

54. Geomechanik-Kolloquium

Leipzig, 14.11.2025

Tagungsband



INSTITUT FÜR
GEBIRGSMECHANIK
GMBH

Tagungsband zum 54. Geomechanik-Kolloquium 2025.

Herausgegeben durch:

Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig
Friederikenstraße 60
04279 Leipzig
+49 341 33600 0
kolloquium@ifg-leipzig.de
www.ifg-leipzig.de

Veranstaltungsorganisatoren:

Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig
Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik und Bergbau,
Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau, Freiberg
Verein Freiburger Geotechniker e.V., Freiberg



Programm

09:10 J. Kupper¹, W.-P. Kamlot¹, R.-M. Günther¹, G. Gärtner², S. Gehne²

¹IfG, ²BGE

Einfluss des Versatzverhaltens bei der Modellierung der gebirgsmechanischen Auswirkungen von Notfallmaßnahmen in der Schachtanlage Asse II

09:35 R. Wendling, S. Halder, M. Scholze, V. Zakharchuk

BGE

Lösungszutritt Asse: Monitoring, Entwicklung und aktuelle Situation

10:00 K. Plenkers¹, A. Blanke¹, G. Kwiatek¹, J. Philipp¹, M. Sobiesiak¹, D. de Nil², C. Friedrich², D. Kemmler², L. Pascharat², S. Schennen², M. Scholze²

¹GMuG, ²BGE

Beitrag der Mikroakustik bei Fragestellungen in Asse II und ERAM

10:25 E.-M. Berns, M. Toppe

Dr. Spang

Böschungssicherung im Felseinschnitt: Lösungen bei komplexen Projektanforderungen

- Pause -

11:20 F. Weber, H. Konietzky

TUBAF

Hydro-mechanisch gekoppelte visko-elasto-plastische Simulationen für den Salzbergbau

11:45 C. Lüdeling¹, O. Rabbel², M. Nest¹

¹IfG, ²BGE

Modellierung der Baugrundverformungen durch eine Rückstandshalde

12:10 S. van der Klauw¹, A. Jockel¹, T. Teichert¹, S. Engler¹, T. Kießling¹, J. Mühlbauer², M. Knauth², D. Naumann², R.-M. Günther²

¹ERCOSPLAN, ²IfG

Angewandte Gebirgsmechanik bei der Projektierung untertägiger Kalisalzgewinnung - Aktuelle Aufgabenstellungen im Auslandsbergbau

- Pause -

13:35 J.-P. Schleinig¹, R.-M. Günther², S. Zeibig¹, J. Barnasch³, A. Zirkler³, M. Knauth²,
C. Lüdeling²
¹K+S, ²IfG, ³K+S Minerals and Agriculture

Gaseinschlüsse im Salinar des Werra-Fulda-Kaligebietes: Geomechanik, Modellierung und Relevanz für Integritätskonzept und Sicherheitsnachweise

14:15 C. Stoltenberg, A. Jockel, S. van der Klauw
ERCOSPLAN

Vergleich der Anforderungen an geologisch-gebirgsmechanische Eingangsgrößen bei der Planung konventioneller und soltechnischer Gewinnung von Kali- und Steinsalzlagerstätten

14:40 W. Minkley, C. Lüdeling, M. Nest
IfG

Tagesbruch über einer tiefen südamerikanischen Kaverne: Fallbeschreibung und Geomechanik

- Pause -

15:35 T. Wilsnack¹, U. Glaubach¹, S. John², L. Hofmann², A. Baum³, R. Bornkessel⁴,
M. Klautschke⁵, A. Engler⁵, T. Teichert⁵, J. Braatz⁶, A. Carstensen⁶
¹IBeWa, ²K-UTEC, ³GSES, ⁴SBN, ⁵ERCOSPLAN, ⁶BGE

Errichtung eines Demonstrationsbauwerkes im Steinsalz aus MgO-Massenbaustoff: Stand der Arbeiten im Projekt MASTRIS

16:00 S. Gehne, A. Hussein, J. Bauer, C. Rohr, M. Miehlbradt, M. Mohlfeld, A. Carstensen,
V. Busse
BGE

Endlager Morsleben: Vorläufige geotechnische Ergebnisse des Streckenabdichtungssegmentes im Hauptanhydrit

16:25 T. Popp¹, M. Wiedemann¹, C. Lüdeling¹, D. Freyer², I. Paschke², M. Gruner², C. Arnold³,
A. Carstensen⁴, T. Serwatka⁴
¹IfG, ²TUBAF, ³SBN, ⁴BGE

Demonstrationsbauwerk für eine Streckenabdichtung im Anhydrit aus Magnesiabaustoff als Spritzbeton und Bitumen / Asphalt: Stand der Arbeiten im Projekt DeSPriBi

Inhalt

Einfluss des Versatzverhaltens bei der Modellierung der gebirgsmechanischen Auswirkungen von Notfallmaßnahmen in der Schachtanlage Asse II	1
Lösungszutritt Asse: Monitoring, Entwicklung und aktuelle Situation	5
Beitrag der Mikroakustik bei Fragestellungen in Asse II und ERAM	11
Böschungssicherung im Felseinschnitt: Lösungen bei komplexen Projektanforderungen	15
Hydro-mechanisch gekoppelte visko-elasto-plastische Simulationen für den Salzbergbau	19
Modellierung der Baugrundverformungen durch eine Rückstandshalde	27
Angewandte Gebirgsmechanik bei der Projektierung untertägiger Kalisalzgewinnung - Aktuelle Aufgabenstellungen im Auslandsbergbau	31
Gaseinschlüsse im Salinar des Werra-Fulda-Kaligebietes: Geomechanik, Modellierung und Relevanz für Integritätskonzepte und Sicherheitsnachweise	33
Vergleich der Anforderungen an geologisch-gebirgsmechanische Eingangsgrößen bei der Planung konventioneller und soltechnischer Gewinnung von Kali- und Steinsalzlagerstätten	41
Tagesbruch über einer tiefen südamerikanischen Kaverne: Fallbeschreibung und Geomechanik	43
Errichtung eines Demonstrationsbauwerkes im Steinsalz aus MgO-Massenbaustoff: Stand der Arbeiten im Projekt MASTRIS	49
Endlager Morsleben: Vorläufige geotechnische Ergebnisse des Streckenabdichtungssegmentes im Hauptanhydrit	51
Demonstrationsbauwerk für eine Streckenabdichtung im Anhydrit aus Magnesiabaustoff als Spritzbeton und Bitumen / Asphalt: Stand der Arbeiten im Projekt DeSPriBi	53

Einfluss des Versatzverhaltens bei der Modellierung der gebirgsmechanischen Auswirkungen von Notfallmaßnahmen in der Schachtanlage Asse II

J. Kupper¹, W.-P. Kamlot¹, R.-M. Günther¹, G. Gärtner², S. Gehne²

¹IfG - Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig

²BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine

1 Einführung

Die Schachtanlage Asse II ist ein Salzbergwerk, in dem bis 1964 Stein- und Kalisalze abgebaut worden sind. Zwischen 1967 und 1978 wurden im Auftrag des Bundes in verschiedene Grubenbaue des Bergwerks schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert. Seit 1988 wird ein Zutritt gesättigter Steinsalzlösung beobachtet, der gegenwärtig etwa 13 m³ pro Tag beträgt und überwiegend aufgefangen wird. Gemäß § 57b Atomgesetz (AtG) ist die Schachtanlage Asse II unverzüglich stillzulegen. Die Stilllegung soll nach Rückholung der radioaktiven Abfälle erfolgen. Die Rückholung ist abubrechen, wenn deren Durchführung für die Bevölkerung und die Beschäftigten aus radiologischen und sonstigen sicherheitsrelevanten Gründen nicht vertretbar ist.

Das Institut für Gebirgsmechanik (IfG) ist seit 1996 mit einer Vielzahl von Projekten in die gebirgsmechanische Bewertung der Schachtanlage Asse II eingebunden. Neben dem Fortschreiben der Planungen für die Rückholung der radioaktiven Abfälle wird seitens des Betreibers, der Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), auch die Notfallplanung vorangetrieben.

2 Motivation

Die täglich in die Schachtanlage Asse II zutretende Lösung zeigt, dass die Salinarbarriere des Bergwerks nachhaltig verletzt ist. Es ist daher nicht auszuschließen, dass in Zukunft der Lösungszutritt eskaliert und sich somit zu einem nicht beherrschbaren Lösungszutritt (nbL) weiterentwickelt. Die Notfallplanung enthält Maßnahmen, um die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Konsequenzen eines nbL zu minimieren. Es handelt sich um Vorsorgemaßnahmen, die bereits jetzt präventiv umgesetzt werden, und um Notfallmaßnahmen, die beim Eintreten des nbL ergriffen werden sollen. Zu den Vorsorgemaßnahmen zählen:

- Bau von Strömungsbarrieren
- Einbringung von stützendem Versatz
- Resthohlraumverfüllung
- Maßnahmen zur Verbesserung des Lösungsmanagements
- Rückholung gasbildender und wassergefährdender Stoffe

Zu den Notfallmaßnahmen zählen:

- Verfüllung der Resthohlräume in den Einlagerungskammern
- Gegenflutung mit MgCl₂-Lösung
- Aufbringen eines pneumatischen Stützdrucks
- Verschluss der Tagesschächte

Zur Konsequenzenbewertung ist es wichtig, das gebirgsmechanische Verhalten des Grubengebäudes im Falle eines nbL beschreiben zu können. Dafür ist insbesondere die Beschreibung des Verhaltens des Salzgrusversatzes wichtig. Der gesamte aufgefahrene Hohlraum der Schachanlage Asse II beträgt ca. 4,7 Millionen m³ und davon sind ca. 3,9 Millionen m³, also über 80 %, mit Salzgrusversatz verfüllt. Ein weiteres Volumen von 431.000 m³ ist mit Sorelbe-
ton versetzt und ein Volumen von ca. 379.000 m³ steht aktuell offen.

3 Modellierung der gebirgsmechanischen Auswirkungen bei Umsetzung der Notfallmaßnahmen

Für die Modellierung der Auswirkungen ist damit das gebirgsmechanische Verhalten der Versatzkörper im Grubengebäude im trockenen und im feuchten Zustand zu berücksichtigen. Aktuell verwendet das IfG dafür das IfG-GS-DY-Stoffmodell, ein visko-elasto-plastisches Stoffmodell für Salzgrus basierend auf einem Double-Yield-Ansatz für die Versatzkompaktion.

Für den Fall, dass sich im Grubengebäude Lösung aufstapelt und somit die Versatzkörper durch langsam aufsteigende Lösung durchfeuchtet werden, sind folgende gebirgsmechanische Effekte bei der Modellierung zu berücksichtigen:

- Versatzsackung
- Feuchtekriechen
- Effektivspannungskonzept
- Stützwirkung des Fluiddrucks

Unter der Versatzsackung verstehen wir den Abfall des bis dahin durch trockene Hohlraumkonvergenz aufgebauten Versatzdrucks im Versatzkörper auf das Eigengewicht des jeweiligen Versatzkörpers. Diese Sackung ist verbunden mit einer Volumenverringerung und der Bildung eines Firstspalts über dem Versatzkörper. Das Feuchtekriechen beschreibt die erhöhten Kriechraten des umgebenden Salinars sowie des Versatzkörpers bei Befeuchtung und das Effektivspannungskonzept beschreibt die abgeminderten Gesteinsfestigkeiten bei Vorliegen eines Porendrucks, welcher durch die aufgestapelte Lösung hervorgerufen wird. Diese drei Effekte bewirken eine Destabilisierung des Grubengebäudes. Die Aufstapelung von Lösung bringt aber auch einen stabilisierenden Effekt mit sich. Dieser hat seine Ursache im Stützdruck, mit dem die gestapelte Lösung auf die Hohlraumkontur der Grubenbaue wirkt.

Die genannten Prozesse werden in den gebirgsmechanischen Modellen des IfG [1] durch die verwendeten Stoffmodelle und gezielte Routinen im Modellierungsablauf abgebildet. Damit ist das IfG in der Lage, auch für den Fall eines nbL das gebirgsmechanische Verhalten der Grube zu beschreiben und zu prognostizieren.

In Abbildung 1 ist für ein beispielhaftes Flutungsszenario die zeitliche Entwicklung der Pfeilerstauchungsraten für ausgewählte Pfeiler des Abbaufeldes Südflanke dargestellt. Dabei wird angenommen, dass bis zum Jahr 2027 die Hohlraumkonvergenz im gesamten Bergwerk trocken erfolgt. Im Jahr 2027 findet hypothetisch der nbL statt und die Aufstapelung von Lösung beginnt. Weiterhin wird angenommen, dass die zutretende Lösung auch beim nbL an Steinsalz gesättigt bleibt und dass gleichzeitig eine MgCl₂-gesättigte Gegenflutungslösung die Zersetzung von Carnallit im Grubengebäude verhindert.

Im Zeitraum 2025 bis 2027 nehmen die Pfeilerstauchungsraten in Abbildung 1 kontinuierlich ab. Ursache hierfür ist der mit der Zeit ansteigende Versatzdruck in den Abbauen der Südflanke, welcher der Pfeilverformung entgegenwirkt. Mit Beginn des nbL im Jahr 2027 steigen

die Pfeilerstauchungsraten auf Grund des Versatzdruckabfalls (Versatzsackung) und des Feuchtekriechens sprunghaft an. Der Fluidruck der aufgestapelten Lösung und der im Jahr 2028 aufgebrachte pneumatische Stützdruck reduzieren diesen anfänglichen Ratenanstieg aber deutlich. Bis zum Zeitstand 2033 nehmen die Raten dann wieder zu, weil nun auch die höheren Sohlen geflutet werden. Im Jahr 2033 ist nach dem hier modellierten Szenario das Bergwerk fast komplett geflutet. In den Folgejahren sinken die Pfeilerstauchungsraten immer weiter ab, weil sich auf Grund der beschleunigten Hohlraumkonvergenz ein Überdruck im Grubengebäude einstellt, welcher die Hohlraumkonturen stützt. Da dieser Druckanstieg im Modell stufenweise simuliert wird, erfolgt die Abnahme der Pfeilerstauchungsraten nach dem Jahr 2033 im Modell auch stufenweise. Die kleinen Peaks zwischen den einzelnen Stufen sind modelltechnischer Natur.

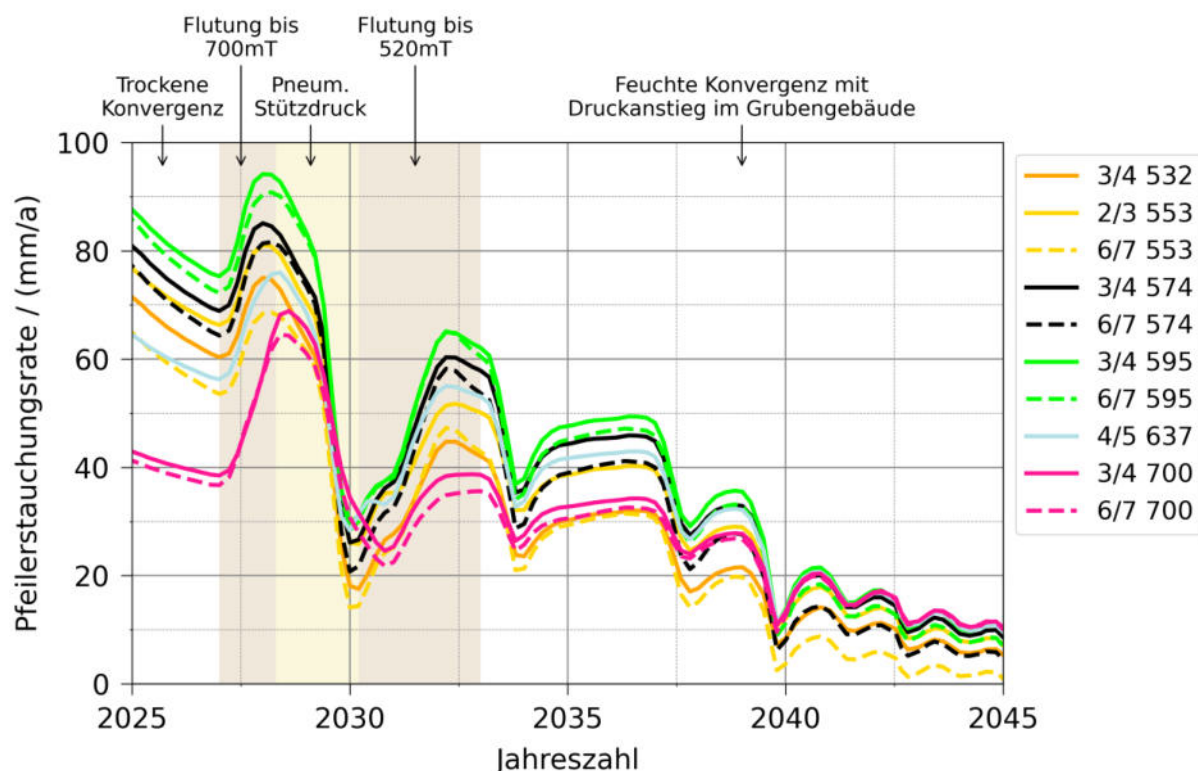


Abbildung 1: Zeitliche Entwicklung der Pfeilerstauchungsraten für ein beispielhaftes Flutungsszenario im gebirgsmechanischen Modell der Schachtanlage Asse II.

4 Weitere Arbeiten zum Versatzverhalten

In den vergangenen ca. 40 Jahren wurden zahlreiche Forschungsarbeiten bezüglich der Kompaktion von Salzgrus durchgeführt [2 - 8]. Trotz dieser umfangreichen Forschungsaktivitäten existiert Stand heute noch kein Stoffmodell, welches die Kompaktion von Salzgrus beginnend von hohen Porositäten (ca. 40 %) bis hin zu kleinen Porositäten (kleiner 5 %) umfassend beschreibt. Das IfG partizipiert daher im Verbundprojektes MEASURES, um die bestehenden Stoffmodelle weiterzuentwickeln und somit die Prognosefähigkeit der gebirgsmechanischen Modelle sowohl für die trockene als auch für die feuchte Versatzkompaktion weiter zu verbessern.

Literatur

- [1] J. Kupper et al., Überführung des aktuellen Geomodells der Asse in die gebirgsmechanische Modellierung und Modellierungsstrategie zur Abbildung sich ändernder Planungsrandbedingungen, 52. Geomechanik-Kolloquium, Leipzig, 2023
- [2] C. J. Spiers et al., Long-term Rheological and Transport Properties of Dry and Wet Salt Rocks. EUR 11848 EN, Luxembourg, 1988
- [3] W. Bechthold et al., Backfilling and sealing of underground repositories for radioactive waste in salt (BAMBUS project), Final report. EUR Project report - nuclear science and technology, vol. 19124, EUR-19124-EN, 248 p., ISBN 92-828-7923-2, DOI 0009, Off. for Off. Publ. of the Europ. Communities: Luxembourg, 1999
- [4] W. Bechthold et al., Backfilling and sealing of underground repositories for radioactive waste in salt (BAMBUS II project), Final report. Europäische Kommission, EUR Nuclear science and technology Project report, vol. 20621, EUR-20621-EN, 272 p., ISBN 92-894-7767-9, DOI 00051, Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg, 2004
- [5] K.-P. Kröhn et al., Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz, REPOPERM – Phase 1, GRS 254, 2009
- [6] K.-P. Kröhn et al., Mechanical and hydraulic behaviour of compacting crushed salt backfill at low porosities, REPOPERM – Phase 2, GRS 450, 2017
- [7] O. Czaikowski et al., KOMPASS - Compaction of crushed Salt for the safe Containment, GRS 608, 2020
- [8] L. Friedenberg et al., KOMPASS-II Compaction of Crushed Salt for Safe Containment – Phase 2, GRS 751, 2023

Lösungszutritt Asse: Monitoring, Entwicklung und aktuelle Situation

R. Wendling, S. Halder, M. Scholze, V. Zakharchuk

² BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung, Peine

1 Einführung

Die Schachthanlage Asse II ist ein als Gewinnungsbergwerk ab 1906 aufgefahrendes Salzbergwerk, welches von 1967 bis 1978 für die versuchsweise Einlagerung von radioaktiven Abfällen im Auftrag des Bundes genutzt wurde.

Große Teile des Grubengebäudes wurden Jahrzehnte offengelassen. Ende der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts stiegen die Pfeilerstauchungsraten derart an, dass es in der Folge 1988 zu einem Lösungszutritt in der Südflanke des Grubengebäudes kam.

2 Monitoring

Die Südflanke wurde systematisch mit Salzgrus versetzt, um das Grubengebäude zu stabilisieren und die Verformungsraten damit zu reduzieren. Das vorhandene Monitoringsystem wurde dabei stetig erweitert. Das Monitoring erfolgt mittels Extensometer, Inklinometer, Spannungsmonitorstationen, Mikroseismik und -akustik zur Überwachung und Bewertung der Gebrauchstauglichkeit des Grubengebäudes. Numerische Modelle für Berechnungen wurden erstellt und in den Folgejahren kalibriert und validiert. Dazu wurden die Messergebnisse aus dem Monitoring sowie Ergebnisse von in situ Messungen und Laborversuchen herangezogen.

Eingebettet in das Gesamtmonitoring ist auch die Überwachung des Lösungszutritts. Dieser unterliegt einem engmaschigen Monitoring verschiedener Austrittsstellen innerhalb des Grubengebäudes, an denen Menge, Dichte, chemische Zusammensetzung und Isotopensignaturen überwacht werden. Veränderungen innerhalb des Grubengebäudes können so möglichst frühzeitig erkannt werden. Abweichungen einzelner lokaler Parameter werden in der Gesamtheit aller Überwachungsergebnisse im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit des Grubengebäudes überprüft und bewertet.

3 Entwicklung Lösungszutritt

Ende 1990er Jahre wurde ein Fassungssystem im Abbau 3 der 658-m-Sohle gebaut. Auf einer mit Gefälle nach Norden eingebauten Kunststoffdichtungsbahn wurde über die letzten Jahrzehnte die Hauptmenge der in der gesamten Südflanke austretenden Lösung im Abbau 3/658 gefasst und gesammelt. Des Weiteren wurde Anfang der 2000er Jahre zusätzlich auf der 725-m-Sohle eine Strecke an der nördlichen Abbauseite aufgefahren. Dort kann seither der Großteil der am Hauptfassungssystem des Abbaus 3/658 vorbeimigrierenden Lösung oberhalb der Haupteinlagerungssohle aufgefangen werden.

Die Fassungsmenge hatte sich im Laufe der Jahre stufenweise erhöht, ob nun durch Änderungen im Zutritt selbst oder durch eine bessere Fassung, so dass 2023 in der gesamten Südflanke etwa 13 m³ Lösung pro Tag gefasst wurden. Die Fassung konzentrierte sich auf die Abbaureihe 3 in der Südflanke.

Im Rahmen der Überwachung wurde Ende 2023 eine Änderung der Lösungsmenge an der Hauptauffangstelle festgestellt. Anfang 2024 reduzierte sich die Menge weiter und führte zur deutlichen Abnahme der Fassungsrates im Abbau 3 auf der 658-m-Sohle auf 2 m³ pro Tag. Erst im April 2024 zeigte sich wieder ein Anstieg der gefassten Lösungsmenge, jedoch nicht an der Hauptauffangstelle 3/658, sondern in der sogenannten Gleitbogensausstrecke auf der 725-m-Sohle (Abbildung 1). Ab Anfang Oktober 2024 konnte keine Lösung mehr im Abbau 3/658 gefasst werden.

Bis in den Sommer 2024 hinein stieg nun die auf der 725-m-Sohle gefasste Lösungsmenge an. In Summe wurde damit in etwa das Vorniveau der Gesamtfassungsrates an Lösung in der Südflanke erreicht. Da es bei der Lösungszusammensetzung keine signifikanten Änderungen gab, war davon auszugehen, dass sich der Lösungszutritt zum Grubengebäude nicht verändert hatte. Vielmehr betraf die Veränderung die Migrationswege innerhalb des Grubengebäudes.

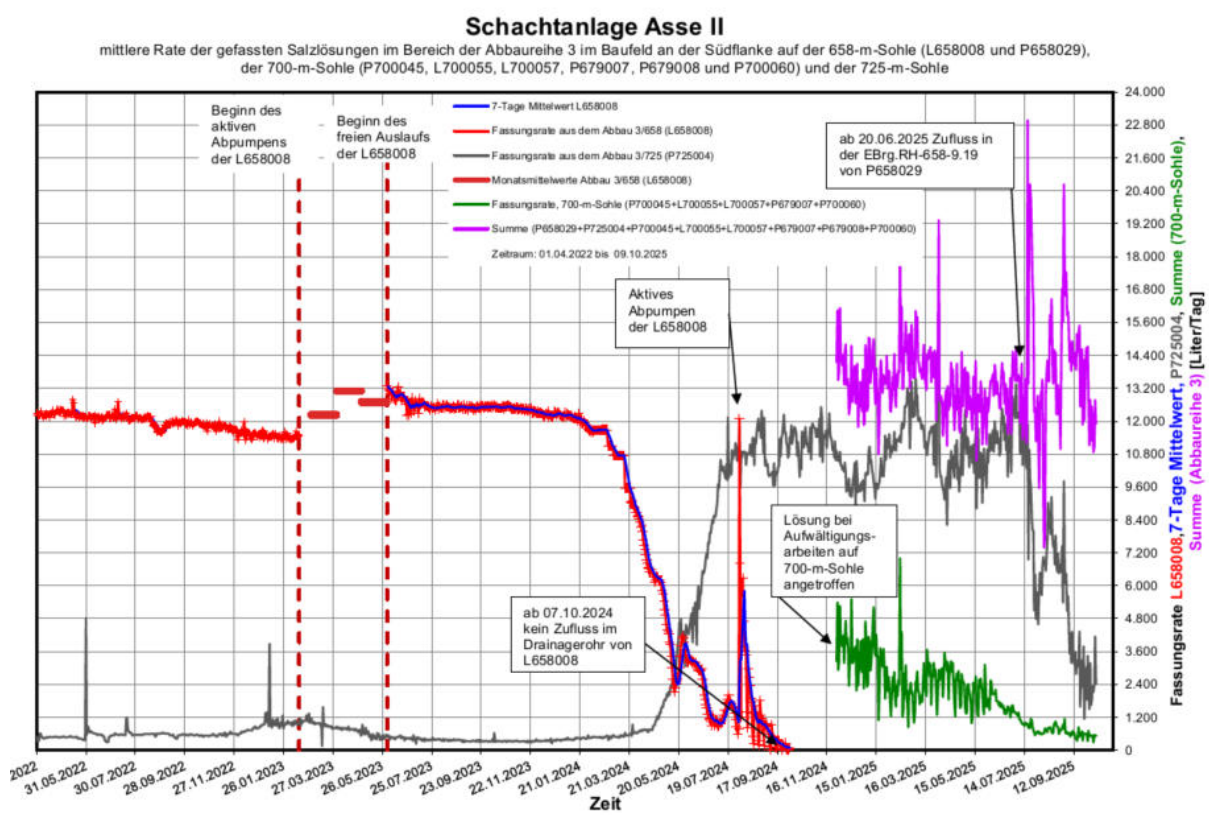


Abbildung 1: Entwicklung Fassungsrates Abbau 3/658, 700-m-Sohle, 725-m-Sohle und gesamte Südflanke, Stand 09.10.2025.

Mit dem Rückgang der Fassungsmenge auf der 658-m-Sohle wurde ein Maßnahmenpaket (Abbildung 2) erarbeitet, mit dem sowohl Ursachen des Lösungsverlustes, Migrationspfade und der Verbleib der fehlenden Lösungsmenge erkundet werden soll. Ziel ist eine Fassung der Lösung oberhalb der 725-m-Sohle, also mit ausreichendem Abstand zur Haupteinlagerungssohle und damit zu den radioaktiven Abfällen dauerhaft zu gewährleisten.

Zur Wiederherstellung der Lösungsfassung auf der 658-m-Sohle wurde zunächst eine Unterfahrgang geplant, da eine Absenkung bzw. Undichtigkeit der Folie vermutet wurde. Zur Überprüfung des Dichtungssystems wurde dafür ein Bohrort am nördlichen Abbaurand aufgeföhrt und der Versatz unterhalb der Kunststoffdichtung fächerförmig bis zum südlichen

Abbaustoß mit Bohrungen erkundet. Mittels Georadar konnten die Lage der Folie und die Abbauränder ermittelt werden.

Bei der Suche nach der Lösung wurde parallel auch auf der 700-m-Sohle erkundet. In Erkundungsbohrungen und in einer wieder aufgewältigten versetzten Richtstrecke konnten ebenfalls signifikante Lösungsmengen gefunden und gefasst werden.



Abbildung 2: Maßnahmenpaket Lösungsfassung.

4 Aktuelle Situation

Die Ergebnisse der Erkundungsbohrungen unterhalb des Dichtungssystems im Abbau 3/658 zeigen einen trockenen Versatz mit geringer Porosität. Über Georadarmessungen konnte die Lage der Kunststoffdichtungsbahn modelliert werden (Abbildung 3). Die Ergebnisse gaben hier keine Hinweise auf eine undichte Kunststoffdichtungsbahn. Sie zeigten, dass die Lage der Dichtung sich gegenüber der Ursprungslage aus dem Einbaujahr 1997 deutlich unterscheidet. Das ursprüngliche Gefälle von Süd nach Nord besteht durch eine starke Absenkung des Versatzes und damit der Kunststoffdichtung, nicht mehr. Vielmehr gibt es ein Gefälle nach Süden.

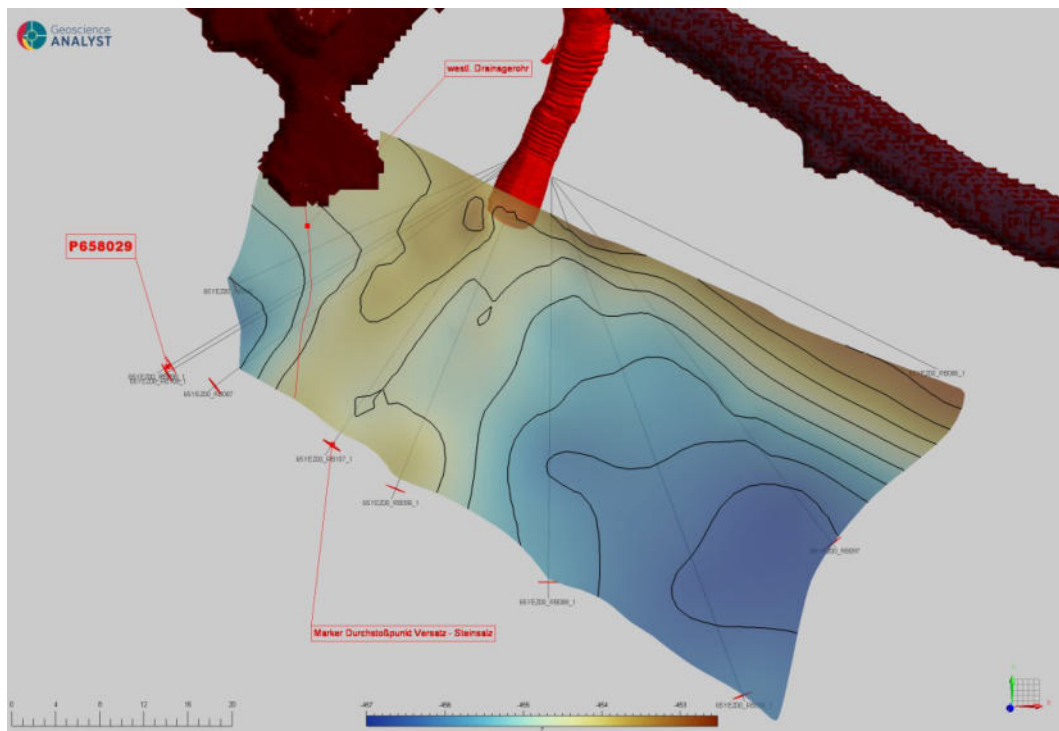


Abbildung 3: Lage der Kunststoffdichtungsbahn aus den Georadarmessungen modelliert.

In einer Erkundungsbohrung unterhalb der Kunststoffdichtungsbahn wurde am Übergang Salzversatz/Abbaustoß in der Südwestecke des Abbaus in der Auflockerungszone ein Migrationspfad angebohrt (Abbildung 4). Die Menge der hier täglich abgepumpten Lösung von 9 bis 11 m³ legt nahe, dass hier ein Hauptmigrationspfad der Lösung getroffen wurde. Mit der Fassung der Lösung aus der Bohrung nahm auch die Fassungsmenge auf der 700-m-Sohle und der 725-m-Sohle deutlich ab.



Abbildung 4: Lösung in der Erkundungsbohrung in die Südwestecke des Abbaus 3/658.

Zur Wiedererlangung der Lösungsfassung im Niveau der 658-m-Sohle wird vom Abbauzugang oberhalb der Kunststoffdichtung der Abbau aufgewältigt, um zum Südstoß und dem erkundeten Migrationspfad der Lösung zu gelangen (Abbildung 5).



Abbildung 5: Aufwältigung im Abbau 3/658 (Überführung, Maßnahme 1).

5 Ausblick

Unabhängig davon, ob es gelingt auf dem Niveau der 658-m-Sohle wieder dauerhaft Lösung zu fassen, ist es Ziel eine redundante Lösungsfassung möglichst oberhalb der 725-m-Sohle zu realisieren. Alle bei den jetzigen und zukünftigen Erkundungen gewonnenen Erkenntnisse sind dabei Grundlage für die weitere Planung.

Für alle Maßnahmen muss über ein begleitendes Monitoring eine sichere Umsetzung ermöglicht und gewährleistet werden. Negative Auswirkungen auf die weitere Gebrauchstauglichkeit des Grubengebäudes, den Lösungszutritt und die Lösungsfassung sollen somit verhindert werden.

Beitrag der Mikroakustik bei Fragestellungen in Asse II und ERAM

K. Plenkers, A. Blanke, G. Kwiatak, J. Philipp, M. Sobiesiak, D. de Nil, C. Friedrich,
D. Kemmler, L. Pascharat, S. Schennen, M. Scholze

GMuG – Gesellschaft für Materialprüfung und Geophysik mbH, Bad Nauheim
BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung, Peine

1 Einleitung

Die Methodik der untertägigen Mikroakustik, welche in den 1990er Jahren u.a. in Asse II und ERAM (Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben) entwickelt wurde, wird dort mittlerweile für eine Vielzahl von verschiedenen Fragestellungen eingesetzt. Über Einsatzgebiete der letzten Jahre wird im Folgenden ein Überblick gegeben. Während bei Erdbeben seismische Wellen mit tiefen Frequenzen ausgestrahlt werden, werden von Mikrorissen seismische Wellen mit Frequenzen $f > 1000$ Hz emittiert. Zum Einsatz kommen deswegen spezifisch für untertage optimierte piezoelektrische Sensoren. Da mikroakustische Ereignisse in großer Anzahl in Gebieten z.B. mit Spannungsänderungen, Deformation oder Auflockerung vorkommen, werden die Ereignisse in der Asse II gezielt genutzt, um geologische Grenzen insbesondere an der nördlichen und südlichen Flanke der Salzstruktur zu kartieren. Im ERAM wird die Methode der Mikroakustik zur Ortung von Mikrorissen im und am Demonstrationsbauwerk im Anhydrit eingesetzt. Da insbesondere Informationen aus unzugänglichen Gebirgsbereichen gewonnen werden konnten, liefert die Mikroakustik einen wertvollen Beitrag in der geomechanischen Interpretation in Kombination mit geotechnischen Messungen.

2 Beschreibung des Verfahrens der Mikroakustik

Wie in der Mikroseismik oder bei der Erdbebenüberwachung werden bei mikroakustischen Messungen seismische Wellen aufgezeichnet, welche von (Scher)brüchen ausgesendet werden. Während in der Mikroseismik Brüche auf Meter- oder Dekameter-Skala aufgezeichnet werden, zeichnet die Mikroakustik die seismischen Wellen von (Mikro)rissen im Milli- bis Dezimeterbereich auf und umfasst damit z.T. auch Verschiebungen unterhalb der Korngröße. Je kleiner das Rissereignis ist, desto höher sind die Frequenzen der abgestrahlten Wellen. Die Detektion der Signale wird durch den Einsatz von optimierten piezoelektrischen Sensoren möglich, welche für den Frequenzbereich 1 kHz – 100 kHz ausgelegt sind und damit für Frequenzen oberhalb des in der Mikroseismik genutzten Frequenzbereichs liegen. Aus den Laufzeiten der seismischen Wellen eines mikroakustischen Ereignisses zu mehreren Sensoren wird dann das Hypozentrum des Ereignisses bestimmt. Auf Grund des technischen Fortschritts ist es mittlerweile möglich, Wellenformen kontinuierlich bei Digitalisierungsraten bis zu 1 MHz pro Kanal und 16 Bit A-D-Wandlerbreite aufzuzeichnen. Dies erlaubt eine vertiefte Analyse auch über größere Distanzen hinweg d.h. im Steinsalz über Distanzen > 200 m.

3 Einsatz der Mikroakustik zur Kartierung von geologischen Grenzflächen

In der Asse II wurde die Mikroakustik von 2020 bis 2024 gezielt genutzt, um die Nord- und Südflanke zu kartieren. Die Ergebnisse wurden u. a. bei der Interpretation und Modellierung der Schichtgrenzen aus der hochauflösenden 3D-Seismik genutzt. Im Gegensatz zur Seismik, die eine Auflösungsgenauigkeit von ca. 10 m erreicht, lag die Lokalisierungsgenauigkeit der Mikroakustik bei ca. 1 m. Mikroakustische Messungen konzentrierten sich dabei auf Bereiche mit guter Zugänglichkeit (siehe Abbildung 1), so dass jeweils nur Teile der Grenzflächen abgebildet werden konnten. Eine detaillierte Kartierung auch von feinen Strukturen war möglich.

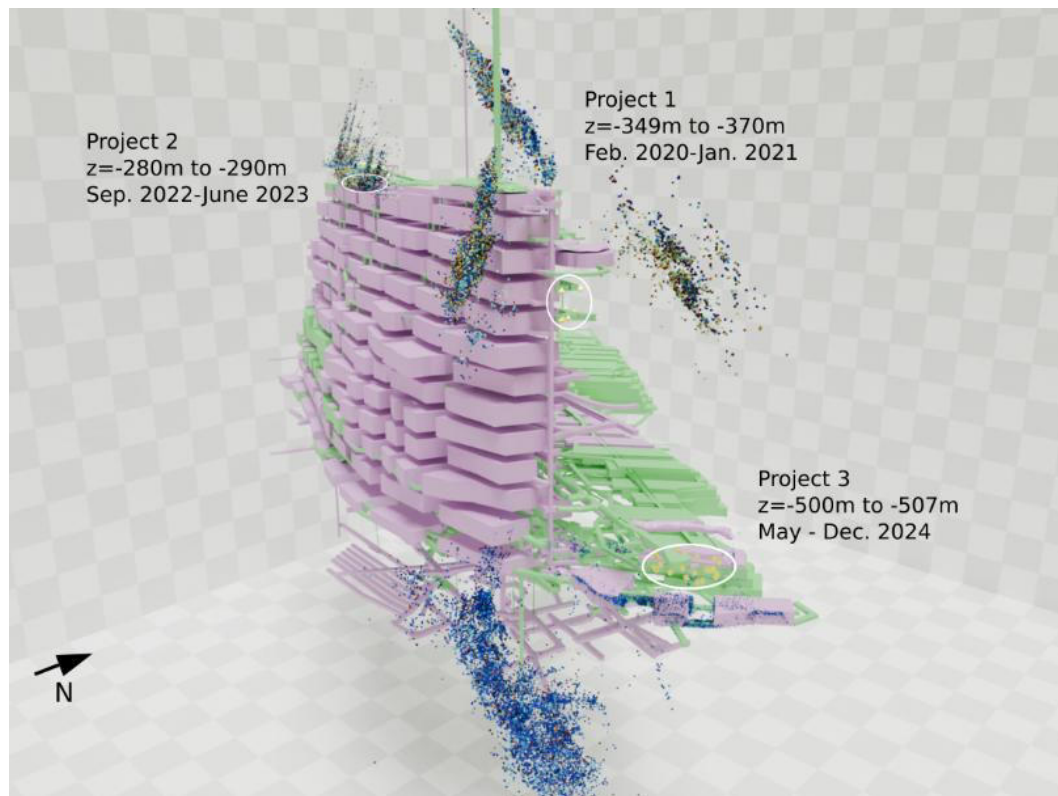


Abbildung 1: Mikroakustische Messungen in Asse II zur Kartierung von Nord- und Südflanke.

4 Mikroakustische Überwachung des Demonstrationsbauwerks im Anhydrit im ERAM

Mit dem Demonstrationsbauwerk „Abdichtungssegment mit Magnesiabinder im Hauptanhydrit“ sollen die technische Herstellbarkeit und Handhabbarkeit für ein „Streckenabdichtungssegment mit Widerlager aus Magnesiabaustoff im Hauptanhydrit“ nachgewiesen sowie die Eigenschaften dieses Demonstrationsbauwerks untersucht und bewertet werden. Die Betonage der Kernbarriere erfolgte im Oktober 2024. Ziel der mikroakustischen Überwachung ist, das Ausmaß der Mikroriss- / Rissbildung qualitativ und quantitativ zu erfassen. Durch den Einsatz eines sehr dicht angeordneten Messnetzes werden dabei auch (Scher)bewegungen unterhalb der Korngröße aufgezeichnet, so dass mikroakustische Aktivität nicht unbedingt mit einer makroskopischen Schädigung gleichzusetzen ist. Besonders gut sichtbar ist dies in den ersten Wochen nach Betonage, wo es aufgrund des Temperatur- und Feuchteintrags zu einer starken Erhöhung der mikroakustischen Aktivität in der Auflockerungszone des Bauwerks kommt. Die mikroakustische Wolke breitet sich vom Bauwerk

entfernend aus und klingt dann ab (Abbildung 2). Im Weiteren kann seismologisch keine Änderung im Verhalten des umgebenden Gesteins festgestellt werden. Im Gegensatz dazu zeigt sich im Bauwerk erst zwei Monate nach Betonage eine nennenswerte mikroakustische Aktivität.

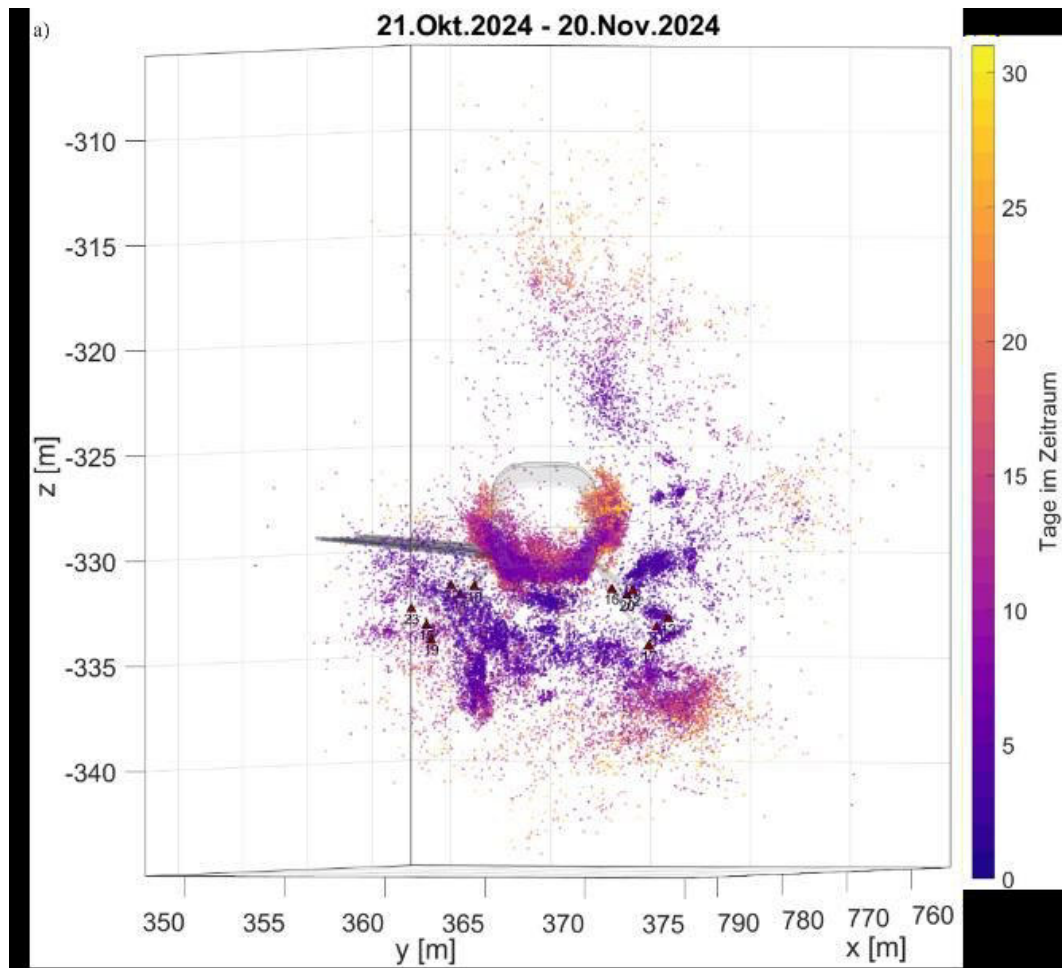


Abbildung 2: Mikroakustische Aktivität im an das Bauwerk angrenzenden Gebirge im ersten Monat nach Betonage.

Böschungssicherung im Felseinschnitt: Lösungen bei komplexen Projektanforderungen

E.-M. Berns, M. Toppe

Dr. Spang Ingenieurgesellschaft für Bauwesen, Geologie und Umwelttechnik mbH, Witten



Abbildung 1

Im Sauerland (NRW) wurde zur Entlastung eines Ortskerns in den vergangenen Jahren eine Ortsumfahrung geplant und gebaut. Zu Beginn der Planungsphase wurden umfangreiche geotechnische Erkundungen für die Trasse, die insgesamt fünf Bücken und Überführungen sowie die herzustellenden Einschnitte durchgeführt. Für die Sicherung der Felseinschnitte wurden im Rahmen der Planung verschiedene Lösungen diskutiert um die dauerhafte Verkehrssicherheit gewährleisten zu können. Bei den Bauarbeiten waren die komplexen Projektanforderungen und Herstellungsbedingungen zu überwachen.

Die Trasse der Ortsumfahrung schneidet im hinteren Abschnitt in die Flanke eines Hügels ein, wodurch ein ca. 300 m langer Anschnitt entsteht. An der tiefsten Stelle war eine Höhe der neu zu profilierenden Felsböschung von ca. 26 m mit einer Neigung von 70° herzustellen. Die vorlaufenden Erkundungen umfassten Kernbohrungen, Kleinrammbohrungen und Rammsondierungen. Die Felsböschung zeichnete sich durch ein wechselndes Trennflächengefüge aus, weswegen zusätzliche Baggerschürfe entlang der Trasse durchgeführt wurden. Das stark veränderliche Trennflächengefüge konnte durch die Schürfe bestätigt werden.

Für die dauerhafte Sicherung der Böschung wurden zunächst mehrere klassische Stützkonstruktionen diskutiert, von denen vor allem die Gabionenwand lange Zeit favorisiert wurde. Aufgrund der großen Bauwerkshöhe stellte sich die Gabionenwand nicht als die wirtschaftlichste und bautechnisch sinnvollste Lösung heraus. Stattdessen wurde die Herstellung eines flexiblen Stahldrahtgeflechts, welches mit Mikropfählen (= Felsnägeln) in der Böschung rückverhängt wird favorisiert.



Abbildung 2

Während der Bauausführung kam es bei der Profilierung der Böschung zur Herstellung des Einschnitts zunächst zu deutlich erkennbaren Rissen am Böschungskopf. Im weiteren Bauablauf traten immer wieder lokale Rutschungen ein. Grund hierfür ist das weitaus heterogenere Trennflächengefüge, was im Rahmen der Baugrunderkundungen nicht in vollem Umfang zu erkennen war. Zudem sorgte der Zutritt von Wasser zu einer Reduzierung der Scherparameter. Als weiterer kritischer Faktor führte der zeitliche Druck auf der Baustelle zu Abweichungen im Pilgerschrittverfahren, sodass zulässige Aushubfenster überschritten und die Böschungssicherung nicht fachgerecht fortgeführt wurde.

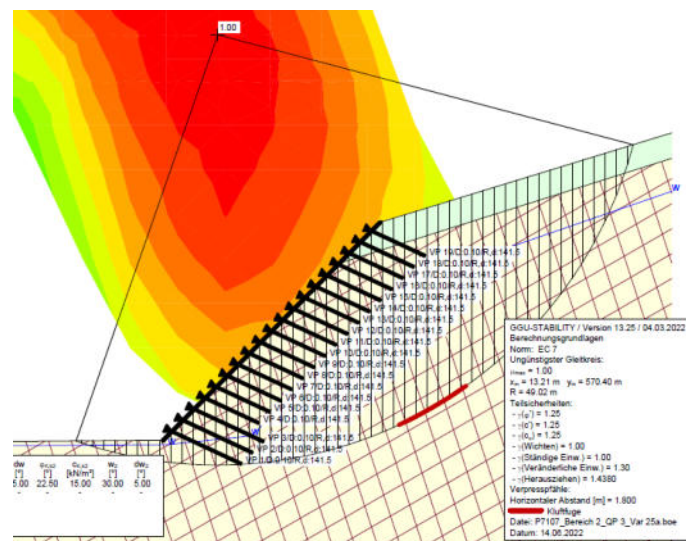


Abbildung 3

Aufgrund der im Bauablauf angetroffenen geänderten geotechnischen Gegebenheiten war eine Nachbegutachtung der zum Teil aufgefahrenen Böschung erforderlich. Dabei wurden aus dem Trennflächengefüge Risiken aus Keilgleiten und Gleiten als globales Risiko für die Böschung erkannt. Um die Risiken zu reduzieren und die Dauerhaftigkeit der Böschungssicherung zu gewährleisten wurde entschieden den kritischen Teilabschnitt die Böschung auf 45° abzuflachen. Zudem wurde das Raster der Mikropfähle verkleinert und die Mikropfähle bis hinter die abgängigen Felsschichten verlängert. Ergänzend wurden Entwässerungsbohrungen ausgeführt, um den Wasserdruck auf die Schichtflächen zu reduzieren. Baubegleitend wurde zudem ein Monitoring der Böschung eingerichtet, um bei Anzeichen für weitergehenden Bewegungen die laufenden Arbeiten unterbrechen zu können.

Die Arbeiten wurden mit der angepassten Planung fortgesetzt und die Umgehungsstraße im Jahr 2023 für den Straßenverkehr freigegeben. Trotz einer den Regeln der Technik entsprechenden Vorerkundung des geplanten Einschnitts, konnten die eingetretenen Schäden nicht verhindert werden. Insbesondere bei neu zu erstellenden Einschnitten ist eine enge geotechnische Baubegleitung erforderlich, welche die geotechnischen Gegebenheiten kontinuierlich überprüft und bewertet. Auch die Aushub- und Sicherungsarbeiten sind intensiv zu überwachen. Durch das Abflachen der Böschung, die statische Umplanung und die enge Überwachung der Bauarbeiten konnte ein dauerhaftes, standsicheres und verkehrstaugliches Bauwerk geschaffen werden.



Abbildung 4

Hydro-mechanisch gekoppelte visko-elasto-plastische Simulationen für den Salzbergbau

F. Weber, H. Konietzky

TUBAF – TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Lehrstuhl für Fels- und Gebirgsmechanik/Felsbau, Freiberg

Geotechnische Problem- und Fragestellungen befassen sich zunehmend mit der komplexen Interaktion unterschiedlicher physikalischer Prozesse. Ein Beispiel sind hydro-mechanische Wechselwirkungen, die in verschiedenen Anwendungsbereichen eine große Rolle spielen (Hydraulic Fracturing, Bewertung von Barriereintegrität, Böschungsanalysen, etc.). Numerische Simulationen helfen dabei, umfangreiche multiphysikalische Vorgänge abzubilden. Zur hinreichend genauen und effizienten Bearbeitung kann es jedoch sein, dass die Anwendung eines einzelnen spezialisierten Softwarepaketes nicht ausreicht und nur Softwarekopplungen Abhilfe schaffen. Die vorgestellte Arbeit erweitert die geomechanische Komplexität einer hydro-mechanischen Kopplung auf visko-elasto-plastisches Materialverhalten im Salinar. Betrachtet werden langandauernde und großräumig induzierte Fluidbewegungen in den durch Volumenkonvergenz charakterisierten lösungserfüllten Abbauen in einem generischen Kali- bzw. Steinsalzbergwerk.

Zur Bearbeitung der Problemstellung wird eine grundlegende Methode zur Kopplung der numerischen Codes FLAC3D und Ansys Fluent entwickelt und vorgestellt. Dabei wird ein expliziter, partieller, zwei-Wege-gekoppelter FLAC3D-Fluent-Simulator speziell für die Aufgabenstellung entworfen und erstellt. Der Simulator ermöglicht es, hydraulische, laminare Ein-Phasenströmungen in porösen Medien unter Annahme des Darcy-Gesetzes abzubilden. Er nutzt die physikalischen und numerischen Stärken des geomechanischen expliziten Simulationsansatzes von FLAC3D und der impliziten zeitlichen Abbildung der Strömungsprozess in Ansys Fluent. Hydraulisch relevante Größen, wie Fluiddruck, Sättigung, Porosität und Volumen- bzw. Masseänderungen, werden vom Hauptprozess FLAC3D während einer problem-spezifischen mechanischen Zeitscheibe in festgelegten Abständen aktualisiert. Nach dem mechanischen Berechnungsabschnitt übergibt FLAC3D die benötigten Parameter und Anfangswerte an Ansys Fluent für die hydraulische Berechnung. Dieser Zyklus erfolgt so lange, bis ein festgelegter Bewertungszeitraum erreicht ist (s. Abbildung 1).

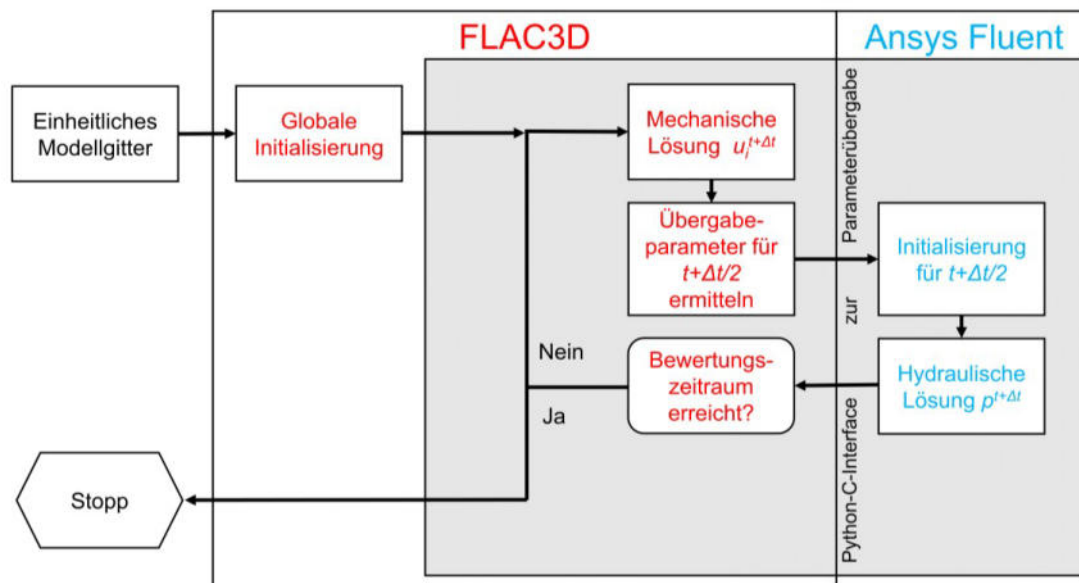


Abbildung 1: Darstellung zum prinzipiellen Ablauf des FLAC3D-Fluent-Simulators für zeitabhängige Problemstellungen.

Für die Simulationen am generischen Grubenmodell wurde ein numerisches Modell einer vereinfachten, horizontalen Lagerstätte erstellt. Es beinhaltet zwei Abbaufelder und eine Kaverne (s. Abbildung). Die drei Grubenbereiche können hydraulisch über eine Verbindungsstrecke miteinander interagieren. Sowohl die geomechanischen Eigenschaften des Gebirges als auch des Versatzmaterials und der bergmännischen Lösungen, sowie die Abbaugeometrie konnten durch intensive Datenrecherche realitätsnah implementiert werden. Adäquat gewählte Stoffgesetze zur Abbildung des Salinars (Kriechgesetz nach Norton), des Versatzes (Double-Yield-Modell) und linear-elastischer Bereiche ermöglichen die Abbildung der wichtigsten geomechanischen Effekte:

- Hohlraumkonvergenz durch viskoses Materialverhalten des Salinars,
- Kompaktion des Versatzes und damit verbundene Steifigkeitserhöhung.

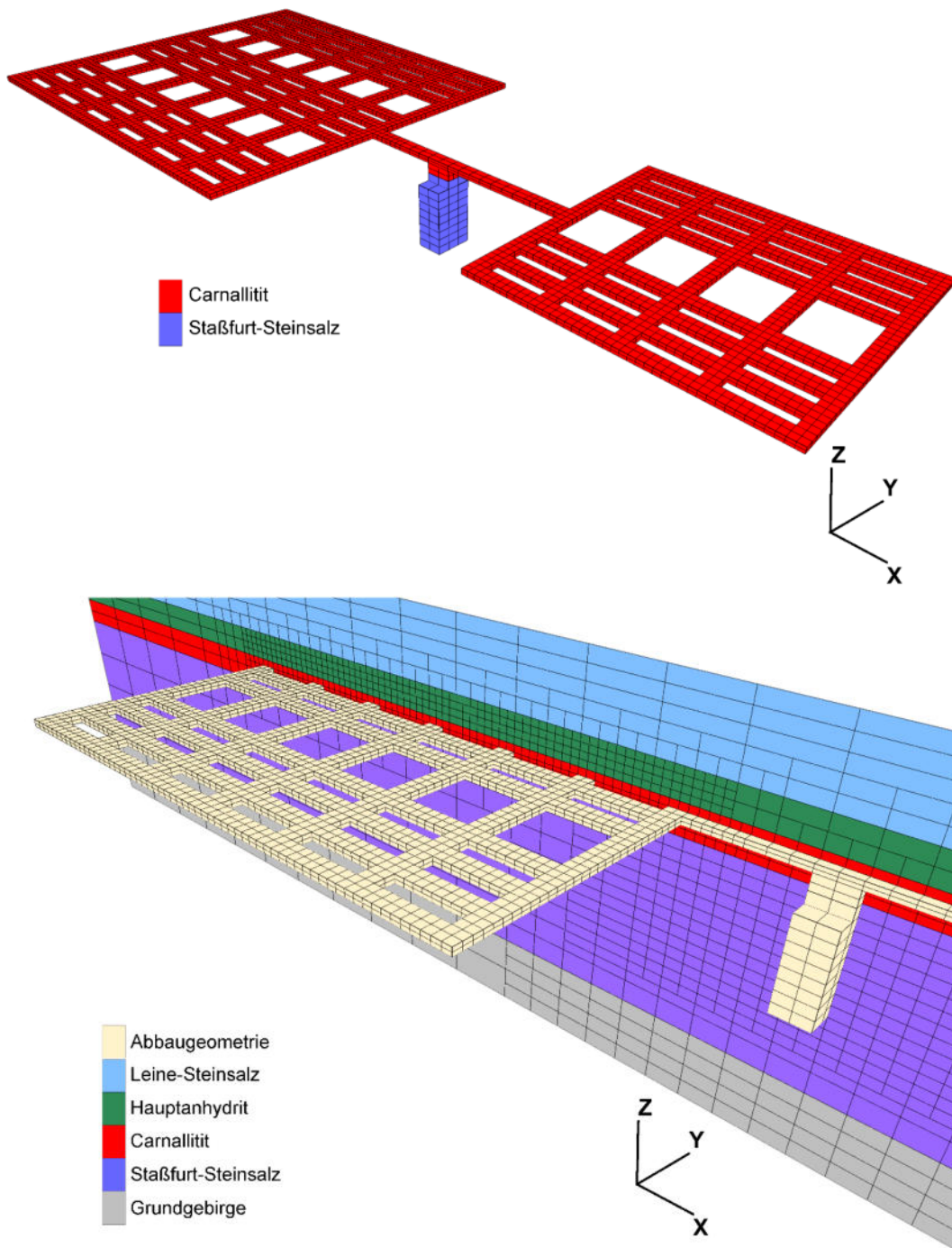


Abbildung 2: Implementierte Abbaugemetrie in FLAC3D, mit Grubenfeldern im Carnallit und einer Kaverne im Staßfurt-Steinsalz (Die Geometrie stellt gleichzeitig das strömungsmechanische Netz in Ansys Fluent dar) – oben. Abbaugemetrie im Vergleich zum Schnitt durch die geologischen Einheiten in FLAC3D – unten.

Die erarbeiteten geomechanischen Parameter sind anhand unterschiedlicher Simulationen kalibriert. Die Kalibrierung der Kriechparameter des Carnallit nutzt dabei die Kammer- und Pfeilerverschiebungen im generischen Grubenmodell im Vergleich zu repräsentativen Simulationen anderer Autoren. Es werden auch der Primär- und Sekundärspannungszustand in FLAC3D sowie der generelle geomechanischen Simulationsablauf verifiziert. Das

Versatzmaterial konnte anhand eines vereinfachten Oedometerversuchs kalibriert werden. Das Kriechverhalten der Kaverne wurde mit Hilfe des FLAC3D-Simulators kalibriert und verifiziert.

Am generischen Grubenmodell wurden anschließend drei Szenarien simuliert:

- M1 – trockene versetzte Grube,
- M2 – versetzte Grube mit lösungserfüllter Kaverne und trockenem Versatz in den Abbauen und der Verbindungsstrecke,
- M3 – versetzte Grube mit lösungserfüllter Kaverne und initial teilgesättigtem Versatz in den Abbauen und der Verbindungsstrecke.

Der Bewertungszeitraum beträgt 20.000 Jahre. Das Modell M1 gilt dabei als trockenes Referenzmodell. Die Modelle M2 und M3 nutzen erstmals den entwickelten FLAC3D-Fluent-Simulator zur Abbildung der hydro-mechanisch gekoppelten visko-elasto-plastischen Simulation. In beiden Modellen stellt sich ein plausibler Flutungsverlauf der Grube ein (Abbildung 3 und 4). Die Kaverne ist nach 600 Jahren ausgepresst. Bei M2 bildet sich in der Bewertungszeit von 20.000 Jahren eine freie Wasseroberfläche in den Abbaufeldern aus. Für Modell M3 kommt es zur Ausbildung eines Überdrucks im Grubengebäude, der zunächst zur Stagnation der Kriechbewegungen, sowie zu auftriebsinduzierten Hebungserscheinungen um die Abbaue führt.

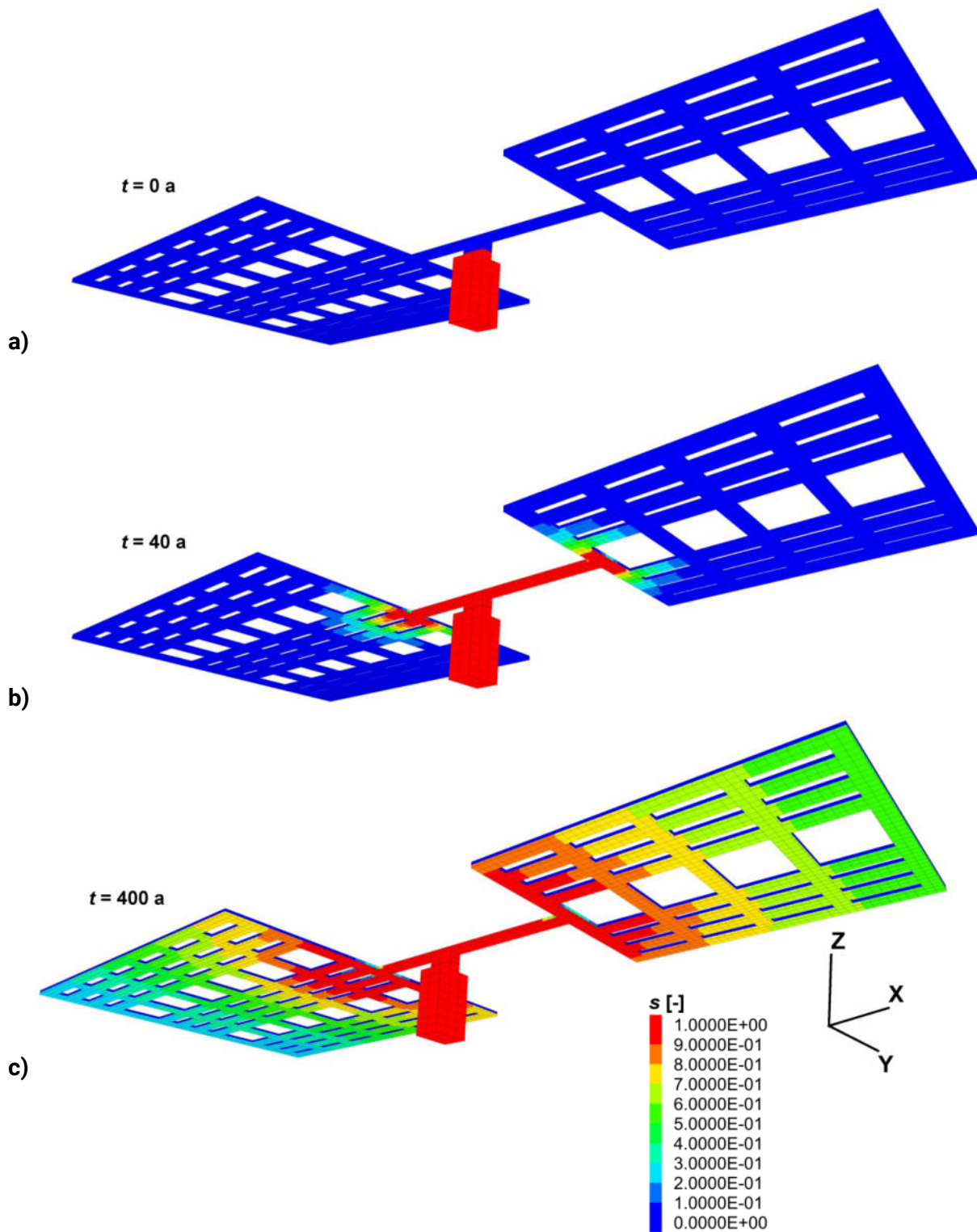


Abbildung 3: Sättigungsverteilung im generischen Grubenmodell M2 a) zu Beginn der Berechnung, b) nach 40 Jahren und c) nach 400 Jahren.

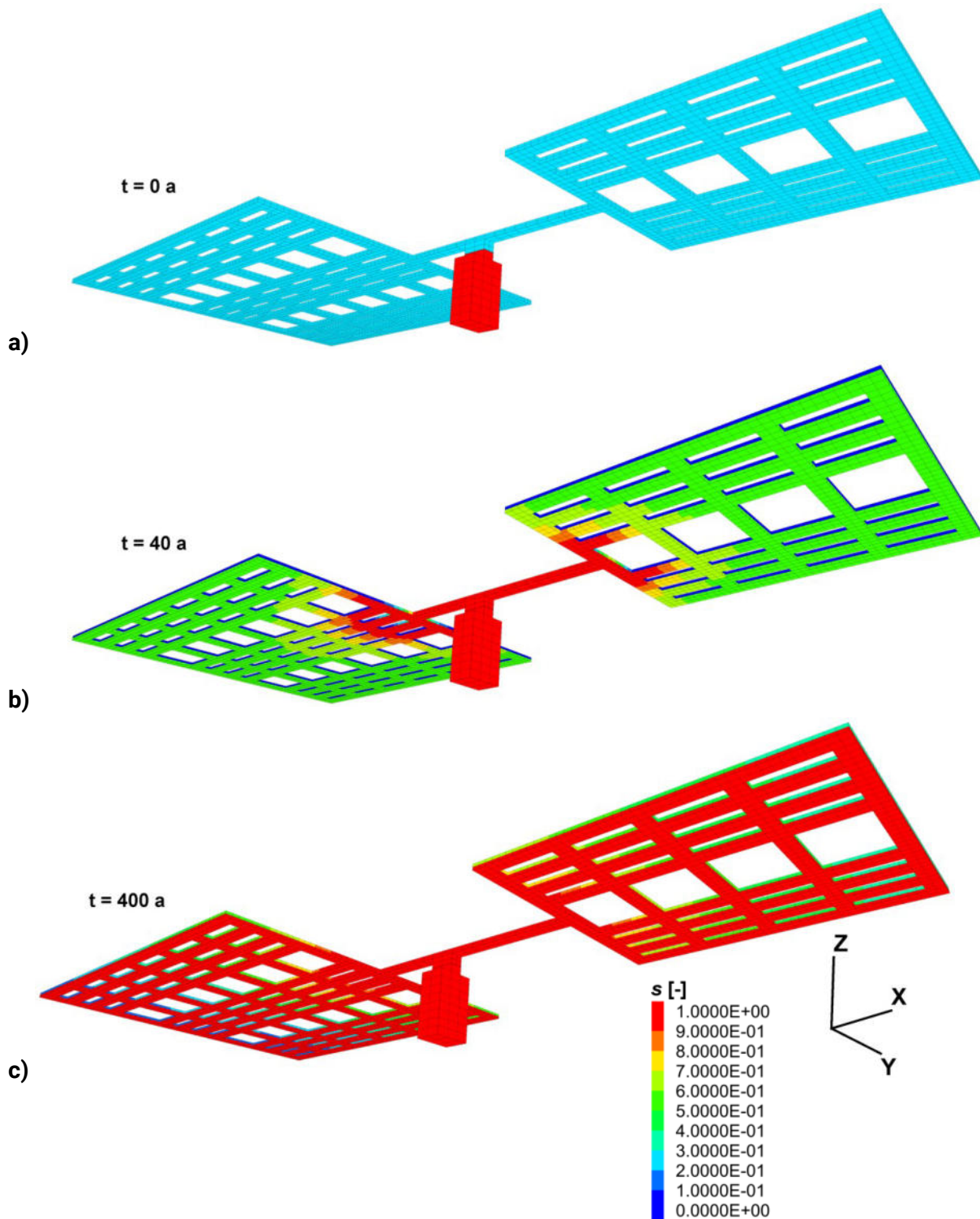


Abbildung 4: Sättigungsverteilung im generischen Grubenmodell M3 a) zu Beginn der Berechnung, b) nach 40 Jahren und c) nach 400 Jahren.

Durch einen Vergleich der Modellszenarien M2 und M3 mit einer hydro-mechanisch gekoppelten Simulation mit expliziter Zeitintegration von M2 rein in FLAC3D, konnte durch den FLAC3-Fluent-Simulator ein Performancegewinn von mehreren Größenordnungen aufgezeigt werden, der aber nur für die vorgestellten Simulationen mit ihren Eingangsparametern, Randbedingungen und Modellgeometrien gültig ist. Der Simulator verknüpft komplexe multi-physikalische Zusammenhänge (Hohlraumkonvergenz, Auspressen von Lösungen, Versatzkompaktion) und simuliert eindrucksvoll das Strömungsverhalten im generischen Grubenmodell unter Ausbildung eines freien Fluidspiegels oder eines Überdrucks im eingeschlossenen Fluid.

Weitere Details unter: <https://doi.org/10.1016/j.deepre.2025.100201>

Modellierung der Baugrundverformungen durch eine Rückstandshalde

C. Lüdeling¹, O. Rabbel², M. Nest¹

¹IfG - Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig

²BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine

1 Zielstellung

Im Umfeld von Rückstandshalden der Kaliproduktion kommt es zu Bodenverformungen, die von den Kriecheigenschaften des Rückstandsmaterials (im Wesentlichen granulares Steinsalz), aber auch vom Baugrund abhängen. Eine verlässliche modelltechnische Prognose des Haldenverhaltens erfordert daher ein adäquates Verständnis des Aufbaus und der mechanischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten, die durch eine Kalibrierung am beobachteten Systemverhalten belegt wird.

2 Geologische und geotechnische Situation

Im Beitrag betrachten wir eine Rückstandshalde, deren Baugrund durch ein mehr als 100 m mächtiges Lockergesteinspaket gekennzeichnet ist.

Die Verformungen werden durch ein umfangreiches Monitoringprogramm aufgezeichnet, das die Horizontal- und Vertikalverschiebungen bis in eine Entfernung von mehreren Hundert Metern erfasst; zusätzlich wird die Teufenabhängigkeit durch Inklinometer überwacht. Die Beobachtungen zeigen, dass sich die Verschiebungen jeweils beschleunigen, wenn die Schüttaktivitäten sich dem jeweiligen Haldenabschnitt nähern und nach Ende der Schüttung innerhalb von ein bis zwei Jahren wieder deutlich zurückgehen. Die Verformungen können lokal über 100 m ins Haldenvorfeld reichen.

Der Baugrundaufbau ist aufgrund der geologischen Geschichte komplex. Vereinfacht kann der Baugrund oberhalb des Festgesteins als ein horizontal gelagertes Paket aus verschiedenen Homogenbereichen, jeweils mit Mächtigkeiten im Bereich von 40 m bis 60 m, betrachtet werden: An der Oberfläche steht ein Paket aus Sanden mit eingeschalteten Mergelhorizonten und -linsen an. Darunter liegen tertiäre Tone, die ihrerseits von Feinsanden unterlagert werden. Die Inklinometer zeigen, dass die Verformungen bis zu den Tönen nachweisbar sind.

3 Modellaufbau und Kalibrierung

Das System aus Halde und Baugrund wird mit einem geomechanischen Modell (in FLAC3D) simuliert (Abbildung 1). Die Modellabmessungen liegen horizontal bei 3850 m bzw. 4500 m und in der Vertikalen bei knapp 450 m (von Haldenoberkante bis Modellunterkante).

Die Haldenentwicklung wird anhand der gemessenen Haldenkonturen in Schritten von mehreren Jahren nachgebildet. Das Rückstandssalz wird mit dem IfG-CWIPP-Modell [1] belegt, dass die Verdichtung des anfangs losen Materials und die Annäherung an die Eigenschaften kompakten Salzes beschreibt.

Der Baugrund wird, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, in drei Homogenbereiche unterteilt und mit folgenden Stoffmodellen beschrieben:

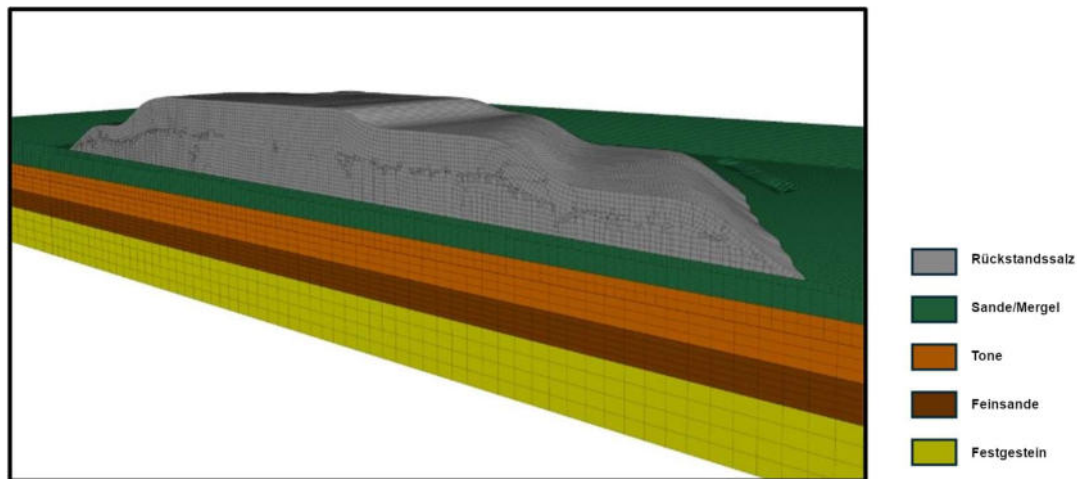


Abbildung 1: Modellaufbau.

- Für die Sande und Mergel wird das *plastic-hardening*-Modell [2] angesetzt. Dieses komplexe bodenmechanische Modell bildet wichtige Charakteristika von sandigen Böden wie spannungsabhängige elastische Parameter, Verformungsverfestigung, Volumenkompaktion und plastisches Mohr-Coulombsches Scherversagen ab. Ziel der Verwendung dieses Modells ist, das Verformungsverhalten der Sande und Mergel möglichst realitätsnah abzubilden, um über eine konservative Standsicherheitsprognose hinaus lokationsspezifische Aussagen über die erwarteten Verschiebungen treffen zu können.
- Die Tone können unter konstanter Last kriechen (siehe z.B. [3,4,5]) und werden daher mit einem linear-viskoplastischen Stoffmodell versehen, also einer Kombination aus linear-viskosem Kriechen und Mohr-Coulomb-Elastoplastizität.
- Die Feinsande werden elastoplastisch modelliert, das Festgestein elastisch.

Die Parameter für die einzelnen Baugrundbereiche wurden zunächst anhand von vorliegenden bodenmechanischen Versuchen abgeleitet und danach im Rahmen einer Kalibrierungsrechnung angepasst. Es zeigte sich, dass die aus den Versuchen ermittelten Parameter das Verformungsverhalten nicht zufriedenstellend beschreibt. Insbesondere wurden (bei guter Übereinstimmung der Werte am Haldenfuß) die Verformungen im Fernfeld deutlich unterschätzt. Um das globale Verhalten angemessen wiederzugeben, wurden daher die (effektiven) Reibungswinkel insbesondere der Tone deutlich herabgesetzt. Bodenmechanisch gibt es dafür zwei Gründe:

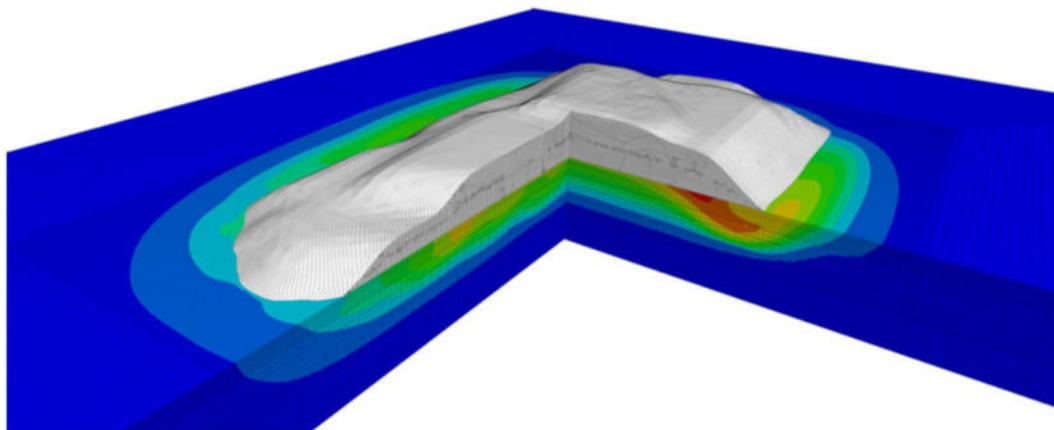


Abbildung 2: Baugrundverschiebungen (relative Einheiten).

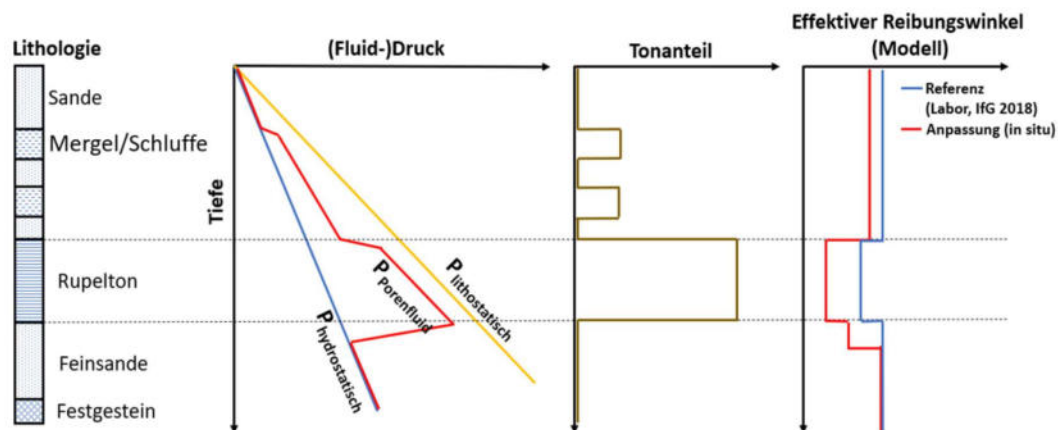


Abbildung 3: Schematischer Verlauf der Porendrücke und der effektiven Reibungswinkel im Baugrund.

Die Mergel im oberen Baugrundpakten zeigen lokal erhöhte Anteile von Schluffen und Tonen, die geringere Reibungswinkel und geringere hydraulische Leitfähigkeiten aufweisen.

Die Baugrundverformungen unter und vor der Halde sind primär durch eine deutliche Reduktion des Porenvolumens bedingt. Dies bewirkt in Schluffen und vor allem Tonen eine Erhöhung des Porendrucks, wenn eine geringe Permeabilität den Druckausgleich durch Fluidfluss verhindert. Erhöhte Porendrücke führen dazu, dass sich der effektive Spannungszustand in Richtung der Fließgrenze verschiebt. Dies ist wiederum äquivalent zu einem effektiv verringerten Reibungswinkel (Abbildung 4).

Durch die Parameteranpassung konnte eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen den gemessenen und modellierten Bodenbewegungen erreicht werden (siehe exemplarisch Abbildung 2 und Abbildung 3), sodass das Modell als hinreichend kalibriert angesehen wird. Während natürlich aufgrund der modelltechnisch erforderlichen Vereinfachungen lokale Abweichungen nicht zu vermeiden sind, wird die Charakteristik der Verformungen, also das Verhalten von Nah- und Fernfeld, an allen Messlinien gut wiedergegeben. Die Senkungen unter der Halde und auch das Teufenverhalten der Baugrundverschiebungen ist zufriedenstellend abgebildet. Insgesamt kann das Modell das Systemverhalten qualitativ in Übereinstimmung mit der geomechanischen Interpretation der Messungen und auch quantitativ zufriedenstellend abbilden.

4 Ergebnisse

Auf Basis des kalibrierten Modells kann zum einen die Standsicherheit des Systems bewertet werden und zum anderen die zukünftige Entwicklung unter Annahme der weiteren Schüttungen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Standsicherheit der Halde auch bei größeren Verformungen im Baugrund gegeben ist. Die hohe Festigkeit und das duktile Verformungsverhalten des Haldenmaterials ist ein wichtiger Faktor für die Stabilität des Gesamtsystems Halde-Baugrund, da das hochkompaktierte Salz kein Spröbruchverhalten zeigt und somit ein Ab- oder Nachrutschen auf dem Baugrund verhindert wird.

Andererseits können die Verformungsraten während der Schüttaktivitäten signifikant sein. Im Baugrund können sich Bereiche im Grenzgleichgewicht befinden. Auf lange Sicht verlaufen

Verformungen aber degressiv. Das Monitoringprogramm des Betreibers ist geeignet, das Systemverhalten angemessen zu überwachen und sollte fortgesetzt werden.

Die Ergebnisse stimmen mit früheren Untersuchungen des IfG überein [1,6].

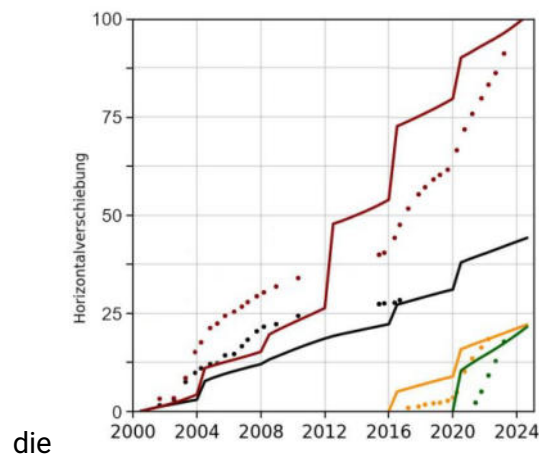


Abbildung 4: Kalibrierung (Beispiel, relative Einheiten) der Horizontalverschiebungen anhand dreier Messpunkte einer Messlinie.

Literatur

- [1] Lüdeling, C., und W. Minkley. 2014. „A Crushed–Salt Model with Creep, Compaction and Strain Softening, and Application to Tailings Heaps“. In ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, ARMA-2014-7037. ARMA
- [2] Cheng, Z., und C. Detournay. 2016. „Plastic hardening model I: Implementation in FLAC3D“. In Proc. 4th Itasca Symposium on Applied Numerical Modeling
- [3] Coll et al. 2007. „Long Term Behaviour Of The Boom Clay: Influence Of Viscosity On The Pore Pressure Distribution“. In Colloque ANDRA. Lille, Frankreich
- [4] NAGRA. 1990. „Numerical Modeling Of The Creep Behavior Of Clays With Emphasis On Tunnels And Underground Openings: A Critical Review Of The State-Of-The-Art (Technical Report)“. 90–02. NAGRA/ISMES
- [5] Yu et al. 2015. „Creep behavior of boom clay“, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, , Nr. 76: 256–64.
- [6] IfG. 2018. „Bergrechtliches Planfeststellungsverfahren ‚Haldenkapazitätserweiterung II Werk Zielitz‘ (HKE II)“, Band 6 der Antragsunterlage, Nachweis der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit“. Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig.

Angewandte Gebirgsmechanik bei der Projektierung untertägiger Kalisalzgewinnung - Aktuelle Aufgabenstellungen im Auslandsbergbau

S. van der Klauw¹, A. Jockel¹, T. Teichert¹, S. Engler¹, T. Kießling¹, J. Mühlbauer², M. Knauth²,
D. Naumann², R.-M. Günther²

¹ERCOSPLAN - Erfurter Consulting- und Planungsbüro GmbH, Erfurt

²IfG - Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig

Rohstoffgrundlage für die Produktion von Kalidüngemitteln oder anderen Kalium-Produkten sind Lagerstätten (fester) mineralischer Salze im geologischen Untergrund oder (flüssige) Salzlösungen in natürlichen Salzseen an der Erdoberfläche oder von Porenwässern in oberflächennahen Sedimenten. Dabei gleicht kaum eine Lagerstätte der anderen. Die Projektierung der Rohstoffgewinnung fester mineralischer Salze muss diesen lagerstättenspezifischen Randbedingungen Rechnung tragen, daneben aber auch eine ganze Reihe weiterer standortspezifischer Einflussfaktoren berücksichtigen.

Aus der Gestalt der Lagerstätte resultieren die wesentlichen technischen Anforderungen an das Gewinnungsverfahren. Eine gleichmäßige oder ungleichmäßige Verteilung der Mächtigkeit oder des Nutzmineralgehaltes der Rohstoffkörper, ihr einheitliches oder wechselhaftes Einfallen, das Auftreten von Vertaubungen und deren räumliche Anordnung sowie die potenzielle Salzlösungs- und Gasführung sind sicherlich die signifikantesten, wenn auch nicht ausschließlich zu betrachtenden Einflussfaktoren. Wesentliche Grundlage für die Auswahl des am besten geeigneten Gewinnungsverfahrens ist deshalb ein verlässliches Lagerstättenmodell, das alle relevanten Parameter repräsentativ abbildet. Voraussetzung für die Erstellung eines solchen Modells ist eine hinreichend detaillierte Erkundung der Lagerstätte, die aber neben der Charakterisierung o. g. rohstoffgeologischer Parameter auch wesentliche bergbau-sicherheitsliche Aspekte, darunter auch die gebirgsmechanischen und geohydraulischen Eigenschaften des Lagerstättenhorizontes sowie seiner hydrogeologischen Schutzschichten, aufklären muss. Erst auf Basis dieser im 3D-Lagerstättenmodell visualisierten grundlegenden Kenntnisse ist eine Abwägung bezüglich konventioneller bergmännischer oder soltechnischer Gewinnung möglich, wobei wiederum auch weitere standortspezifische Faktoren von essenzieller Bedeutung sein können.

Der Fachvortrag stellt anhand aktueller Projekte zur untertägigen Gewinnung von Kalisalzlagerstätten beispielhaft vor, wie die Unterschiede im geologischen Bau der Kalilagerstätten die gebirgsmechanischen Randbedingungen beeinflussen und welche Auswirkungen dies auf die Auswahl der am besten geeigneten Gewinnungsmethode hat. Die drei Fallbeispiele erläutern schwerpunktmäßig die gebirgsmechanischen Besonderheiten bei der konventionellen bergmännischen Gewinnung einer flach einfallenden Carnallitlagerstätte in geringer Teufe und einer mittelsteil bis steil einfallenden Sylvinitlagerstätte in mittleren bis großen Teufen sowie bei der soltechnischen Gewinnung einer flach einfallenden Carnallitlagerstätte mit mehreren AbbauhORIZONTEN in unterschiedlichen Teufen.

Gaseinschlüsse im Salinar des Werra-Fulda-Kaligebietes: Geomechanik, Modellierung und Relevanz für Integritätskonzepte und Sicherheitsnachweise

J.-P. Schleinig¹, R.-M. Günther², S. Zeibig¹, J. Barnasch³, A. Zirkler³, M. Knauth², C. Lüdeling²

¹K+S Aktiengesellschaft Kassel

²IfG - Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig

³K+S Minerals and Agriculture GmbH, Kassel

Abstract

Gaseinschlüsse im Salz sind ein hervorragendes Analogon für den Beleg der langzeitlichen Dichtheit unverritzter Gebirgsbereiche im Salinar. Im Werra-Fulda-Kaligebiet entstanden diese Einschlüsse im Tertiär begleitend zum Rhönvulkanismus, bei dem die Gase sowohl im unmittelbaren Umfeld von Magmatitintrusionen als auch entlang von tektonischen Klüften und Schnitten in dem Salinargebirge akkumuliert wurden. Die unter Gebirgsdruck stehenden Einschlüsse verblieben über viele Millionen Jahre im Salinar, bis diese Areale durch den aktiven Gewinnungsbergbau aufgeschlossen wurden. Ihre räumliche Verteilung ist anhand der Lage bekannter Magmatitzonen und tektonischer Störungszonen sowie anhand der beim aktiven Abbau aufgetretenen Gas-Salzausbrüche vorrangig in den Kaliflözen und Begleitflözen nachzuvollziehen. Der bergmännische Aufschluss solcher gasführenden Gebirgsbereiche durch die untertägige geologische Exploration und bergmännische Gewinnung führte zu extrem herausfordernden Situationen, sehr selten mit tödlichen Unfällen. Mit zunehmender Erfahrung konnte jedoch die gewaltige Kraft dieser Ausbrüche beherrscht und sogar partiell für den Gewinnungsprozess genutzt werden.

Auf der anderen Seite stellt die Erfassung und Abbildung dieser initialen Dichtheit des Salinargebirges gegenüber den hocheingespannten Gasen eine große Herausforderung für numerische Modellierungen dar. Es bietet sich an, diese schützenden Eigenschaften im Zuge von Untersuchungen der Integrität von Salinarbarrieren um Abbaue zu berücksichtigen und abzubilden. Hierzu werden neu entwickelte Ansätze und deren Umsetzung in den praktischen Modellierungen gezeigt.

Geologische Entstehung von Gaseinschlüssen im Salinar

Das mit Beginn der bergmännischen Erkundung und Erschließung der Kalilagerstätte im Werra-Fulda-Gebiet aus dem Gebirge austretende Gas war für den aufstrebenden Kalisalzbergbau eine große Herausforderung. Dabei wird aufgrund der Dominanz von CO₂ an der Gesamtzusammensetzung der Gase generell und auch im vorliegenden Text von CO₂-Ausbrüchen bzw. CO₂-Ereignissen gesprochen. Bereits 1895 führte eine Kalisuchbohrung zwischen Bad Salzungen und Stadtlengsfeld zu einem CO₂-Gasausbruch im Bereich des Oberen Kalilagers (DUCHROW, 1997). Ein plötzliches Ausbrechen von Gasen bzw. Gas und Gestein war damals in erster Linie aus Ereignissen von austretendem Methan im Steinkohlenbergbau bekannt und dort oft mit großen Zerstörungen und Todesopfern verbunden. Für die Gewinnung von Stein- und Kalisalzen gab es bislang keine ähnlichen Erfahrungen.

Vor diesem Hintergrund ist ein Blick auf die geologische Entstehung und den Aufbau der Kalisalzlagerstätte im Werra-Fulda-Gebiet interessant. Die Ablagerung der Salze erfolgte im Zechstein vor etwa 250 Mio. Jahren. Bei voller Ausbildung sind die salinaren

Zechsteinschichten im Mittel ca. 400 m und darin das Werra-Steinsalz durchschnittlich 270 m mächtig. Abbildung 1, links, zeigt eine schematische Darstellung des Lagerstättenaufbaus. Eingelagert im Werra-Steinsalz befinden sich die beiden bauwürdigen Kaliflöze, das untere Flöz Thüringen und das obere Flöz Hessen, in Teufen von ca. 300 m bis 1.200 m. Sie enthalten hauptsächlich die kalimineralführenden Gesteine Hartsalz, Carnallit und Sylvinit.

Im Zuge des tertiären Rhönvulkanismus, dessen Hauptphasen zwischen 22 – 18 und 14 – 11 Mio. Jahren liegen (FLICK & SCHRAFT, 2013), drangen Fluide und somit auch Gase unter hohem Druck in die salinaren Zechsteinschichten ein und wurden aufgrund der besonderen Löslichkeitseigenschaften der Kalisalze bevorzugt in diesen Schichten eingelagert. Mit einer Reichweite von wenigen Zentimetern bis mehrere hundert Meter um die Aufstiegszonen wurden Carnallit zu Sylvinit und Halitit im Kaliflöz Thüringen sowie in den carnallitischen Begleitflözen des Kaliflöz Hessen umgewandelt, wie es beispielhaft für die beiden Kaliflöze in der Abbildung 1, rechts, gezeigt wird (KOCH & VOGEL, 1980).

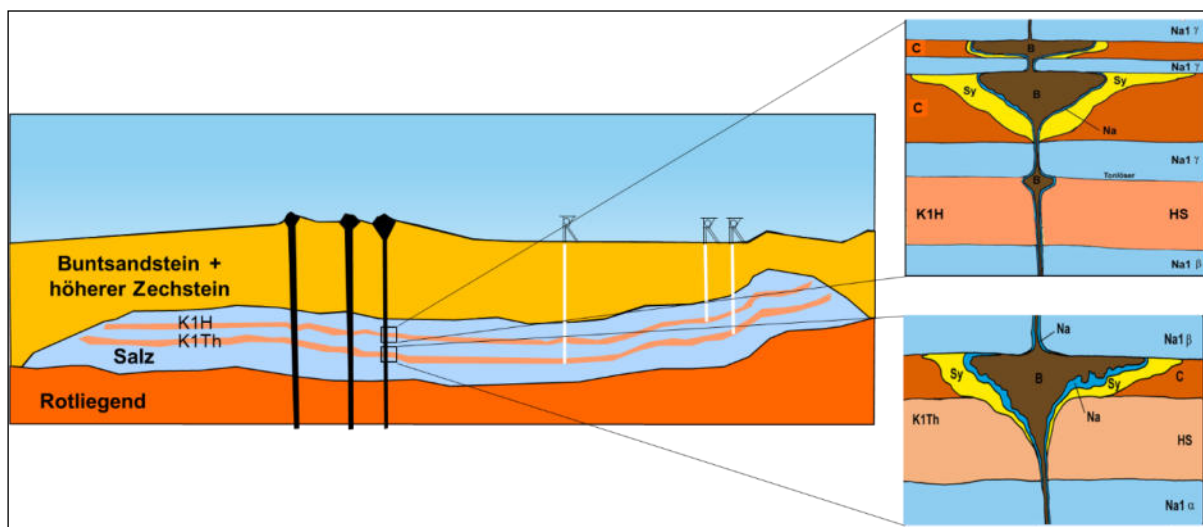


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Werra-Lagerstätte (links) und der Beeinflussung der Kaliflöze Hessen bzw. Thüringen (rechts oben K1H bzw. unten K1Th) durch Fluide, die im Zusammenhang mit dem Rhönvulkanismus ins Salinar eindringen (Abkürzungen: Na1α= Unteres Werra-Steinsalz, Na1β=Mittleres Werra-Steinsalz, Na1γ=Oberes Werra-Steinsalz, HS=Hartsalz, C=Carnallit, Sy= Sylvinit, Na=Umwandlungshalit, B=Basalt).

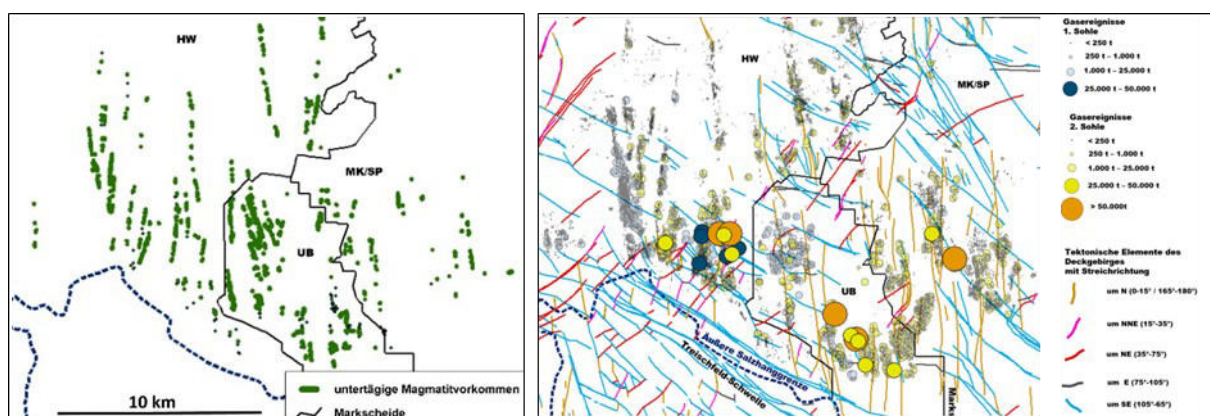


Abbildung 2: Räumlicher Zusammenhang zwischen Magmatitvorkommen im Kalilager (links, blau ist die äußere Salzhanggrenze eingefügt), Gas-Salz-Ausbrüchen

und tektonischen Elemente des Deckgebirges (rechts) nach ZIRKLER et. al. (2025)

Die räumliche Verteilung bisheriger, durch Exploration und bergmännischen Aufschluss ange- troffener Gas-Salz-Ausbrüche in Bezug auf untertägige Magmatitvorkommen und tektonische Elemente im Deckgebirge zeigt die Abbildung 2.

Demnach liegen die Grubenfelder der Werra-Kalilagerstätte in einem Bereich mit Nord-Süd- ausgerichteten Magmatitvorkommen und im Kreuzungsbereich tektonischer Nordost-Süd- west, Nord-Süd und Nordwest-Südost-Strukturen im Deckgebirge (ZIRKLER, 2025). Wie ebenfalls in Abbildung 2 zu erkennen, konzentrieren sich die Gas-Salz-Ausbrüche auf beiden Sohlen auf diese Strukturelemente, wobei die größten Gasausbrüche im südlichen und östli- chen Bereich der Lagerstätte auftraten.

Die im Ergebnis in das Salzgebirge eingelagerten Gase können nach GIMM et al. (1976), HERR- MANN (1988) und HERRMANN & KNIPPING (1993) als schnittgebundene Gase nahezu frei auf Schlechten und Klüften oder als mineralgebundene Gase eingeschlossen sein. Nach OELSNER (1961) sind ca. 95 % der mineralgebundenen Gase intergranular, das heißt auf den Korngren- zen und in Zwickeln zwischen den Kristallen, und die verbleibenden 5 % intragranular, das heißt in mikroskopisch kleinen Poren in den Kristallen, gespeichert. Im unverritzten Salzgebirge kann eine Tonne Salz bis zu ca. 7 - 8 m³ flüssiges CO₂ enthalten, das unter petrostatischem Überla- gerungsdruck eingespannt ist (GIMM & HÄFNER, 1972). Die Speicherung dieses hochgespannten Fluids über viele Millionen Jahre belegt die primäre Dichtheit des unverritzten Salzgebirges.

Einfluss der Gas-Salz-Ausbrüche auf die bergmännische Gewinnung

Wird im Salinar eingebundenes Gas durch bergmännische Gewinnungsarbeiten aufgeschlos- sen, kann es mehr oder weniger zerstörungsfrei ausgeblasen oder mit gasbelastetem Salz ausgeworfen werden. Im Ergebnis von Gas-Salz-Ausbrüchen entstehen meist kugel- bis ellip- senförmige Ausbruchshohlräume, die sogenannten Gas-Racheln (Abbildung 3).



Abbildung 3: Gas- und Gas-Salz-Ausbrüche in Kaliflözen

Links: Gasrachel entlang einer vertikalen Schnittstruktur (hellgraue Linie)

Mitte: Gas-Salz-Ausbruch mit Gasrachel, rechts von einem Abbau

Rechts: Stoß der Gasrachel mit charakteristischer Schieferung.

Das schnittgebundene, freie Gas wird beim Antreffen in der Regel nur über eine sehr kurze Zeit und in relativ geringen Mengen ausgeblasen. Nur in wenigen Fällen wurden dabei Unfälle in der Vergangenheit durch aus dem Bohrloch ausgeblasene Bohrgestänge verursacht. Dagegen

können Gas-Salz-Ausbrüche vorher mineralgebundener Gase beim Aufschluss durch die bergmännische Gewinnung mit erheblichen Gefährdungen für die bergmännische Gewinnung verbunden sein. Resultierend daraus erfolgt das Sprengen während des Schichtwechsels zum Schutz der Belegschaft. Einen schlaglichtartigen Überblick besonders großer Gas-Salz-Ausbrüche zeigt das Diagramm im linken Bild der Abbildung 4, von denen vier Ereignisse nachfolgend beispielhaft kurz beschrieben werden.

- Der erste, bei bergmännischen Auffahrungen aufgetretene Gas-Salz-Ausbruch trat 1908 beim Sprengen mit ca. 7.000 t Salzauswurf und erheblichen Zerstörungen in der Grube Menzengraben auf und galt danach über dreißig Jahre als "Rekordausbruch" im gesamten Revier (DUCHROW, 1997).

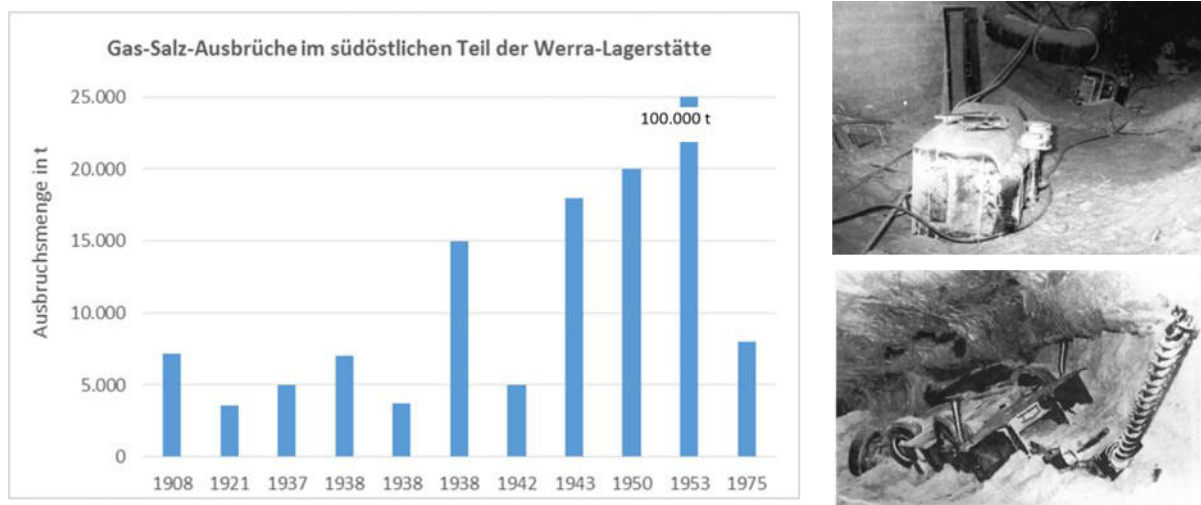


Abbildung 4: Überblick über sehr große Gas-Salz-Ausbrüche in Kaliflözen (links) und zerstörerische Auswirkungen in einer Seilbahn-Förderstrecke in Unterbreizbach (rechts, oben) sowie einen über 145 m geschleuderten Großlochbohrwagen (rechts, unten) aus DUCHROW (1997).

- Im Grubenfeld Unterbreizbach kam es 1938 im Abstand von wenigen Monaten zu zwei Gas-Salz-Ausbrüchen mit ca. 7.000 t bzw. 3.700 t Salzauswurf. Abbildung 4 (Bild rechts oben) zeigt die dafür typische Verwüstung in einer Seilbahn-Förderstrecke dieses Grubenfeldes (DUCHROW, 1997).
- 1975 ereignete sich in einem Carnallitabbau ein weiterer großer Salz-Gas-Ausbruch. Obwohl beim Erkunden der Ortsbrust mit kleinen Bohrlöchern auch CO₂-Schnitte angetroffen wurden, die unspektakulär und in üblicher Weise entgasten, lief beim anschließenden Herstellen der Großbohrlöcher ein Ausbruch mit einer Auswurfmenge von ca. 8.000 t Salz und 50.000 m³ Gas an, der den in Abbildung 4, Bild rechts unten, gezeigten, ca. 11 t schweren Großlochbohrwagen „um 145 m zurückwarf, wo er bis zur Unbrauchbarkeit demoliert mit den Rädern nach oben im Auswurfsalz landete“ (DUCHROW, 1997).
- Im Jahr 2013 wurde in der Grube Unterbreizbach bei einer Auffahrung im Carnallitit des Kaliflözes Thüringen ein außergewöhnlich großes Gasvorkommen aus dem darüber liegenden Werra-Steinsalz aufgeschlossen. Der Carnallitit selbst wies kaum CO₂-Imprägnationen auf. Diese spröde Salzart konnte jedoch trotz

erfahrungsbasierter Begrenzung von Hohlraum- und Freilegungsquerschnitt dem beim Sprengen freiwerdenden, flüssigen CO₂ bei seiner sofortigen, explosionsartigen Umsetzung in Gas nicht standhalten. Bei diesem Ereignis wurden ca. 100.000 t Salz durch ein ausströmendes Gasvolumen von ca. 40 Mio. m³ aus der Ausbruchs-rachel in die angrenzenden Grubenräume transportiert. Abschätzungen zeigen, dass das zuvor im Gebirge eingeschlossene flüssige CO₂ mit einem Volumen von ca. 60.000 m³ unter dem Teufendruck von ca. 22 bis 30 MPa gestanden hat.

In Bewertung zahlreicher Gas-Salz-Ausbrüche wurden die ablaufenden gebirgsmechanischen Prozesse des Ausbruchsmechanismus untersucht und in verschiedenen Literaturquellen (siehe u.a. GIESEL et al., 1989) beschrieben. Sie werden nachfolgend vereinfachend zusammengefasst:

- Durch die CO₂-Einlagerung in das Salzgebirge verringert sich die Kohäsion zwischen den Salzkörnern und damit die Festigkeit des gasimprägnierten Salzes. Der allseitig wirkende Gasdruck entspricht hier nahezu dem isotropen Spannungszustand im umgebenden gasfreien Salzgebirge. Da nur Druckspannungen wirken, ist das gasimprägnierte Salz stabil und in seinem gebirgsmechanischen Verhalten vom umgebenden, gasfreien Salzgebirge nicht zu unterscheiden.
- Mit Freilegung des eingespannten Gases durch Sprengung im Rahmen der bergmännischen Gewinnung wird die Gebirgsspannungsverteilung im Zugangsbereich schlagartig verändert. Die vorher am Stoß des bergmännischen Grubenbaues vorhandene Spannungsverteilung mit ihrem vertikalen Spannungsmaximum wird sehr schnell auf den gasimprägnierten Salzbereich verlagert.
- Durch die Zerklüftung und Zerstörung des Salzes im Zugangsbereich wird das unter hohem Druck stehende CO₂ freigesetzt, kann sich entspannen und fördert das jetzt lose Salz in Form einer pneumatischen Förderung in die angeschlossenen bergmännischen Hohlräume ab.
- Der Gas-Salz-Ausbruch läuft als Kettenreaktion aus Spannungsumlagerung auf den gasbelasteten Gebirgsbereich und pneumatischen Abtransport des losen Salz-Gas-Gemisches fort, bis
 - das freiwerdende, strömende Gasvolumen den pneumatischen Salztransport nicht mehr aufrechterhalten kann, der Bruchvorgang abgebremst wird und noch in dem gasbelasteten Gebirgsbereich zum Stehen kommt, oder
 - die geologischen Grenzen des ausbruchsaktiven Gebirgsbereiches erreicht werden.
- Nach Zusammenbrechen des pneumatischen Salztransportes kann sich eine sekundäre, entgaste Schutzschicht herausbilden, die das noch vorhandene, ausbruchsaktive Salz konserviert.

Wie sehr das Gas in das Salz eingebunden sein kann, zeigt ein Versuch, bei dem ein Salzbrocken aus einem solchen Gas-Salz-Ausbruch in Wasser gelegt wird. Dabei steigen die durch die

Auflösung von Salz freiwerdenden Gase sichtbar auf und belegen, dass das nahezu druckfreie Gas trotz immenser Beanspruchung beim Ausbruchprozess noch in und zwischen den Mineralkörnern (hier nur durch die Kohäsion gehalten) im Salzbrocken eingeschlossen ist.

Im Ergebnis dieser Untersuchungen wird der Gas-Salz-Ausbruch als ein von geologischen Bedingungen abhängiger, durch bergmännische Gewinnung ausgelöster und nach gebirgsmechanischen, thermo- sowie aerodynamischen Gesetzen ablaufender Prozess beschrieben. Dieses Wissen zum Ausbruchsmechanismus machte es möglich, den CO₂-Weitungsbaue als neues Abbauverfahren zur Sylvinitgewinnung zu entwickeln und unter bestimmten Randbedingungen einzuführen. Unter Nutzung des eingeschlossenen Gases und seiner beschriebenen Eigenschaften werden die im Zuge der Sprengungen erzeugten neuen Abbauhohlräume hauptsächlich durch CO₂-Rachen begrenzt Größe gebildet und die Gewinnung im Rahmen eines Rastersystems für den Tragpfeiler-Ensembleausgleich gesteuert.

Anhand der vorgestellten Entwicklung wird einerseits die Gefahr eines Gas-Salz-Ausbruches mit ihrem immensen Zerstörungspotential deutlich reduziert und andererseits die hervorragenden Barriereigenschaften von unverritztem Salzgebirge gegenständlich belegt. In diesem Kontext ist zu erwähnen, dass es aufgrund einer Forschungsk Kooperation mit der Universität Heidelberg in den letzten Jahren gelungen ist, nicht nur neue Erkenntnisse zur Platznahme der Fluide bzw. des Gases im Salzgebirge zu erlangen, vielmehr auch zu bestätigen, dass die getroffenen Sicherheitsmaßnahmen für einen sicheren Bergbau im Werra-Kali-Gebiet weiterhin Bestand haben.

Versuchstechnischer Nachweis der Barrierewirksamkeit von Steinsalz, Ableitung von Integritätskriterien und Modellierung

Ausgehend vom dargestellten natürlichen Analogon des geogenen langzeitdichten Einschusses von hochgespanntem CO₂ im Werragebiet wird anhand eines In-situ-Langzeitversuchs, der im Rahmen des F+E-Projektes „Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept“ (POPP, T. et al., 2007) durchgeführt wurde, die geogene Dichtheit von Steinsalz exemplarisch demonstriert. Im Zusammenhang mit Permeabilitätsmessungen im gesteinsmechanischen Labor können die für den langzeitigen Dichtheitsnachweis bzw. für den Nachweis des vollständigen Einschusses erforderlichen Integritätskriterien und deren Konservativitäten abgeleitet und begründet werden.

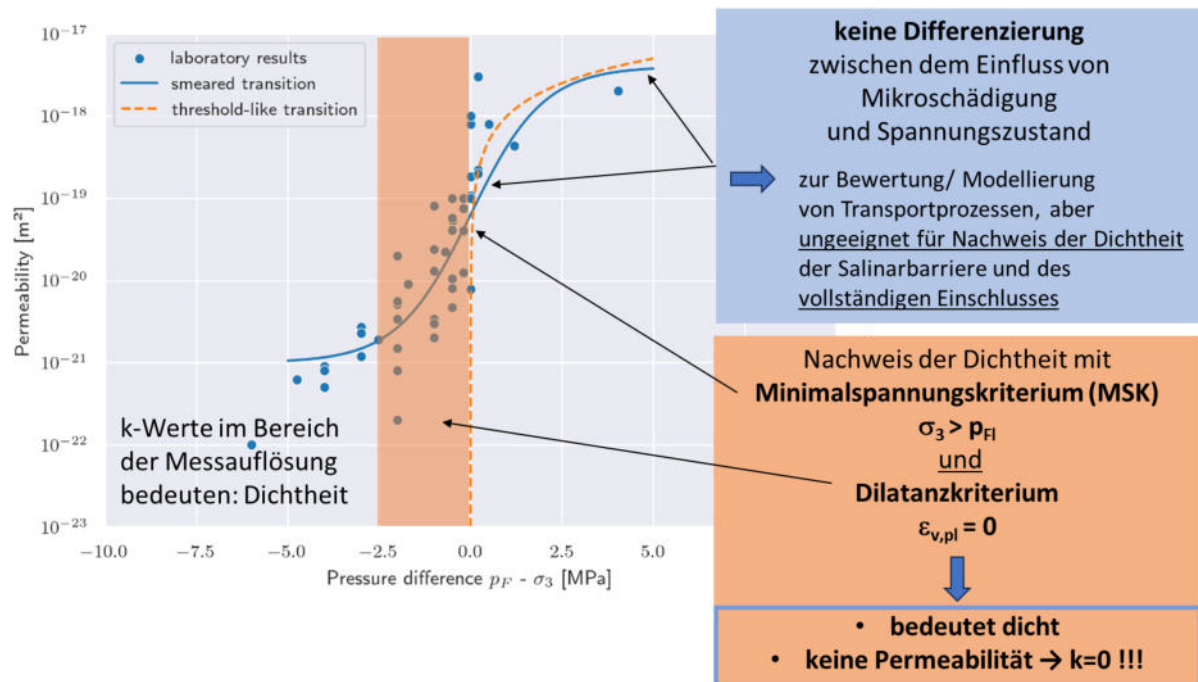


Abbildung 5: Permeabilität von Steinsalz in Abhängigkeit der effektiven Spannung ($p_F - 3$);
Beschreibung der Permeabilitätsentwicklung und Integritätskriterien.

Im Ergebnis der Präsentation wird eine Argumentationskette aufgebaut, die die in der Gebirgsmechanik anerkannten Integritätskriterien zunächst phänomenologisch über das natürliche Analogon langfristig eingeschlossenes CO₂ begründet. Weiterführend wird anhand von In-situ- und Laborversuchen die Bedeutung der minimalen Hauptspannung als untere Perkolationschwelle sowie der Dilatanz herausgearbeitet, woraus sich das Minimalspannungs- und das Dilatanzkriterium als konservativ abdeckende Nachweiskriterien ableiten lassen. Es wird erläutert, wie geogene Unsicherheiten im Nachweiskonzept berücksichtigt werden und unter welchen Bedingungen weiterführende Untersuchungen durchzuführen sind. Darüber hinaus wird der Einfluss des gebirgsmechanischen Spannungsfeldes auf die Entwicklung weiterqualifizierter Integritätskriterien vorgestellt.

Literatur

- DUCHROW, G., 1997. Der 100-jährige "Rhönmarsch" in die Kohlensäurefelder des südthüringischen Kalibergbaus. Der Anschnitt 49, 1997, H. 4, S. 123 - 147
- FLICK, H. & SCHRAFT, A., 2013. Die Hessische Rhön – Geotope im Land der offenen Fernen. Redaktion: S. Küttner-Bahr, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 312 S.
- GIESEL, R.J., HAASE, G., MARGGRAF, P., SALZER, K. & THOMA, K., 1989. Drei Jahrzehnte Ausbruchsforschung im Kalibergbau des Werrareviers der DDR. Zeitschrift geologischer Wissenschaft, 17 (4), S. 333 – 346.
- GIMM, W. & HÄFNER, H.-P., 1972. Ausgasung und plötzliche Ausbrüche im Bergbau. Lehrbrief Gebirgsmechanik der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

GIMM, W., HÄFNER, H.P. & MARGGRAF, P., 1976. Gegenwärtiger Stand der Beherrschung der CO₂-Gasgefahren im Werrakalibergbau der DDR. Neue Bergbautechnik, 6 (8), S. 596 – 600.

HERRMANN, A.G., 1988. Gase in marinen Evaporiten. PTB informiert: Fachbeiträge zur Sicherstellung und Endlagerungen radioaktiver Abfälle, 2/88, 33 S.

HERRMANN, A.G. & KNIPPING, J.K., 1993. Fluids in marine evaporites. In: Waste Disposal and Evaporites, Lecture Notes in Earth Sciences, 45, S. 55 – 110.

KOCH, K. & VOGEL, J., 1980. Zu den Beziehungen von Tektonik, Sylvinitbildung und Basaltintrusionen im Werra-Kaligebiet. Freiburger Forschungshefte, C 347, 104 S.

OELSNER, O., 1961. Ergebnisse neuer Untersuchungen in CO₂-führenden Salzen des Werrareviers, in: Freiburger Forschungshefte. A 183, Berlin 1961, S. 5-19.

POPP, T., WIEDEMANN, M., BÖHNEL, H. & MINKLEY, W., 2007. Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, Forschungsvorhaben SR 2470., 255 S.

ZIRKLER, A., ZEIBIG, S. & GLASMACHER, U. A., 2025: Untersuchungen zur Gasführung salinarer Gesteine des Werra-Kaligebietes sowie der strukturgeologischen Randbedingungen. Kali und Steinsalz, Heft 02/2025, S. 6-17

Vergleich der Anforderungen an geologisch-gebirgsmechanische Eingangsgrößen bei der Planung konventioneller und soltechnischer Gewinnung von Kali- und Steinsalzlagerstätten

C. Stoltenberg, A. Jockel, S. van der Klauw

ERCOSPLAN - Erfurter Consulting- und Planungsbüro GmbH, Erfurt

Für die untertägige Gewinnung von Kali- und Steinsalzlagerstätten haben sich sowohl die konventionelle (bergmännische) als auch die soltechnische Gewinnung als erprobte Verfahren etabliert. Die Auswahl eines für die jeweilige Kali- bzw. Steinsalzlagerstätte geeigneten Gewinnungsverfahrens wird vor allem, jedoch nicht ausschließlich, durch lagerstättenbezogene Einflussfaktoren determiniert, die u.a. als geologisch-geomechanische Eingangsgrößen in den Entscheidungsprozess einfließen. Diese Eingangsgrößen müssen im Rahmen der Erkundung akquiriert werden, wobei Kenntnisse aus früheren Erkundungskampagnen zu validieren und zu präzisieren, ggf. auch zu korrigieren sind. Zu den geologischen Eingangsgrößen gehören u. a.

- die Verteilung der Wertstoff-Gehalte, die letztlich die Mächtigkeit des Lagerstättenhorizontes und die Gestalt der Rohstoffkörper bestimmen;
- die Lagerungsverhältnisse der Rohstoffkörper, also ihr gleichmäßiges oder wechselhaftes Einfallen und die homogene oder veränderliche Mächtigkeitsverteilung;
- die Teufe und die daraus resultierende Deckgebirgsauflast;
- der lithologische Aufbau der Schichtenfolge im Hangenden und im Liegenden des Abbauhorizontes, ihr tektonisches Inventar und insbesondere die Ausprägung der erforderlichen hydrogeologischen Barrieren und ihre räumliche Verbreitung;
- das Vorhandensein von Fluiden in der Lagerstätte und/oder im Hangenden und Liegenden und deren potenziellen Auswirkungen auf die Rohstoffgewinnung.

Aufbauend auf diesen geologischen Charakteristika sind geomechanische Eingangsgrößen zu ermitteln, welche die gesteinsmechanischen Eigenschaften der wesentlichen lithologischen Einheiten der Lagerstätte und des Hangenden und Liegenden, einschließlich der darin eingebetteten Barrieren quantitativ hinreichend beschreiben.

Ebenso wie die Bestimmung der Wertstoffgehalte erfolgt auch die Ermittlung der gesteinsmechanischen Parameter an Proben im Labor. Besondere Bedeutung kommt dabei der Probenahme durch den Geologen zu. Zum einen ist möglichst unverändertes, also nicht durch nachträgliche Umwelteinflüsse (Luftfeuchtigkeit, Relaxation, u.a.) alteriertes Material erforderlich. Zum anderen müssen die Proben ein repräsentatives Abbild der natürlichen Variabilität gewährleisten. Adäquates Probenmaterial kann dabei häufig nur durch Entnahme aus Kernstrecken aktueller Bohrkampagnen gewonnen werden, da über Jahre oder Jahrzehnte archivierte Bohrkerne von Salzgesteinen sowohl Veränderungen in ihrem Stoffbestand als auch in ihrem Korngefüge erfahren haben und somit keine realistischen Ergebnisse der *in situ*-Verhältnisse liefern.

Hinsichtlich der Anforderungen an diese geologisch-geomechanischen Eingangsgrößen unterscheiden sich konventionelle und soltechnische Gewinnung in einigen Aspekten deutlich, so dass sowohl die grundsätzliche technische Machbarkeit eines der beiden Verfahren nicht gegeben sein kann, oder aber die Wirtschaftlichkeit des einen oder anderen Verfahrens in unterschiedlichem Ausmaß beeinträchtigt wird.

Im Vortrag werden solche unterschiedlichen Anforderungen vergleichend diskutiert und der Entscheidungsprozess für die Auswahl des Gewinnungsverfahrens anhand von Projekten in Zentral- und Ostafrika, Südostasien sowie Süd- und Nordamerika exemplarisch erläutert.

Tagesbruch über einer tiefen südamerikanischen Kaverne: Fallbeschreibung und Geomechanik

W. Minkley, C. Lüdeling, M. Nest

IfG - Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig

1 Einführung

Über einem Solfeld in Südamerika sind in den letzten 50 Jahren Senkungen im Bereich mehrerer Meter aufgelaufen. Die Senkungsraten stiegen in den 2010er Jahren an und lagen im Maximum bei über 20 cm/a. Nach einem schwachen Erdbeben wurde der Betrieb der Kavernen eingestellt und Stabilisierungsmaßnahmen eingeleitet. Ende 2023 ereignete sich ein Tagesbruch über einer der Kavernen.

2 Geologische und geotechnische Situation

Das Feld liegt teilweise unter bebautem Gebiet und teilweise unter einem flachen Küstenstreifen bzw. einer Lagune. Es umfasst 35 Kavernen und wurde von den 1970er Jahren bis 2019 betrieben. Eine Reihe von Kavernen ist durch intensive Firstverbrüche ins Deckgebirge gewandert, zum Teil um mehrere Hundert Meter. Zwischen mehreren Kavernen sind dabei Verbindungen aufgetreten.

Nach der Betriebsphase standen die Kavernen unter Soledruck. Durch die intensive Verformung im Deckgebirge sind die Rohrtouren von einige Kavernen beschädigt wurden, so dass auch für Kaverne im Steinsalzlager eine hydraulische Verbindung zu Deckgebirge und ein niedrigerer Innendruck angenommen werden muss. Das Erdbeben von 2018 (Magnitude 2,4) konnte durch die Identifikation von Nachbeben in einer Teufe von ca. 500 m nahe dem Rand des Senkungstrogos lokalisiert werden [1].

Die Kavernen liegen in einem mesozoischen flach gelagerten Steinsalzhorizont in Teufen von etwa 900 m bis 1200 m. Das Deckgebirge besteht aus ebenfalls flach lagernden sedimentären Gesteinen (Tonsteine (*shale*), Sandsteine, Konglomerate, Kalksteine). Das Steinsalz ist von zahlreichen Tonsteinlagen durchzogen.

Solungshorizont und Deckgebirge wurden am IfG eingehend untersucht. Die mechanischen Eigenschaften des Steinsalzes sind vergleichbar denen aus anderen Lagerstätten weltweit. Die eingeschalteten Tonlagen hingegen haben erheblich geringere Festigkeiten, so dass die Gebirgsfestigkeit weit herabgesetzt ist. Die überlagernde Tonsteinschicht weist deutlich höhere Scherfestigkeiten auf, aber sehr geringe Zugfestigkeiten entlang der Schichtung. Auch die folgenden Sandsteine und Konglomerate mit einer Mächtigkeit von etwa 400 m zeigen geringe Festigkeiten (einachsige Druckfestigkeit im Bereich von 5 MPa). Die Kalksteinschichten haben die höchsten Festigkeiten im lokalen Deckgebirge, sind aber vergleichsweise geringmächtig und geklüftet.

Der Vertikalspannung ist in guter Näherung lithostatisch mit einem mittleren Gradienten von 0,022 MPa/m. Die Horizontalspannungen sind aufgrund der Grabenstruktur vergleichsweise gering mit einem Seitendruckbeiwert für die minimale Hauptspannung im Bereich von 0,6 bis 0,75. Der Porendruck ist hydrostatisch.

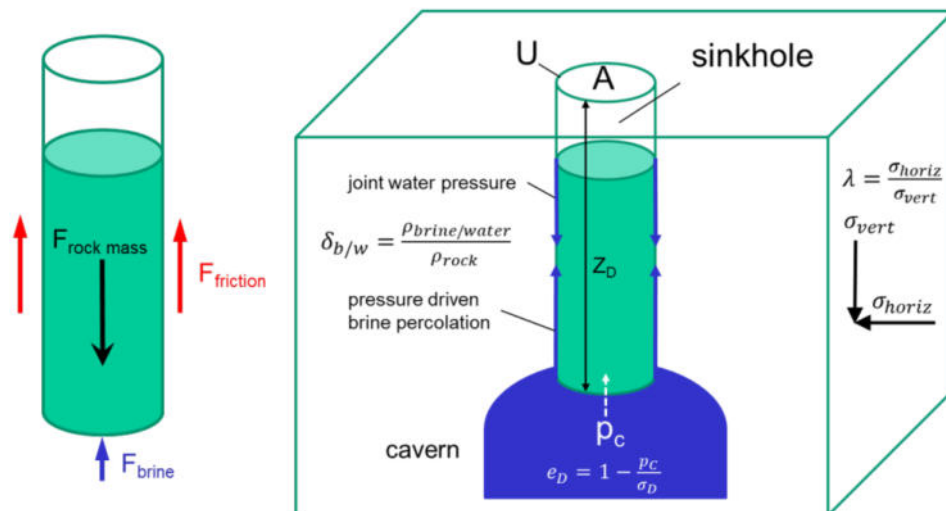


Abbildung 1: Analytisches Modell zum Grenzgleichgewicht für Blockgleiten im Deckgebirge.

3 Tagesbruchentstehung über tiefen Kavernen

Für Kavernen in großen Teufen kann ein Tagesbruch nur auftreten, wenn die nachbrechenden Deckgebirgsmassen keine signifikante Auflockerung erfahren, die das Hohlraumvolumen verzehrt. Gleichzeitig belegen zahlreiche Tagesbrüche mit runden oder elliptischen Querschnitten, dass geologische Störungszonen für die Bildung von Tagesbrüchen nicht erforderlich sind.

In [2] ist ein grundlegender Mechanismus beschrieben, der das Entstehen von Tagesbrüchen auch in großen Teufen erlaubt (Abbildung 1). Kernelement ist dabei ein Fluiddruck auf bestehenden oder neu gebildeten kleintektonischen Kluftflächen, der die effektiven Spannungen und damit den Scherwiderstand herabsetzt und so das Abgleiten großer Deckgebirgsblöcke ohne relevante Auflockerung erlaubt (siehe dazu auch [3,4,5]).

Es ergibt sich ein kritisches Verhältnis von Kavernenumfang und -durchmesser (Formelzeichen siehe Abbildung 1):

$$\left(\frac{A}{U}\right)_{\text{krit}} = \frac{1}{2} \cdot Z_D \cdot \mu_s \left[\frac{\lambda - f_{\text{dyn}} \cdot \delta_{b/w}}{1 - \delta_{b/w}} \right] \quad (1)$$

Für einen kreisförmige Kaverne ist $D_{\text{krit}} = 4 \cdot \left(\frac{A}{U}\right)_{\text{krit}}$. Der kritische Durchmesser wird klein, falls

- der Seitendruckbeiwert näherungsweise gleich dem Verhältnis von Fluid- und Felsdichte ist ($\lambda \approx \delta_{b/w}$), falls also die Horizontalspannung gering oder die Fluideichte hoch ist, oder
- durch dynamische Überdrücke ($f_{\text{dyn}} > 1$), die z.B. durch Firstfälle ausgelöst werden können.

Dieser Mechanismus konnte durch zahlreiche hydromechanisch gekoppelte diskontinuumsmechanische Simulationen gestützt werden [3,4].

4 Fallbeschreibung

Anfang November 2023 wurde durch das auf Empfehlung des IfG installierte mikroseismische Netzwerk im Bereich der benachbarten Kavernen M18 und M05 eine deutliche Zunahme der seismischen Aktivität registriert. Da das Netzwerk Sensoren an der Oberfläche, in 300 m und in ca. 900 m umfasst, konnte die Teufenlage gut bestimmt werden und lag anfangs bei über 1000 m, stieg aber schnell in den Bereich um 700 m. In den nächsten zwei Wochen blieb die mittlere Teufenlage bei abnehmender Rate in etwa konstant, bevor die Intensität wieder zunahm und die seismische Aktivität sich in zwei Stufen nach oben verlagerte (Abbildung 2). Ab dem 27.11.2023 war auch eine signifikante Beschleunigung der Senkung auf mehrere Zentimeter pro Tag zu beobachten. Umliegende Stationen zeigten horizontale Bewegungen aus das Senkungszentrum, in den asphaltierten Bereich waren konzentrische Risse sichtbar. Gleichzeitig traten in 100 m Entfernung nur geringe Verschiebungen auf.

Am 10.12.2023 trat schließlich der Tagesbruch ein; der eigentliche Bruchprozess war nicht durch signifikante seismische Aktivität begleitet. Der entstandene Krater liegt unter der Lagune; durch bathymetrische Messungen wurde die lokalisierte Form mit flachem Boden und steilen Flanken nachgewiesen (Abbildung 1).

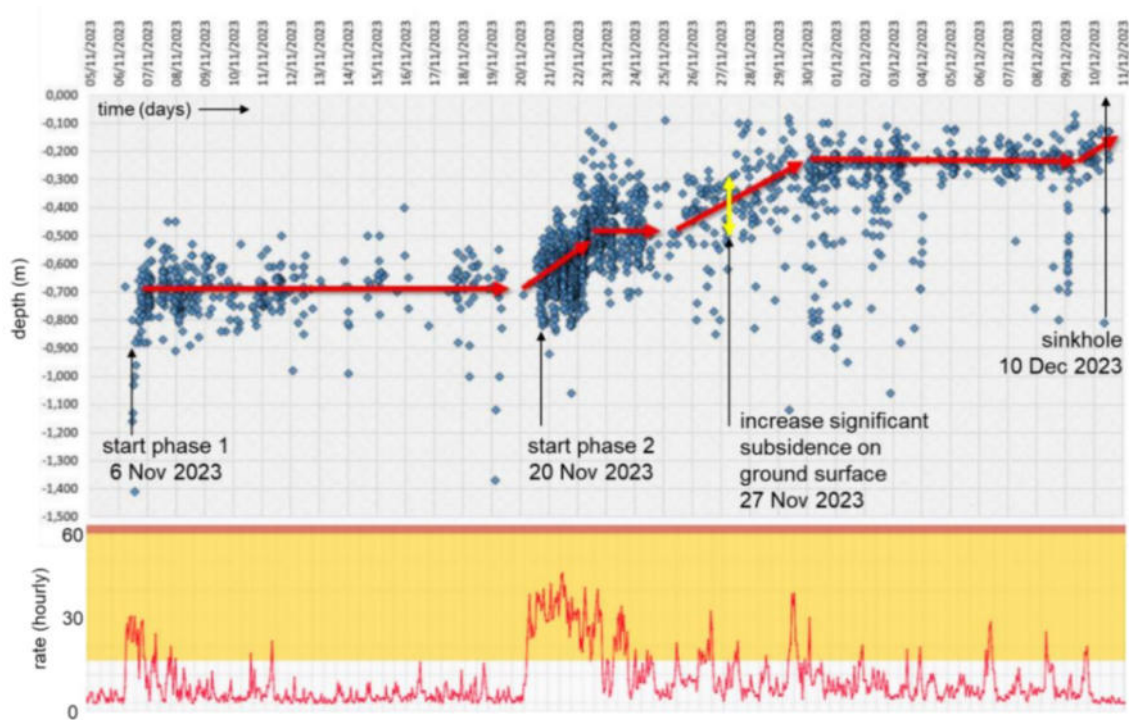


Abbildung 2: Seismische Ereignisse nach Teufe (oben) und Rate (unten).

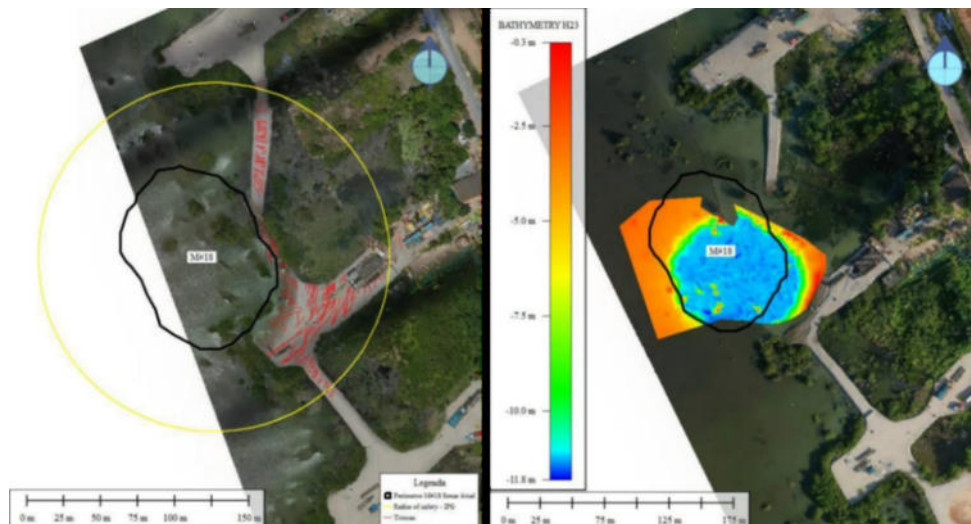


Abbildung 3: Luftbilder wenige Stunden vor (links, mit markierten Rissen auf den Fahrwegen) und nach dem Tagesbruch (rechts, mit Bathymetrie des Gewässergrundes).

5 Gebirgsmechanische Analyse der Tagesbruchentstehung

Der in Kapitel 2 vorgestellte Mechanismus zeigt für den Fall, dass die Sole aus der Kaverne im Deckgebirge das Süßwasser lokal verdrängt hat, dass das Kavernensystem angesichts der geringen Seitendruckbeiwerte und der geringen Festigkeiten nahe des Grenzgleichgewichtes war. Dazu kommt die spezifische Konfiguration mit zwei Kavernen, von denen die eine weit hochgebrochen und durch aufgelockerte Bruchmassen versetzt ist. Als plausibler Auslöser kann eingeschätzt werden, dass der verbleibende Pfeiler zwischen den Kavernen versagte, so dass die Bruchmassen in die tieferen Hohlräume fließen konnten. Anschließend entwickelte sich ein Tagesbruch über der nun solegefüllten oberen Kaverne, indem zunächst durch Bruchprozesse durchgehende Klüfte geschaffen wurden. Als die Klüfte die festeren und steiferen Kalksteinschichten durchdrungen hatten, zeigte sich auch beschleunigte Senkungen an der Tagesoberfläche. Als schließlich eine durchgehende fluidgesättigte Bruchfläche vorlag, bildete sich der Tagesbruch durch Blockgleiten.

6 Numerische Modellierung der Tagesbruchentstehung

Der grundlegende Mechanismus und die wesentlichen Einflussfaktoren wurden bereits in verschiedenen Szenarien numerisch untersucht [3,4]. Für den vorliegenden Fall wurden dreidimensionale hydromechanisch gekoppelte diskontinuumsmechanische Simulationen (mit dem Code 3DEC) durchgeführt, die die Modellvorstellung unterstützen (Abbildung 4).

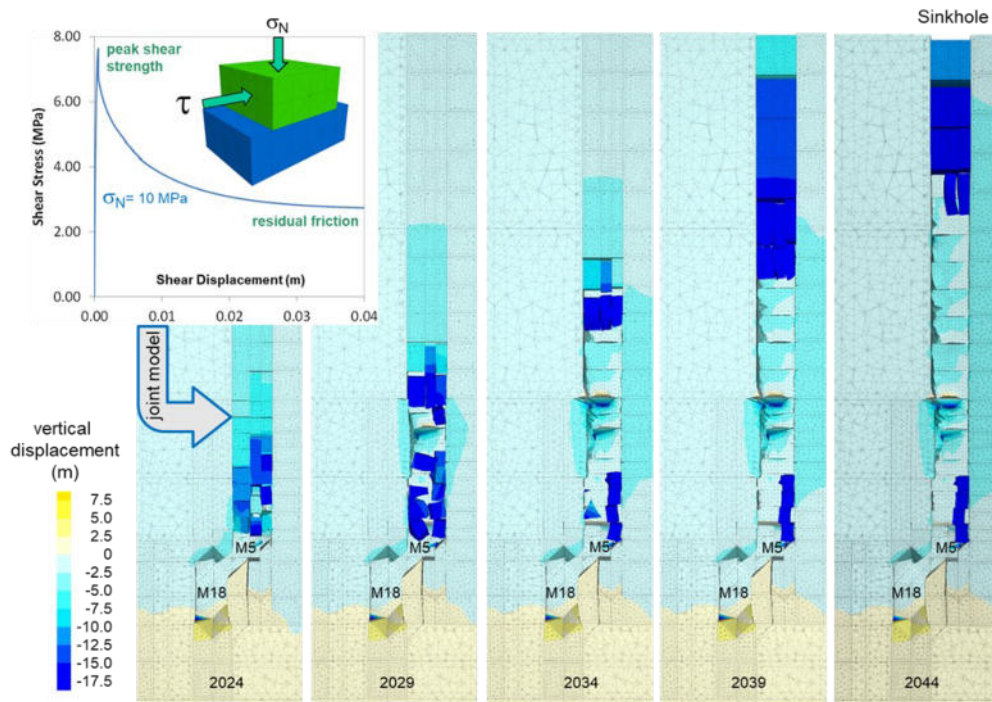


Abbildung 4: Numerische Simulation der Tagesbruchentstehung.

Literatur

- [1] Assumpção, M., Celestino, T. B., Cosgrove, J., de Mello, L. G., Sadowski, G. R (2020): Analysis Report of the possible causes of land instabilities in Pinheiro, Mutange and Bebedouro districts, Maceió (AL). Tech. rep.
- [2] Minkley, W., and Groß, U. (1990): Sliding of blocks in the top rock, a model for rockburst of the regional type. In: Gerlands Beiträge Geophysik 99.5, pp. 487–491
- [3] Minkley, W., Lüdeling, C. (2020): Sinkholes over Deep Caverns. 49. Geomechanik-Kolloquium. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2020-4.
- [4] Minkley, W., Lüdeling, C., Taghichian, A. (2022): Mechanism for the formation of sinkholes above deep salt caverns. SaltMech X, Utrecht on 6-8 July 2022, 590-603, CRC Press/Balkema, ISBN 9781032282206
- [5] Lüdeling, C., Minkley, W., Naumann, D., Brandt, M., Taghichian, A. (2025): Geomechanical Investigation of a Solution Mining Field in Maceió, Brazil. XI. Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Santa Fe, NM, USA

Errichtung eines Demonstrationsbauwerkes im Steinsalz aus MgO-Massenbaustoff: Stand der Arbeiten im Projekt MASTRIS

T. Wilsnack¹, U. Glaubach¹, S. John², L. Hofmann², A. Baum³, R. Bornkessel⁴,
M. Klautschke⁵, A. Engler⁵, T. Teichert⁵, J. Braatz⁶, A. Carstensen⁶

¹IBeWa - Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser und Deponietechnik
Wilsnack und Partner, Freiberg

²K-UTEC AG SALT TECHNOLOGIES, Sondershausen

³GSES - Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH, Sondershausen

⁴SBN – Schachtbau Nordhausen GmbH, Nordhausen

⁵ERCOSPLAN - Erfurter Consulting- und Planungsbüro GmbH, Erfurt

⁶BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) hat für das sich derzeit im Offenhaltungsbetrieb befindliche Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERA Morsleben) die atomrechtliche Stilllegung beantragt. Das Sicherheitskonzept für die Gewährleistung der Erreichung der Schutzziele bei der Stilllegung des ERA Morsleben beschreibt verschiedene Maßnahmen zum langzeitsicheren Abschluss der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre. Dies sind neben Stützversatz, der Abdichtung von Bohrungen und den Schachtverschlüssen auch die Errichtung von Streckenabdichtungen.

Die BGE hat die interdisziplinäre Arbeitsgemeinschaft „Magnesiumoxid STreckenverschluss Im Steinsalz“ (ARGE MASTRIS), die aus den Fachfirmen ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, GSES Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH, IBeWa Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser und Deponietechnik Wilsnack & Partner, K-UTEC AG Salt Technologies und SCHACHTBAU Nordhausen GmbH besteht, mit der Planung, Bauausführung und Untersuchung eines großmaßstäblichen Demonstrationsbauwerkes aus Magnesiabaustoff als Massenbeton im Steinsalzgebirge beauftragt.

Die Errichtung des Demonstrationsbauwerkes dient dem Nachweis der bautechnischen Herstellbarkeit und der Ermittlung erforderlicher Daten zur Bestimmung der Eigenschaften, die benötigt werden, um die Funktionalität von Streckenabdichtungen nach Stilllegung des ERA Morsleben für mögliche Belastungszustände belegen zu können. Anhand der Untersuchungsergebnisse sollen Prognosen für die Entwicklung der Bauwerkseigenschaften und wie sich diese bei zeitlich ändernden Randbedingungen und Belastungen entwickeln, abgeleitet werden.

Das Demonstrationsbauwerk aus Magnesiabaustoff wird in einem bisher unverritzten Teil der Lagerstätte im Bergwerk „Glückauf“ der GSES in einer neu aufgefahrenen Blindstrecke im Staßfurt-Steinsalz errichtet. Es besteht aus einem durch zwei Schalungswände begrenzten Widerlager, einem Abdichtungssegment und einer Druckkammer mit zwei Kontrollkammern.

Im Rahmen der Projektbearbeitung hat die ARGE MASTRIS Planungsunterlagen (Entwurfs-, Genehmigungs- und Ausführungsplanung) als Grundlage für die Errichtung des Demonstrationsbauwerkes, für die durchzuführenden geomechanischen, strömungstechnischen und geophysikalischen Untersuchungen, für das geotechnische und geophysikalische Monitoring, die Testung des Demonstrationsbauwerkes sowie der Nacherkundungen erarbeitet

und mit BGE abgestimmt. Zudem hat die ARGE MASTRIS ein Qualitätssicherungsprogramm für die Durchführung der Arbeiten erstellt.

Im Rahmen des Vortrages werden neben den übergeordneten Zielstellungen des Projektes auch projektspezifische Informationen wie z. B.

- zur Einbaulokation,
- zum Bauwerksentwurf,
- zum einzusetzenden Baustoff,
- zum geplanten Untersuchungsumfang vor, während und nach der Errichtung des Bauwerks,
- zu Ergebnissen von Voruntersuchungen

sowie

- zum Stand der Arbeiten einschließlich der Entwicklung von projektspezifischen Methoden/ Lösungen zur bautechnischen Umsetzung

gegeben.

Endlager Morsleben: Vorläufige geotechnische Ergebnisse des Streckenabdichtungssegmentes im Hauptanhydrit

S. Gehne, A. Hussein, J. Bauer, C. Rohr, M. Miehlbradt, M. Mohlfeld, A. Carstensen, V. Busse

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine

Heute lagern fast 37.000 Kubikmeter schwach- und mittelradioaktive Abfälle im Endlager Morsleben in einer Tiefe von etwa 480 Metern. Die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE) beabsichtigt das Endlager Morsleben stillzulegen, wobei die eingelagerten Abfälle an Ort und Stelle verbleiben sollen. Für die dauerhafte Einlagerung ist ein Sicherheitskonzept erforderlich, mit dem Anspruch, die radioaktiven Abfälle so lange wie möglich aus der Umwelt fernzuhalten.

Das Stilllegungskonzept umfasst dabei drei wesentliche Maßnahmen: den Bau unterirdischer Abdichtbauwerke in Strecken, Bohrungen und einem Wetterrolloch, die umfangreiche Verfüllung des Bergwerks mit Salzbeton sowie die Verschließung der beiden bestehenden Schächte „Marie“ und „Bartensleben“. Das stillgelegte Endlager muss die radioaktiven Abfälle dauerhaft und sicher einschließen und zudem wartungsfrei sein. Da jedoch der Eintritt von Wasser zu einem späteren Zeitpunkt nicht ausgeschlossen werden kann, werden unter Tage spezielle Abdichtbauwerke errichtet. Diese sollen später die radioaktiven Abfälle vom Rest der Grube abtrennen und so von der Umwelt isolieren. Für die Stilllegung des Endlagers Morsleben sind Streckenabdichtungen im Salzgestein und eine im Anhydrit geplant. Um die Funktionsfähigkeit von Streckenabdichtungen systematisch bewerten zu können, sind mechanische und hydraulische Kennwerte notwendig, die durch In-situ-Untersuchungen an Demonstrationsbauwerken gewonnen werden.

Derzeit wird an drei solcher Demonstrationsbauwerke für Streckenabdichtungen gearbeitet, die jeweils unterschiedliche Zielstellungen haben. Ein derartiges Demonstrationsbauwerk im Anhydrit wurde im Endlager Morsleben aus einem MgO-Massenbeton errichtet, welches im Mittelpunkt dieses Vortrages steht. Die wesentlichen Ziele dieses Demonstrationsbauwerks sind die Bewertung der technischen Herstellbarkeit der Abdichtungssegmente, der technischen Herstellung eines Magnesia-Baustoffs, der Einhaltung der technischen Anforderungen an den Baustoff sowie die Bewertung eines vorübergehenden Drucks während des Abbindevorgangs, der die Reibungsverbindung des Baustoffs mit der Felskontur unterstützt. Darüber hinaus werden in dem Versuch auch die Verbindung des Betonkörpers mit dem Hauptanhydrit, die Herstellung der Widerlager gemäß den Anforderungen und die Eigenschaften hinsichtlich der integralen Durchlässigkeit untersucht.

Das Demonstrationsbauwerk besteht aus einer ca. 20 Meter langen Kernbarriere, die zwischen einem Widerlager und der Ortsbrust positioniert ist. Das Programm der geotechnischen und geophysikalischen Messungen umfasst Messungen während der Bauphase des Bauwerks und in der Zeit nach Fertigstellung des Bauwerks. Insgesamt sind etwa 270 geotechnische und geophysikalische Sensoren im Bauwerk installiert. Stationäre Temperatur-, Spannungs- und Verformungs-, Ultraschall- und mikroakustische Messsysteme sind im Bauwerk selbst, in der Kontaktzone zwischen Baukörper und dem Anhydrit sowie im umgebenden Gestein installiert. Als Baumaterial wird ein an die örtlichen Anforderungen angepasster Massengestein auf Magnesiumoxidbasis (MgO) verwendet. Im Vergleich zu anderen Betonsorten zeichnet sich MgO-Beton durch eine hohe Wärmeabgabe während des Abbindeprozesses aus. Das Material sollte

beim Abbinden Druck aufbauen, um Risse zwischen Baukörper und Gebirge zu vermeiden und eine vollständige Verbindung mit dem umgebenden Gestein zu gewährleisten. Die Temperaturen im Baukörper wurden im Voraus mithilfe einer thermischen Analyse bewertet. Aufgrund der erwarteten hohen Temperaturen während des Abbindeprozesses, wurden im Vorfeld Versuche mit den geotechnischen und geophysikalischen Messinstrumenten durchgeführt.

Diese Präsentation gibt einen Überblick über die Herstellung des Demonstrationsbauwerks, über die vorläufigen Ergebnisse der In-situ-Messungen im Demonstrationsbauwerk im Anhydrit und zieht einen Vergleich mit den im Vorfeld durchgeführten numerischen Berechnungen.

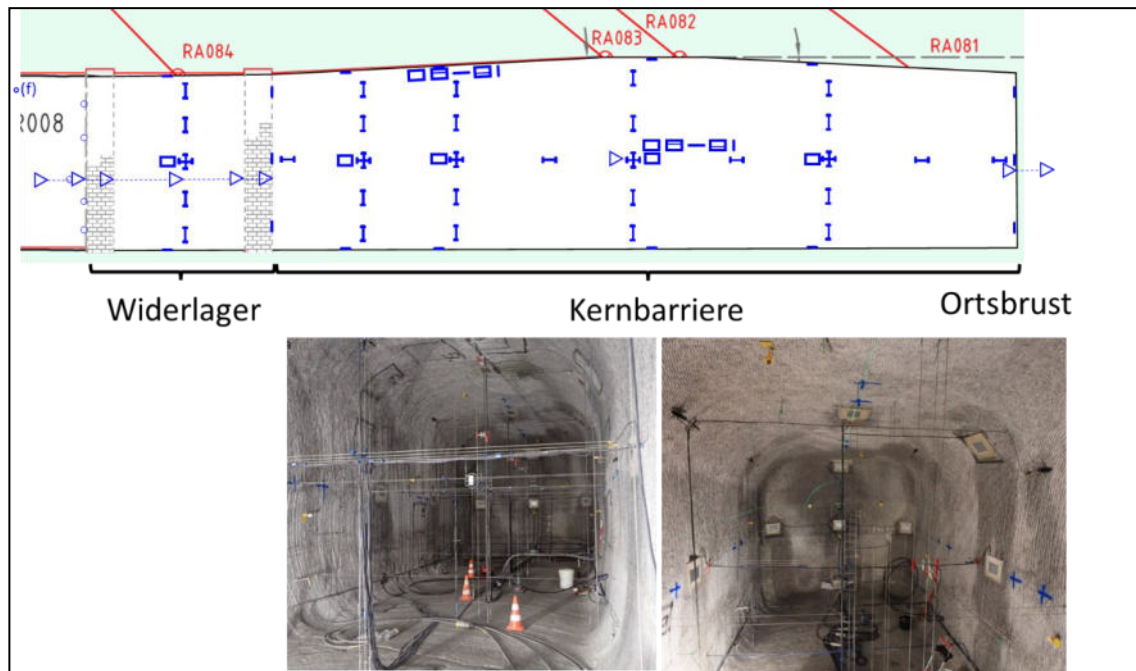


Abbildung 1: Schematischer Plan des Demonstrationsbauwerks im Anhydrit mit geotechnischen und geophysikalischen Sensoren in Blau (oben), Bilder der installierten geotechnischen und geophysikalischen Sensoren in der Kernbarriere (unten)

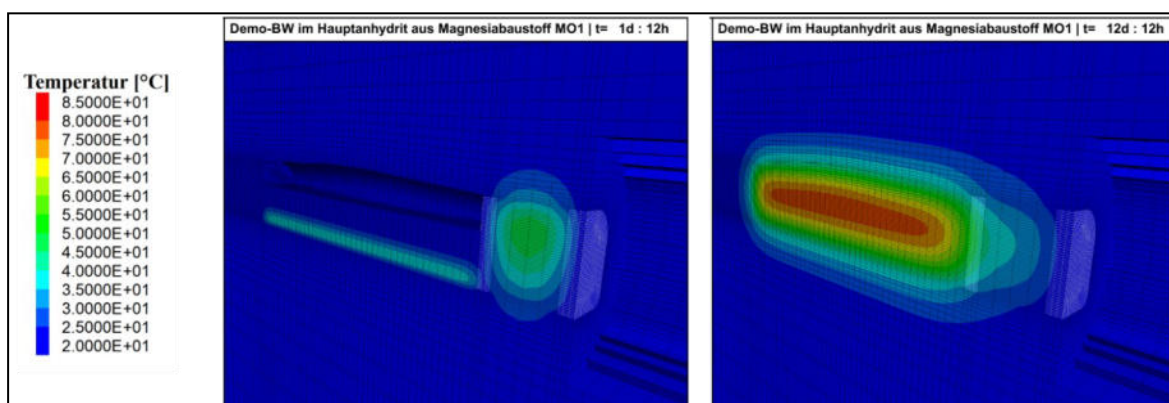


Abbildung 2: Demonstrationsbauwerk im Hauptanhydrit: Temperaturentwicklung während des Abbindeprozesses von MgO-Beton zu zwei verschiedenen Zeitpunkten, nach 1,5 Tagen (links) und nach 12,5 Tagen (rechts).

Demonstrationsbauwerk für eine Streckenabdichtung im Anhydrit aus Magnesiabaustoff als Spritzbeton und Bitumen / Asphalt: Stand der Arbeiten im Projekt DeSPriBi

T. Popp¹, M. Wiedemann¹, C. Lüdeling¹, D. Freyer², I. Paschke², M. Gruner², C. Arnold³
A. Carstensen⁴, T. Serwatka⁴

¹IfG – Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig

²TUBAF – TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie, Freiberg

³SBN - Schachtbau Nordhausen GmbH, Nordhausen

⁴BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH, Peine

Salzgesteine (insbesondere Steinsalz) bieten aufgrund ihrer günstigen Wirtsgesteinseigenschaften (z. B. hydraulische Dichtheit, Plastizität) hervorragende Voraussetzungen für den sicheren Einschluss radioaktiver Abfälle in einer Salzstruktur mit Konzentration der Nuklide am Lagerort. Im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) lagern knapp 37 000 Kubikmeter schwach- und mittelradioaktive Abfälle in einer Tiefe von rund 480 Metern. Das ERAM befindet sich zurzeit im Offenhaltungsbetrieb und die atomrechtliche Stilllegung ist beantragt.

Der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle in der Salzstruktur und die Konzentration am Ort der Einlagerung werden für das ERAM durch das Zusammenwirken der vorhandenen geologischen Barriere mit geotechnischen Barrieren gewährleistet, die ein robustes, gestaffeltes Barriersystem um die Gebirgsbereiche bilden, in denen die radioaktiven Abfälle eingelagert sind.

Im Rahmen der Stilllegung ist die Errichtung von 25 geotechnischen Barrieren als Streckenabdichtungen geplant.

Diese Streckenabdichtungen befinden sich vorzugsweise im kriechfähigen Steinsalz, wo die integrale hydraulische Dichtheit der geotechnischen Barrieren mit zunehmendem Aufkriechen des umgebenden Salzgesteins auf den Abdichtungskörper zunimmt. Eine der abzudichtenden Strecken befindet sich jedoch in einer Anhydritstruktur. Anhydrit ist ein natürlicher Bestandteil der salinaren Abfolge von Salzablagerungen, die insbesondere in den europäischen Zechsteinstrukturen in großen Mächtigkeiten (bis zu mehrere zehner Metern Mächtigkeit) auftreten können. Anhydrit unterscheidet sich in seinem geomechanischen Verhalten (z. B. hohe Festigkeit, sprödes Bruchverhalten) grundlegend von den benachbarten Salzgesteinen wie Steinsalz oder Kalisalz, insbesondere kriecht Anhydrit nicht.

Beim Streckenvortrieb in Anhydrit im Bohr- und Sprengverfahren und durch Spannungsumlagerungen während der offenen Standzeit entsteht zwangsläufig eine dilatante, durchlässige Kontaktzone und Auflockerungszone (ALZ) im Dezimeterbereich. Vor der Errichtung der Dichtsegmente wird die ALZ durch einen mehrphasigen Nachschnitt reduziert. Es bildet sich allerdings durch den Einsatz von Schneid- und Polierköpfen eine nachschnittbedingte Zone (NBZ) aus. Im Gegensatz zu Strecken im Steinsalz können sich diese geschädigten Zonen jedoch aufgrund der fehlenden Kriechfähigkeit nicht mit der Zeit (nach dem Einbau des Dichtsegments) zurückbilden. Zudem weist Anhydrit zusätzlich noch Klüfte auf. Diese können im Zusammenwirken mit den durch bergmännische Tätigkeiten initiierte geschädigte Zonen (ALZ und NBZ) zu einer Umströmung der Streckenabdichtung führen, weshalb für diese Strecken ein spezielles Abdichtungskonzept erforderlich ist. Aus diesem Grund wird im Rahmen

des F&E-Projekts DeSpriBi ein neuer Ansatz für die Herstellung der Streckenabdichtung im Anhydrit entwickelt, der die Sicherheitsfunktion (dauerhafte Behinderung des Zutritts von Lösungen in den Bereich mit Einschlusswirkung und Auspressung aus diesem heraus so gut wie technisch möglich) auch ohne Konvergenz des umgebenden Anhydrit erfüllt. Das neue Konzept besteht aus einer Kombination eines geeigneten Baustoffs für die Strecke und zusätzlichen technischen Maßnahmen, z. B. der Injektion der Kontaktzone zwischen Baukörper und dem geschädigten Anhydrit.

Im Sicherheitskonzept zur Stilllegung des ERAM wird die Streckenabdichtung im Anhydrit aus mehreren hintereinander angeordneten Dichtsegmenten hergestellt, wobei unter Berücksichtigung der Grundprinzipien von Redundanz und Diversität kaskadenartig angeordnete Einzelbauwerke sowohl in Ortbeton- und auch mittels Spritzbetontechnologie aus MgO-Baustoffen errichtet werden sollen. Das mit dem Vorhaben DeSpriBi zu errichtende Demonstrationsbauwerk basiert auf der Kombination von zwei kombiniert wirkenden Dicht- und Widerlagerelementen auf MgO-Spritzbeton-Basis, wie sie ursprünglich als Konzept im Forschungsprojekt CARLA für die Herstellung von Abdichtungen im Carnallit entwickelt und erprobt wurden (Knoll et al., 2010). Dazwischen wird ein zusätzliches Bitumen-Schott installiert, das sowohl als Flächendichtung wirksam ist, als auch mit einem umlaufenden Schram in der Anhydrit-Kontur noch die Kontaktzone zum Bauwerk sowie die angrenzende geschädigte Anhydrit-Kontur abdichtet (Abbildung 1).

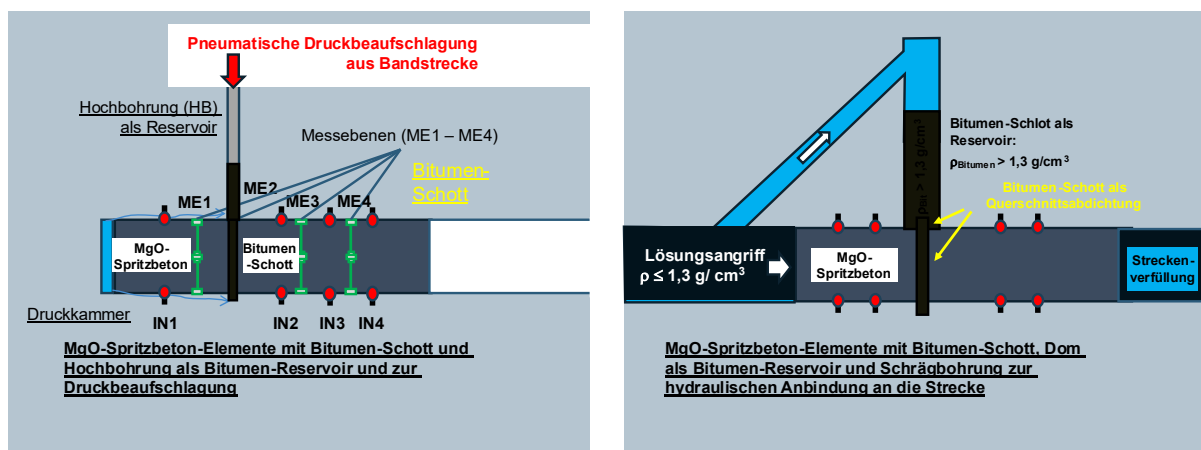


Abbildung 1: DeSpriBi-Konzept Bernburg (links) und technisches Konzept für die Stilllegung ERAM (rechts) (Schemazeichnungen).

Die aktuell verfügbaren MgO-basierten Baustoffe mit unterschiedlichen Rezepturen weisen spezifische stoffliche und hydro-mechanische Eigenschaften (z. B. Festigkeit, Dichtheit, thermisches Abbindeverhalten) (Freyer et al., 2015) auf. Während alle MgO-Baustoffe nach dem Abbinden mindestens volumenkonstant sind (im Gegensatz zu zementbasierten Baustoffen), enthält der MgO-Spritzbeton mit seiner 5-1-8-Rezeptur zusätzlich noch erhebliche Mengen an freiem, reaktivem Rest-MgO. Die beim Eindringen einer MgCl_2 -Lösung in den MgO-Spritzbeton-Baukörper einsetzende Reaktion führt zur Selbstabdichtung vorhandener Wegsamkeiten im Baukörper und gewährleistet so dessen Dichtheit. Der Bereich zwischen Baustoff und Anhydrit mit NBZ ist hydraulisch eine potenzielle Schwachstelle, weshalb sie bei den Dichtsegmenten aus MgO-Spritzbeton zusätzlich noch mit Injektionsmitteln injiziert wird, um diese Fließwege zu unterbrechen.

Das zwischen zwei MgO-Spritzbeton-Segmenten liegende Bitumen-Schott (Abbildung 1) wird mittels beschwerten Bitumens ($\rho > 1,3 \text{ g/cm}^3$, Einbautemperatur $< 140 \text{ °C}$) hergestellt, womit im Bauwerk noch eine zusätzliche Flächendichtung (Dichtsegment) vorhanden ist, die über einen in die Kontur reichenden Schram zusätzlich noch zur Abdichtung der Kontaktzone und ALZ dient. Oberhalb des Bitumen-Schotts befindet sich ein angeschlossener Bitumen-Schlot, womit ein möglicher Volumenschwund (z.B. durch thermische Kontraktion des Heißbitumens bzw. infolge des Volumenverlusts in Wegsamkeiten durch gravitatives Abwandern unter Eigengewicht oder unter hydraulischer Belastung durch einen Lösungsdruck) als Reservoir kompensiert wird. Über eine schräge Verbindungsbohrung (aus der Zugangsstrecke für die Lösung) zum Bitumenschlot wird ein Flüssigkeits- oder Gasdruck auf das Bitumen übertragen, wodurch eine dauerhafte Querschnittsdichtung mit dauerhafter Wirksamkeit gegenüber einem Fluidruck. (s. Abbildung 2) erreicht wird.

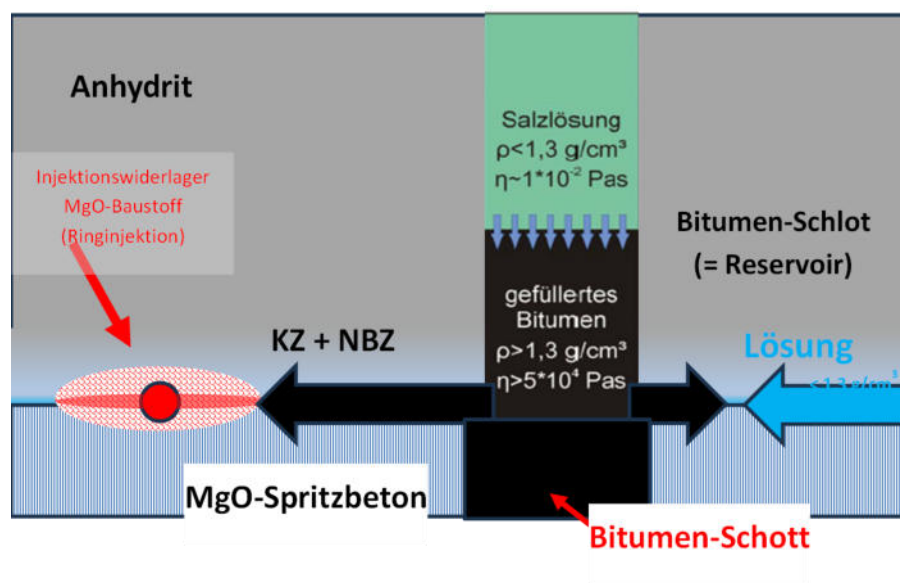


Abbildung 2: Aktives Abdichtprinzip mittels beschwertem Bitumen, auf das ein Lösungsdruck von oben wirkt, womit das Bitumen sich horizontal in Wegsamkeiten ausbreitet.

Die technische Umsetzung des MgO-Spritzbeton-Konzepts in Anhydrit mit dem Bitumen-Schott wird derzeit im Bergwerk Bernburg im Anhydrit in einem maßstabsgetreuen -Demonstrationsbauwerk umgesetzt.

Die Ziele des von der BGE finanzierten und fachlich begleiteten F&E-Projektes sind:

- (1) Die Konstruktion der Systemelemente aus MgO-Spritzbeton und Bitumen im Anhydrit,
- (2) die Ermittlung und Dokumentation der mechanischen und hydraulischen Eigenschaften in Abhängigkeit der verwendeten Baustoffe (u.a. MgO-Spritzbeton, beschwertes Bitumen, Injektionsmittel),
- (3) die Entwicklung eines funktionsoptimierten Abdichtungssystems für die Randbedingungen im ERAM unter Verwendung der Systemelemente MgO-Massenbaustoff, MgO-Spritzbeton und Bitumen sowie Injektionsmittel basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen und

(4) die Entwicklung eines Qualitätssicherungsprogramms für die Errichtung von Dichtsegmenten aus MgO-Spritzbeton mit Injektion und aus beschwertem Bitumen als Grundlage für das Genehmigungsverfahren zur Stilllegung des ERAM.

Das Projekt wird seit Frühjahr 2023 von einem Konsortium aus dem IfG, der TU BA Freiberg und SBN am Standort Bernburg im Steinsalzbergwerk (K+S) durchgeführt. Die Errichtung des Demonstrationsbauwerks hat in einer neu aufgefahrenen Strecke begonnen (07/2024) und soll 2026 abgeschlossen sein.

Literatur

Freyer D, Gruner M. & Popp T (2015): Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffes. – Freiburger Forschungsheft E15 – Naturwissenschaften, 1. Auflage, 2015, Verlag der TU Bergakademie Freiberg, ISBN 978-386012-516-8.

Knoll, P., Finder, M., Kudla, W. (2010): Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV, Teil 2: Erprobung von Funktionselementen. Zusammenfassender Abschlussbericht, FuE-Vorhaben (FKZ 02 C 1204). Grube-Teutschenthal-Sicherungs-GmbH, Dezember 2010.

Platz für Ihre Notizen:

Platz für Ihre Notizen: