



TUBAF

Die Ressourcenuniversität.
Seit 1765.



Institut für Geotechnik
Professur für
Gebirgs- und
Felsmechanik/Felsbau
Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky

„Auswirkungen von Sprengungen auf die Barriereintegrität für das Vorhaben Altertheimer Mulde“

Auftraggeber: Knauf Gips KG
Am Bahnhof 7
97346 Iphofen

Auftragnehmer: Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky
Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg
Gustav –Zeuner-Straße 1
09599 Freiberg

Bearbeiter: Dr.-Ing. Roy Morgenstern
Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky

Umfang: 18 Seiten mit 11 Abbildungen

.....
Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky

Datum: 18.08.2025

Die im Bericht getroffenen Aussagen und entwickelten Lösungsansätze gelten stets für die genannten Parameter (Anfangs- und Randbedingungen, Materialkennwerte etc.). Eine Übertragung auf andere Konstellationen ist ohne vorherige Prüfung nicht zulässig.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung und Grundlagen.....	4
Modellaufbau und -annahmen.....	5
Berechnungsergebnisse.....	10
Diskussion der Ergebnisse.....	16
Literaturverzeichnis.....	18

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Aufgeschnittene Darstellung des verwendeten dynamischen Rechenmodells. Dargestellt sind die zentral aufgefahrene Kammer, die angrenzenden Pfeilerbereiche sowie der Firstbereich. Die Schnittführung ermöglicht eine Visualisierung der strukturellen Anordnung und der geometrischen Bedingungen im Modell.....	5
Abbildung 2: Blick in die zentral aufgefahrene Kammer. Über der Kammer ist die 9 m mächtige Ton-Sulfat-Wechselagerung (TSW=y_lg) einschließlich der angesetzten Anbaubank (bestehend aus y2) dargestellt. Dieser Bereich wurde im Modell konservativ einheitlich mit den Materialparametern der Einheit y-lg abgebildet.....	6
Abbildung 3: Amplitude des Sprengsignals im Vergleich mit den Schwinggeschwindigkeiten aus dem Sprenggutachten (Krämer, 2025) für Sohle und Firste separat in Abhängigkeit der Entfernung des Schusspunktes. Die schwarzen Punkte stellen den max. beobachteten Schwingungsbetrag aller drei Schüsse dar. In allen betrachteten Entfernungen liegen diese entweder über oder auf den Schwinggeschwindigkeiten, welche durch das Sprenggutachten vorgegeben sind (rote Sterne).....	7
Abbildung 4: Blick in die teilaufgefahrene Kammer. Sichtbar sind unter anderem die Beobachtungspunkte an Sohle und Firste, die entlang einer Linie entgegengesetzt zur Vortriebsrichtung angeordnet sind. Diese dienen der Kalibrierung und dem Vergleich der berechneten Sprengwirkung mit den Werten aus dem Sprenggutachten.....	8
Abbildung 5: Verwendetes Sprengsignal.....	8
Abbildung 6: Plastifizierungszustand nach drei erfolgten Sprengungen (3 Abschlägen)	11
Abbildung 7: Logarithmische volumetrische Dehnungen (Dilatanz) nach Durchführung der drei Sprengungen.....	12
Abbildung 8: Plastifizierungszustand nach drei erfolgten Sprengungen und nachgeschalteter Festigkeitsreduktion mit Faktor 2.0.....	13
Abbildung 9: Logarithmische volumetrische Dehnungen (Dilatanz) nach Durchführung der drei Sprengungen und nachgeschalteter Festigkeitsreduktion mit Faktor 2.0.....	14
Abbildung 10: Volumetrische Deformationen der Einzelschichten aus y-lg für die drei untersuchten Zustände. Die Sterne stellen den Mittelwert aus der gesamten Einzelschicht und die Dreiecke die Mittelwerte des dilatanten Anteils in der Schicht dar (,dynamic' bezeichnet die dynamische Berechnung ohne Festigkeitsreduktion, d.h. den Zustand nach den erfolgten drei Sprengungen). Die mit Stern bzw. Punkt markierten Mittelwerte entstammen den jeweiligen Zonenmittelpunkten (slices). Die Zonen innerhalb der Barriere sind ca. 0.8 m hoch, d.h. es ist eine 9 m mächtige Barriere inkl. Anbaubank dargestellt (die Firste fällt mit der unteren Zonenkante bei 10 m zusammen).....	15
Abbildung 11: Mächtigkeit der Barriere [Knauf, 2024].....	17

Einleitung und Grundlagen

Die Fa. Knauf plant ein neues untertägiges Bergwerk im Raum Altertheim (Bayern). Dazu wurde eine entsprechende Dimensionierung für ein langfristig ohne Ausbaustandsicheres Kammer-Pfeiler-System durchgeführt (Morgenstern, Konietzky, Frühwirt, 2023). Weiterhin wurde unter Berücksichtigung dieser Dimensionierung die Barriereintegrität nachgewiesen (Morgenstern, Friedel & Konietzky, 2024a,b). Zu beachten ist, dass der damalige Nachweis auf Kammerhöhen von bis zu 10 m basierte und die Barriere lokal nur mit 7 m angesetzt war. Eine gegebenenfalls erforderliche Anbaubank in der Firste wurde damals nicht betrachtet. Im Gegensatz dazu liegt diesem Bericht das aktuell geplante Abbauschema zugrunde.

Grundlage für die hier vorgestellten Modellierungen bilden die bereits in vorangegangenen Berichten genutzten numerischen Modelle und Parameter. Die Modelle selbst sind in den erwähnten Berichten detailliert beschrieben, weshalb auf eine erneute Beschreibung hier verzichtet wird.

Inhalt dieses Berichtes ist eine Untersuchung, ob - und wenn ja, inwieweit - die untertägigen Abbausprengungen die Integrität der Barriere beeinflussen. Dies erfordert eine dynamische Simulation, die eine modifizierte Vernetzung, die Anwendung dynamischer Randbedingungen, dynamische Dämpfung sowie die Annahme eines dynamischen Eingangssignals als Abbildung des Sprengimpulses bedingt. Außerdem ist eine vollständige 3D-Betrachtung erforderlich, um die Abstrahlung des Wellenfeldes im Nahfeld komplett zu erfassen.

Da dynamische Simulationen wesentlich aufwändiger als statische sind, wurde aus dem statischen Modell zur Barrierebewertung ein Teilmodell „herausgeschnitten“ und zu einem vollständigen 3D-Teilmodell erweitert. Als Teilmodell wurde aus konservativer Sicht der Teil ausgewählt, der die geringste Barrieremächtigkeit und die größte Plastifizierung bzw. Dilatanz im Barrierebereich bei den statischen Berechnungen zeigte.

Modellaufbau und -annahmen

Das vorliegende Modell ist ein Submodell des übergeordneten Modells zur Bewertung der Barriereintegrität. Es wurde aus dem Gesamtmodell im Bereich zwischen 3320 m und 3784 m herausgelöst (vgl. Abbildung 1). In diesem Bereich beträgt die Mächtigkeit der als Barrierschicht geltenden Ton-Sulfat-Wechselagerung (TSW) lediglich 6,3 m. Da das von Knauf vorgesehene aktuelle Abbauschema in solchen Fällen vorschreibt, eine mindestens 9 m mächtige Barrierschicht zu belassen, wird analog zur geplanten Umsetzung modellseitig eine 3 m dicke Anbaubank an der Firste ergänzt. Dadurch ergibt sich eine Kammerhöhe von 7 m, wie im Abbauschema vorgesehen. Die horizontalen Modellabmessungen betragen damit 464 m x 116 m. Die Oberkante des Modells stellt die Erdoberfläche dar.

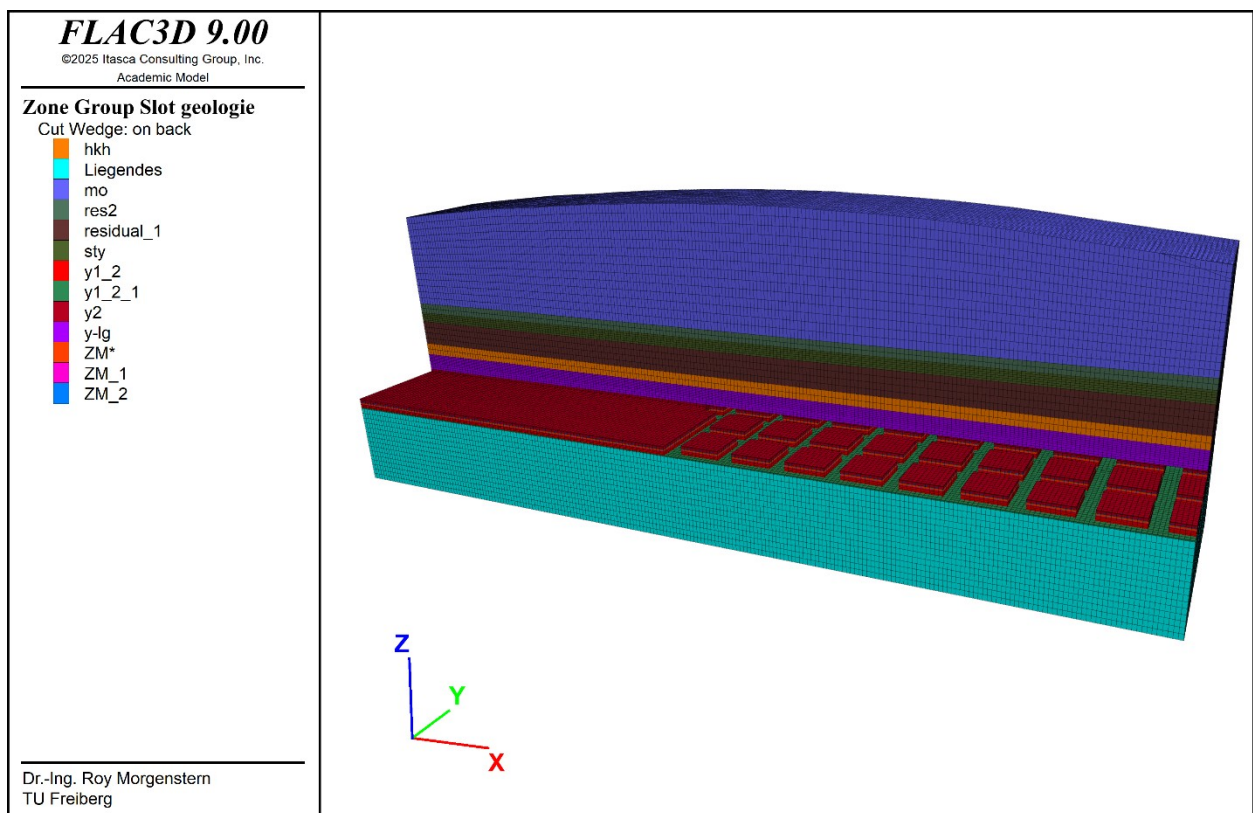


Abbildung 1: Aufgeschnittene Darstellung des verwendeten dynamischen Rechenmodells. Dargestellt sind die zentral aufgefahrene Kammer, die angrenzenden Pfeilerbereiche sowie der Firstbereich. Die Schnittführung ermöglicht eine Visualisierung der strukturellen Anordnung und der geometrischen Bedingungen im Modell.

Diese Anbaubank wird konservativ mit den mechanischen Parametern der Barrierschicht modelliert (im Modell als *y-lg* bezeichnet), obwohl dort üblicherweise Gips mit signifikant höheren Festigkeitswerten ansteht (im Modell mit *y2* gekennzeichnet). Damit wird eine zusätzliche Konservativität in die Modellierung eingeführt (vgl. Abbildung 2).

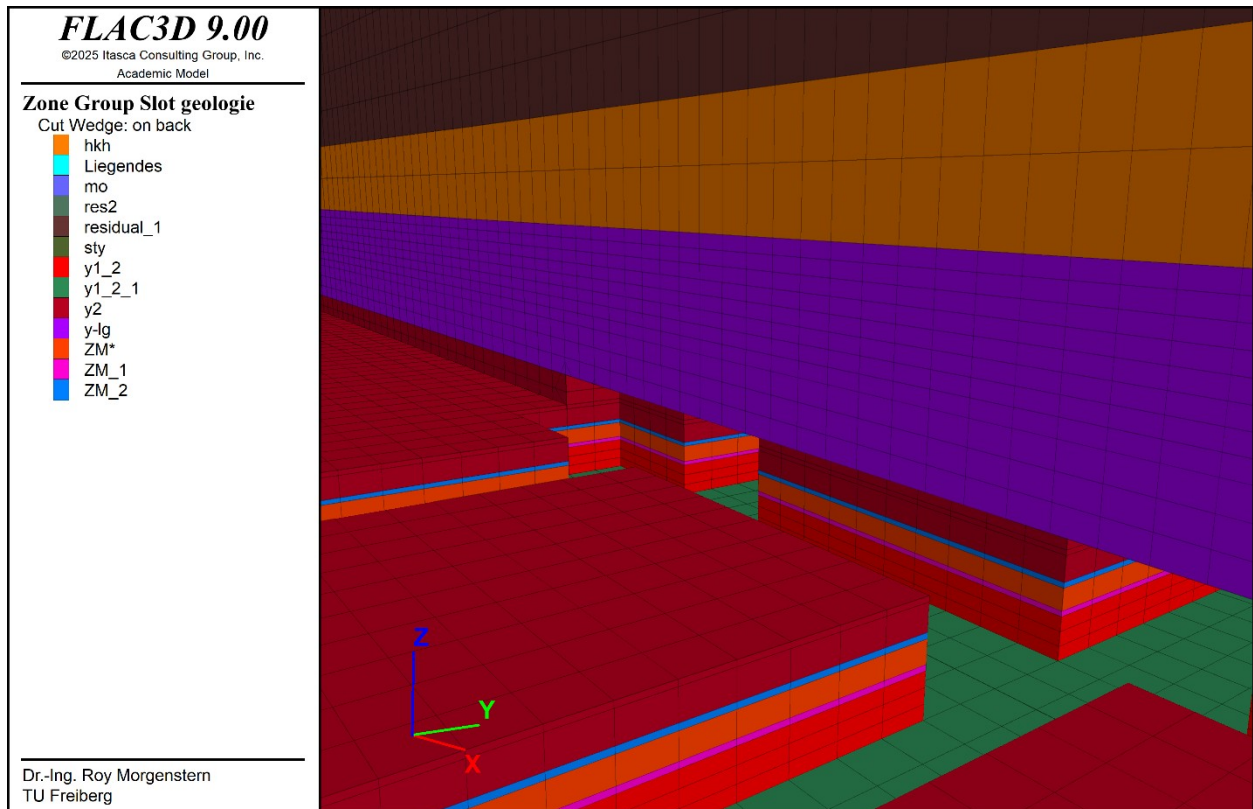


Abbildung 2: Blick in die zentral aufgefahrene Kammer. Über der Kammer ist die 9 m mächtige Ton-Sulfat-Wechselagerung (TSW=y_{lg}) einschließlich der angesetzten Anbaubank (bestehend aus y₂) dargestellt. Dieser Bereich wurde im Modell konservativ einheitlich mit den Materialparametern der Einheit y_{lg} abgebildet.

In diesem Modell werden drei aufeinander folgende Sprengungen in einer Kammer simuliert. Die gesamte Berechnungssequenz beinhaltet folgende Schritte:

- Initialisierung des Modells ohne Hohlräume
- Auffahrung eines Kammer-Pfeiler-Systems (statische Berechnung)
- Umstellung auf dynamische Berechnung
- Simulation 1. Sprengung (dynamische Berechnung)
- Simulation 2. Sprengung (dynamische Berechnung)
- Simulation 3. Sprengung (dynamische Berechnung)
- Umstellung auf statische Berechnung
- Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5 (statische Berechnung)
- Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0 (statische Berechnung)

Die modellierte Auffahrung erfolgt in negativer x-Richtung. Der Modellzustand entspricht einer teilrealisierten Auffahrung, beginnend vom maximalen x-Wert in Richtung des minimalen x-Werts. Betrachtet wird ein Sprengvortrieb mit drei Einzelsprengungen einer zentral gelegenen Kammer. Die Wirkung der Sprengungen wird anhand von Beobachtungspunkten in Sohle und Firste der Kammermitte analysiert und mit den Werten aus dem Sprenggutachten von Krämer (2025) kalibriert und verglichen (vgl. Abbildung 3). Die Vorgaben von Krämer (2025) basieren auf empirischen Beziehungen, wobei insbesondere der Bereich der Abstandsbeziehung Relevanz hat, der die Entfernung vom Einbruch bis zum Ende der Barrierschicht überstreicht.

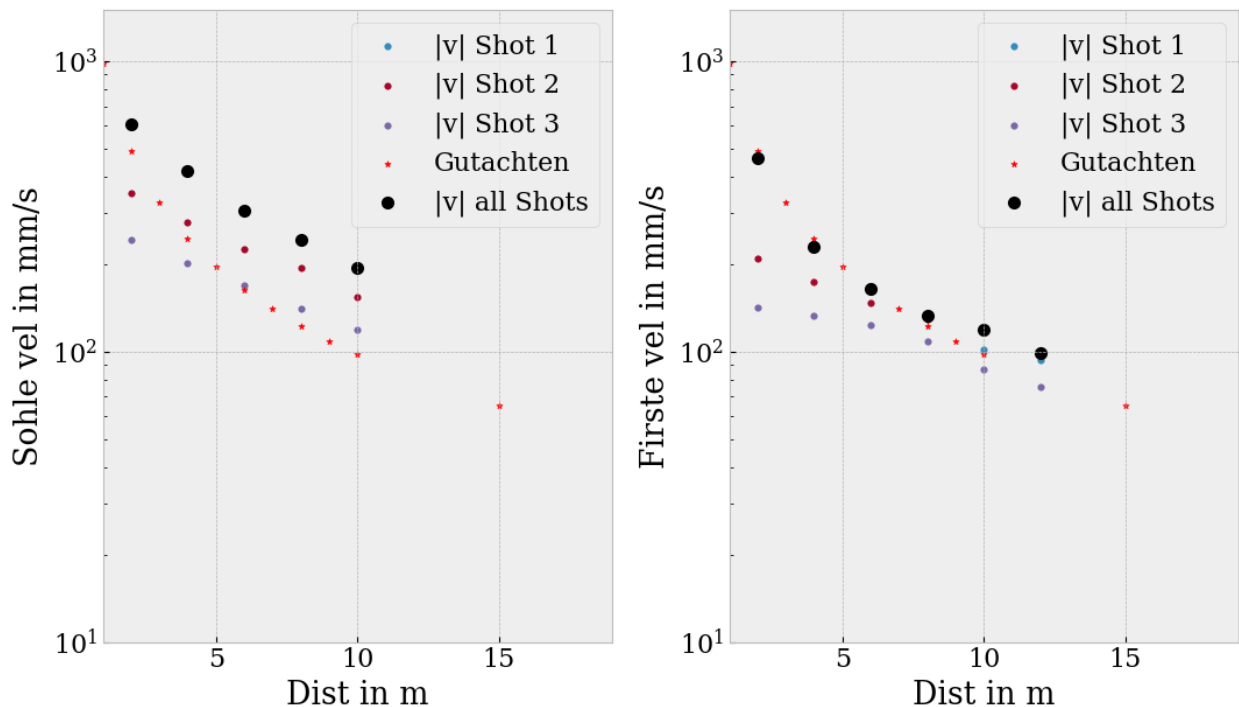


Abbildung 3: Amplitude des Sprengsignals im Vergleich mit den Schwinggeschwindigkeiten aus dem Sprenggutachten (Krämer, 2025) für Sohle und Firste separat in Abhängigkeit der Entfernung des Schusspunktes. Die schwarzen Punkte stellen den max. beobachteten Schwingungsbetrag aller drei Schüsse dar. In allen betrachteten Entfernungen liegen diese entweder über oder auf den Schwinggeschwindigkeiten, welche durch das Sprenggutachten vorgegeben sind (rote Sterne).

Diese Beobachtungspunkte sind entlang einer Linie in positiver x-Richtung angeordnet, beginnend 4 m vor dem ersten Abschlagspunkt in Richtung unverritztes Gebirge versetzt (vgl. Abbildung 4).

Die Simulation der Auffahrung erfolgt in drei aufeinanderfolgenden Abschlügen mit Längen von jeweils 4,3 m, was durch die Netzauflösung im Modell vorgegeben ist und in guter Näherung den realen Abschlägslängen in-situ entspricht. Insgesamt ergibt sich somit eine modellierte Auffahrungslänge von knapp 13 m.

Die Sprengungen selbst werden dynamisch berechnet. Dabei kommen die bereits bekannten, konservativ angesetzten Steifigkeiten und Festigkeitswerte aus dem Barriere-Modell zum Einsatz (statische Parameter). Auf die üblicherweise höheren dynamischen Materialkennwerte wird bewusst verzichtet, um den konservativen Charakter der Modellierung zu unterstreichen.

Als Sprengsignal wird ein 50-Hz-Sweep mit einer maximalen Amplitude von 980 mm/s verwendet (Abbildung 5). Dieses Signal wird vollflächig über die gesamte Kammerbreite aufgebracht, beginnend an der Sohle bis 1,5 m unterhalb der Firste. Der darüberliegende Bereich wird gebirgsschonend mittels Sprengschnur gelöst, wodurch die Einwirkung auf die Firste in diesem Abschnitt deutlich geringer ausfällt als beim initialen Heraussprengen des Materials im unteren Kammerbereich. Daher wird im Modell ausschließlich der Bereich bis 1,5 m unterhalb der Firste betrachtet. Die entsprechende Lademenge beträgt 24 kg pro Zündzeitstufe. Das Sprengsignal wird als Geschwindigkeits-Randbedingung in allen drei Raumrichtungen (x, y, z) an der gesamten Ortsbrust bis 1,5 m unterhalb der Firste aufgebracht.

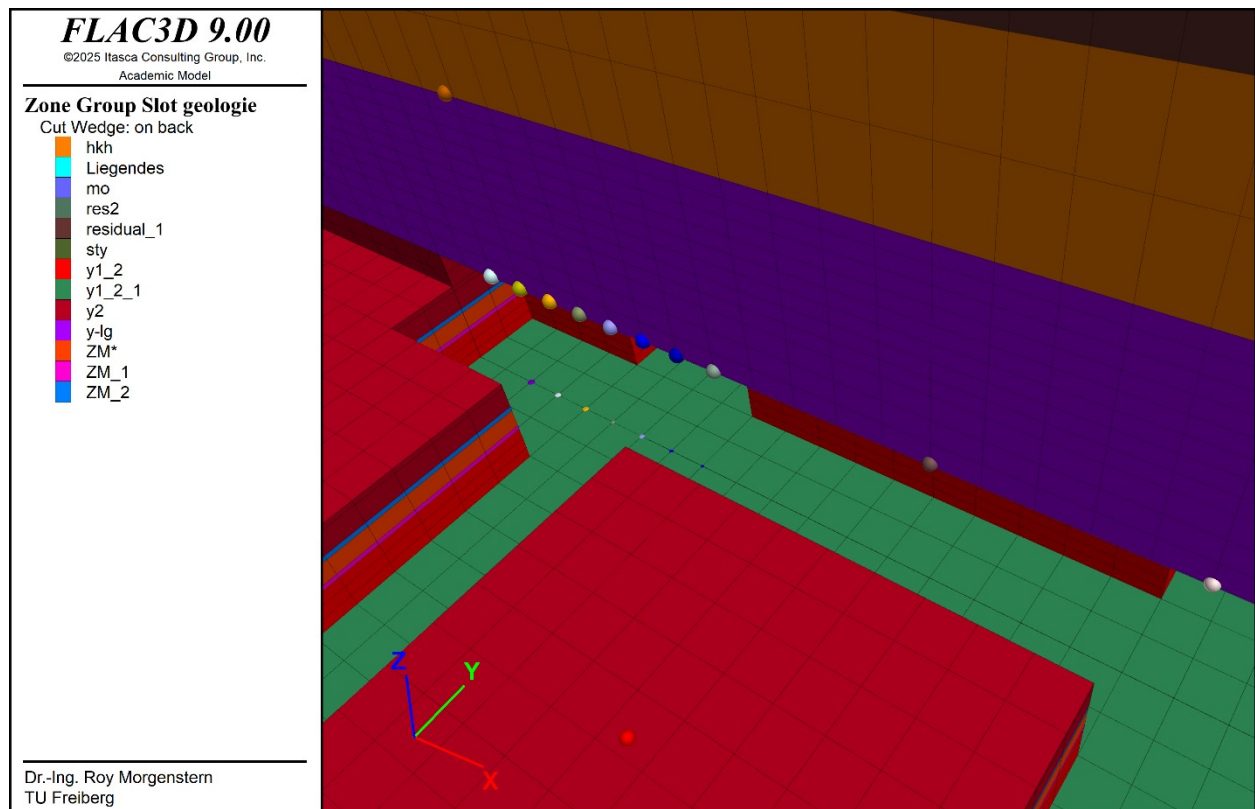


Abbildung 4: Blick in die teilaufgefahrene Kammer. Sichtbar sind unter anderem die Beobachtungspunkte an Sohle und Firste, die entlang einer Linie entgegengesetzt zur Vortriebsrichtung angeordnet sind. Diese dienen der Kalibrierung und dem Vergleich der berechneten Sprengwirkung mit den Werten aus dem Sprenggutachten.

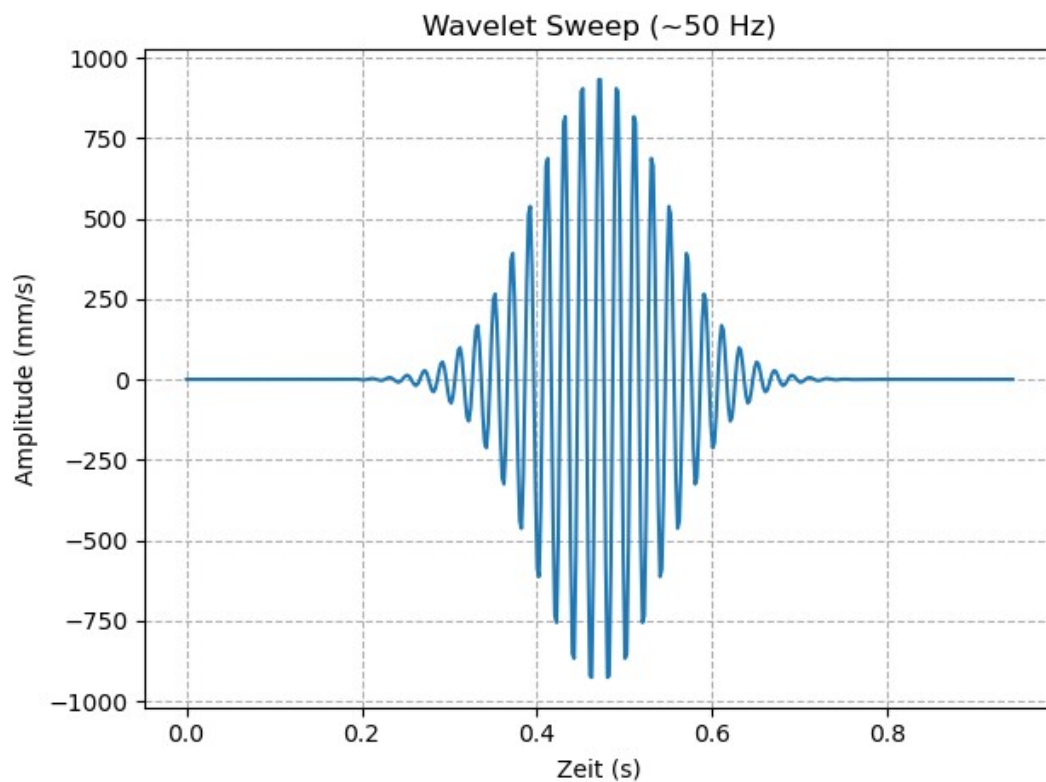


Abbildung 5: Verwendetes Sprengsignal

Zur Untersuchung potenzieller Langzeiteffekte wird nach Abschluss der dynamischen Sprengsimulation auf eine statische Berechnung umgestellt. In diesem Anschlussmodell erfolgt eine klassische Reduktion der Materialparameter Kohäsion (c), Reibungswinkel (φ) und Zugfestigkeit (σ^t) unter Anwendung von Sicherheitsfaktoren 1,5¹ und 2,0 – ganz analog dem Vorgehen, wie im Detail von Morgenstern, Friedel & Konietzky (2024a,b) beschrieben.

Auf diese Weise lässt sich die Entwicklung der Barriereintegrität über sehr lange Standzeiten bewerten, da alle drei Belastungen, die die Barriere insgesamt erfährt (statische Belastung durch Spannungsumlagerung + dynamisch induzierte Belastungen durch Sprengimpulse + langzeitliche wirkende Festigkeitsverluste), summarisch betrachtet werden.

¹ Auf die Darstellung der Ergebnisse für diesen Faktor wird zugunsten der Übersichtlichkeit im Folgenden verzichtet.

Berechnungsergebnisse

Für die Abbildungen gelten folgende Konventionen:

- Plastifizierungen („zone state“):
 - Shear: Scherversagen
 - Tension: Zugversagen
 - -p: Versagen in Vergangenheit, durch Spannungsumlagerung zurück im elastischen Bereich
 - -n: Versagen in der Gegenwart (aktive Plastifizierung)
- Volumetrische Volumenvergrößerung (Dilatanz)

Zunächst werden die aus den 3 Sprengungen resultierenden Plastifizierungen (Abbildung 6) und volumetrischen Dehnungen (Abbildung 7) gezeigt. Dabei sind Dehnungswerte unterhalb $1\text{E-}4$ grau dargestellt. Die eingezeichnete Profillinie verläuft durch die Kammermitte und erstreckt sich von 7 m unterhalb der Sohle bis zur Oberkante der Barrierschicht. Im dazugehörigen Diagramm innerhalb der Abbildung ist der Verlauf der logarithmischen volumetrischen Dehnungen entlang dieser Profillinie dargestellt.

Die gleichen Auswertungen werden anschließend für die statische Berechnung nach Abschluss der dynamischen Phase gezeigt, basierend auf der Festigkeitsreduktion mit einem Reduktionsfaktor von 2,0 (Abbildung 8 und Abbildung 9).

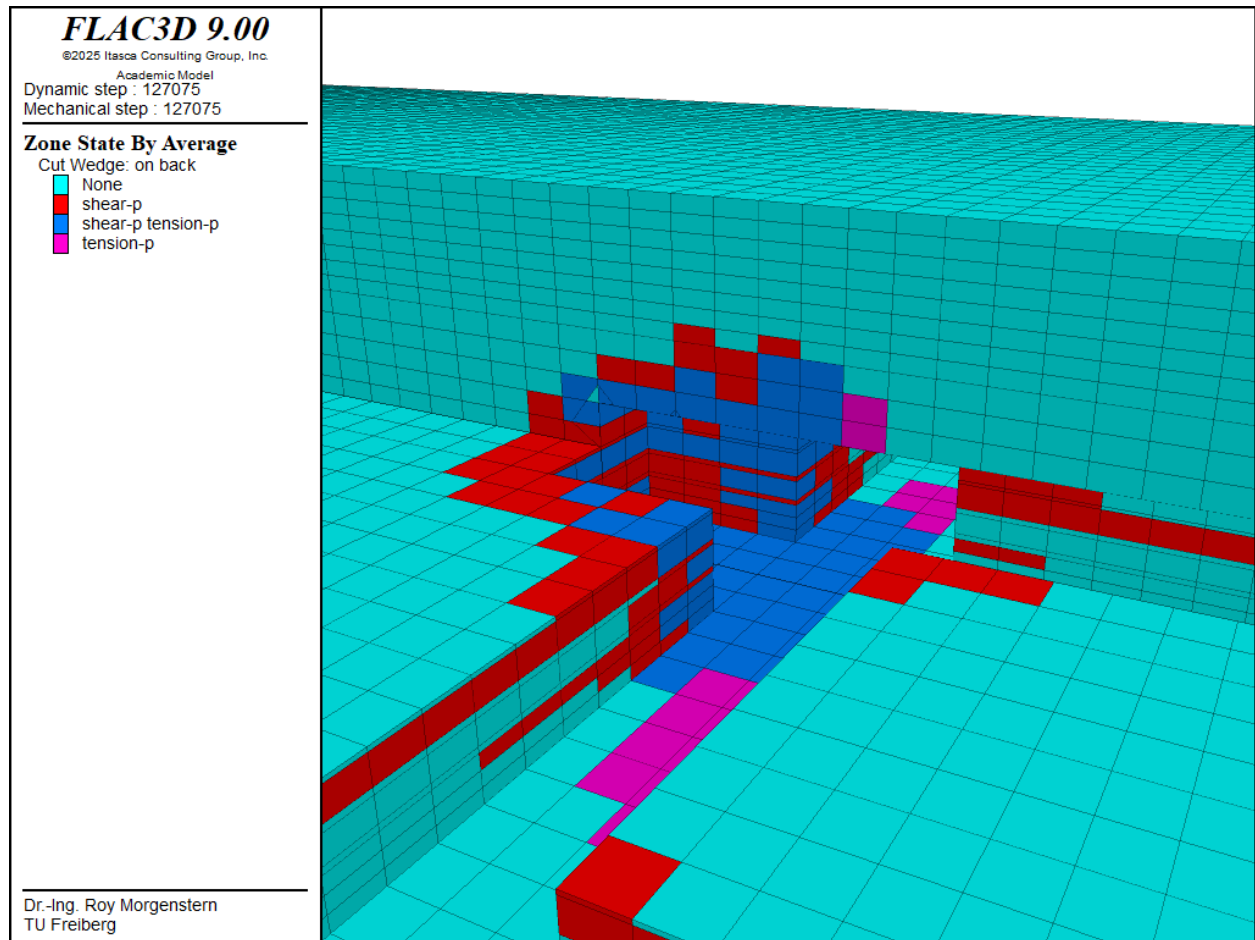


Abbildung 6: Plastifizierungszustand nach drei erfolgten Sprengungen (3 Abschlügen)

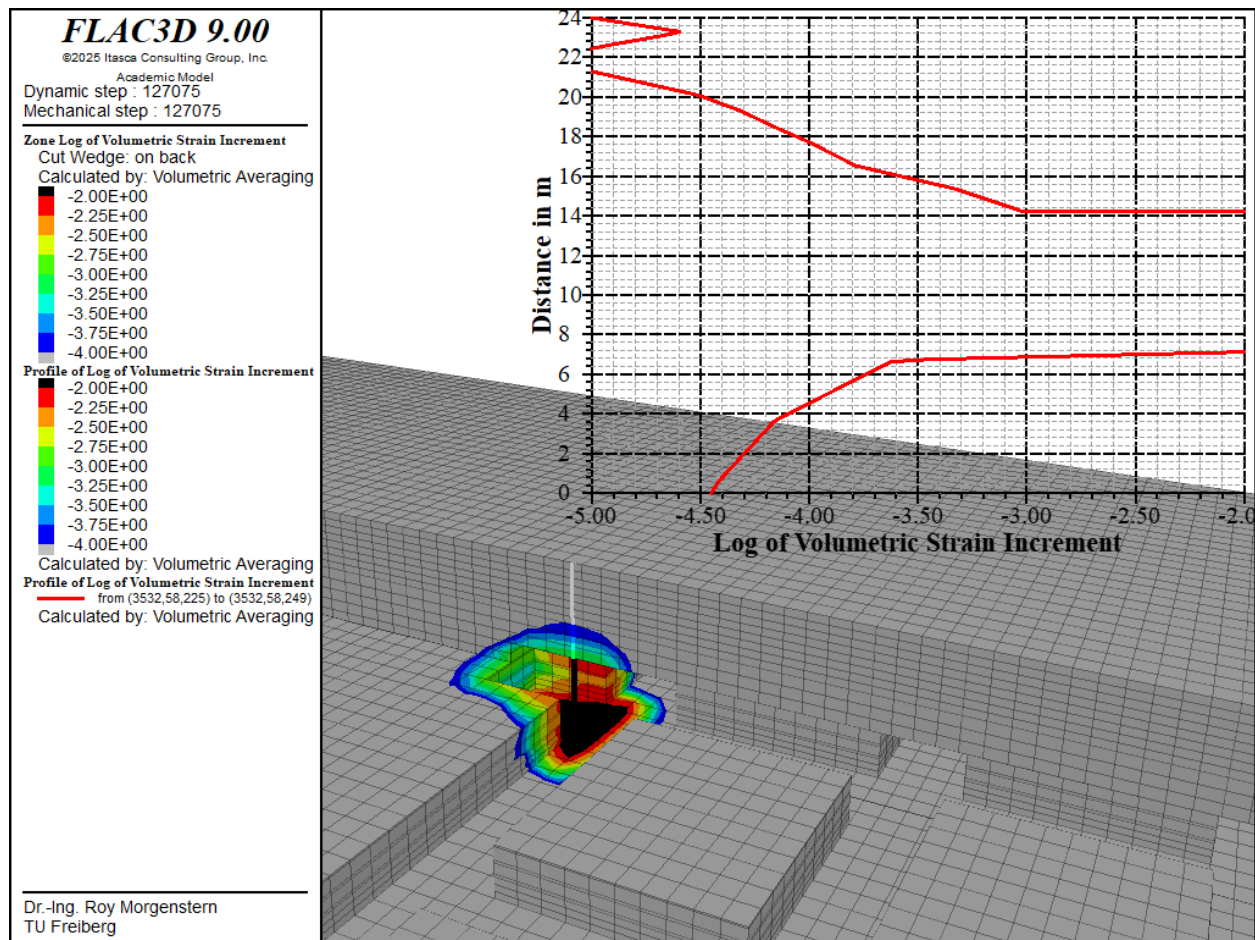


Abbildung 7: Logarithmische volumetrische Dehnungen (Dilatanz) nach Durchführung der drei Sprengungen.

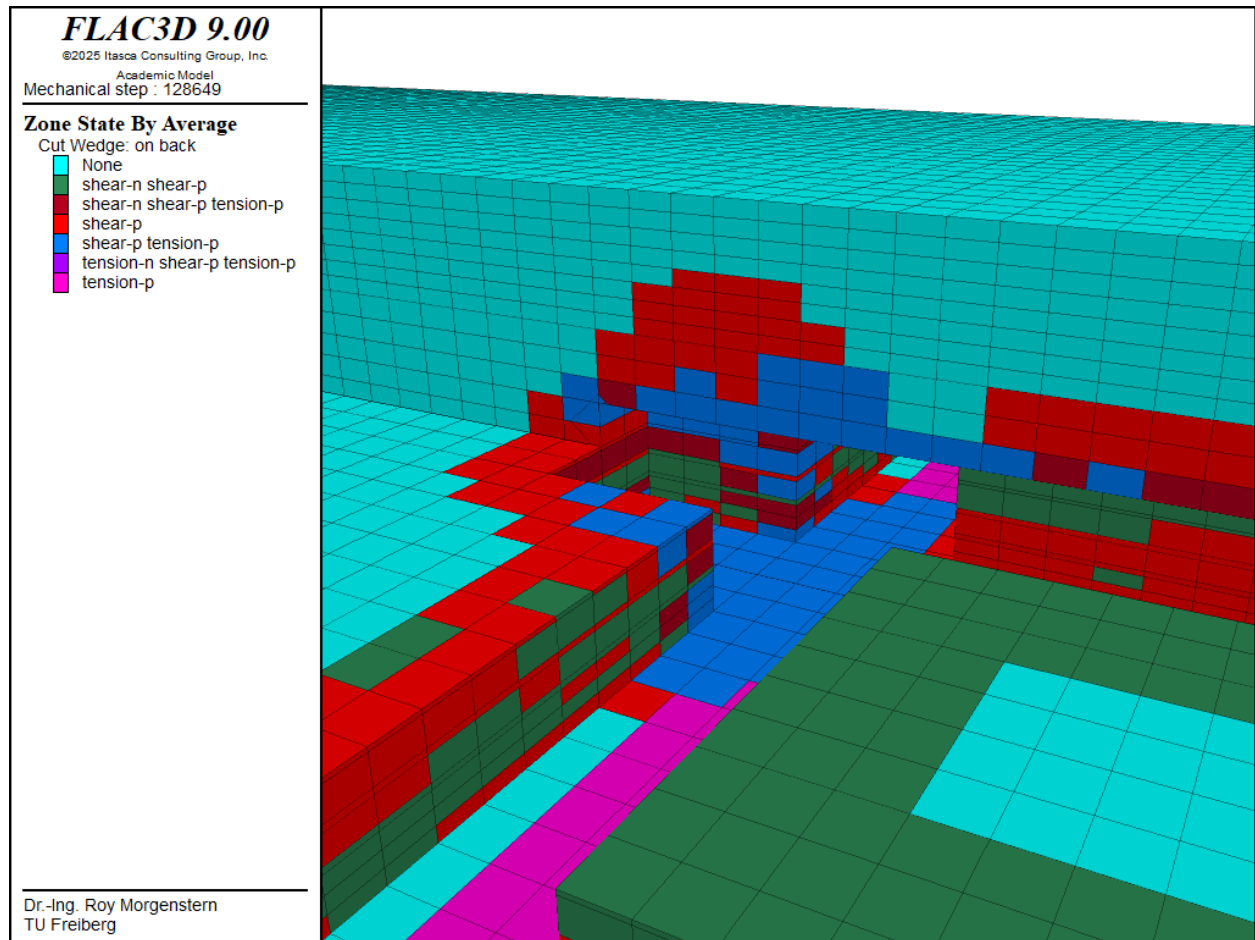


Abbildung 8: Plastifizierungszustand nach drei erfolgten Sprengungen und nachgeschalteter Festigkeitsreduktion mit Faktor 2.0.

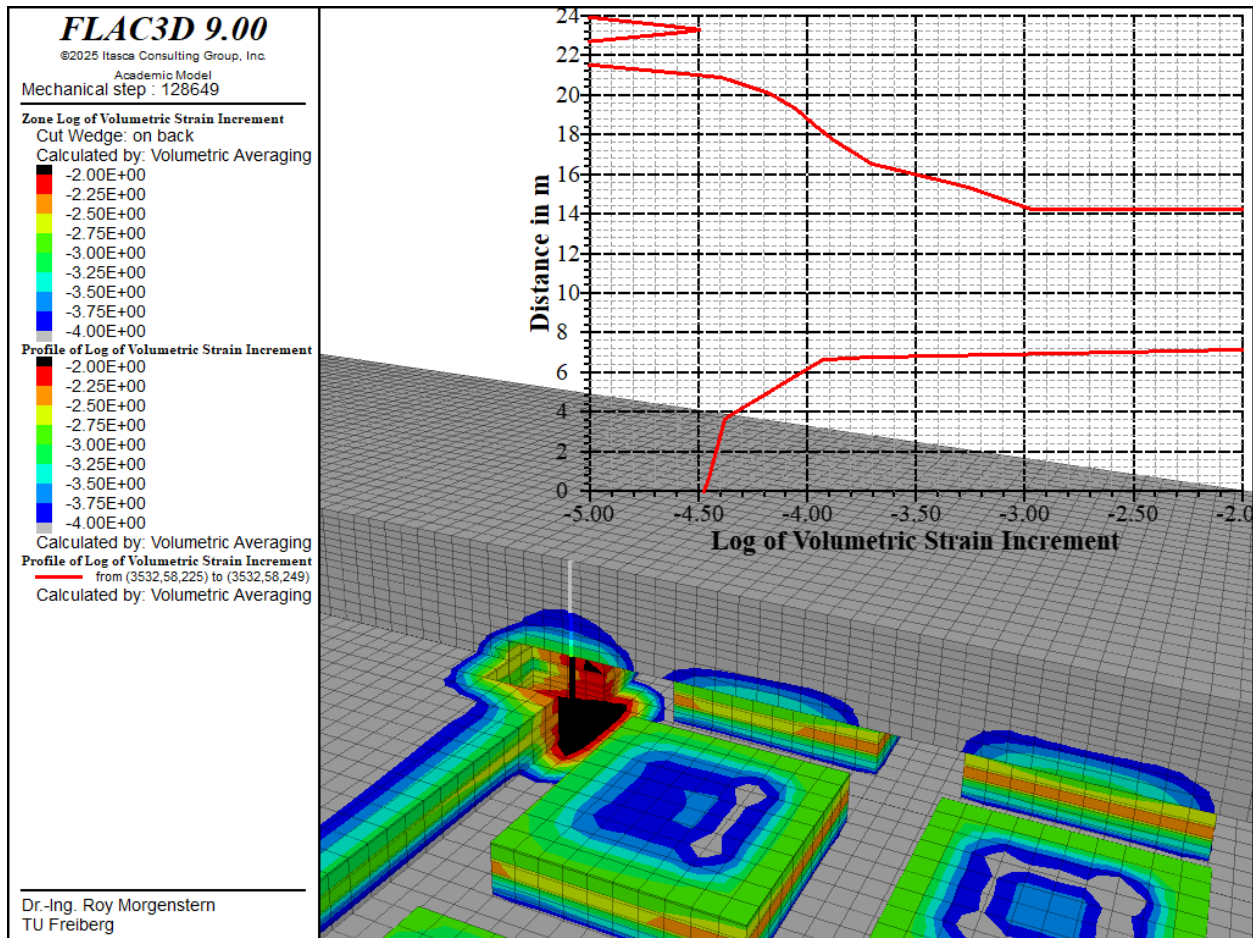


Abbildung 9: Logarithmische volumetrische Dehnungen (Dilatanz) nach Durchführung der drei Sprengungen und nachgeschalteter Festigkeitsreduktion mit Faktor 2.0.

Wie schon von Morgenstern, Friedel & Konietzky (2024a,b) beschrieben, ist erst bei Dilatanz größer $1\text{E-}3$ mit einer signifikanten Zunahme der Permeabilität zu rechnen. Die Auswertung der volumetrischen Dehnungen, dargestellt in Abbildung 10, zeigt folgendes:

(a) nach den Sprengungen erreicht die Dilatanz in den ersten ca. 100 cm oberhalb der Firste ganz lokal maximale Werte von nahezu $1\text{E-}3$. Darüber sinken die Werte schnell und deutlich ab. Im Mittel liegen die Werte stets unter $1\text{E-}5$, selbst in den ersten 100 cm in der Firste.

(b) nach der Festigkeitsreduktion mit dem Faktor 2.0 (Simulation Langzeitverhalten) steigen die Werte der Dilatanz in den unteren ca. 100 cm der Firste ganz lokal auf Werte größer $1\text{E-}3$, sind aber im Mittel dort kleiner als $1\text{E-}4$.

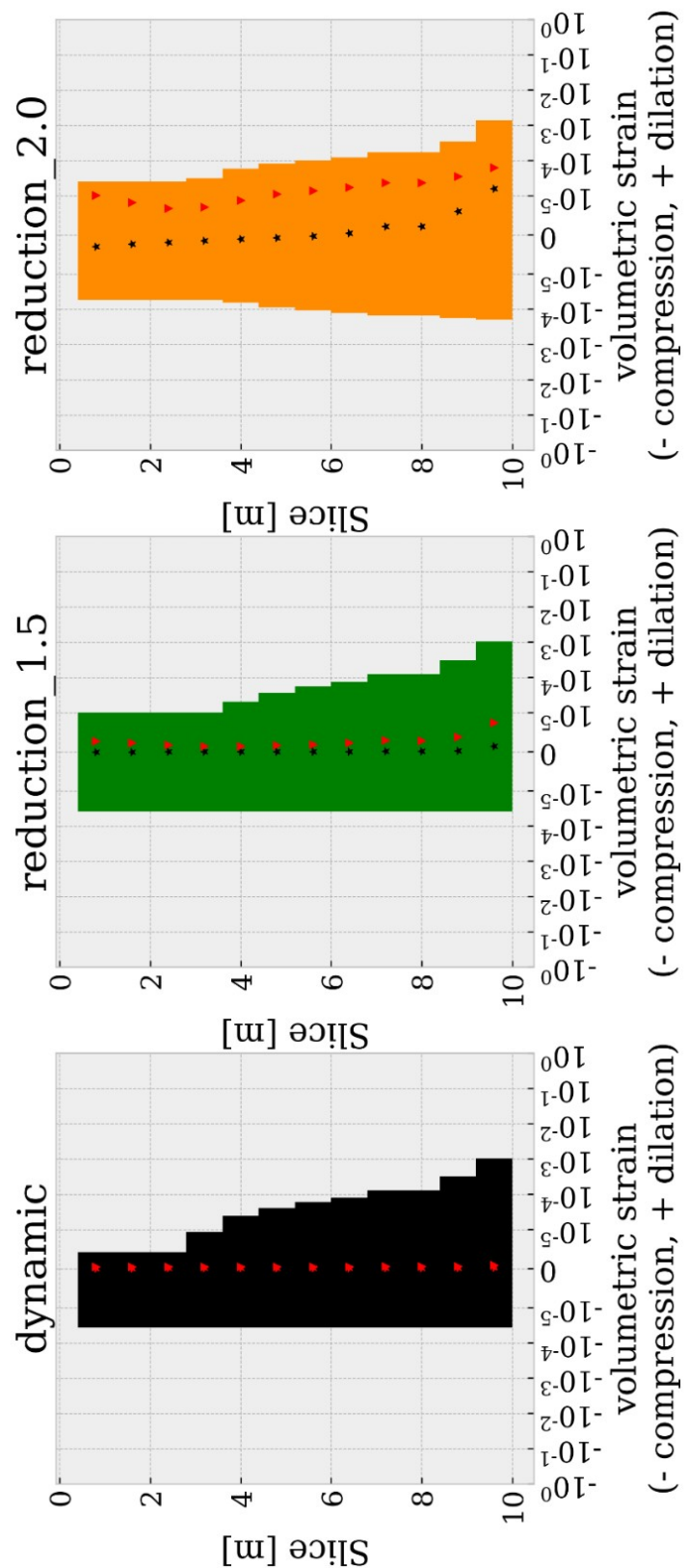


Abbildung 10: Volumetrische Deformationen der Einzelschichten aus y-Ig für die drei untersuchten Zustände. Die Sterne stellen den Mittelwert aus der gesamten Einzelschicht und die Dreiecke die Mittelwerte des dilatanten Anteils in der Schicht dar ('dynamic' bezeichnet die dynamische Berechnung ohne Festigkeitsreduktion, d.h. den Zustand nach den erfolgten drei Sprengungen). Die mit Stern bzw. Punkt markierten Mittelwerte entstammen den jeweiligen Zonenmittelpunkten (slices). Die Zonen innerhalb der Barriere sind ca. 0.8 m hoch, d.h. es ist eine 9 m mächtige Barriere inkl. Anbaubank dargestellt (die Firste fällt mit der unteren Zonenkante bei 10 m zusammen).

Diskussion der Ergebnisse

Zunächst muss festgehalten werden, dass die dynamischen Simulationen in folgender Hinsicht konservativ sind:

- Für das dynamischen Teilmodell wurde der kritischste Abschnitt ausgewählt (Bereich mit stärkster Belastung der Barriere, d.h. größte Nähe zum Grenzzustand)
- Es wurde mit statischen Materialfestigkeiten gerechnet (dynamische sind signifikant höher)
- Die Anregungsfrequenz (Sprengsignal) ist mit 50 Hz konservativ gewählt
- Ein potentieller Selbstheilungseffekt auf Basis der Tonanteile wird nicht berücksichtigt
- Die geplante gewölbte Firste wurde nicht berücksichtigt und durch ein Rechteckprofil ersetzt.

In Bezug auf die Bewertung der Barriereintegrität sind zwei Parameter von entscheidender Bedeutung:

- Plastifizierungen: sie geben das Erreichen der Festigkeitsgrenze an
- Dilatanz (irreversible Volumenvergrößerung, die sich aus elastischen und plastischen Anteilen zusammensetzt)

In Bezug auf die Barriere bedeutet dies konkret:

- (a) Solange keine Plastifizierung eintritt, befindet sich die Barriere im rein elastischen Zustand, d.h. sie erfährt keinerlei Schädigung und behält ihre ursprünglichen, d.h. ungeschädigten Eigenschaften.
- (b) Falls Plastifizierung eintritt, ist entscheidend, ob und wenn ja wie groß die Dilatanz ist. Bei Werten kleiner $1E-3$ ist mit keiner Erhöhung der Permeabilität zu rechnen (dies ergibt sich aus der Beziehung zwischen Dilatanz und Permeabilität (siehe auch Anhänge A und B in (Morgenstern, Friedel & Konietzky, 2024a)). D.h. die Barriere erfährt dann praktisch keine Schädigung, die hydraulisch wirksam ist. Damit bleibt die Barrierewirkung vollständig erhalten.
- (c) Für Bereiche, die eine Dilatanz erfahren, die signifikant größer als $1E-3$ ist, ist mit einer lokalen Erhöhung der Permeabilität zu rechnen, die berücksichtigt werden muss. Gemäß den Ausführungen auf Seite 24 (DMT, 2024) bleibt die Barrierewirkung dabei erhalten, wenn eine signifikante Vergrößerung der Permeabilität an der Unterkante der Barriere eine vertikale Erstreckung von 20% der Gesamtmächtigkeit nicht übersteigt.
- (d) Die numerischen Simulationen zeigen, dass lokal Dilatanzwerte von größer $1E-3$ auf einen Bereich in der Firste von ca. 100 cm beschränkt bleiben (siehe Abbildung 10). In Bezug auf die Mächtigkeit der Barriere (lokal inkl. Anbaubank) von 9 bis 14 m (siehe Abbildung 11) sind damit nur 7% bis 11% der Barriere als lokal geschädigt im Sinne einer erhöhten Permeabilität anzusehen. Damit verliert

die Barriere auch unter Beachtung der Sprengungen langfristig nicht ihre hydraulische Barrierefunktion.

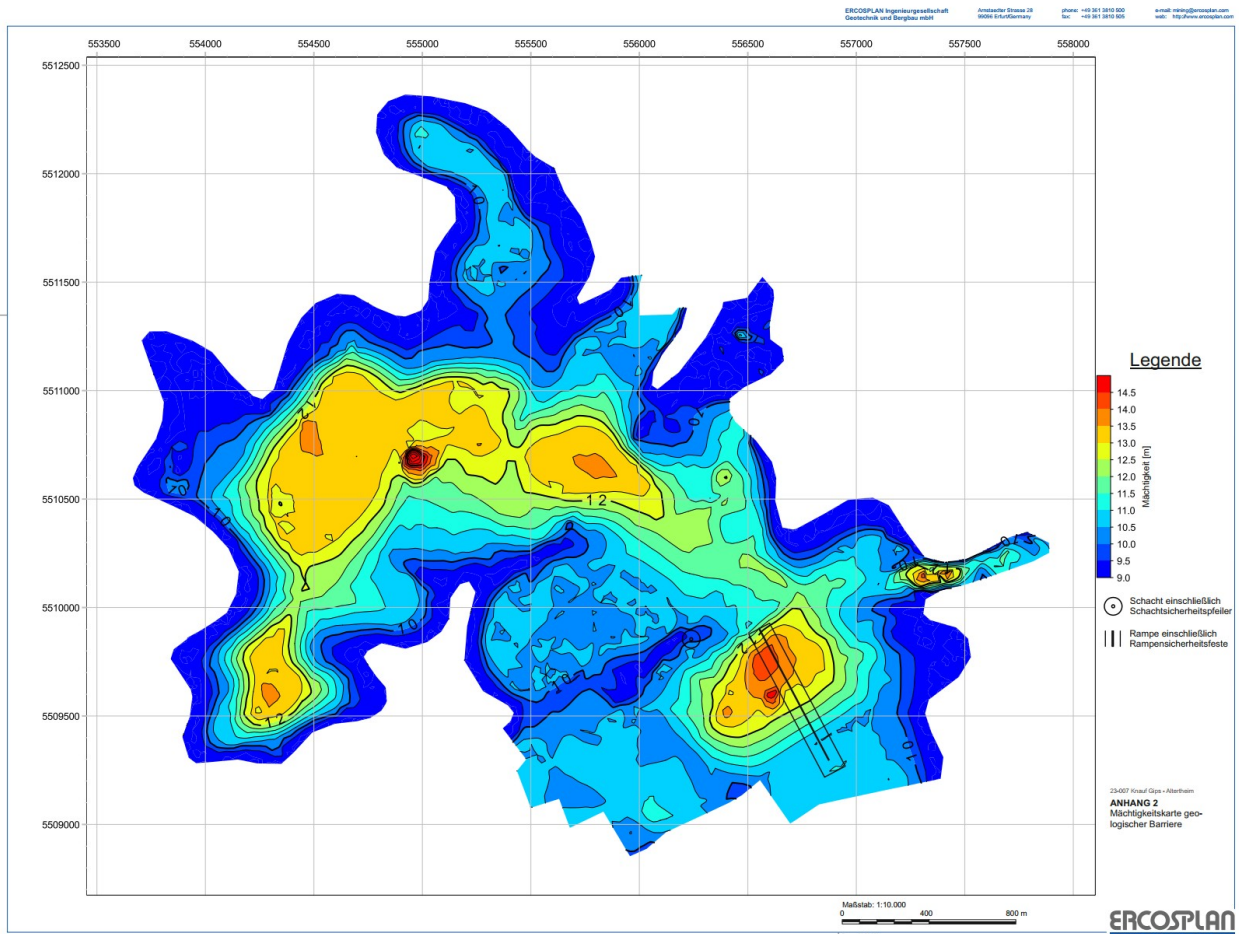


Abbildung 11: Mächtigkeit der Barriere [Knauf, 2024]

Literaturverzeichnis

- DMT (2024): Geplantes Gips-Bergwerk Altertheim, Hydrogeologisches Gutachten mit Szenarienuntersuchungen, Teil B - Szenarienberechnungen
- Knauf (2024): Fakultativer Rahmenbetriebsplan mit integriertem 1. Hauptbetriebsplan und integrierter Raumverträglichkeitsprüfung vom 21.11.2024, S. 147
- Krämer, M. (2025): Ergänzung: Erschütterungen durch Sprengungen und deren Einfluss auf die Barrierschicht, Bergtechnik und Bauingenieurwesen Krämer, 12.08.2025
- Morgenstern, R.; Konietzky, H., Frühwirt, T. (2023): Projektbericht ,Numerische Standsicherheitsuntersuchungen für das geplante Bergwerk „Altertheim“ – Teilprojekt I, Institut für Geotechnik, TU BAF
- Morgenstern, R.; Konietzky, H. (2024a): Projektbericht ,Bericht zur Barriereintegrität für das Vorhaben Altertheimer Mulde‘, Institut für Geotechnik, TU BAF
- Morgenstern, R.; Konietzky, H. (2024b): Projektbericht ,Bericht zum Flutungsszenario für das Vorhaben Altertheimer Mulde‘, Institut für Geotechnik, TU BAF