

Verformungen an Infrastruktureinrichtungen durch die Belastungen des Baugrundes aus großflächigen Rückstandshalden

Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach, TU Darmstadt, Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik
Dipl.-Ing. Steffien Leppla, TU Darmstadt, Institut und Versuchsanstalt für Geotechnik
Dipl.-Ing. Matthias Seip, Ingenieursozietät Professor Dr.-Ing. Katzenbach GmbH, Darmstadt
Dr.-Ing. Jan-Peter Schleinig, K+S Aktiengesellschaft, Kassel
Dipl.-Ing. Frank Schnürer, K+S KALI GmbH, Kassel

Bei der Düngemittelproduktion aus Kalisalz fallen große Mengen an Salzurückständen an, die zu einem großen Teil aufgehaldet werden. Dabei entstehen Halden mit Abmessungen in der Grundfläche von mehr als einem Quadratkilometer und Höhen von mehr als 120 m. Mit Hilfe der Finite-Element-Methode (FEM) und einem am Institut und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt entwickelten numerischen Stoffmodell für Rückstandssalz wird der Einfluss auf benachbarte Infrastruktureinrichtungen prognostiziert. Insbesondere im Zusammenhang mit dem Genehmigungsprozess von Haldenerweiterungen werden anhand umfangreicher numerischer Untersuchungen Spannungen und Verformungen berechnet, um die durch die Aufhaltung zu erwartenden Verformungen im Bereich von Schutzgütern abzuschätzen und ggf. die Planungen der Haldenerweiterung anzupassen. Zur Überprüfung der Berechnungsergebnisse und zur Sicherung der benachbarten Infrastruktureinrichtungen werden im Sinne der Beobachtungsmethode den Aufhaltungsprozess begleitende Messungen durchgeführt. Beispielhaft werden in diesem Beitrag die Erweiterung einer Rückstandshalde sowie die prognostizierten und in Verbindung mit der Haldenerweiterung gemessenen Verformungen einer Bahnlinie gegenübergestellt.

1. Einleitung

Bei der Gewinnung von Kalisalzgesteinen und der Weiterverarbeitung zu Düngemitteln für die Landwirtschaft und zu Spezialprodukten für die chemische Industrie fallen große Mengen an Rückstandssalz an, das zum großen Teil aufgehaldet wird. Die dadurch entstehenden, zum Teil über 1 km² großen Halden weisen in ihrer Aufstandsfläche bei einer Höhe von 120 m Normalspannungen von 2.200 kN/m² und Schub- bzw. Spreizspannungen von 550 kN/m² auf. Die durch den großen Lasteintrag entstehenden, vertikalen und horizontalen Verformungen werden mit Hilfe der Finite-Element-Methode (FEM) prognostiziert. Hierzu werden für den Baugrund elasto-plastische Stoffgesetze und für den Salzurückstand ein am Institut und der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt entwickeltes visko-plastisches Stoffmodell verwendet.

Einen Eindruck von den Dimensionen solcher Salzhalden gibt Bild 1.



Bild 1: Rückstandssalzhalden in Deutschland

Die Verifizierung der Berechnungen erfolgte durch die Nachrechnungen von Laborversuchen und durch die messtechnische Überwachung konkreter Projekte. Der vorliegende Beitrag stellt neben dem entwickelten Stoffmodell ein Projekt vor, bei dem die Auswirkungen einer Haldenerweiterung auf eine derzeit noch minimal rd. 300 m vom Haldenfuß entfernte Bahnlinie untersucht wurden.

Auch bei anderen Infrastruktureinrichtungen, wie z.B. Energieversorgungsleitungen, haben die Halden Einfluss auf Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit (1, 2).

2. Projektbeschreibung

Zur Gewährleistung der weiteren Produktion muss eine existierende 120 m hohe Halde erweitert werden.

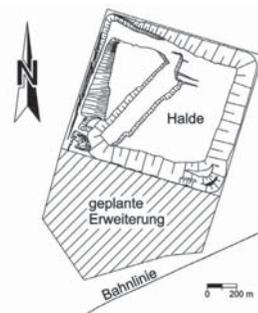


Bild 2: Lageplan der beiden Halden mit der dazwischen liegenden Bahnlinie und der Erweiterungsfläche.

Südlich der Erweiterungsfläche der Halde verläuft eine Bahnlinie mit regem Schienenverkehr. Der Lageplan mit der Halde, der Bahnlinie sowie der Erweiterungsfläche sind in Bild 2 dargestellt.

Das Projektgelände im Bereich der Erweiterungsfläche ist bis auf eine kleine Erhöhung von etwa 20 m in der Mitte der Erweiterungsfläche eben und fällt leicht nach Südwesten ab. Geplant ist, im Bereich der größten Annäherung, den Haldenrand bis etwa 50 m an die bestehende Bahnlinie heranzuführen. Die zu erweiternde Halde wurde bisher im Wesentlichen im Blockschüttverfahren errichtet. Hierbei wurden einzelne Blöcke durch einen Absetzer aufgeschüttet (Bild 3). Bild 4 zeigt den schematischen Ablauf des Schüttvorgangs.



Bild 3: Absetzer auf einer Salzhalde

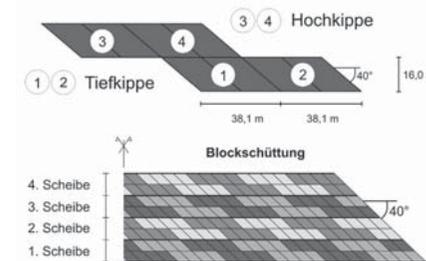


Bild 4: Schematische Darstellung des Blockschüttverfahrens

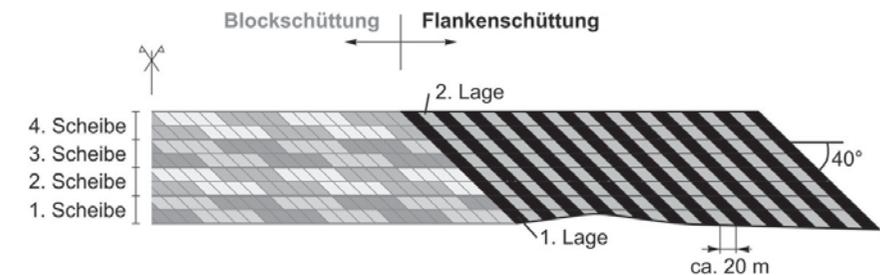


Bild 5: Schematische Darstellung des Flankenschüttverfahrens.

Dabei wird vom Absetzer das Material lagenweise aufgeschüttet. Diese so genannten Scheiben bestehen aus je zwei Blöcken, die einmal als Tief- und einmal als Hochkippe geschüttet werden. Die Böschungseigung an den Flanken beträgt bis zu 40°.

Die Beschüttung der Erweiterungsfläche der Halde erfolgt seit 2008 im Flankenschüttverfahren. Dabei werden aktuell vom Haldentop aus mit dem Absetzer einzelne Lagen mit einer Dicke von rd. 20 m flankenparallel geschüttet. Bild 5 zeigt den schematischen Ablauf der Flankenschüttung.

3. Baugrund- und Grundwasserverhältnisse

Das Projektareal ist morphologisch durch die eiszeitlichen Gletscherbewegungen der Saale-Eiszeit entstanden und flachwellig ausgeformt. Die Höhe der Haldenaufstandsfläche beträgt im nördlichen Bereich rund 80 mNN, im südlichen Bereich rund 65 mNN. Die mittlere Geländeneigung der Aufstandsfläche beträgt rund 1% fallend nach Süden (Bild 2).

Der Baugrund besteht im gesamten Bereich aus einer geringdicken, durchwurzelten, humosen Deckschicht an der Oberfläche und darunter liegenden quartären Ablagerungen und Geschieben der Saale-Eiszeit. Diese bestehen im Wesentlichen aus Fein-, Mittel- und Grobsanden, Kiesen mit unterschiedlich großen bindigen Anteilen sowie meist sandigen Schluffen. Zum Teil finden sich auch Gerölle und Steine.

Die quartären Schichten werden als Beckenablagerungen, Schmelzwassersande und Geschiebemergel angesprochen und sind glazialen Ursprungs.

Die Basis des Quartärs liegt bei 0 mNN bis 40 mNN. Die Dicke der quartären Schichten beträgt demnach 30 m bis 70 m.

Unter den quartären Böden folgen der tertiäre Rupelton und tertiäre schluffige Sande und darunter die Schichten des Buntsandsteins.

Der gesamte Baugrundaufbau kann zusammenfassend wie folgt beschrieben werden:

- oberflächennah anstehende, locker gelagerte Sande von wenigen Metern Dicke,
- eine 5 – 10 m dicke Schicht aus sandigem, z.T. kiesigem Schluff, Geschiebemergel bzw. Beckenschluff,
- tiefliegende Sande mit einer Dicke von mehreren Dekametern,
- tertiärer Rupelton ab einer Tiefe von 50 m unter der Geländeoberfläche mit i.M. einer Dicke von 60 m,
- Basissande aus schluffigem Feinsand bzw. sandige, tonige Schluffe mit einer Dicke von 80 m und
- Buntsandstein im Liegenden ab einer Tiefe von rund 190 m.

4. Materialverhalten von Rückstandssalz

Das Materialverhalten von Rückstandssalz zeichnet sich durch eine ausgeprägte Zeit- und lastabhängigkeit aus. Anfänglich hat frisches Rückstandssalz eine granulare, kohäsionslose Struktur. Nach kurzer Zeit geht das lose, granulare Rückstandsmaterial in einen verkitteten, kohäsiven Verbund mit hoher Festigkeit über (3). Dabei erreicht das Rückstandssalz eine Scherfestigkeit mit einem Reibungswinkel von $\phi' = 50^\circ$ und einer Kohäsion von $c' = 850 \text{ kN/m}^2$ sowie Steifigkeiten von $E_s = 2.500 \text{ MN/m}^2$, Größen, die u. a. entscheidend von der Belastungsgeschwindigkeit abhängen. Hohe, überkritische Belastungsgeschwindigkeiten führen zu großer Festigkeit und Steifigkeit des Rückstandssalzes und zum Sprödbuch, geringe, unterkritische Belastungsgeschwindigkeiten zu geringerer Festigkeit und Steifigkeit und zu bruchlosem plastischem Kriechen.

Direkt nach der Aufhaltung hat das Rückstandsmaterial eine Schüttdichte von $\rho = 1,4$ bis $1,5 \text{ t/m}^3$. Unter dem Einfluss von Restfeuchte, der atmosphärischen Einflüsse, den chemischen Prozessen und dem Druck durch zunehmende Überdeckung mit weiteren Lagen aus Rückstandssalz verwandelt sich das granulare Rückstandsmaterial im Haldenkern in ein nahezu kompaktes Salz.

Unter konstanter deviatorischer Spannung weist das Rückstandssalz trotz der enormen Festigkeit ein konstantes Kriechverhalten auf. Das Materialverhalten von Rückstandssalz ist somit stark vom Spannungszustand und der Deformationsrate abhängig. Bild 6 zeigt die Ergebnisse von zwei weggesteuerten Triaxialversuchen an Materialproben aus Rückstandssalz, die durch Kernbohrungen vom Haldentop aus gewonnen wurden. Für beide Versuche wurde ein Zeldruck von $\sigma_3 = 0,5 \text{ MN/m}^2$ vorgegeben. Die beiden Verformungsrate $\dot{\epsilon}_1$ variieren um den Faktor 1.000.

Die Probe mit der höheren (überkritischen) Verformungsrate von $d\epsilon/dt = 10^5 \text{ 1/s}$ zeigt das typische Materialverhalten bei hoher Verformungsrate. Nach der größten Spannung q_f folgt ein starker Abfall der deviatorischen Spannung (Sprödbuch).

Die Probe mit der kleineren (unterkritischen) Verformungsrate von $d\epsilon/dt = 10^8 \text{ 1/s}$ bricht nicht. Diese Probe kriecht unter einer konstanten Deviatorspannung q_{stat} .

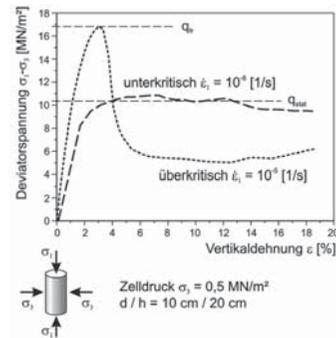


Bild 6: Typische Ergebnisse von weggesteuerten Triaxialversuchen an Salzproben

Links im Bild 7 ist der Probekörper nach dem Versuch mit unterkritischer Verformungsrate dargestellt. Rechts im Bild 7 ist der Probekörper nach dem Versuch mit überkritischer Verformungsrate dargestellt.

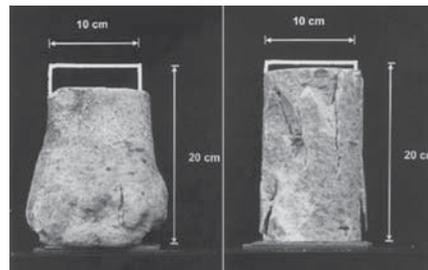


Bild 7: Probekörper von Triaxialversuchen mit unterkritischer (links) und überkritischer (rechts) Verformungsrate

Wird das Rückstandssalz einem deviatorischen Spannungszustand unterworfen, beginnt das Material mit einer anfänglich hohen Rate zu kriechen. Die Kriechrate fällt bei gleich bleibender Deviatorspannung mit der Zeit ab und nähert sich asymptotisch der konstanten Kriechrate, der sogenannten stationären Kriechrate $\dot{\epsilon}_{cr}^{stat}$ (Bild 8). Das Rückstandssalz entzieht sich durch Kriechen der Beanspruchung.

Bei dieser stationären Kriechrate finden mikromechanische Kriechvorgänge (Versetzungskriechen, Diffusionskriechen) statt (4), die dem Rückstandssalz die Aufnahme großer Spannungen ohne makroskopische Versagenszustände erlauben.

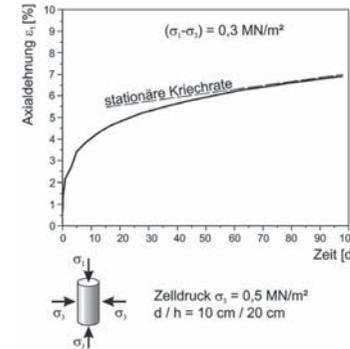


Bild 8: Typische Kriechkurve von Rückstandssalz

Für eine weitere, detaillierte Diskussion des Materialverhaltens von Salz wird auf (5) bis (7) verwiesen.

Obwohl Salzhalden einer sehr langsam ablaufenden, ständigen Kriechverformung unterworfen sind und somit auch der Baugrund einer sich ständig, sehr langsam ändernden Belastung unterliegt, sind die Halden aufgrund der visko-plastischen Materialeigenschaften des Rückstandssalzes standsicher, wenn die Verformungsrate unterkritisch ist. Die Kenntnis der tatsächlichen Verformungsrate und der Größe der kritischen Verformungsrate, die experimentell eingegrenzt werden muss, ist daher ein wesentliches Element der Standsicherheitsbeurteilung.

Der Kollaps einer Haldenböschung kann nur durch einen progressiven Bruch (Typ 3, Bild 9), resultierend aus einer beschleunigten überkritischen Verformung, erfolgen. Das Systemverhalten von Rückstandshalden folgt meist dem Verhalten des Typs 2 in Bild 9, wenn keine Anomalien, wie vorgegebene Gleitflächen, in der Aufstandsfläche bzw. darunter vorliegen.

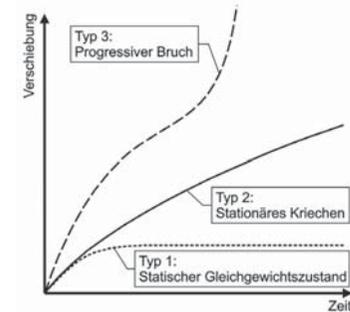


Bild 9: Geschwindigkeitsabhängiges Systemverhalten

Auf der Basis einer Vielzahl von Versuchsdaten, unter anderem von mehr als 150 Triaxialversuchen, wurde am Institut und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt von Boley ein neu-

es Stoffmodell für Rückstandssalz entwickelt und in ein Finite-Element-Programmsystem implementiert (4). Dieses Stoffmodell berücksichtigt das Materialverhalten in Abhängigkeit der Kriech- und Verformungsrate.

Das für zweidimensionale Untersuchungen verwendete Stoffmodell von Boley (4) wurde durch Wachter weiterentwickelt. Das neue Stoffmodell CAPCREEP für dreidimensionale Untersuchungen (8, 9) berücksichtigt zusätzlich die Dichteabhängigkeit der Verformungseigenschaften von Rückstandssalz.

5. Numerische Modellierung

Die numerische Modellierung erfolgte mit der Finite-Element-Methode (FEM). Bild 10 zeigt einen Ausschnitt aus dem Berechnungsmodell, bestehend aus Baugrund und Halde vor und nach der geplanten Erweiterung.

Die Halde hat aktuell eine Höhe von 120 m. Der Grundwasserstand wurde im Sinne einer Grenzwertbetrachtung geländegleich angesetzt. Die Länge des Modellausschnittes beträgt rund 1.800 m. Das Gefälle des Geländes wurde bei der Modellierung ebenso berücksichtigt wie die Erhebung im Bereich der Erweiterungsfläche und die Bahnlinie im Vorfeld der Erweiterungsfläche.

Die Bodenschichten des Quartärs, des Rupeltons sowie der Basissande werden als elasto-plastisches Material, der Buntsandstein ab einer Tiefe von 190 m als elastisches Material modelliert. Die elastischen Verformungen werden nach dem Gesetz von Hooke ermittelt. Für die Ermittlung der plastischen Dehnungen wird ein modifiziertes Drucker-Prager-Modell verwendet.

Die Scherfestigkeiten und die Steifigkeiten der quartären Bodenschichten basieren auf den Ergebnissen der Baugrunderkundung. Die Steifigkeit des Materials wurde unter Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit variabel über die Tiefe formuliert.

Die Kennwerte des ab einer Tiefe von 50 m anstehenden Rupeltons wurden unter Verwendung von in bodenmechanischen Versuchen gewonnenen und an Rückrechnungen validierten Erfahrungswerten mit überkonsolidierten Rupeltonen aus dem Raum Offenbach auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt.

Für die schluffigen Feinsande bzw. sandigen und tonigen Schluffe der Basissande wurden die Kennwerte der Scherfestigkeit auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt.

Aufgrund der großen Tiefenlage des Buntsandsandsteins und dem damit verbundenen großen Spannungsniveau kann davon ausgegangen werden, dass in dieser Schicht keine plastischen Scherverformungen auftreten.

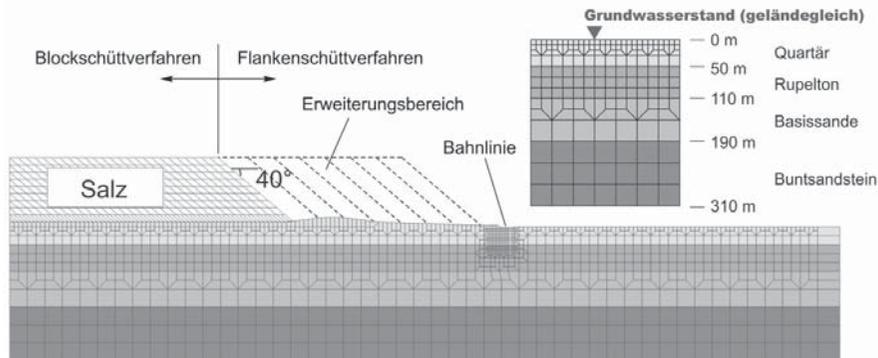


Bild 10: FE-Modell für Baugrund und Rückstandshalde vor und nach der Erweiterung

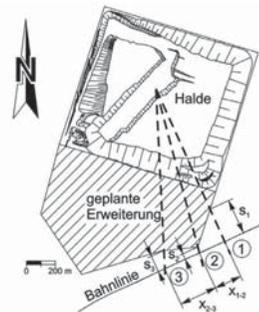
Der Buntsandstein wurde daher elastisch modelliert. Die Steifigkeit des Materials wurde in Anlehnung an bekannte Kennwerte des Buntsandsteins der Volpriehausen-Veuchselfolge aus dem Werra-Fulda-Kaligebiet angesetzt.

Der schraffierte Bereich in den Bildern 10 und 11 zeigt die Situation nach erfolgter, vollständiger Erweiterung der Halde. Das Rückstandssalz reicht dabei im Minimum bis auf etwa 50 m an die bestehende Bahnlinie heran.

Die Interaktion zwischen Halde und Baugrund wird im FE-Modell durch Kontaktflächen modelliert. Die Scherfestigkeit in den Kontaktflächen ist durch das Reibungsgesetz nach Coulomb definiert. Danach sind die aufnehmbaren Schubspannungen proportional zu den Normalspannungen in der Kontaktfläche. Die Proportionalitätskonstante ist dann die Scherfestigkeit in der Aufstandsfläche.

Die zeitliche Varianz des Materialverhaltens wird durch eine Step-by-Step-Analyse simuliert. Zur Erstellung der bereits existierenden Halde werden Blöcke von Rückstandsmaterial in einzelnen Schritten aufgebracht. Dazwischen wird die Zeit simuliert, die die Aufbringung in Realität benötigt und so die Zeit simuliert, in der das Material kriecht. Analog erfolgt die Simulation der Haldenerweiterung. Nach jeder geschütteten Lage an der Haldenflanke folgt ein Berechnungsschritt zur Ermittlung der Kriechverformung.

Der horizontale Abstand s_1 der Bahnlinie zum Böschungsfuß der Halde an der geplanten Erweiterungsfläche variiert entlang der Bahnlinie (Bild 11).



Geo Environmental Engineering Conference, Kyoto, Japan, 3. – 4. April 2006, 237-244.

3. Ankes, A.: *Untersuchung bodenphysikalischer Eigenschaften von Rückstand*. Dissertation an der Fakultät für Technische Wissenschaften der Bergakademie Freiberg, 1972.

4. Boley, C.: *Untersuchungen zur Viskoplastizität und Festigkeit von Steinsalz*. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 48, 1999.

5. Chumbe, D.; Lloret, A.; Alonso, E.: *Creep and permeability tests on compacted granular salt*. 4th Conference on the Mechanical Behaviour of Salt, Montreal, Kanada, ed. M. Aubertin & H. R. Hardy, Jr., Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld, 331-339, 1996.

6. Fordham, C.J.: *Behaviour of granular halite for use as a backfill in potash mines*. Dissertation an der University of Waterloo, Kanada, 1988.

7. Munson, D. E.; Wawersik, W. R.: *Constitutive modelling of salt behaviour – state of the technology*. 7th International Conference on rock mechanics, Workshop on Rock Salt Mechanics, A. A. Balkema, Rotterdam, 1797-1810, 1991.

8. Wachter, S.: *Dreidimensionale, zeitvariante stoffliche Modellierung von granularem Steinsalz*. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 82, 2009.

9. Wachter, S.; Katzenbach, R.: *CAPCREEP – Ein benutzerdefiniertes Stoffmodell zur Untersuchung von Rückstandshalden*. Bauingenieur, Band 84, Heft 9, 368-373, 2009.