca. 32° - 38° deutlich steiler sind als die der geplanten Flachhalde. Auch sind bei der Althalde keine signifikanten Bodenbewegungen im Haldenvorfeld erkennbar.
  - Der Vergleich mit der Halde Zielitz 1 zeigt, dass:
    - die finalen Höhen beider Halden ca. 80 m betragen,
    - die relevanten Steifigkeitswerte für den Untergrund bei ähnlichen Werten in der Größenordnung von 50 bis 100 MPa liegen,
Die bei der Halde 1 in Zielitz bestimmten, stationären mittleren Horizontalverschiebungsraten liegen in der Größenordnung von wenigen Millimetern pro Jahr [K+S, 2014]. Auch für diese Halde ist die Standsicherheit durch Erfahrungen und Gutachten nachgewiesen.
- Der sich bei standsicheren Rückstandshalden erfahrungsgemäß einstellende Böschungswinkel von etwa 32° – 38° sowie der in den nachfolgend genannten Untersuchungen bestimmte Reibungswinkel des Haldensalzes von mehr als 40° wird durch den Böschungswinkel der geplanten Neuhalde mit 18° – 20° deutlich unterschritten.

Tab. 2-3.4.3.1-1: Vergleich charakteristischer Daten verschiedener Salzhalden der K+S KALI GmbH

<b>Standort</b>	<b>Höhe [m]</b>	<b>Volumen [Mio. m<sup>3</sup>]</b>	<b>Alter [Jahre]</b>	<b>Finaler Böschungswinkel [°]</b>	<b>Baugrund</b>
Zielitz 1	75	30	40	32 – 38	Großteils Lockergestein bis 100 m Tiefe (Katzenbach 2000)
Zielitz 2	120	134	40	32 – 38	Großteils Lockergestein bis 100 m Tiefe (Katzenbach 2000)
Siegfried-Giesen (Althalde)	80	6	100	32 – 38	Lockergesteine und veränderlich feste Gesteine bis 100 m Tiefe (I-27)
Siegfried-Giesen (geplant)	ca. 80	ca. 17	----	18 – 20	Lockergesteine und veränderlich feste Gesteine bis 100 m Tiefe (I-27)

Für eine Einordnung der zu erwartenden Eigenschaften der Rückstandssalze des Werkes Siegfried-Giesen im losen, unmittelbar nach der Schüttung befindlichen Zustand wurden entsprechende Probemengen vom Rückstand der ESTA-Versuchsanlage im K+S Forschungsinstitut entnommen. Das Rückstandssalz war granular und nicht kompaktiert und wurde durch Zugabe einer synthetischen Haldenlauge auf den bei der Aufhaltung zu erwartenden Wassergehalt eingestellt. Das so hergestellte Rückstandssalz wurde durch Katzenbach [Katzenbach 2014] untersucht und ist im Ergebnis dessen mit einem frischen Produktionsrückstand vergleichbar. Bezieht man die Resultate an verfestigten Kernproben aus Bohrungen auf der Halde Zielitz ein, so wird deutlich, dass die Reibungswinkel vergleichbar groß sind und die Kohäsion mit zunehmender Standzeit auf das ca. 10-fache anwächst.

Tab. 2-3.4.3.1-2: Vergleich der Festigkeitseigenschaften des Rückstandssalzes

<b>frisches Rückstandssalz aus</b>	<b>verfestigtes Rückstandssalz aus</b>	<b>Reibungswinkel [°]</b>	<b>Kohäsion [kPa]</b>
Zielitz		32 - 50	10 - 300
Siegfried-Giesen		41 - 45	46 - 63
	Zielitz	49	890

Die Gebrauchstauglichkeit wird ebenfalls anhand eines Vergleiches mit der Halde Zielitz 1 bewertet. Die hier gemessenen Horizontalverschiebungen am Haldenfuß betragen in einem Beobachtungszeitraum von 10 Jahren etwa 10 cm, wobei im stationären Zustand von einer mittleren Verschiebungsrate in der Größenordnung von wenigen Millimetern pro Jahr ausgegangen werden kann [K+S, 2014]. Die Größenordnung der Deformationen an der Halde Zielitz 1 wurde auch durch numerische Simulationen [Katzenbach 2000] bestätigt. Aufgrund eines ähnlichen Untergrundes (in beiden Fällen stehen verfestigte Lockergesteine an) sowie der ähnlichen Haldenhöhe und -eigenschaften sind die an der Halde Zielitz 1 bestimmten Verformungsraten in vergleichbarer Größenordnung auch an der geplanten Flachhalde Siegfried-Giesen zu erwarten, wobei wegen der flachen Endböschungen die Werte wohl noch geringer sein werden.

### 3 Numerische Berechnungen

#### 3.1 Generelle Vorgehensweise

Die Untersuchung mit numerischen Berechnungsverfahren ist die komplexeste und wissenschaftlich-technisch anspruchsvollste Form der Nachweisführung. Sie erlaubt auf Basis einer visko-elasto-plastischen Betrachtungsweise die parallele Nachweisführung der Standsicherheit für die geplante Halde sowie die Ausweisung von deren Auswirkungen auf das Haldenvorland (Gebrauchstauglichkeit) gemäß DIN 1054 und EC7 durch

- die Bewertung des rückstandssalzspezifischen Verhaltens, bei dem spannungsabhängig visko-elasto-plastische Verformungen induziert werden sowie
- die zeitabhängige Berechnung von Spannungen und Verformungen in Halde, Basisabdichtungssystem und Untergrund und somit eine gemeinsame Bewertung ihrer Stabilität.

Dabei wird neben dem elasto-plastischen Verhalten des Systems Halde-Basisabdichtung-Untergrund bevorzugt das sekundäre Kriechen der Rückstandshalde betrachtet, da dieses Verhalten für die Bewertungszeiten (Ende der Betriebsphase und anschließende Standzeit von 30 Jahren) charakteristisch ist. Das nur sehr zeitbegrenzt bei der Schüttung auftretende primäre Kriechverhalten kann aufgrund der angestrebten langzeitlichen Bewertungsaussagen nachfolgend unberücksichtigt bleiben.

Die numerische Nachweisführung beinhaltet mehrere Bearbeitungsschritte:

- Erfassung des viskosen Rückstandsverhaltens in einem Materialgesetz anhand von Ergebniskurven aus Laboruntersuchungen an verfestigtem Rückstandssalz (siehe Abschnitt 3.2):  
Das zukünftige aufzuhaldende Rückstandssalz fällt in einer neu zu errichtenden Aufbereitungsanlage (ESTA) als nicht verwertbarer Produktionsrückstand an. Eine begrenzte Menge dieses Rückstandssalzes wurde in einer versuchstechnischen Aufbereitungsanlage hergestellt und untersucht (vgl. Abs. 2 und Anhang 1). Diese Bewertungen bilden die Grundlage für die Erfassung des viskosen Rückstandsverhaltens in einem Materialgesetz.
- Kalibrierung der Stoffgesetze und der angesetzten Materialparameter durch Modellierung der Situation der bestehenden Halde Zielitz-1 und Nachvollziehen der dort in situ bestimmten Verformungen im Modell (siehe Abschnitt 3.3):  
Die Übertragung des bestimmten Rückstandsverhaltens auf eine reale Halde erfolgt anhand der Nachrechnung der Situation an der Halde Zielitz-1, da hier
  - näherungsweise vergleichbare Verhältnisse für das System Halde-Untergrund (vgl. Abs. 2) sowie
  - Ergebnisse von haldeninduzierten Verformungsmessungen im Haldenfußbereich vorliegen, die zur Kalibrierung des Bewertungsmodells angesetzt werden können.

An der bestehenden Althalde Siegfried-Giesen liegen keine Verformungsmessungen vor, die als Kalibrierungsdaten bei der Modellierung der geplanten Neuhalde genutzt werden könnten.

- Entwicklung von numerischen Modellen für einen repräsentativen Schnitt durch die geplante Neuhalde Siegfried-Giesen und Durchführung von Prognoserechnungen für den Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit (siehe Abschnitt 3.4): Ansatz des so kalibrierten Haldenverhaltens auf ein numerisches Modell der Neuhalde Siegfried-Giesen, bei der Geometrie der Neuhalde sowie Geometrie und Eigenschaften von Basisabdichtung und Untergrund gemäß der vorlaufenden Untersuchungen in den Unterlagen E-10 und I-27 berücksichtigt werden.

Dieses Vorgehen wurde gewählt, um die Nachweise für die standortspezifisch gegebenen Randbedingungen zu erarbeiten.

### 3.2 Verifizierung des Materialgesetzes für das Haldenmaterial

Um das Kriechverhalten der Salzhalde abzubilden, wurde ein visko-elasto-plastisches Stoffgesetz [‘crushed salt model’, Itasca 2011] ausgewählt, welches speziell für Salzgrus entwickelt wurde und insbesondere im untertägigen Steinsalz- und Kalibergbau zur Modellierung von Salzgrusversatz eingesetzt wird. Dieses Materialgesetz ist in der Lage, primäres und sekundäres Kriechen sowie volumetrische Kriechkompaktion (Verdichtung) abzubilden. In Kombination mit dem elasto-plastischen Materialgesetz nach Mohr-Coulomb kann zudem das Festigkeitsverhalten unter Scher- und Zugbeanspruchung berücksichtigt werden. Wie bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben, wird sich nachfolgend auf die Erfassung des sekundären Kriechverhaltens konzentriert.

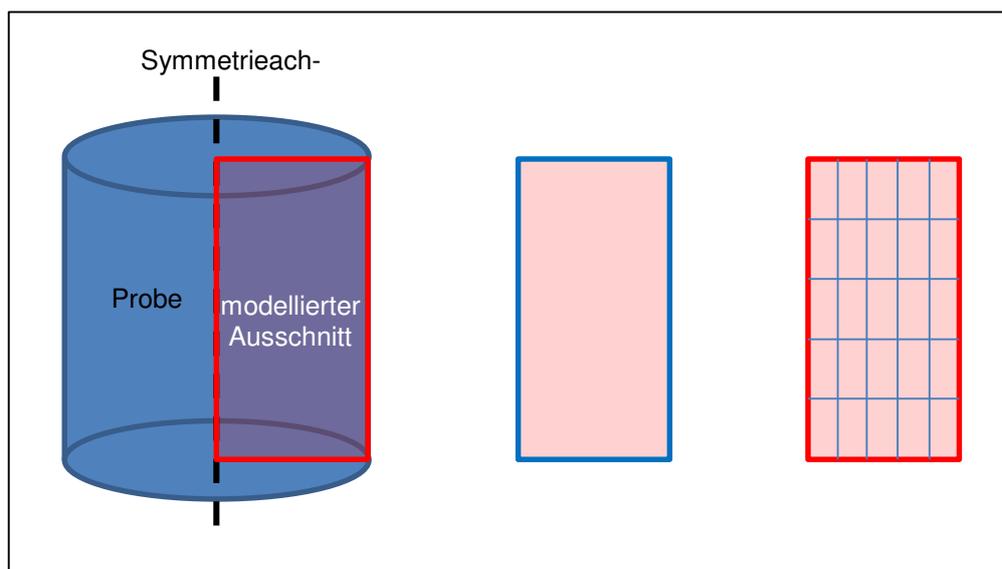


Abb. 3.2-1: Zylindrische Probe mit Symmetrieachse und modelliertem Ausschnitt (links), abgeleitete Modelle aus einem (Mitte) bzw. 25 Elementen (rechts)

Zur Verifizierung des Materialgesetzes und seiner Parameter in Bezug auf das sekundäre Kriechen wurden Untersuchungen mit zwei Modellen von Rückstandssalzproben durchgeführt. Sie wurden axialsymmetrisch aus einem Einzelement bzw. aus 25 Elementen (entspricht 5 x 5 Elementen) aufgebaut (Abbildung 3.2-1).

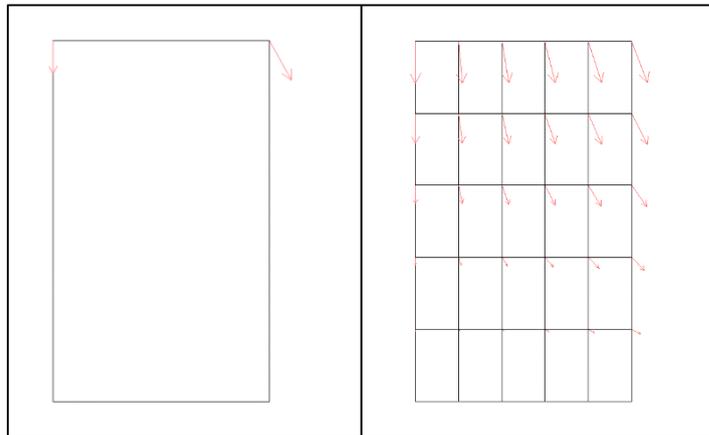


Abb. 3.2-2: 1-Zonen-Modell (links) und 25-Zonen-Modell (rechts) mit Verschiebungsvektoren in der sekundären Kriechphase bei Nutzung des ‚crushed-salt-model‘

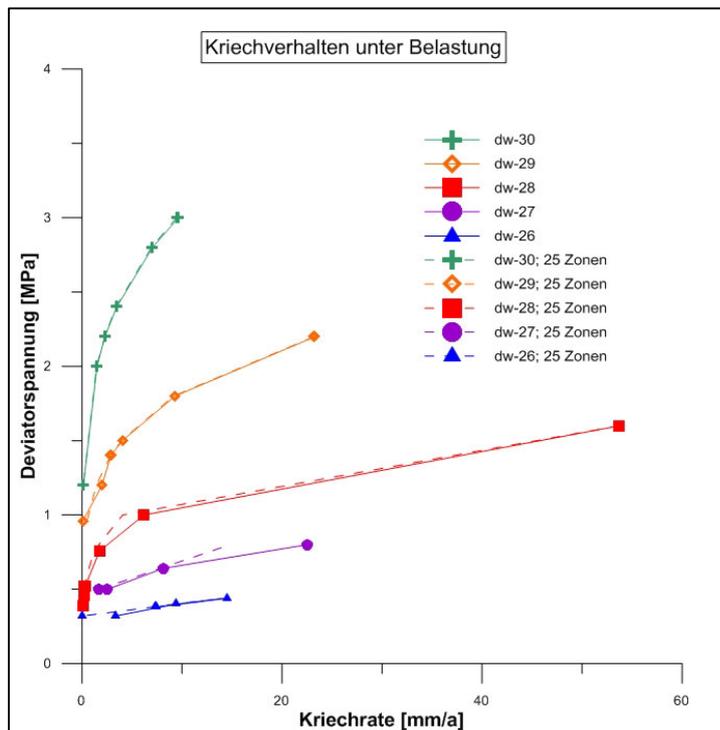


Abb. 3.2-3: Kriechrate als Funktion der Deviatorspannung für das 1- und das 25-Zonen-Modell unter Ansatz verschiedener WIPP-D-Werte

Die sekundäre Kriechrate dieser Elemente wird durch diese Formel gesteuert:

$$\dot{\epsilon}_s = D (\sigma_{dev})^n e^{\left(-\frac{Q}{RT}\right)}$$

wobei R die universelle Gaskonstante, Q die Aktivierungsenergie,  $\sigma_{dev}$  der Spannungsdeviator, T die absolute Temperatur in Kelvin, n der Kriechexponent und D die WIPP-Konstante darstellen. Nähere Ausführungen zum Stoffgesetz, insbesondere dem WIPP-Ansatz sind in Munson & Dawson (1979), Munson (1997), Carter & Hansen (1983) sowie ITASCA (2011) zu finden.

Die Probenmodelle wurden vergleichbar zu Laboruntersuchungen axial belastet. Die Abbildung 3.2-2 zeigt exemplarisch Ergebnisse der Modellberechnung mit Verschiebungsvektoren und Abbildung 3.2-3 die Kurven der Ergebnisse bzgl. der sekundären Kriechrate für verschiedene Werte des D-Faktors (WIPP-Konstante D).

Die Untersuchungsziele sind

- das Nachvollziehen des viskosen Rückstandsverhaltens anhand von Ergebniskurven aus Laboruntersuchungen an verfestigtem Rückstandssalz und
- die Klärung des Einflusses unterschiedlicher Modellvernetzungsdichte.

Beide Modelle zeigen konsistente Ergebnisse (Netzunabhängigkeit) und können durch eine geeignete Wahl der WIPP-Konstante D bzgl. der sekundären Kriechrate im interessierenden Spannungsfeld das gesamte Spektrum der im Labor an Rückstandsproben bestimmten und in-situ gemessenen Kriechraten [Boley 1999, Wachter 2009, K+S 2013, Katzenbach 2000] abdecken. Damit ist der gewählte Stoffgesetzansatz geeignet, das prinzipielle sekundäre Kriechverhalten von Rückstandssalz abzubilden.

### 3.3 Modellkalibrierung (Halde Zielitz-1)

Die Halde Zielitz-1 ist bezüglich der wesentlichen Parameter:

- Haldengeometrie: die Haldenhöhen sind vergleichbar, die größere Grundfläche und das größere Volumen können hierbei unberücksichtigt bleiben,
- Untergrundaufbau: der Untergrundaufbau der Halde Zielitz-1 ist dem dominierenden Untergrundaufbau unter der geplanten Neuhalde Siegfried-Giesen ähnlich. Besonders der nordwestliche Bereich der Halde Siegfried-Giesen ist aufgrund des Baugrundeinfallens für die Bewertung der Standsicherheit wichtig, da hier die Halde ihre maximale Höhe erreicht,

der geplanten Neuhalde Siegfried-Giesen sehr ähnlich (siehe auch Tabelle 2-1) und wurde daher zur Validierung eines numerischen Berechnungsmodells einer Rückstandshalde benutzt. Ziel ist dabei, den in Abschnitt 3.2 für das Rückstandssalz ausgewählten Stoffansatz an die Verhältnisse einer Rückstandshalde unter Nutzung verfügbarer in situ-Messwerte anzupassen. Auch deshalb wurde die Halde Zielitz-1 gewählt, da hier neben numerischen Berechnungsergebnissen und Laborergebnissen zu dieser Halde [Katzenbach 2000] insbesondere in-situ Messergebnisse zum Deformationsverhalten [K+S 2014] der Halde vorliegen.

Bezüglich des Modellaufbaus wurde auf die Arbeit von Katzenbach [Katzenbach 2000] zurückgegriffen. Die neuen Berechnungen wurden mit zweidimensionalen Schnittmodellen durch die Halde und den Untergrund unter Verwendung des Programmes FLAC [Itasca 2011] durchgeführt. Aufgrund der Symmetrieebene in Haldenmitte wird nur die Hälfte der Halde modelliert. Das gesamte Modell umfasst eine Breite von ca. 950 m. Die Halde wurde mit einer Höhe von 80 m berücksichtigt, der Untergrund wurde bis in eine Tiefe von 400 m erfasst. Die äußeren Ränder des Gesamtmodells sind mit Rollenrandbedingungen belegt, nur die Oberflächen von Halde und Untergrund sind frei. Die Abbildungen A1 und A2 im Anhang A zeigen den Modellaufbau.

Das Modell enthält 3 Materialien: das Rückstandssalz der Halde sowie den sandigen Untergrund mit einer 7 m mächtigen Geschiebemergelschicht in einer Tiefe zwischen 5 und 12 m unter der Geländeoberkante. Bei der numerischen Modellbildung wurden abweichend vom Vorgehen in Katzenbach [2000] alternative Materialmodelle verwendet:

- Das elasto-plastische Verhalten wird mit dem besser geeigneten Mohr-Coulomb-Modell mit nicht-assoziierter Fließregel und begrenzter Zugfestigkeit abgebildet [Itasca 2011].
- Das visko-elastische Kriechverhalten wird mittels des ‚crushed salt model‘ [Itasca 2011] simuliert, das ähnliche Charakteristika wie das von Katzenbach [2000] verwendete Stoffgesetz nach Boley & Wachter [Boley 1999, Wachter 2009] enthält und durch die in Abschnitt 3.2 dargestellten Untersuchungen an das prinzipielle Verhalten von Rückstandssalz angepasst wurde.

Der Anhang A (Abb. A2) zeigt die Zuordnung von Halde und Untergrundschichten im Modell und Tabelle 3.1-1 die entsprechend angesetzten Materialparameter.

Tab. 3.4.3.1-1: Materialparameter Haldenmodell Zielitz-1

Parameter	Rückstandssalz	Sand	Geschiebemergel
<b><i>elasto-plastisch*</i></b>			
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	1500 – 2000	2000	2000
E-Modul [MPa]	2500	62	25
Querdehnzahl	0,25	0,35	0,35
Kohäsion [kPa]	890	0	5
Reibungswinkel [°]	49	32	20
Dilatanzwinkel [°]	24	16	10
Zugfestigkeit [MPa]	0	0	0
<b><i>viskos**</i></b>			
WIPP-Konstante D [Pa <sup>-n</sup> /s]	0,2 x 10 <sup>-31</sup>	----	----
WIPP-Exponent n	4,9	----	----
Temperatur [K]	300	----	----
Aktivierungsenergie [cal/mol]	12000	----	----
Gaskonstante [cal/mol*K]	1,987	----	----

\* Quelle: Katzenbach [2000]

\*\* Quelle: Anpassungswerte aus Abschnitt 3.2

Zur Simulation des Kriechverhaltens der Halde wird nur die sekundäre Kriechrate verwendet, deren Kennwerte in den nachfolgenden Berechnungen durch Kalibrierung des Haldenverhaltens an den in-situ Messergebnissen angepasst werden. Der Ansatz der sekundären Kriechrate ist gerechtfertigt, da vorrangig das langzeitliche Verhalten der Halde im Sinne der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit bewertet werden soll, für die die stationären Verformungsraten maßgebend sind. Maßstab für diese Berechnungen sind die Ergebnisse von in situ-Messungen am Böschungsfuß der Halde Zielitz 1. Wie in [K+S 2014] gezeigt, lässt sich konservativ abgeschätzt eine sekundäre Kriechrate am Haldenfuß von etwa 1-2 mm/a (mit abklingender Tendenz) ableiten, wobei man sich bzgl. der in situ-Messungen am Rande der Messgenauigkeit der verwendeten Verfahren bewegt.

Zwischen GOK und Unterkante Salzhalde wird im Modell eine Trennfläche (Interface) eingebaut, der konservativ ein Reibungswinkel von  $20^\circ$ , eine Kohäsion von Null und dem Haldensalz äquivalente Steifigkeiten zugeordnet werden.

Für den E-Modul des Untergrundes (Sand) wird eine mit der Tiefe ansteigende Funktion verwendet, die am Modellboden bei – 400 m unter GOK zu einem Wert von 1 GPa führt.

Die Untersuchung erfolgt in mehreren Phasen:

- 1.) Berechnung des Primärspannungszustandes im Untergrund ohne Halde (elastisch und elasto-plastisch, wobei ein mit der Tiefe ansteigender E-Modul angenommen wird – ‚small strain stiffness‘)
- 2.) Aufbringen des Haldenmaterials mit einer Dichte von  $1500 \text{ kg/m}^3$  und Berechnung der sich einstellenden Dichteverteilung in der Halde unter Eigengewicht (elastisch und elasto-plastisch)
- 3.) Umschalten des Stoffgesetzes für Haldenmaterial auf das ‚crushed-salt-model‘ zur Beschreibung des visko-elasto-plastischen Materials und Berechnung des Haldenverhaltens über eine Zeitdauer von 30 Jahren (Kriechberechnungen)
- 4.) Bewertung des berechneten Verformungsverhaltens der Halde bzgl. der vorliegenden in situ-Messungen und ggf. Anpassung des Haldenmaterialverhaltens.

Die in Phase 2 berechnete Dichteverteilung in der Halde unter Eigengewicht führen zu einer spannungsabhängigen Variation von  $1500 \text{ kg/m}^3$  an der Haldenoberfläche und bis  $2000 \text{ kg/m}^3$  an der Haldenbasis.

Die im Ergebnis der Berechnungen über den Betrachtungszeitraum von ca. 30 Jahren in Phase 3 ausgewiesenen Verformungen am Haldenrand zeigen eine gute Übereinstimmung mit den in situ-bestimmten gemessenen Werten. Die dabei am Haldenfuß auftretenden Horizontalverschiebungen betragen ca. 95 mm und an der Böschungsschulter ca. 50 mm (siehe Anhang A, Abb. A3 und A4). Die horizontale Kriechrate am Böschungsfuß nimmt mit der Zeit ab und beträgt im Mittel im 1. Jahr ca. 12 mm/Jahr, in den ersten 10 Jahren im Mittel ca. 6 mm/Jahr und in den ersten 30 Jahren im Mittel ca. 3 mm/Jahr. Die gewählte Parameterkonstellation in dieser Modellierung deckt damit den angestrebten Wert von ca. 3 mm/Jahr konservativ ab und bestätigt den prinzipiell erwarteten Verlauf konstanter bis degressiver Verformungsraten. Das für die Situation an der Rückstandshalde Zielitz-1 verwendete Hal-

densalzstoffgesetz sowie die angesetzten Rückstandssalzparameter wurden durch die vorliegenden Berechnungen bestätigt und können für Prognoserechnungen zur geplanten Halde Siegfried-Giesen verwendet werden.

### 3.4 Geplante Neuhalde Siegfried-Giesen

#### 3.4.1 Entwicklung des numerischen Modells

Die Untersuchungen zum Nachweis von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der geplanten Neuhalde Siegfried-Giesen erfolgen anhand numerischer Modellierungen mit dem bereits in Abschnitt 3.3 vorgestellten Programmcode FLAC. Wie bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben, entspricht dieses Vorgehen der wissenschaftlich-technisch anspruchsvollsten Form der Nachweisführung. Dazu wird das in Abschnitt 3.2 entwickelte und in Abschnitt 3.3 kalibrierte Rückstandssalzverhalten auf die Verhältnisse der geplanten Neuhalde am Standort Siegfried-Giesen übertragen. Für die Untersuchungen wurden vorbereitend folgende Schritte durchgeführt:

##### - Erstellung der Modellnetzgeometrie

Die Prognoserechnungen werden an einem Schnitt gemäß den Empfehlungen aus dem Geotechnischen Gutachten [Unterlage I-27] durchgeführt. In dem Schnitt wird der gesamte Haldenkörper mit der maximalen Haldenhöhe von 80 m (Haldenhöhe steigt unter Beachtung der Geländemorphologie von SO nach NW von ca. 63 m ü. GOK auf 80 m ü. GOK an bei gleichbleibender Höhe über NN) modelliert. Die Böschungsneigungen unterscheiden sich entsprechend der Haldenbetriebszustände. Ausgehend von einer im Südosten beginnenden und nach Nordwesten geführten Haldenschüttung wird sowohl der Schüttzustand mit nordwestlicher Schüttböschung von ca. 40° im Bereich der maximalen Haldenhöhe (Betriebsphase) als auch der Haldenendzustand mit flachen Böschungen von ca. 20° (Nachbetriebsphase) berücksichtigt. Die geplante praktische Realisierung ist in den Unterlagen E-10 (Haldenplanung) und I-30 (Schüttregime) beschrieben.

Zwischen Geländeoberkante und Unterkante Salzhalde wird modelltechnisch bedingt die Basisabdichtung durch eine deformierbare Gleitfläche (Interface) abgebildet.

Der Untergrund wird entsprechend dem Geotechnischen Gutachten (Unterlage I-27) modelliert. Es werden drei Baugrundsituationen (Modelle -1, -2 und -3) berücksichtigt.

Das Modellnetz

- besteht aus ca. 35.000 Elementen. Der Knotenabstand liegt zwischen 2 und 5 m. Die Modellmaße können den Abb. B1 und B3 für die Modelle mit flacher Böschung (Nachbetriebsphase) sowie B2 und B4 für die Modelle mit flacher und steiler Böschung (Betriebsphase) in Anhang B entnommen werden. Vergleichbar zur Modellierung in Abschnitt 3.3 sind die äußeren Ränder des Gesamtmodells mit Rollenrandbedingungen belegt, nur die Oberflächen von Halde und Untergrund sind frei.
- erfasst die ungünstigste Halden- und Untergrundgeometrie, da
  - das Untergrundeinfallen nach Nordwesten,

- die maximale Haldenausdehnung sowie die maximale Haldenhöhe,
  - die aus allen Baugrundaufschlüssen ungünstigsten Untergrundkombinationen
- im zweidimensionalen Modell unendlich tief in die Bildebene hinein berücksichtigt werden.

- Stoffgesetze und Materialparameter

Das in den Abschnitten 3.2 und 3.3 beschriebene Rückstandssalzverhalten wird bzgl. seiner spannungsinduzierten elasto-plastischen und viskosen Verformungen differenziert betrachtet.

Das elasto-plastische Verhalten von Halde wird mit dem Mohr-Coulomb-Modell mit nicht-assoziierter Fließregel und begrenzter Zugfestigkeit abgebildet [Itasca 2011]. Dem Rückstandssalz wurden dabei die Festigkeitseigenschaften des geschütteten Rückstandssalzes zugeordnet. Die an den bestehenden Halden beobachtete, zeitabhängige Verfestigung des Rückstandssalzes (vgl. auch Tab. 2-2) bleibt hier konservativ unberücksichtigt.

In der Untersuchung wird die sekundäre Kriechrate bewertet, die für das langzeitliche Verhalten der Halde im Sinne der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit maßgebend ist. Die Simulation des Kriechverhaltens erfolgt mit dem ‚crushed salt models‘ [Itasca 2011] entsprechend der in den Abschnitten 3.2 und 3.3 beschriebenen Anpassungen. Dazu wird das in Abschnitt 3.3 für die Halde Zielitz-1 kalibrierte Kriechverhalten auf die Situation in Siegfried-Giesen angewandt. Die in der Modellierung verwendeten Parameter für das Rückstandssalz sind in Tabelle 3.4.1-1 dargestellt.

Tab. 3.4.3.1-1: Verwendete Materialparameter Haldenmodell Siegfried-Giesen

<b>elasto-plastische Parameter [Katzenbach, 2000]</b>	<b>Werte</b>
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	1500 - 2000
Steifemodul [MPa]	1000
Querdehnzahl	0,25
Kohäsion [kPa]	54
Reibungswinkel [°]	44
Dilatanzwinkel [°]	24
Zugfestigkeit [MPa]	0
<b>viskose Parameter [Abschnitt 3.3]</b>	
WIPP-Konstante D [Pa <sup>-n</sup> /s]	0,2 x 10 <sup>-31</sup>
WIPP-Exponent n	4,9
Temperatur [K]	300
Aktivierungsenergie [cal/mol]	12000
Gaskonstante [cal/mol*K]	1,987

Zwischen Geländeoberkante und Unterkante Rückstandshalde befindet sich die Basisabdichtung, die durch eine deformierbare Gleitfläche (Interface) mit einem Reibungswinkel

von 20°, einer Kohäsion von Null und Steifigkeiten abgebildet wird, die einem Steifemodul von 13 MPa entsprechen.

Der Untergrund wird elasto-plastisch modelliert. Die dafür verwendeten Materialparameter werden gemäß dem in Unterlage I-27 entwickelten Baugrundmodell angesetzt, sie sind in Tabelle 3.4.1-2 zusammengefasst. Für die numerischen Berechnungen wurde der E-Modul aus den jeweiligen Steifemoduli unter Verwendung der Querdehnzahlen abgeleitet.

Tab. 3.4.3.1-2: Verwendete Materialparameter Baugrundmodell unter der Halde Siegfried-Giesen

<b>Parameter</b>	<b>Modellschicht 1a (nur bautechnisch relevante Schicht)</b>	<b>Modellschicht 1</b>	<b>Modellschicht 2 (Modellschicht 3)</b>
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	1700	1800	2100
Steifemodul [MPa]	13	40 - 60	60 - 1500
Querdehnzahl	0,25	0,25	0,25
Kohäsion [kPa]	12.5	25	100
Reibungswinkel [°]	25	27	27
Dilatanzwinkel [°]	12	13	13
Zugfestigkeit [MPa]	0	0	0

Die Modellschicht 1 entspricht den Lockergesteinen, die Modellschicht 2 den veränderlich festen Gesteinen. Aus konservativen Erwägungen und einer entsprechenden Empfehlung in Unterlage I-27 folgend wurden im oberen Bereich der Modellschicht 1 (= Modellschicht 1a) die Festigkeits- und Deformationsparameter nochmals abgemindert.

Innerhalb der Modellschicht 2 wird eine tiefenabhängige Steifigkeitsverteilung gemäß der vorgegebenen drei Baugrundsituationen der Unterlage I-27 gewählt.

Konservativ wird bei allen Untersuchungen ein Grundwasserflurabstand von 1 m unter der Geländeoberkante angesetzt, wobei im südöstlichen Haldenteil keine Grundwasserführung nachgewiesen wurde.

Die oben beschriebenen Modelle entsprechen den im Geotechnischen Gutachten (Unterlage I-27, Kapitel 8) aus den Baugrundaufschlüssen bereits konservativ abgeleiteten Berechnungsmodellen. Sie sind am Beispiel des Modells mit den flachen Böschungen im Anhang B, Abb. B5 bis B7 dargestellt. Durch dieses Vorgehen werden die für die Bewertung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit ungünstigsten Geometrien und Eigenschaften erfasst, um eine konservative Bewertungsaussage zu erreichen.

### 3.4.2 Vorgehen zur Nachweisführung

Vergleichbar zum Vorgehen in Abschnitt 3.3 erfolgen die Berechnungen mit dem numerischen Programmcode FLAC in den Phasen:

- 1.) Berechnung des Primärspannungszustandes im Untergrund ohne Halde (elastisch und elasto-plastisch).
- 2.) Aufbringen des Haldenmaterials mit einer Dichte von  $1500 \text{ kg/m}^3$  und Berechnung der sich einstellenden Dichteverteilung in der Halde unter Eigengewicht (elastisch und elasto-plastisch), nachfolgend: Bewertung Haldensituation in der Betriebsphase
- 3.) Umschalten des Stoffgesetzes für Haldenmaterial auf das ‚crushed-salt-model‘ und Berechnung des Haldenverhaltens über eine Zeitdauer von 30 Jahren (Kriechberechnungen) nachfolgend: Bewertung Haldensituation in der Nachbetriebsphase
- 4.) Auswertung / Analyse / Bewertung des berechneten Haldenverhaltens.
- 5.) Anwendung des ‚c- $\varphi$ - $\sigma_t$ -Reduktionsverfahrens‘ zur Bewertung der Standsicherheit für die Situationen ‚Betriebsphase‘ und ‚Nachbetriebsphase‘

Im Einzelnen wird die Situation der geplanten Neuhalde Siegfried-Giesen mit folgenden Berechnungsvarianten untersucht:

- Betriebsphase (vorübergehende Bemessungssituation: BS-T, LF2):
  - Bewertungssituation:
    - Halde fast vollständig aufgefahren mit einer steileinfallenden nordwestlichen Böschungsflanke, die der Schüttflanke entspricht, und einer flach einfallenden südöstlichen Böschungsflanke
    - erfasst die maximale Systembeanspruchung, da die maximale Haldenhöhe und das Einfallen des Untergrundes berücksichtigt werden
  - Bewertungszeit: unmittelbar nach Einstellung der Schüttung (steile Schüttböschung)
  - Bewertungsziele: Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit
- Nachbetriebsphase (ständige Bemessungssituation: BS-P, LF 1):
  - Bewertungssituation:
    - Halde vollständig aufgefahren mit flach einfallenden Böschungsflanken
    - erfasst die maximale Systembeanspruchung, da die maximale Haldenhöhe und das Einfallen des Untergrundes berücksichtigt werden
  - Bewertungszeit: 30 Jahre Standzeit nach Ende Betriebsphase
  - Bewertungsziele: Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit

Die Nachweisführung zur Erreichung der Bewertungsziele umfasst bei den Untersuchungen zur:

- **Standsicherheit** das ‚c- $\varphi$ - $\sigma_t$ -Reduktionsverfahren zur Festigkeitsbewertung des Systems Halde-Basisabdichtung-Untergrund. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der Partialsicherheitsfaktoren und ist ein aktuell national und international etabliertes Verfahren zur Standsicherheitsbewertung von Böschungen. Im EC7 (Eurocode7) sowie der DIN 1054 werden diesbezüglich für Kohäsion und Reibungswinkel bei Böschungen jeweils Partialsicherheitsfaktoren von 1,25 für die ständige Bemessungssituation und 1,15 für eine vorüberge-

hende Bemessungssituation festgesetzt. Dabei wird die Zugfestigkeit konservativ Null gesetzt. Bezogen wird sich auf den Grenzzustand des Versagens durch Verlust der Gesamtstandsicherheit (GEO-3) bei dem der Teilsicherheitsbeiwert der Einwirkungen 1,0 beträgt,

- **Gebrauchstauglichkeit** die Bewertung des Grenzzustandes (SLS) nach den oben genannten Normen. Dabei werden für die Einwirkungen und Widerstände Teilsicherheitsbeiwerte von 1,0 angesetzt, um realitätsnahe Auswirkungen der Halde auf ihre Umgebung zu prognostizieren. In einer weiterführenden Untersuchung werden die Auswirkungen einer konservativ erhöhten Kriechverformung durch Änderung der WIPP-Konstante bewertet (erhöhte sekundäre Kriechrate). Aufgrund der signifikant geringeren Böschungsneigungen im Endzustand der Neuhalde Siegfried-Giesen werden aus der Modellierung deutlich geringere Böschungsfußverschiebungen gegenüber den in situ bestimmten Verformungen an der Halde Zielitz 1 erwartet. Im Sinne einer konservativen Bewertung der neu geplanten Halde wird daher zusätzlich das Kriechverhalten so verstärkt (WIPP-Konstante:  $D = D_{\text{verstärkt}} = 0,2 \times 10^{-30} \text{ Pa}^{-n}/\text{s}$ ), dass die dabei berechneten Bewegungen der flach abgeböschten Neuhalde die Größenordnung von wenigen Millimetern pro Jahr erreichen.

Die Bewertung umfasst dabei bei der Standsicherheit den Ausschluss instabiler Zustände des Systems Halde-Basisabdichtung-Untergrund und bei der Gebrauchstauglichkeit die konservativ bis real zu erwartenden Verformungen. Die so prognostizierten Verformungen sind durch ein späteres, haldenschüttungsbegleitendes Monitoring zu bestätigen. Der Vergleich kann zwei Ergebnisse zeigen:

- Die gemessenen Bewegungen sind kleiner oder gleich den prognostizierten Bewegungen: Daraus folgt, dass das Modell ein realitätsnahes bzw. konservativ abdeckendes Haldenverhalten zeigt und somit Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit bestätigt werden.
- Die gemessenen Bewegungen sind größer als die prognostizierten Bewegungen: Daraus folgt, dass das Modell das reale Haldenverhalten unterschätzt. In diesem Fall ist die Standsicherheit erneut zu überprüfen. Dazu sind das Haldenmodell anhand gemessener Bewegungen erneut zu kalibrieren und die Prognosen für das Haldenverhalten (Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit) zu aktualisieren.

Die Modellierungen (2D-Modelle) sind gegenüber der realen Situation konservativ, da

- in den Haldenschnitten die kritischsten Situationen für die Halde (max. Höhe und Länge) und den Baugrund (stärkstes Einfallen, Kombination der ungünstigsten Baugrunderkundungsergebnisse) erfasst werden
- die 2D-Modelle eine in die 3. Raumrichtung unendlich tief reichende Ausdehnung haben
- keine Festigkeitszunahme des geschütteten Haldenmaterials infolge Kompaktion unter Eigengewicht der Halde berücksichtigt wird
- die Kohäsion für das Residualgebirge mit nur 100 kPa angesetzt ist

- die Reibung in der Basisabdichtung (angesetzter Reibungswinkel von  $20^\circ$ ) unter den in Unterlage E-10 geforderten Werten von mindestens  $23^\circ$  liegt
- der Primärspannungszustand im Untergrund einen Seitendruckbeiwert von ca. 0,33 aufweist (maximaler Spannungsdeviator)
- ein Grundwassereinfluss infolge des angesetzten Grundwasserflurabstand von 1 m unter Geländeoberkante berücksichtigt wird
- der ‚small strain stiffness‘ – Effekt (erhöhte Steifigkeit bei kleinen Deformationen) nicht berücksichtigt wurde.

### 3.4.3 Darstellung der Ergebnisse

#### 3.4.3.1 Prinzipielles Vorgehen

Nach Durchführung der Berechnungen werden für die einzelnen Berechnungsfälle folgende Ergebnisse ausgewiesen

- Betriebsphase
  - Standsicherheit: Die Auswertung erfolgt anhand von Diagrammen bzw. Isoplotdarstellungen der maximalen Ungleichgewichtskraft und der Vertikalspannungsverteilung.
  - Gebrauchstauglichkeit: Die Auswertung erfolgt anhand von Isoplotdarstellungen bzw. Diagrammen bzgl. der Setzungen und Dehnungen mit besonderem Bezug auf die Haldenbasis.
- Nachbetriebsphase (30 Jahre)
  - Standsicherheit: Die Auswertung erfolgt anhand von Diagrammen bzw. Isoplotdarstellungen der maximalen Ungleichgewichtskraft und der Vertikalspannungsverteilung.
  - Gebrauchstauglichkeit: Die Auswertung erfolgt anhand von Isoplotdarstellungen bzw. Diagrammen der horizontalen Verschiebungen, Kriechraten (ausgewählte Böschungspunkte), Setzungen und Dehnungen mit besonderem Bezug auf die Haldenbasis, getrennt für die Ansätze der realen und der konservativ verstärkten Viskosität (Kriechrate).

#### 3.4.3.2 Betriebsphase

Die Ergebnisse der Berechnungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Halde Siegfried-Giesen in der Betriebsphase sind für die Baugrundmodelle 1 bis 3 im Anhang C zusammengefasst.

In allen Berechnungen wird ein Gleichgewichtszustand erreicht. Eindeutiger Beleg dafür ist, dass die maximalen Ungleichgewichtskräfte konvergieren und gegen den Wert Null streben (Abb. C1, C6 und C11). Die Spannungsverteilungen im System Halde-Basisabdichtung und Untergrund zeigen einen plausiblen Verlauf (Abb. C2, C7 und C12). Diese Berechnungser-

gebnisse zeigen, dass die Standsicherheit der Halde Siegfried-Giesen nach dem ‚c-φ-σ<sub>T</sub>-Reduktionsverfahren‘ mit einem Sicherheitsfaktor von mindestens 1,25 für alle untersuchten Baugrundsituationen nachgewiesen ist.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Gebrauchstauglichkeit sind in Tabelle 3.4.3.2-1 dargestellt.

Tab. 3.4.3.2-1: Betriebsphase: Berechnete maximale Setzungen und Dehnungen

Berechnungsmodelle (I-27)	maximale Setzungen		maximale Dehnungen [%]
	SE-Bereich (X=650 m) [m]	NW-Bereich (X=1050 m) [m]	
<b>Modell-1</b>	2,7	3,0	1,8
<b>Modell-2</b>	2,8	3,3	1,8
<b>Modell-3</b>	1,8	3,4	1,9

Die Ergebnisse werden wie folgt bewertet:

- Auf die Analyse der Horizontalverschiebungen kann bei der Bewertung der Betriebsphase verzichtet werden, da die Bewegungen der aktiv beschütteten Böschung weder Schutzgüter beeinträchtigen noch messtechnisch überwacht werden. Die Sicherheit ist hier durch betriebliche Regelungen zu gewährleisten.
- Die Setzungen an der Haldenunterkante (Niveau Basisabdichtung) schwanken je nach Baugrundsituation zwischen etwa 50 - 100 cm im Haldenrandbereich und reichlich 3 m in Bereichen mit dem größten baugrundbedingten Setzungspotential (Abb. C3 und C4, C8 und C9 sowie C13 und C14). Die Setzungsunterschiede zwischen südöstlichem (SE) und nordwestlichem (NW-) Bereich des Modellschnitts variieren zwischen etwa 0,2 und 1,3 m. Die maximalen Dehnungen betragen etwa 1,8% am nordwestlichen Böschungsrand (Bereich der temporären steilen Böschung) und erreichen nochmals punktuell eine ähnliche Größenordnung im Modell-3 an der Stelle des extremen Steifigkeitskontrastes im Untergrund (siehe auch Abb. C5, C10 sowie C15). Ansonsten liegen die Werte unter 1%. Die hier ausgewiesenen Werte stellen aufgrund der in Abs. 3.4.2 genannten konservativen Ansätze theoretische Obergrenzen dar.

### 3.4.3.3 Nachbetriebsphase

Die Ergebnisse der Berechnungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Halde Siegfried-Giesen in der Nachbetriebsphase sind für die Berechnungsmodelle 1 - 3 (I-27) im

- im Anhang D für den Ansatz der realen Viskosität und

- im Anhang E für den Ansatz der erhöhten Viskosität

zusammengefasst.

Die Berechnungen der Nachbetriebsphase schließen unmittelbar an die Berechnungen der Betriebsphase an.

Auch hier wird in allen Berechnungen ein Gleichgewichtszustand erreicht, die maximalen Ungleichgewichtskräfte konvergieren gegen den Wert Null (Abb. D1/E1, D8/E8 und D15/E15). Die Spannungsverteilungen im System Halde-Basisabdichtung und Untergrund zeigen einen plausiblen Verlauf (Abb. D2/E2, D9/E9 und D16/E16). Diese Berechnungsergebnisse zeigen, dass die Standsicherheit der Halde Siegfried-Giesen nach dem ‚c-φ-σ<sub>T</sub>-Reduktionsverfahren‘ mit einem Sicherheitsfaktor von mindestens 1,25 für alle untersuchten Baugrundsituationen nachgewiesen ist.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Gebrauchstauglichkeit sind in den Tabellen 3.4.3.3-1 und -2 dargestellt.

Tab. 3.4.3.3-1: Nachbetriebsphase (30 Jahre nach Ende der Betriebsphase): Berechnete Verformungen unter Ansatz realer Viskosität für das Haldenmaterial (Anhang D)

Modell	kriechbedingte Horizontalver- schiebung [cm]	horizontale Kriechrate [mm/a]	maximale Setzungen		maximale Dehnungen [%]
			SE-Bereich (X=650 m) [m]	NW-Bereich (X=1050 m) [m]	
-1	2 - 3	< 1	2,6	2,9	0,8
-2	2 - 3	< 1	2,6	3,2	0,9
-3	2 - 3	< 1	1,8	3,3	1,3
<b>Monitoring</b>		<b>x</b>	<b>x</b>	<b>X</b>	

Tab. 3.4.3.3-2: Nachbetriebsphase (30 Jahre nach Ende der Betriebsphase): Berechnete Verformungen unter Ansatz erhöhter Viskosität für das Haldenmaterial (Anhang E)

Modell	kriechbedingte Horizontalverschiebung [cm]	horizontale Kriechrate [mm/a]	maximale Setzungen		maximale Dehnungen [%]
			SE-Bereich (X=650 m) [m]	NW-Bereich (X=1050 m) [m]	
-1	5 - 8	< 2	2,4	2,9	0,8
-2	5 - 10	< 2	2,5	3,2	0,9
-3	2 - 8	< 2	1,8	3,3	1,3
<b>Monitoring</b>		<b>x</b>	<b>x</b>	<b>X</b>	

Die Ergebnisse werden wie folgt bewertet:

- Die Horizontalverschiebungen sind von der Baugrundsituation weitgehend unabhängig. Sie erreichen nach 30 Jahren Standzeit ca. 2 - 3 cm unter Ansatz der realen Viskosität (D3, D10, D17) und 5 - 10 cm unter Ansatz der erhöhten Viskosität (Abb. E3, E10, E17). Die Horizontalverschiebungsraten sind 30 Jahre nach Ende der Betriebszeit auf maximal ca. 0,5 - 1 mm/a unter Ansatz der realen Viskosität (Abb. D4, D11, D18) und maximal ca. 1 - 2 mm/a unter Ansatz der erhöhten Viskosität (Abb. E4, E11, E18) abgesunken mit weiterhin abfallendem Trend.
- Die Setzungen an der Haldenunterkante (Niveau Basisabdichtung) sind von der Viskosität weitgehend unabhängig und schwanken je nach Baugrundsituation zwischen 0,5 und 1 m in den Haldenrandbereichen und bis zu 3,3 m in Bereichen mit dem größten baugrundbedingten Setzungspotential (Abb. Modell 1: D5, D6 / E5, E6, Modell 2: D12 und D13 / E12 und E13, Modell 3: D19 und D20 / E19 und E20). Die Setzungsunterschiede zwischen südöstlichem (SE) und nordwestlichem (NW-) Bereich des Modellschnitts variieren zwischen 0,2 und 1,3 m. Die maximalen Dehnungen betragen ca. 1 % (Abb. Modell 1: D7/E7, Modell 2: D14/E14, Modell 3: D21/E21).

Die hier ausgewiesenen Werte stellen aufgrund der in Abs. 3.4.2 genannten konservativen Ansätze theoretische Obergrenzen dar.

Die Dehnungen im Niveau der Basisabdichtung werden im Wesentlichen durch die auflastbedingte Senkungsmulde hervorgerufen. Die viskosen Verformungen, auch unter Annahme einer erhöhten Kriechrate, führen nur zu ganz marginalen Änderungen der Dehnung. Begründet ist dies zum einen dadurch, dass die viskosen Anteile nur etwa 2% der Gesamtdehnungen ausmachen und andererseits durch die viskosen Dehnungen die Auflast der Halde auf eine größere Fläche verteilt wird, was wiederum die Senkungsmulde reduziert.

Die numerisch berechneten Setzungen liegen ca. 0.8 m über den in I-27 ausgewiesenen analytisch abgeschätzten Werten. In vergleichend durchgeführten numerischen Berechnungen mit rein elastischem Materialverhalten im Untergrund werden annähernd die gleichen Setzungswerte, wie in I-27 ausgewiesen, erreicht. Die im Gutachten dargestellten, größeren Setzungsbeträge resultieren aus der Berücksichtigung zusätzlicher plastischer Verformungsanteile. Dieses Ergebnis ist unter dem Gesichtspunkt sehr konservativer Annahmen (siehe Abschnitt 3.4.2) zu sehen.

#### 4 Gesamtbewertung

Die K+S KALI GmbH plant die Wiederinbetriebnahme des Werkes Siegfried-Giesen. Damit verbunden ist die Errichtung einer ESTA-Rückstandshalde, für die in vorausgehenden Untersuchungen ein geeigneter Standort bestimmt wurde. In Vorbereitung der Beantragung des Genehmigungsverfahrens sind die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der geplanten Halde zu untersuchen. Dies erfolgt auf der Grundlage

- der Bewertung der langjährigen praktischen Erfahrungen, Beobachtungen und Messungen an Rückstandshalden, insbesondere der mit vergleichbaren Verhältnissen, sowie
- der numerischen visko-elasto-plastischen Berechnungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit

Im Ergebnis aller Untersuchungen wird die Standsicherheit für die geplante Halde nachgewiesen. Übereinstimmend zeigen vorliegende Erfahrungen und numerische Berechnungen standsichere Haldenverhältnisse bei konstantem bis degressivem Verformungsverhalten.

Die durch die Kompaktion der Halde unter Eigengewicht verursachten Setzungen der Haldenoberfläche können nur analytisch abgeschätzt werden. Unter Ansatz einer Schüttdichte des Rückstandes von  $1500 \text{ kg/m}^3$  und einer mittleren Haldendichte nach Kompaktion von  $1700 \text{ kg/m}^3$  sind Setzungen in der Größenordnung von 10 % der jeweiligen Haldenhöhe zu erwarten. Diese Setzungen sind durch ein schüttungsbegleitendes Monitoring zu bestimmen.

Im Rahmen der Gebrauchstauglichkeitsbewertung werden zu erwartende Auswirkungen der geplanten Halde prognostiziert. Sie gehen in die Bewertung der Basisabdichtung und die Auslegung eines haldenschüttungsbegleitenden Monitoringprogramms ein. Dabei sollte mit geeigneten Beobachtungs- und Messmethoden das reale Verhalten der Haldenböschung und des Haldenvorfeldes begleitend zur Haldenschüttung bestimmt und ausgewertet werden. Wenn die dann gewonnenen Messergebnisse mit den Aussagen der in Abschnitt 3.4 genannten Prognosen zur Verformung übereinstimmen, liefert dies die Grundlage für eine sichere Aufhaltung durch den Nachweis der Einhaltung zulässiger Verformungen. Anderenfalls sind die Prognosemodelle zu überarbeiten, erneut zu kalibrieren und die Berechnungen zu wiederholen.

## Literatur

- Carter, N.L & Hansen F.D. (1983): Creep of rocksalt, Tectonophysics, 92: 275-333
- ITASCA (2011): FLAC-Manuals, Itasca Consulting Group, Inc. Minneapolis, Minnesota, USA
- Katzenbach, R. (2000): Sachverständigengutachten K96019/01 zur Langzeitstabilität der Halde 1, Werk Zielitz, Institut für Geotechnik, TU Darmstadt
- Katzenbach, R. (2014): Sachverständigengutachten IK1358/01, Hartsalzwerk Siegfried-Giesen, Bestimmung der salzmechanischen Parameter von Rückstandsmaterial einer neu zu errichtenden Flachhalde, Ingenieursozietät Katzenbach GmbH
- K+S (2013): Vergleich charakteristischer Haldenparameter. Schriftliche Mitteilung der K+S Aktiengesellschaft
- K+S (2014): Verformungsverhalten der Halde Zielitz 1. Schriftliche Mitteilung der K+S Aktiengesellschaft
- Munson, D.E & Dawson, P.R. (1979): Constitutive model for low temperature creep of salt (with application to WIPP), Sandia Laboratories, USA, 33 p.
- Munson, D.E. (1997): Constitutive model of creep in rock salt applied to underground room closure, Int. J. Rock Mech Min Sci, 34(2): 233-247