



TUBAF

Die Ressourcenuniversität.
Seit 1765.

Institut für Geotechnik

Professur für
Gebirgs- und

Felsmechanik/Felsbau

Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky



„Bericht zum Flutungsszenario 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: M.Sc. Roy Morgenstern
Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky

Umfang: 19 Seiten mit 17 Abbildungen

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

Datum: 05.08.2024

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 Aufgabenstellung	4
Modellaufbau und Berechnungssequenz	5
Berechnungsergebnisse	7
Diskussion der Ergebnisse	18
Literaturverzeichnis	19

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: In das Modell eingeschriebene Porenwasserdrücke für die Schichten hkh und sty. Der Grundwasserstand (schwarze Linie im Plot) stammt von der DMT (2023). Das Modell ist in diesem Bild in x-Richtung um den Faktor 0,5 gestaucht und in z-Richtung um den Faktor 5 überhöht dargestellt.....	5
Abbildung 2: In das Modell eingeschriebene Porenwasserdrücke für die unter dem Grundwasser liegenden Schichten im Deckgebirge und Abbaubereich. Der Grundwasserstand (schwarze Linie im Plot) stammt von der DMT (2023). Die Darstellung ist in x-Richtung um den Faktor 0,5 gestaucht und in z-Richtung um den Faktor 5 überhöht.	6
Abbildung 3: Finales Berechnungsergebnis (Seitendruck 0,8) im abgebauten Zustand ohne Festigkeitsreduktion vor Flutung.....	8
Abbildung 4: Finales Berechnungsergebnis (Seitendruck 0,6) im abgebauten Zustand ohne Festigkeitsreduktion vor Flutung.....	8
Abbildung 5: Finales Berechnungsergebnis (Seitendruck 0,8) im gefluteten Zustand mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5.....	9
Abbildung 6: Finales Berechnungsergebnis (Seitendruck 0,6) im gefluteten Zustand mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5.....	9
Abbildung 7: Finales Berechnungsergebnis (Seitendruck 0,8) im gefluteten Zustand mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0.....	10
Abbildung 8: Finales Berechnungsergebnis (Seitendruck 0,6) im gefluteten Zustand mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0.....	10
Abbildung 9: Detailansicht des gefluteten Zustands (Seitendruck 0,6) mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0 – SSR (= Festigkeitsreduktion).....	11
Abbildung 10: Detailansicht des gefluteten Zustands (Seitendruck 0,6) mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0 - Plastifizierung.....	11
Abbildung 11: Detailansicht des gefluteten Zustands (Seitendruck 0,6) mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0 – VSI (= volumetrische Deformation).....	12
Abbildung 12: Detailansicht des gefluteten Zustands (Seitendruck 0,6) mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5 – SSR (= Festigkeitsreduktion).....	12
Abbildung 13: Detailansicht des gefluteten Zustands (Seitendruck 0,6) mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5 - Plastifizierung.....	13
Abbildung 14: Detailansicht des gefluteten Zustands (Seitendruck 0,6) mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5 – VSI (= volumetrische Deformation).....	13
Abbildung 15: Volumetrische Dehnung der Einzelschichten aus y-lg für die drei untersuchten Zustände mit Seitendruck 0,6 im gefluteten Modell. Die Sterne stellen den Mittelwert aus der gesamten Einzelschicht und die Dreiecke die Mittelwerte des dilatanten Anteils in der Schicht dar.	15
Abbildung 16: Volumetrische Dehnung der Einzelschichten aus y-lg für die drei untersuchten Zustände mit Seitendruck 0,8 im gefluteten Modell. Die Sterne stellen den Mittelwert aus der gesamten Einzelschicht und die Dreiecke die Mittelwerte des dilatanten Anteils in der Schicht dar.	16
Abbildung 17: Volumetrische Dehnung der Einzelschichten aus y-lg für die drei untersuchten Zustände mit Seitendruck 0,6 aus dem ungefluteten Modell aus dem vorangegangenen Bericht. Die Sterne stellen den Mittelwert aus der gesamten Einzelschicht und die Dreiecke die Mittelwerte des dilatanten Anteils in der Schicht dar.	17

Bezeichnung der geologischen Formationen:

dolomite	Untere Dolomite / Liegendes
y1_2	Unteres Gipslager
ZM	Zwischenmittel
y2	Oberes Gipslager
y-lg	Ton-Sulfat-Wechsellagerung (Barriere)
hkh	Mittlere Dolomite
residual_1	Residuen Oberes Sulfatlager
sty	Stylolithen-Kalkstein
res2	Obervolkach-Schichten
mo	Oberer Muschelkalk

Einleitung und Aufgabenstellung

Die Fa. Knauf plant ein neues untertägliches 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, 2024).

In diesem Bericht soll das Szenario einer vollständig gefluteten Grube als ‚worst case szenario‘ betrachtet werden.

Grundlage für die Modellierung bildet das bereits im vorangegangenen Bericht genutzte numerische Modell (Morgenstern, Friedel & Konietzky, 2024).

Modellaufbau und Berechnungssequenz

Das hier diskutierte Modell basiert auf dem Modell, welches zum Nachweis des Erhalts der Barriereintegrität verwendet wurde (Morgenstern, Friedel & Konietzky, 2024), d.h. Geometrie, mechanische Anfangs- und Randbedingungen, Materialgesetze und -parameter wurden unverändert übernommen. Nur die hydraulischen Bedingungen wurden in der Weise verändert, dass ein hydrostatischer Druck unterhalb der Grundwassergleichen gemäß DMT (2023) angesetzt wurde (siehe Abb. 2).

In diesem Bericht wurde eine zusätzliche Rechnung mit einem erhöhtem (eher realistischen) Seitendruckbeiwert von 0.8 durchgeführt (im Bericht von Morgenstern, Friedel & Konietzky (2024) wurde lediglich konservativ abdeckend ein Seitendruckbeiwert von 0.6 betrachtet).

Die Modellierung erfolgt in mehreren Schritten:

Zunächst werden die gespannten Grundwasserleiter hkh (Mittlere Dolomite) und sty (Stylolithen-Kalkstein) mittels Initialisierung der Porenwasserdrücke implementiert. Der Porenwasserdruck wird durch das Konzept der effektiven Spannungen berücksichtigt, was sich auf Plastifizierungen, Spannungsumlagerungen und Deformationen auswirkt. Für die Berechnung des Porenwasserdrucks wurden die von der Fa. DMT ermittelten Grundwassergleichen genutzt (Abbildung 1).

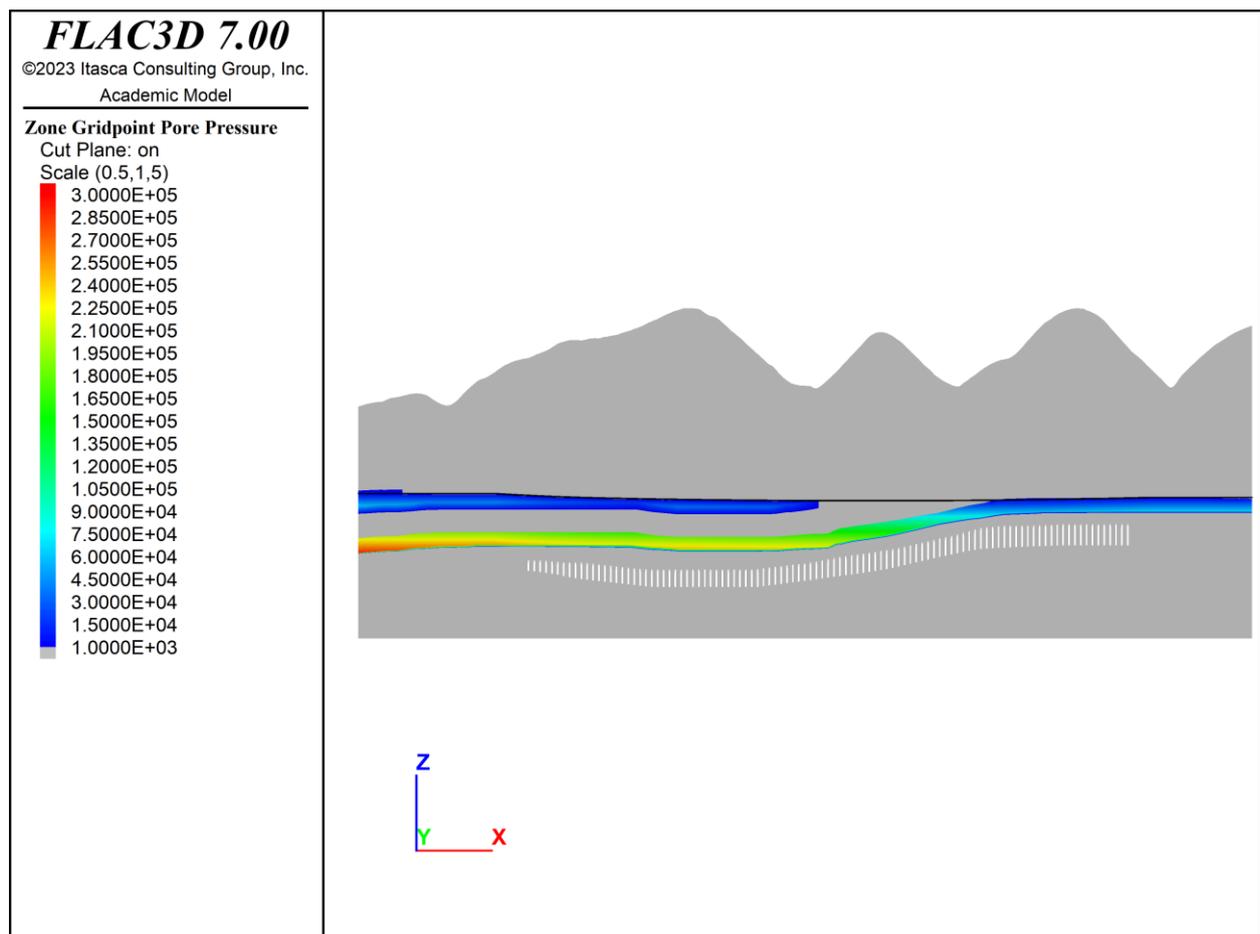


Abbildung 1: In das Modell eingeschriebene Porenwasserdrücke für die Schichten hkh und sty. Der Grundwasserstand (schwarze Linie im Plot) stammt von der DMT (2023). Das Modell ist in diesem Bild in x-Richtung um den Faktor 0,5 gestaucht und in z-Richtung um den Faktor 5 überhöht dargestellt.

Der Porendruck u am Beobachtungspunkt P_z berechnet sich aus der Wasserhöhe H der Grundwassergleichen für die Schicht des jeweiligen Grundwasserleiters nach:

$$u = \rho_w * g * (H - P_z)$$

Nach Einschreiben der Porenwasserdrücke und der mechanischen Spannungen wird das Modell ins Gleichgewicht gerechnet. Danach erfolgt der Aushub der Kammern in einem Schritt und das Modell wird erneut ins Gleichgewicht gerechnet.

Nach dem Abbauende wird die komplette Flutung des Abbaubereichs angenommen. Dies geschieht, indem in den verbleibenden Schichten (res2, sty, residual_1, hkh, y-lg, y2, ZM, y1_2) ebenfalls der Porenwasserdruck gesetzt wird. Außerdem wird an den Seitenflächen der Kammern und Pfeiler als Randbedingung die entsprechende hydraulische Belastung aufgegeben, und zwar mit dem gleichen Wert wie in der an der jeweiligen Fläche beteiligten Zone anliegenden Porenwasserdruck. Danach wird das Modell erneut in das Gleichgewicht gerechnet. Dieser Zustand repräsentiert die vollständige Flutung des Grubengebäudes.

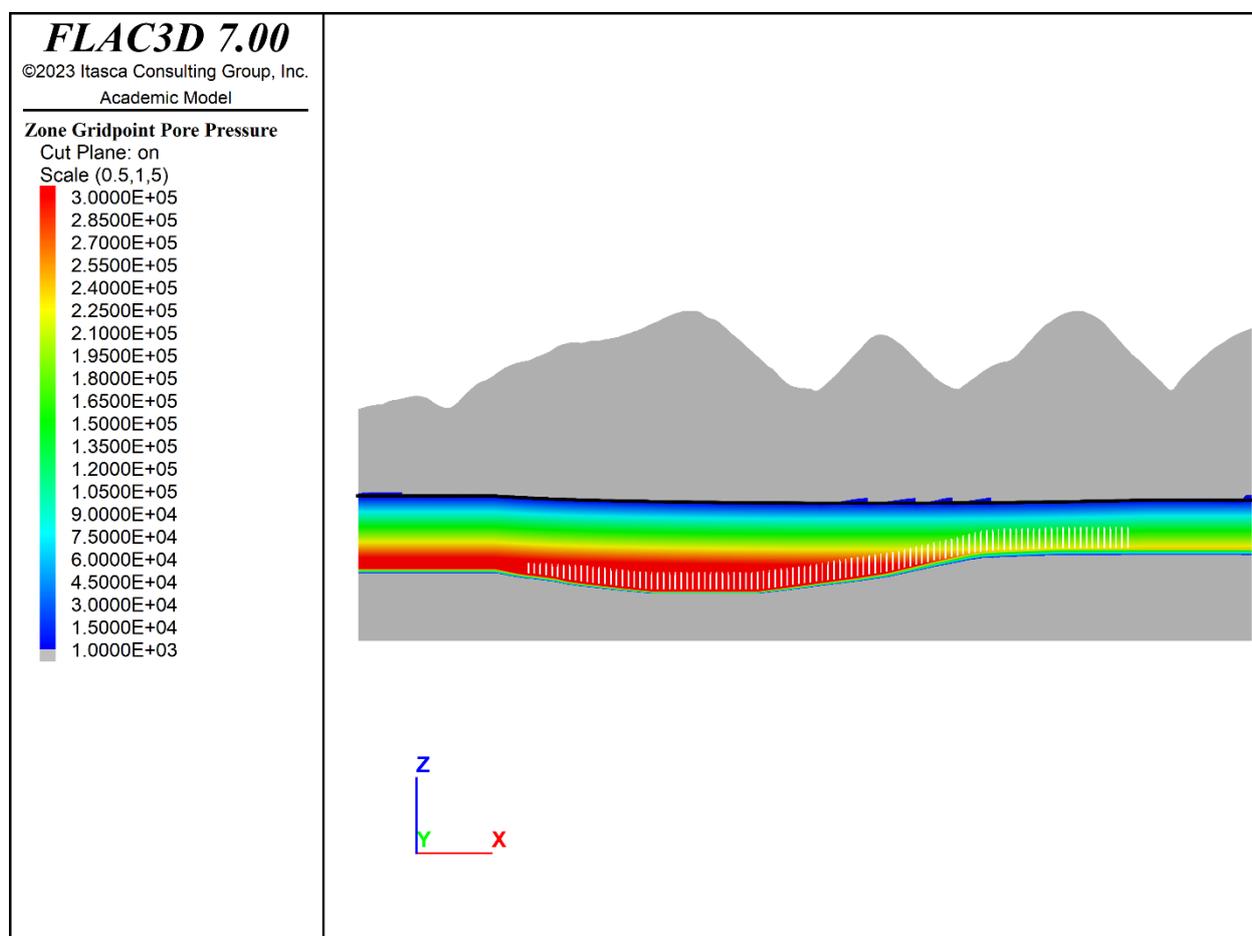


Abbildung 2: In das Modell eingeschriebene Porenwasserdrücke für die unter dem Grundwasser liegenden Schichten im Deckgebirge und Abbaubereich. Der Grundwasserstand (schwarze Linie im Plot) stammt von der DMT (2023). Die Darstellung ist in x-Richtung um den Faktor 0,5 gestaucht und in z-Richtung um den Faktor 5 überhöht.

Danach werden über das gesamte Modell die Festigkeiten mit den Reduktionsfaktoren $F = 1.5$, und 2.0 reduziert (siehe analoge Vorgehensweise von Morgenstern, Friedel & Konietzky, 2024) und die Modelle erneut für jeden Reduktionsfaktor ins Gleichgewicht gerechnet.

Berechnungsergebnisse

Die wesentlichen Berechnungsergebnisse sind den folgenden Abbildungen zu entnehmen.

Für die Abbildungen gelten folgende Konventionen:

- Spannungen in Pa, Druck negativ, Zug: positiv
- Plastifizierungen („zone state“):
 - Shear: Scherversagen
 - Tension: Zugversagen
 - -p: Versagen in Vergangenheit, durch Spannungsumlagerung zurück im elastischen Bereich
 - -n: Versagen in der Gegenwart (aktive Plastifizierung)
- Das „zone strength-stress ratio“ ist das Verhältnis der Radien des Grenzspannungskreises zum aktuellen Spannungskreis gemäß MC-Kriterium (Mohr-Coulomb).
- Die volumetrischen Deformationen („volumetric strain“) sind nur für den relevanten Bereich (Abbaubereich sowie Barriere) gezeigt. Im übrigen Modellraum liegen die Werte unter $1E-3$.
- Die Darstellungen aus dem numerischen Berechnungsprogramm FLAC3D sind jeweils 5-fach überhöht dargestellt.
- Die Detailplots (erhalten aus dem numerischen Berechnungsprogramm) sind nur für das konservative Modell mit Seitendruck 0,6 erstellt, da die Modelle mit Seitendruck 0,8 ein generell positiveres Verhalten zeigen (größere Sicherheitsreserven).

Das „zone strength-stress ratio“ (SSR) ist ein gutes Maß für die Sicherheit, d.h. alle Werte über 1 zeigen Sicherheitsreserven an, d.h. in diesen Zonen tritt keinerlei Festigkeitsüberschreitung bzw. Plastifizierung ein (das Gebirge reagiert rein elastisch ohne jede Schädigung).

Die Abbildungen 3 bis 8 zeigen jeweils von oben nach unten betrachtet folgendes:

- das Verhältnis der aktuellen Spannungsniveaus zum Grenzspannungszustand, wobei alle Werte > 3 in grauer Farbe dargestellt sind,
- den Plastifizierungszustand mit farbiger Kennzeichnung der Plastifizierungsart (siehe Erklärung oben),
- die volumetrische Deformationen in Form der Dehnungen (Werte $< 3e-3$ bzw. Kompressionen sind in grauer Farbe dargestellt).

Die Abb. 9 bis 14 zeigen jeweils Details der zuvor gezeigten Abbildungen.

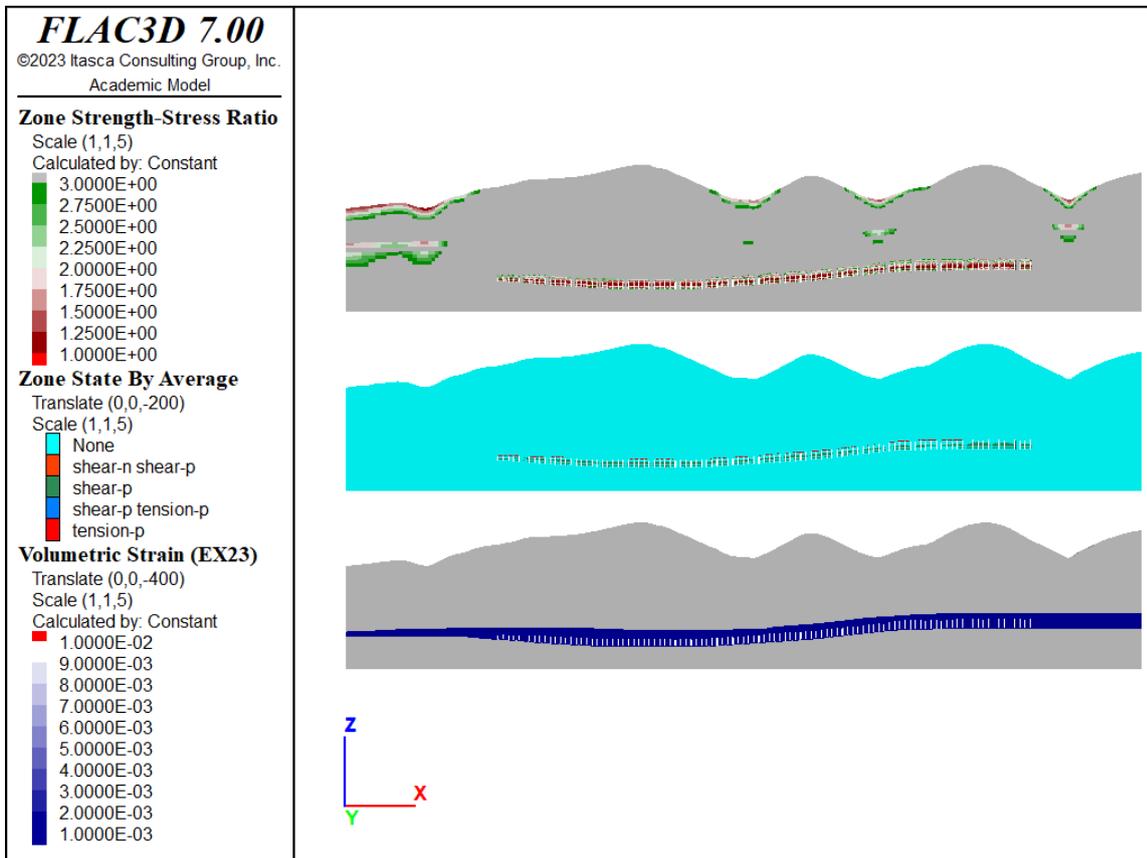


Abbildung 3: Finales Berechnungsergebnis (Seitendruck 0,8) im abgebauten Zustand ohne Festigkeitsreduktion vor Flutung

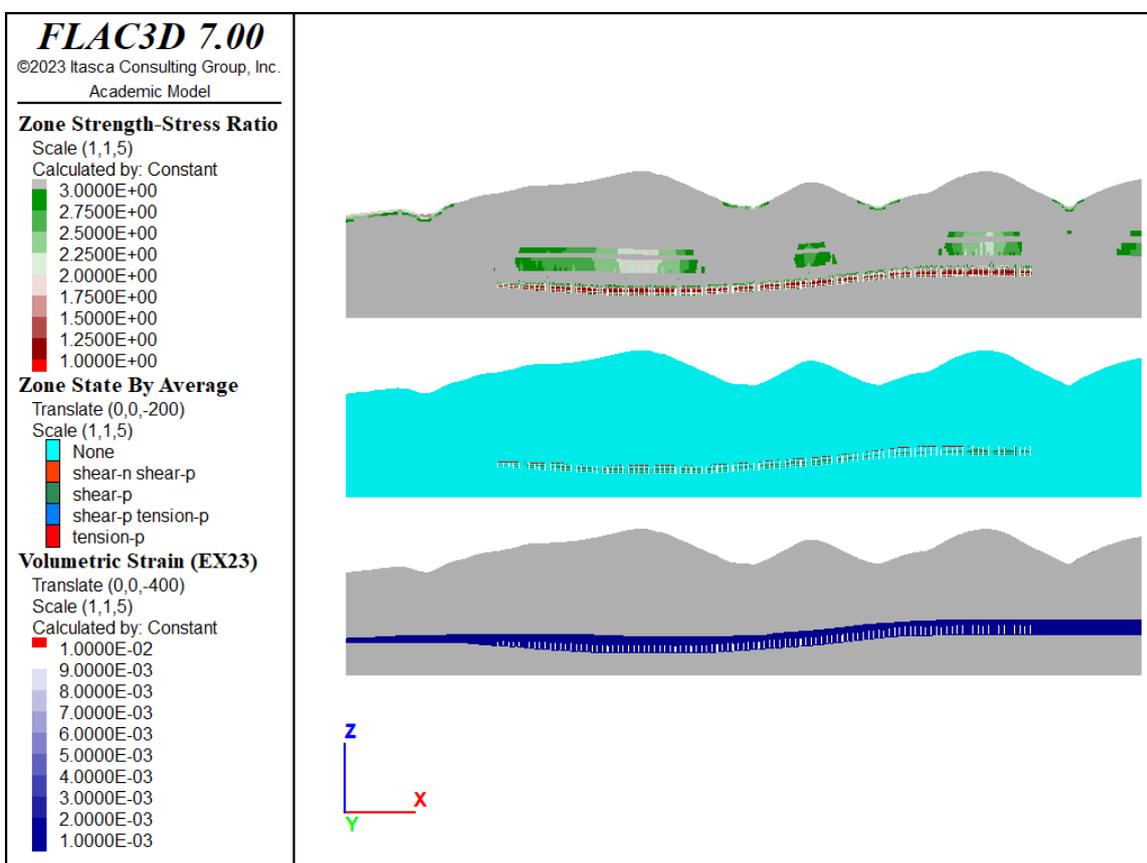


Abbildung 4: Finales Berechnungsergebnis (Seitendruck 0,6) im abgebauten Zustand ohne Festigkeitsreduktion vor Flutung

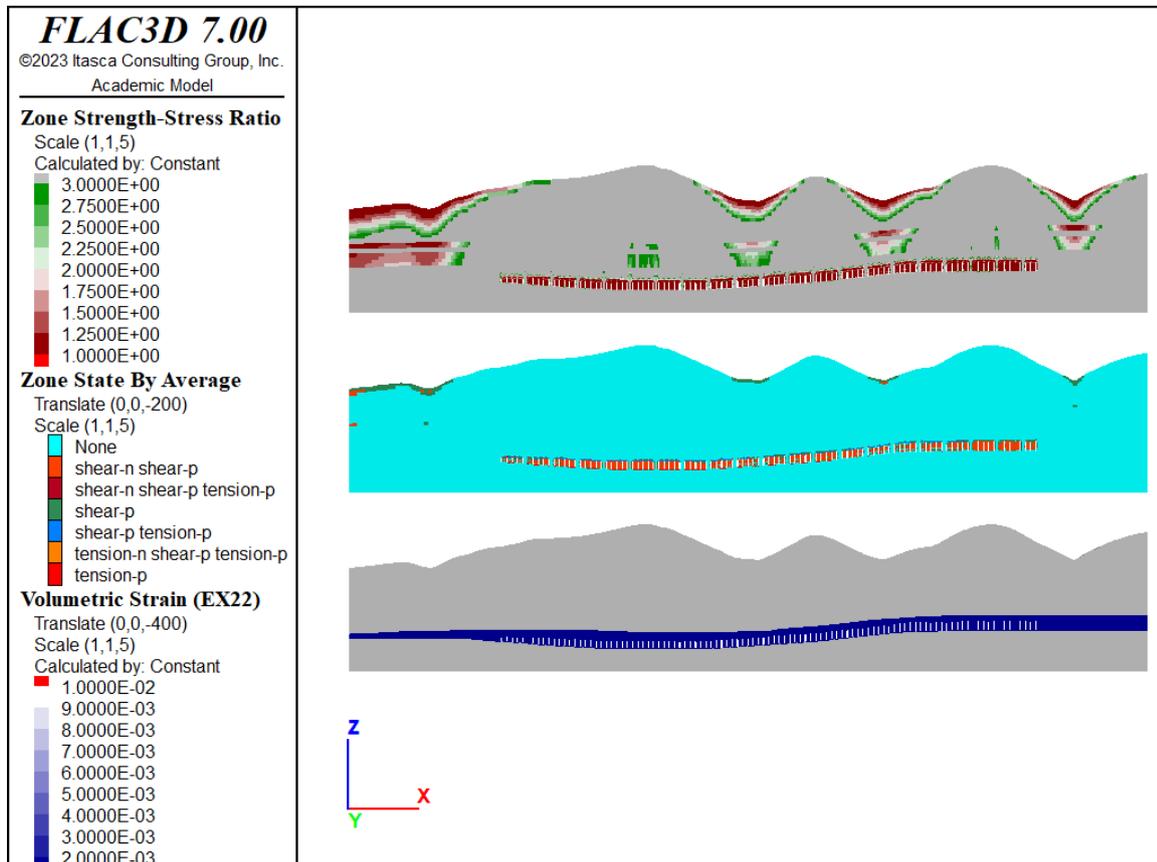


Abbildung 5: Finales Berechnungsergebnis (Seitendruck 0,8) im gefluteten Zustand mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5

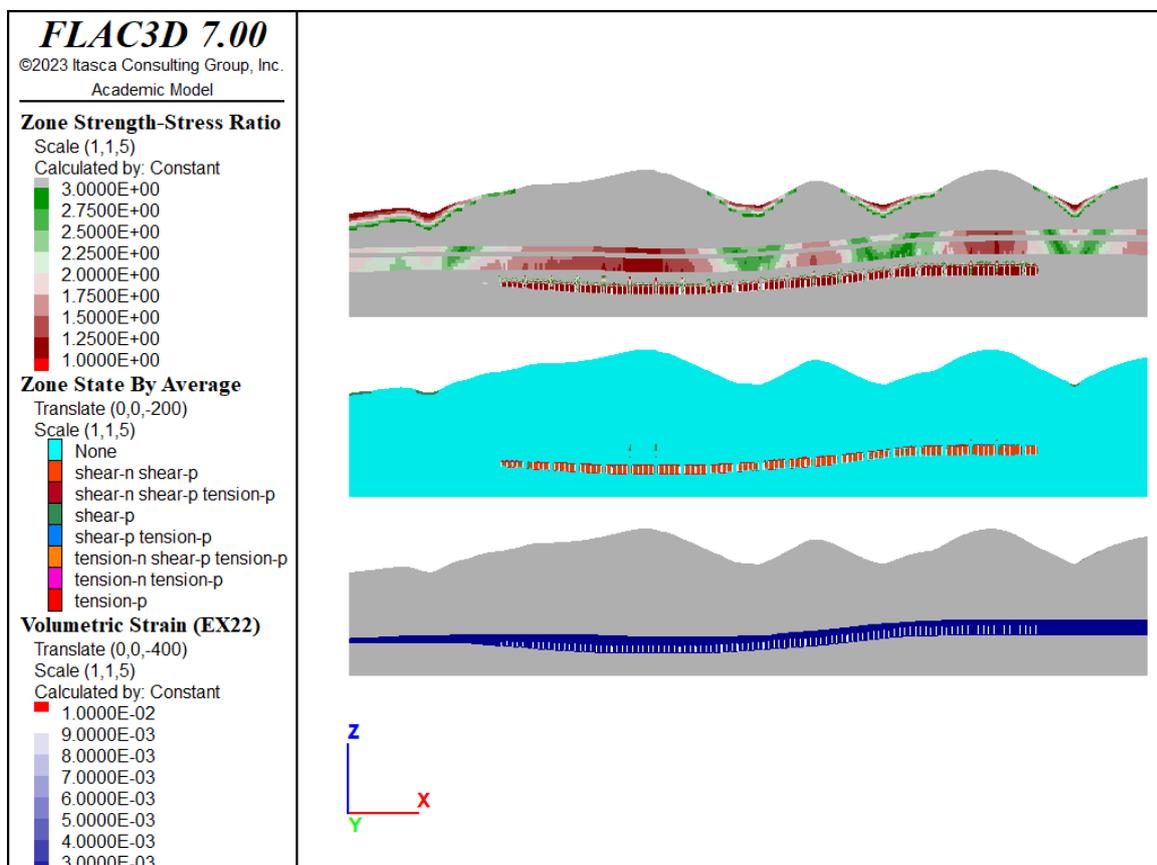


Abbildung 6: Finales Berechnungsergebnis (Seitendruck 0,6) im gefluteten Zustand mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5

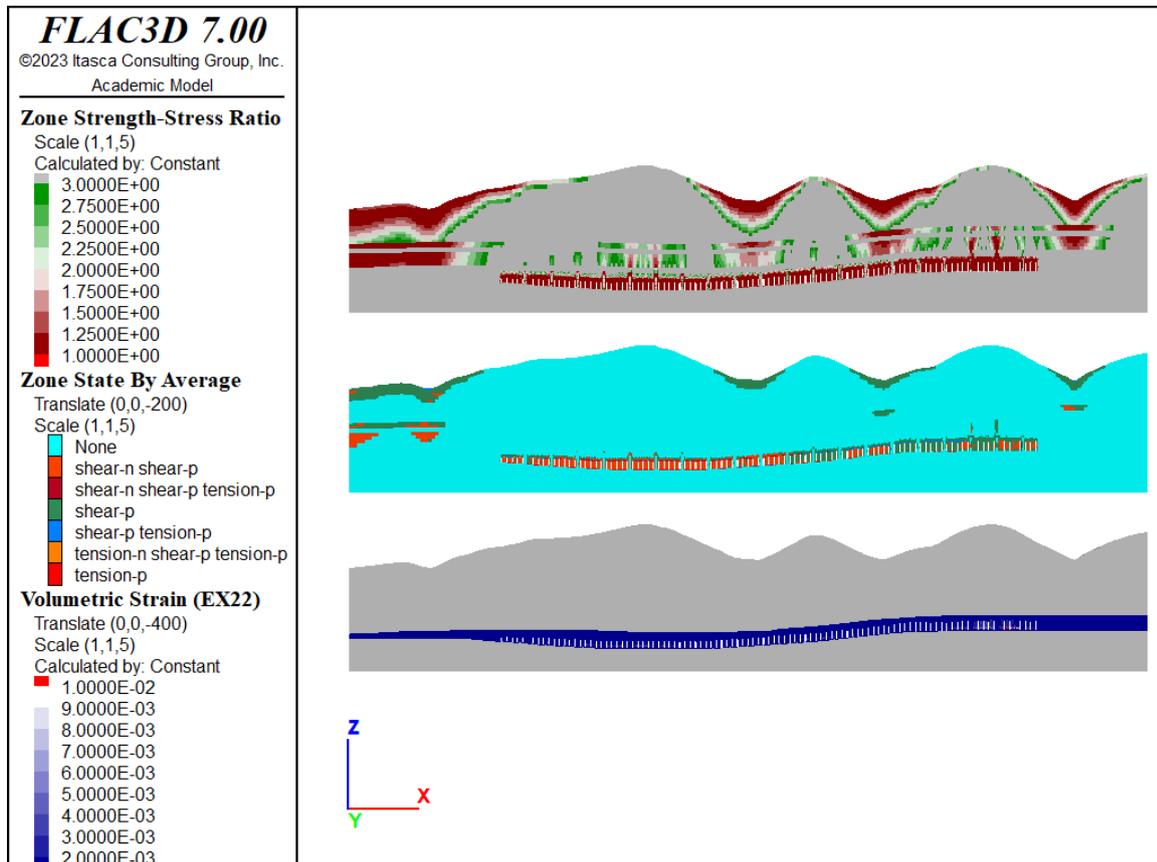


Abbildung 7: Finales Berechnungsergebnis (Seitendruck 0,8) im gefluteten Zustand mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0

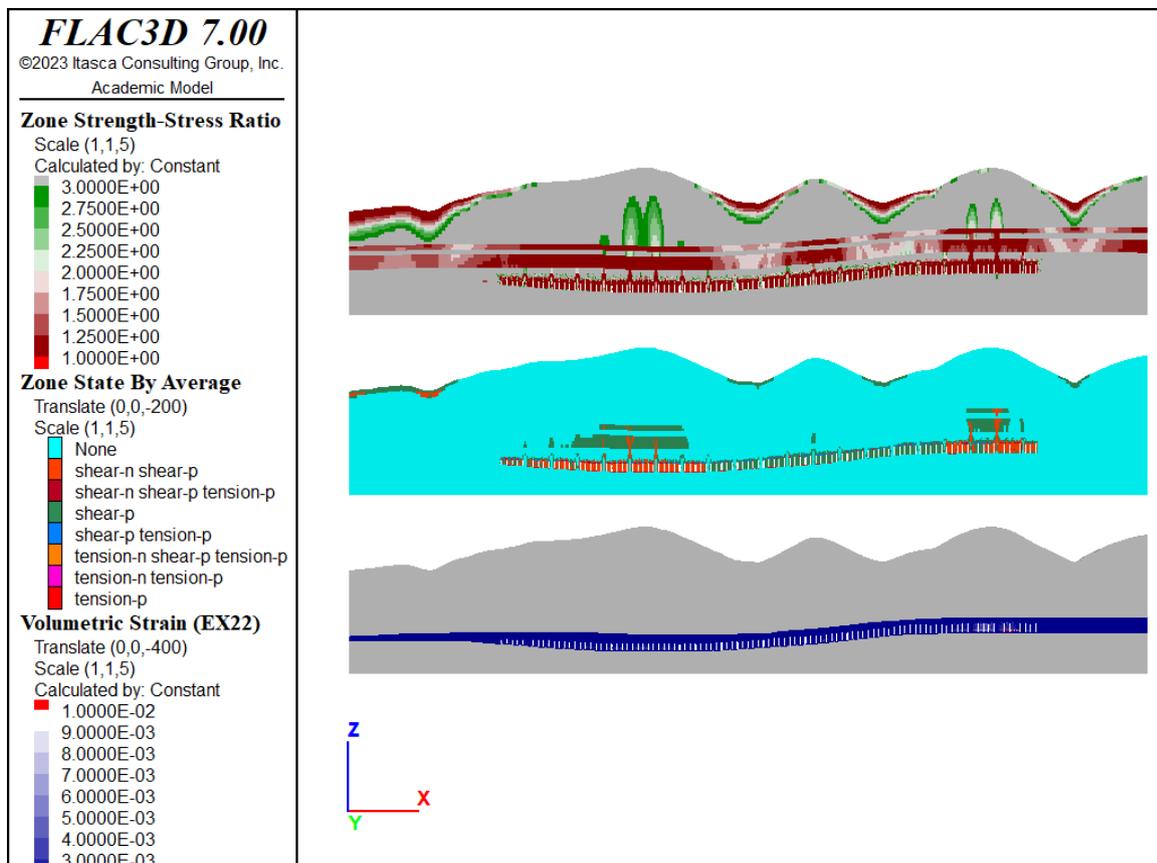


Abbildung 8: Finales Berechnungsergebnis (Seitendruck 0,6) im gefluteten Zustand mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0

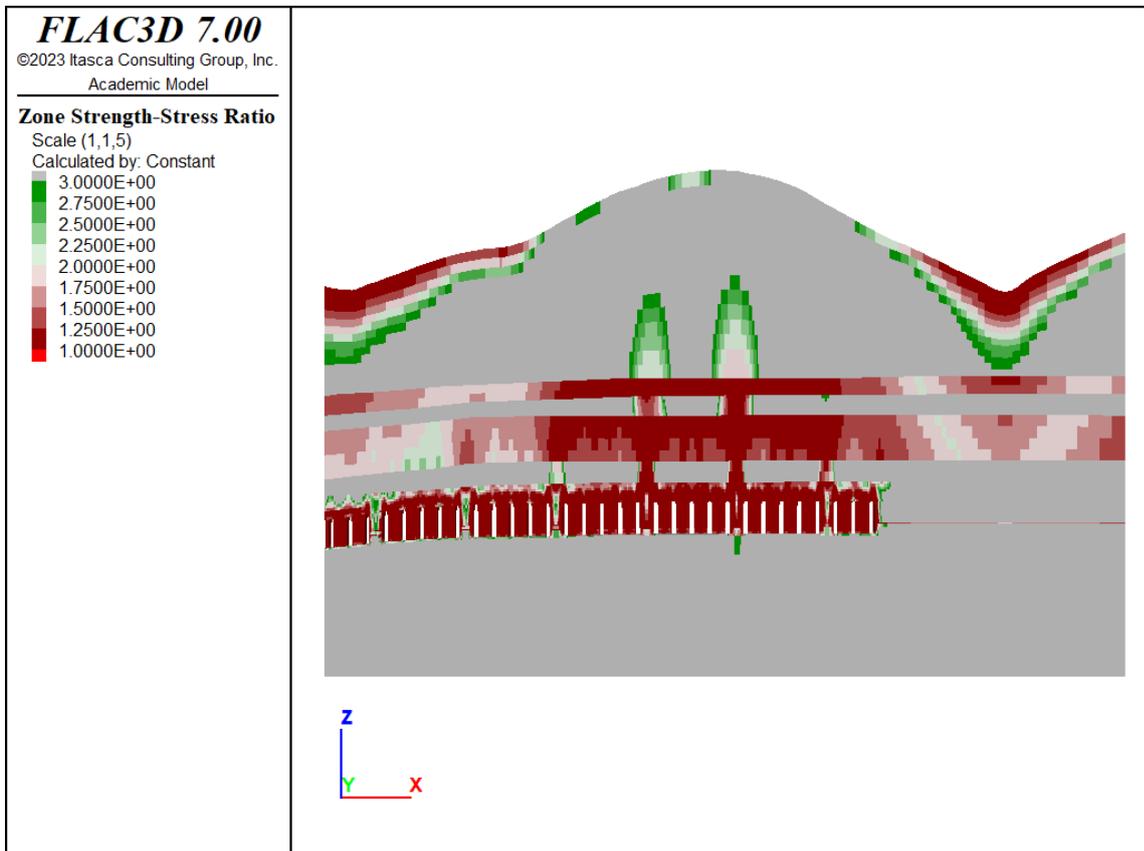


Abbildung 9: Detailansicht des gefluteten Zustands (Seitendruck 0,6) mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0 – SSR (= Festigkeitsreduktion)

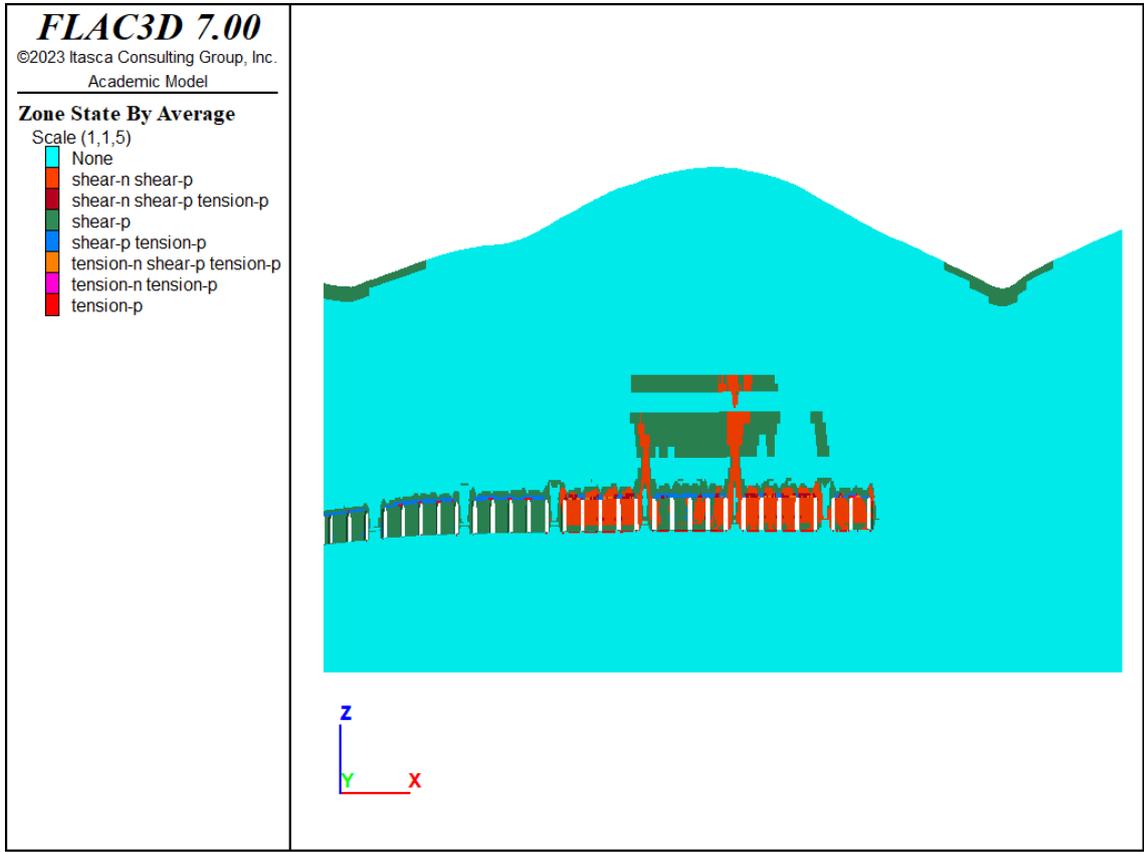


Abbildung 10: Detailansicht des gefluteten Zustands (Seitendruck 0,6) mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0 - Plastifizierung

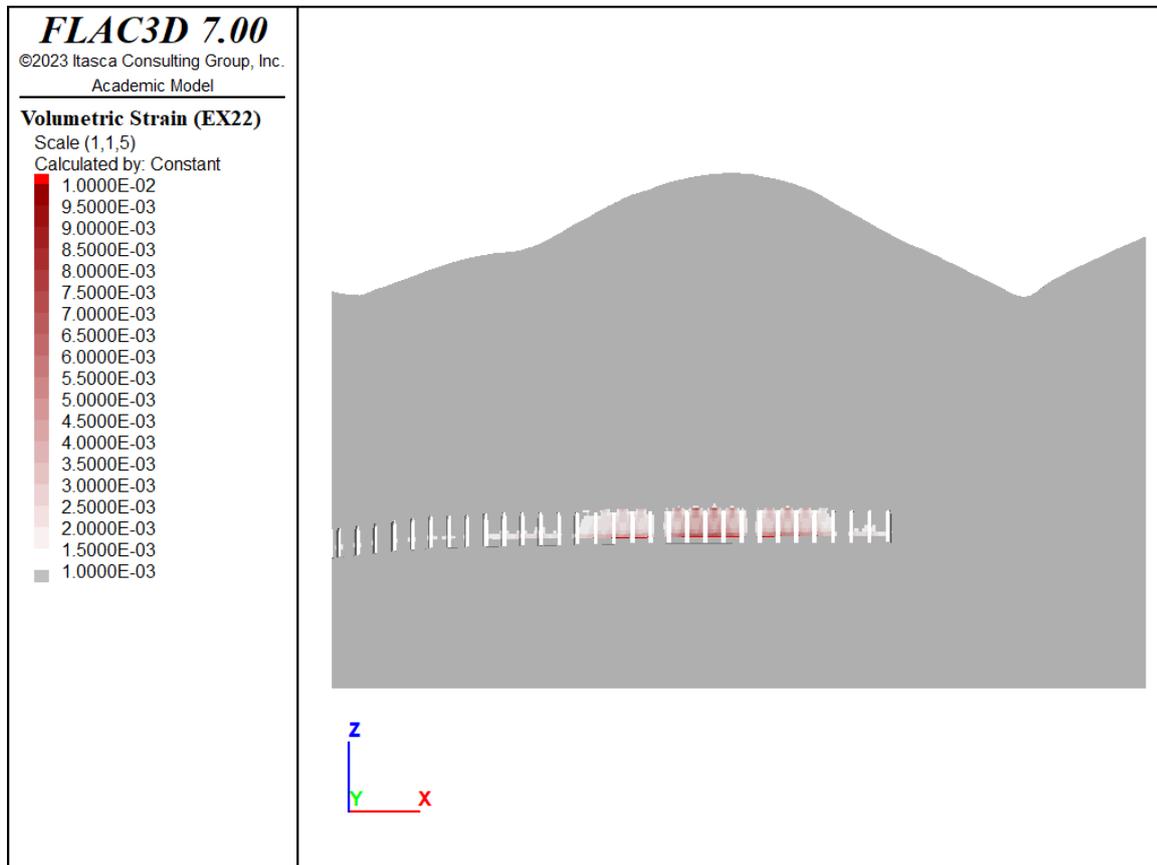


Abbildung 11: Detailansicht des gefluteten Zustands (Seitendruck 0,6) mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0 – VSI (= volumetrische Deformation)

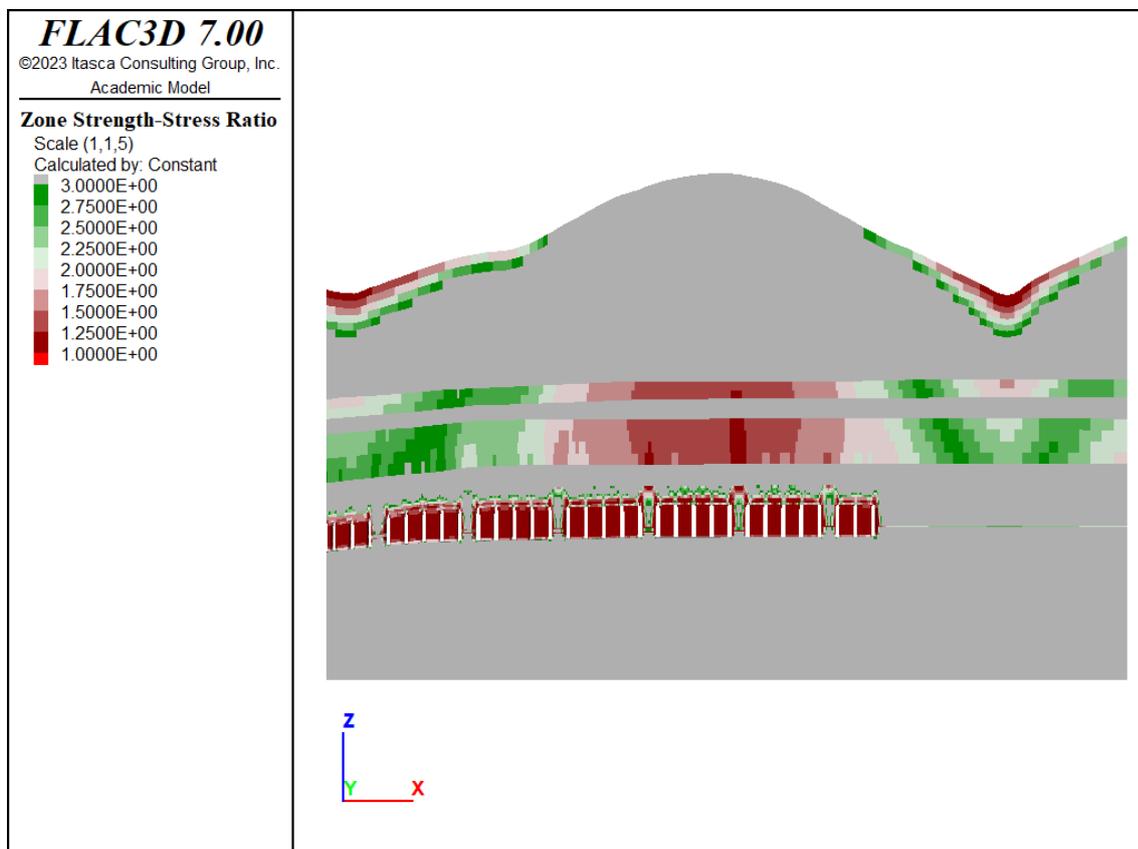


Abbildung 12: Detailansicht des gefluteten Zustands (Seitendruck 0,6) mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5 – SSR (= Festigkeitsreduktion)

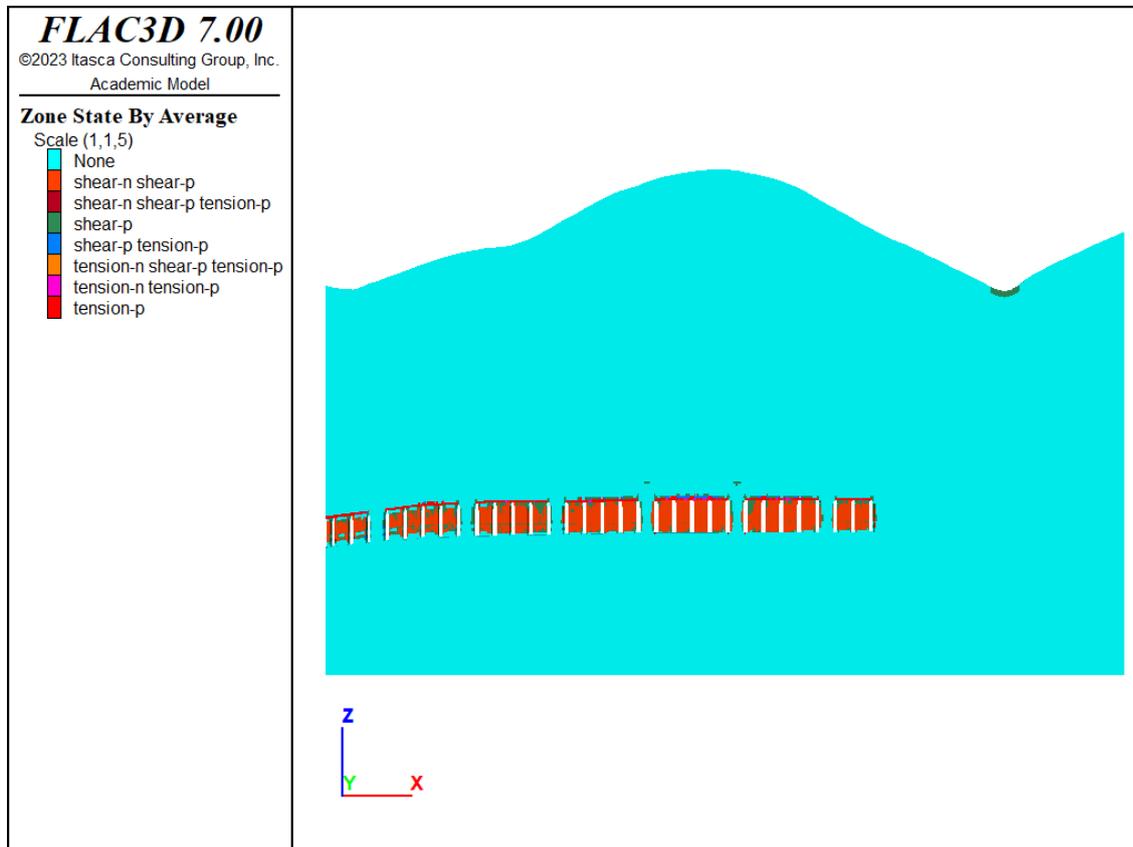


Abbildung 13: Detailansicht des gefluteten Zustands (Seitendruck 0,6) mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5 - Plastifizierung

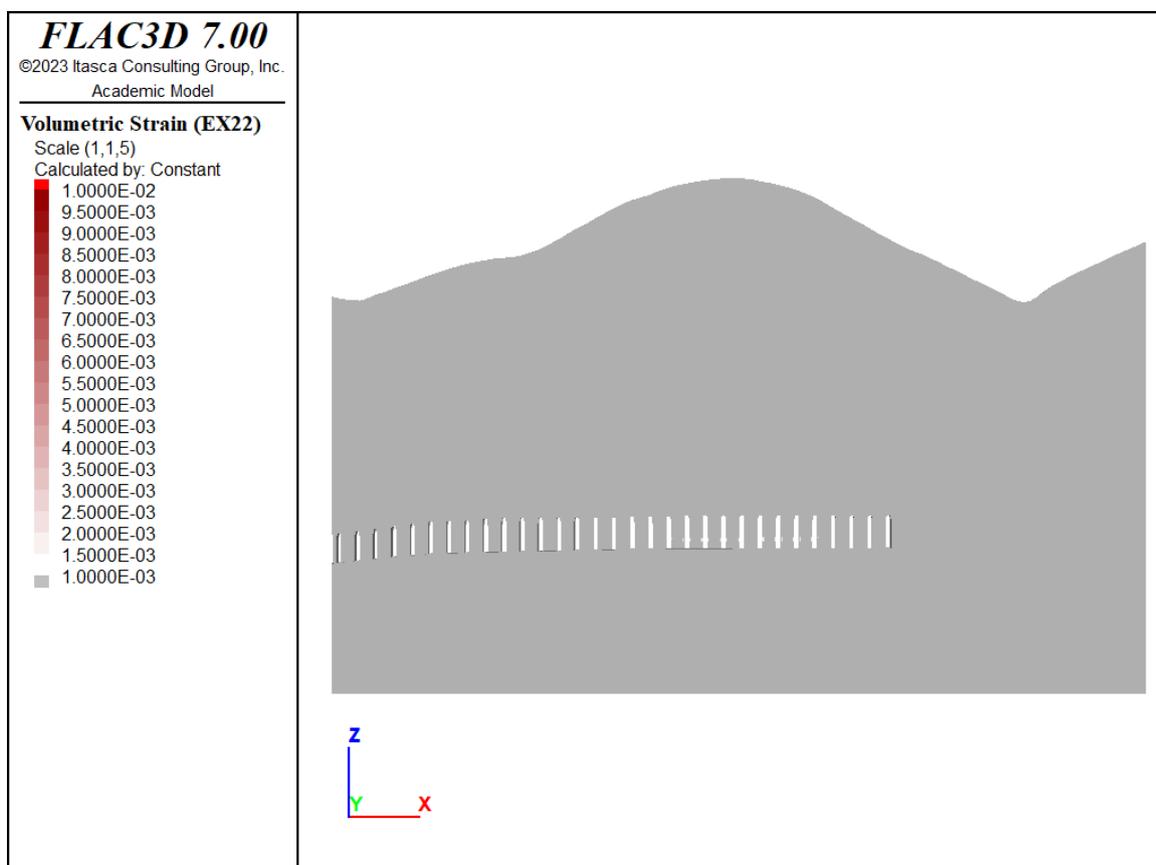


Abbildung 14: Detailansicht des gefluteten Zustands (Seitendruck 0,6) mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5 – VSI (= volumetrische Deformation)

Besondere Bedeutung kommt der Barriere ,y_lg' (Ton-Sulfat-Wechselagerung) direkt oberhalb der Abbaue sowie den beiden GW-Leitern zu, weshalb der Zustand dieser Bereiche durch einen speziellen Plot analysiert wird.

Die Barrierschicht ,y_lg' wird zur Analyse, analog zu Bericht von Morgenstern, Friedel & Konietzky (2024), in mehrere Einzelschichten unterteilt. Sie wird von Top ,y_lg' aus gemessen. Es werden jeweils die Mittelwerte sowie minimalen und maximalen Werte aus allen Zonen der volumetrischen Dehnung der entsprechenden Schicht ausgelesen und in Form von Balkendiagrammen dargestellt (Abb. 15 – 17).

Aufgrund der langen Rechenzeiten wurden nur die diskreten Festigkeitsreduktionsfaktoren $F = 1.5$, und 2.0 betrachtet.

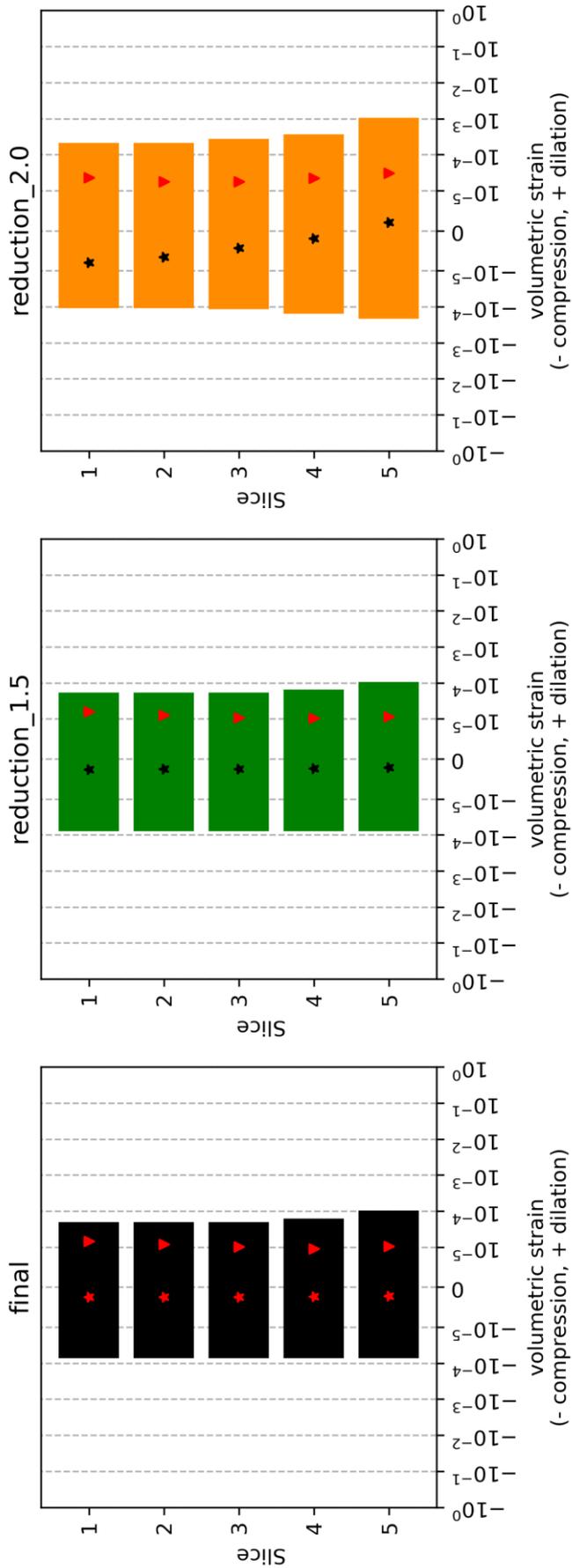


Abbildung 15: Volumetrische Dehnung der Einzelschichten aus y -Ilg für die drei untersuchten Zustände mit Seitendruck 0,6 im gefluteten Modell. Die Sterne stellen den Mittelwert aus der gesamten Einzelschicht und die Dreiecke die Mittelwerte des dilatanten Anteils in der Schicht dar.

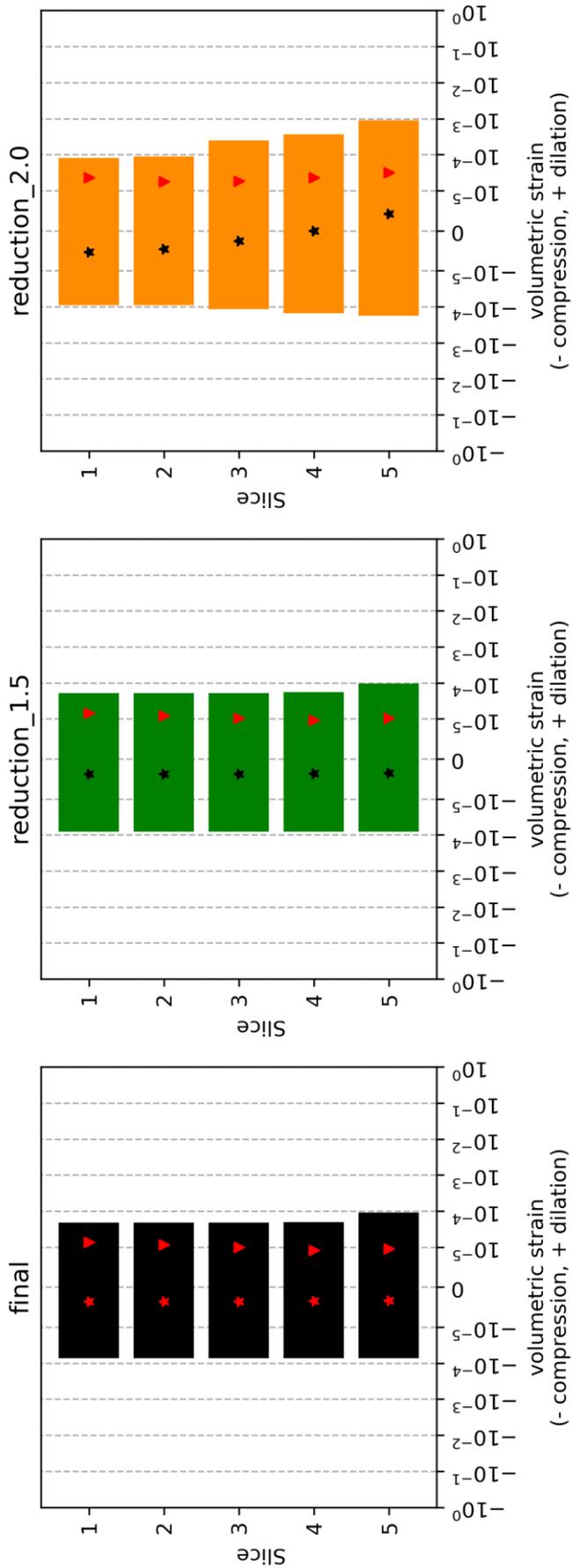


Abbildung 16: Volumetrische Dehnung der Einzelschichten aus y -Ilg für die drei untersuchten Zustände mit Seitendruck 0,8 im gefluteten Modell. Die Sterne stellen den Mittelwert aus der gesamten Einzelschicht und die Dreiecke die Mittelwerte des dilatanten Anteils in der Schicht dar.

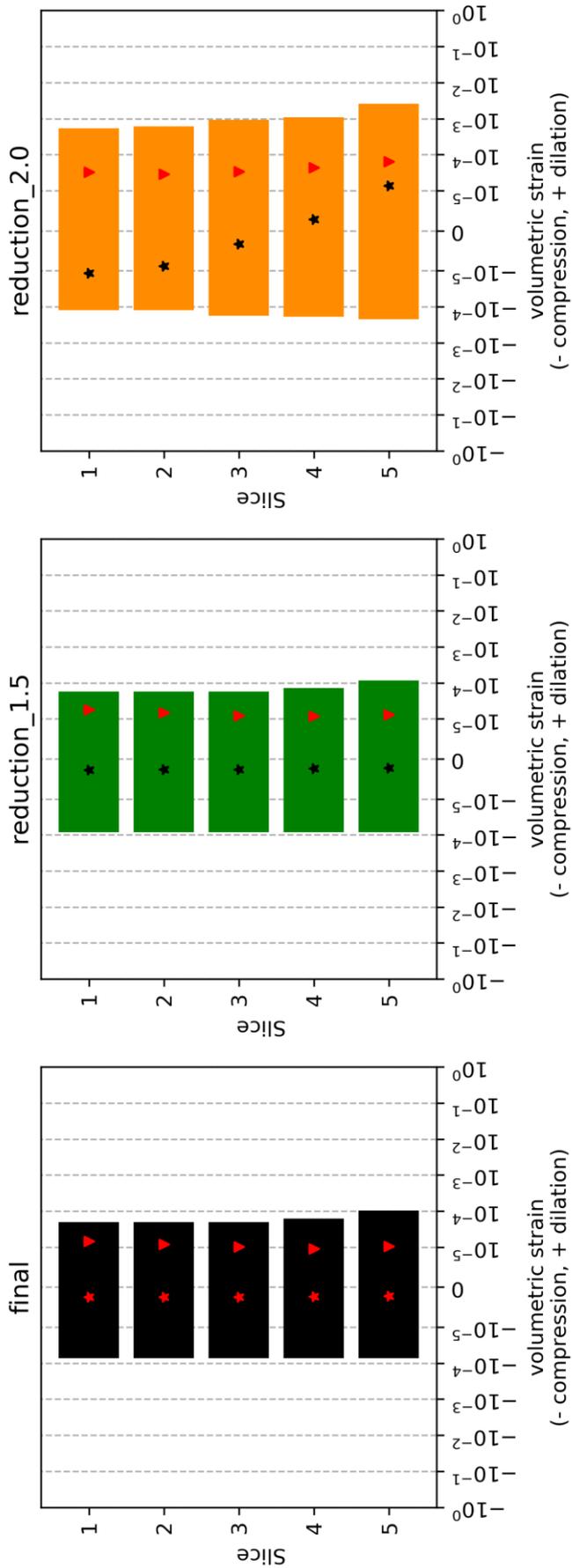


Abbildung 17: Volumetrische Dehnung der Einzelschichten aus y -Ilg für die drei untersuchten Zustände mit Seitendruck 0,6 aus dem ungefluteten Modell aus dem vorangegangenen Bericht. Die Sterne stellen den Mittelwert aus der gesamten Einzelschicht und die Dreiecke die Mittelwerte des dilatanten Anteils in der Schicht dar.

Diskussion der Ergebnisse

Das besondere Gewicht der in diesem Bericht vorgestellten Modellierung liegt auf dem Nachweis, dass die Integrität der Barrierschicht y-lg sowie der darüber liegenden Gesteinspakete selbst im ‚worst case szenario‘ einer vollständigen Flutung der Grube gewährleistet bleibt und es nicht zu großräumigen signifikanten Deformationen im Deckgebirge oder gar zu Tagesbrüchen kommen kann. Die Flutung der gesamten Grube bis hinauf zur Grundwassergleichen bewirkt zweierlei: zum einem bewirken die Porenwasserdrücke ein reduziertes Festigkeitsniveau (Effektivspannungskonzept), zum anderen wirkt der Wasserdruck in den Kammern stabilisierend auf die Hohlraumkonturen im Form von Normalspannungen an der Kontur.

Im Fall ohne Festigkeitsreduktion sowie bei einer Festigkeitsreduktion mit dem Faktor 1.5 entstehen lokale Festigkeitsüberschreitungen nur unmittelbar im Nahbereich der Kammern, d.h. in den äußeren Bereichen der Pfeiler, ohne den Pfeilerkern zu schädigen sowie in den unmittelbaren First- und Sohlbereichen. Barriere und Deckgebirge verhalten sich rein elastisch. Die volumetrischen Deformationen in der Barriere liegen lokal auch im Maximum nur bei $1E-4$ und im Mittelwert eher bei $1E-5$. Da signifikante Schädigungen der Barriere erst ab einer Deformation von ca. $1e-2$ zu erwarten sind (siehe Morgenstern, Friedel & Konietzky, 2024), kann auch aus dieser Sicht eine Schädigung des Deckgebirges ausgeschlossen werden.

Im Falle der Festigkeitsreduktion mit dem Faktor 2 ergibt sich ein etwas anderes Bild. Der Großteil des Deckgebirges reagiert weiterhin elastisch, d.h. signifikante Verformungen oder gar Tagesbrüche sind auch in diesem Fall ausgeschlossen. Es kommt aber sehr lokal und temporär zu Plastifizierungen in der Barriere. Die volumetrischen Deformationen in der Barriere erreichen lokal Maximalwerte von leicht über $1E-3$, im Mittelwert bleiben sie aber immer unter $1E-4$ und im oberen 4/5 der Barriere auch im Maximum stets unter $1E-3$. Somit kann auch hier eine signifikante Schädigung der Barriere und des Deckgebirges insgesamt ausgeschlossen werden.

Die Annahme eines etwas erhöhten Seitendruckbeiwertes (0.8 anstatt von 0.6) führt zu etwas positiveren Ergebnissen, d.h. leicht reduzierte volumetrische Deformationen, leicht erhöhte lokale Sicherheitsfaktoren, leicht reduzierte Ausdehnung von Plastifizierungen. Das Gesamtverhalten unterscheidet sich aber nicht signifikant vom Fall mit Seitendruckbeiwert von 0.6.

Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die angewandte Festigkeitsreduktionsmethode zum Nachweis der Langzeitsicherheit für den Abbauhorizont durchaus sinnvoll und gängige Praxis ist, da hier durch die extremen Spannungsumlagerungen, subkritisches Risswachstum etc. mit einer langfristigen lokalen Entfestigung zu rechnen ist. Für das Deckgebirge trifft dies nur sehr bedingt zu. Daher ist der gewählte Ansatz, alle Schichten in die Festigkeitsreduktion einzubeziehen, sehr konservativ. Weiterhin konservativ wirkt, dass der Biot-Koeffizient auf 1 gesetzt wurde. In der Realität dürfte er zwischen 0.5 und 1 liegen und damit die Effektivspannungen weniger erniedrigen, was zu einem höheren Sicherheitsniveau führen würde.

Literaturverzeichnis

Abbas, S.M.; Konietzky, H. (2017): Rock mass classification systems (https://tu-freiberg.de/sites/default/files/media/professur-felsmechanik-32204/E-book/10_rock_mass_classification_systems.pdf)

DMT (20239): mündliche und schriftliche Mitteilungen

Morgenstern, R.; Konietzky, H., Frühwirt, T. (2023): Projektbericht ,Numerische Standsicherheitsuntersuchungen für das geplante Bergwerk „Altertheim“ – Teilprojekt I, Institut für Geotechnik, TU BAF, 03.03.2023

Morgenstern, R., Friedel, M; Konietzky, H. (2023): Bericht zur Barriereintegrität für das Vorhaben Altertheimer Mulde, Institut für Geotechnik, TU BAF, 05.08.2024