



TUBAF

Die Ressourcenuniversität.
Seit 1765.

Institut für Geotechnik

Professur für
Gebirgs- und

Felsmechanik/Felsbau

Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky



„Bericht zur 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: M.Sc. Roy Morgenstern
Dipl.-Ing. Max Friedel
Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Konietzky

.....
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	7
Vorgehensweise und Datengrundlage.....	8
Modellaufbau	12
Berechnungsergebnisse	14
Diskussion der Ergebnisse	22
Literaturverzeichnis	23

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schnitt B - B' mit geologischen Einheiten und Bohrungen.....	8
Abbildung 2: Schnitt B - B' (Ausschnitt, überhöht) mit den geologischen Einheiten und den Wasserständen ausgewählter Grundwassermessstellen mit Schwankungsbereich.	8
Abbildung 3: 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 x-Richtung um den Faktor 0,5 gestaucht und in z-Richtung um den Faktor 5 überhöht dargestellt.....	12
Abbildung 4: Finales Berechnungsergebnis im abgebauten Zustand ohne Festigkeitsreduktion mit Kennzeichnung des Fensters für die Detailansichten	14
Abbildung 5: Detailansicht des abgebauten Zustands ohne Festigkeitsreduktion - SSR	15
Abbildung 6: Detailansicht des abgebauten Zustands ohne Festigkeitsreduktion - Plastifizierung	15
Abbildung 7: Detailansicht des abgebauten Zustands ohne Festigkeitsreduktion - VSI	16
Abbildung 8: Finales Berechnungsergebnis im abgebauten Zustand mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5.....	16
Abbildung 9: Detailansicht des abgebauten Zustands mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5 - SSR	17
Abbildung 10: Detailansicht des abgebauten Zustands mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5 - Plastifizierung.....	17
Abbildung 11: Detailansicht des abgebauten Zustands mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5 - VSI	18
Abbildung 12: Finales Berechnungsergebnis im abgebauten Zustand mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0.....	18
Abbildung 13: Detailansicht des abgebauten Zustands mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0 - SSR.....	19
Abbildung 14: Detailansicht des abgebauten Zustands mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0 - Plastifizierung.....	19
Abbildung 15: Detailansicht des abgebauten Zustands mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0 - VSI	20
Abbildung 16: Volumetrische Dehnung 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 (,'final' bezeichnet die Berechnungen ohne Festigkeitsreduktion, d.h. den realen in-situ Zustand).	21

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Konservativer Gebirgsdatensatz für das Deckgebirge (DS-0)	9
Tabelle 2: Konservativer Gebirgsdatensatz (DS-I)	9
Tabelle 3: Optimistischer Gebirgsdatensatz (DS-II).....	10

ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS / BEGRIFFSERKLÄRUNG

AG	Auftraggeber
AN	Auftragnehmer
Barriere	Ton-Sulfat-Wechselagerung oberhalb des Gipsabbauhorizontes
Barrierepfeiler	Barrierepfeiler zeichnen sich im Gegensatz zu regulären Pfeilern durch einen vergrößerten Querschnitt (Fläche) aus, die dadurch entsteht, dass entweder der Durchörterungsgrad reduziert wird – wie hier der Fall – oder die Pfeilerbreite insgesamt erhöht wird.
c	Kohäsion [Pa] gemäß Mohr-Coulomb-Stoffgesetz
g	Gravitationskonstante = 9.81 m/s^2
FOS	Factor-of-Safety (Sicherheitsfaktor)
GSI	Geological Strength Index (Gebirgsklassifizierung)
K_{INI}	Permeabilität im gesättigten Ausgangszustand (Laborversuche) [m^2]
K_{END}	Permeabilität im Endzustand im Nachbruchbereich bei maximaler volumetrischer Deformation (Laborversuche) [m^2]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert gemäß Darcy-Gesetz [m/s]
k_{rat}	Verhältnis der Permeabilität im Endzustand (nach Hohlraumherstellung) zu der im Ausgangszustand (vor bergbaulichem Eingriff)
PK	Probenkennzeichnung
P_{H2O}	Fluiddruck am Ein- und Auslass der Probe bei hydro-mechanischen Triaxialversuchen [Pa]
Q	Fluidvolumenstrom [l/s]
SSR	Shear-Strength-Reduction = Scherfestigkeitsreduktion
UCS	Uniaxial Compressive Strength = Einaxiale Druckfestigkeit [Pa]
VSI	Volumetric Strain Increment – Volumetrische Deformation [l]
$\Delta\varepsilon_v$	Volumetrische Dehnung bei Erreichen des Endzustandes im Nachbruchbereich (Maximalwert Laborversuche) [l]
Φ	Reibungswinkel [$^\circ$] gemäß Mohr-Coulomb-Stoffgesetz
ρ_w	Dichte von Wasser = 1000 kg/m^3
ρ	Dichte von Gestein [kg/m^3]
σ_t	Zugfestigkeit Gestein [Pa]
$\sigma_{3,1}$	Manteldruck bei hydro-mechanischen Triaxialversuchen [Pa]
$\sigma_{u,1}$	Maximale Spannung (Bruchpunkt) bei hydro-mechanischen Triaxialversuchen [Pa]

Bezeichnung der geologischen Formationen:

dolomite	Untere Dolomite / Liegendes
yl_2	Unteres Gipslager
ZM	Zwischenmittel
y2	Oberes Gipslager
y-lg	Ton-Sulfat-Wechselagerung (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 wurden Erkundungsbohrungen durchgeführt. Die gewonnenen Kerne wurden im gesteinsmechanischen Labor der TU Bergakademie Freiberg untersucht und entsprechende gesteinsmechanische Parameter bestimmt (Frühwirt, 2019). Diese bilden - nach Ableitung der entsprechenden Gebirgsparameter - die Grundlage für die nachfolgenden numerischen Simulationen.

Der untertägige Abbau der Lagerstätte bedingt auch Bewegungen im Deckgebirge. Da im Deckgebirge zwei Grundwasserleiter platziert sind, die eine besondere Bedeutung für die Trinkwasserversorgung haben, ist die Untersuchung, inwieweit durch die bergbaulichen Aktivitäten die Integrität des Deckgebirges beeinträchtigt wird oder nicht, von großer Bedeutung.

Die Deckgebirgsbewegungen und damit auch die Beanspruchung der Barriere sind in den verschiedenen Abbaubereichen unterschiedlich. Die größten Zerrungen und damit auch Beanspruchungen sind in den Randbereichen zu erwarten, wobei es davon abhängt, wie sie ausgebildet sind. Die bereits erstellten 3D-Kammer-Pfeiler-Modelle (Morgenstern, Konietzky & Frühwirt, 2023) sind für die Beurteilung der Standsicherheit des Kammer-Pfeiler-Systems relevant und aussagekräftig, geben aber keine hinreichenden und detaillierten Aussagen zu den Deckgebirgsbewegungen. Andererseits wäre der Aufbau eines umfassenden 3D-Modells extrem aufwändig (rechentechnisch derzeit unmöglich zu realisieren). Deshalb wird als Kompromiss ein repräsentatives 2.5D-Modell entlang eines Schnittes erstellt, welches längs durch die gesamte Lagerstätte verläuft und dabei alle potentiell kritischen Faktoren berücksichtigt (dabei wird das Zwischenmittel konstant mit einer Mächtigkeit von 1,5 m angesetzt).

Für die durchgeführte Modellierung wurde ein Modell entsprechend der aktuellen Daten (Grundwasserstände, Geologie, Modellparameter) in Absprache mit dem AG angepasst und entspricht damit geologisch-geohydraulisch auch dem Modell, wie es die DMT (2023) für ihre Nachweisführung benutzt.

Vorgehensweise und Datengrundlage

Durch den AG wurde ein repräsentativer Schnitt (B-B') ausgewählt, welcher als Grundlage für die Modellierung dient (siehe Abbildung 1)

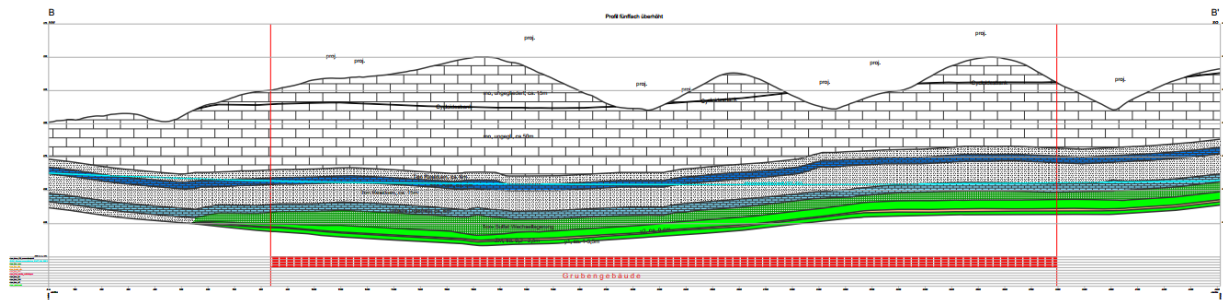


Abbildung 1: Schnitt B - B' mit geologischen Einheiten und Bohrungen.

Für diesen Schnitt wurden durch den AG die Schichtgrenzen und die Wasserstände an ausgewählten Grundwassermessstellen entlang des Profils an den AN übermittelt. Abbildung 2 zeigt in einem Detailbild den Schichtenaufbau.

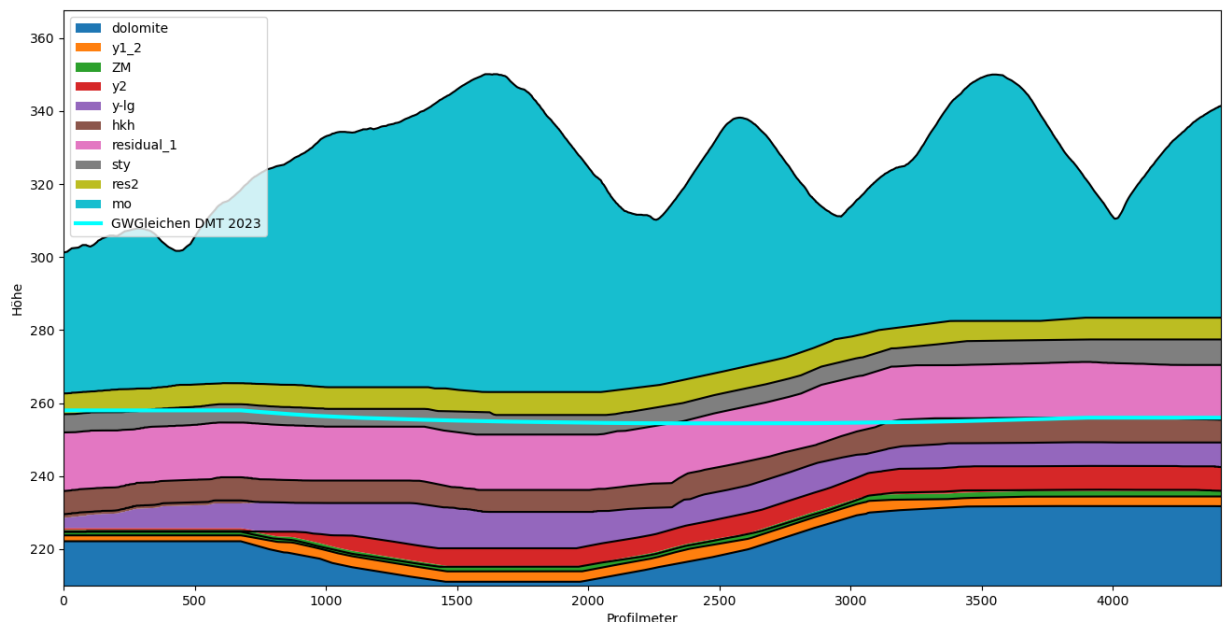


Abbildung 2: Schnitt B - B' (Ausschnitt, überhöht) mit den geologischen Einheiten und den Wasserständen ausgewählter Grundwassermessstellen mit Schwankungsbereich.

Zur Bewertung der Barriereintegrität wurden 2.5-dimensionale numerische Berechnungen mit dem Programm FLAC3D der Firma Itasca durchgeführt, welches speziell für felsmechanische Aufgaben entwickelt wurde und weiterhin wird. Dieses Programm wird weltweit zur Lösung geomechanischer Fragestellungen eingesetzt, so z.B. im Bergbau, Spezialtiefbau, Kavernen- und Tunnelbau.

Das 2.5D-Modell besteht aus jeweils 1/2 Pfeiler und 1/2 Kammer mit der entsprechenden Ausdehnung senkrecht zur Schnittebene (bei konstanter Kammerbreite von 8 m). Es werden über den gesamten Abbaubereich (in Abbildung 2 entspricht das dem Bereich zwischen etwa 835 und 3800 m) Kammern und Pfeiler in einem gleichmäßigen Raster platziert. Dabei wird jeder fünfte Pfeiler als Barrierepfeiler ausgeführt. Ausgehend von den Untersuchungen aus Morgenstern, Konietzky & Frühwirt (2023) wird die Pfeilerbreite in dieser Modellierung konstant auf 21 Meter gesetzt. Um den Lastabtrag über die Pfeiler

und die Firststabilität zu verbessern, werden die Kammern mit abgerundeter Kammerfirste ausgeführt. Der Radius der Kreisbögen an den Kammerseiten beträgt dabei etwa 1,5 Meter.

Die beiden Gebirgsdatensätze für den Abbaubereich für die Schichten y1_2, y2, y-lg, ZM und Dolomite (entsprechend den Schichtbezeichnungen in Abbildung 2), welche in den nachfolgenden Berechnungen verwendet werden, werden aus Morgenstern, Konietzky & Frühwirt (2023) übernommen:

DS-I: Konservativer Gebirgsdatensatz

DS-II: Optimistischer Gebirgsdatensatz

Der konservative Datensatz entspricht einer realistischen Beschreibung der Festigkeits- und Deformationseigenschaften, wie sie nach gegenwärtigem Kenntnisstand in weiten Teilen der potentiellen Grube zu erwarten sind ohne Kredit zu nehmen von lokal günstigeren Situationen. Der optimistische Datensatz beschreibt die durchaus vorhandenen etwas günstigeren Lokationen mit höheren Festigkeitswerten. Vereinzelt ist nicht auszuschließen, dass Festigkeitswerte lokal begrenzt auch noch unterhalb des konservativen Datensatzes liegen. Dort wären dann lokal Sicherungsmaßnahmen vorzunehmen oder der Bereich wird umfahren.

Im Zuge der Aktualisierung der Datensätze wurden folgende gebirgsmechanische Parameter für die Schichten hkh (Dolomite), residual_1 (Residualgebirge), sty (Dolomite), res2 (Residualgebirge) und mo (Kalk- und Tonstein) abgeleitet, wobei für die Parameter gilt: hkh = sty und residual_1 = res2.

Tabelle 1: Konservativer Gebirgsdatensatz für das Deckgebirge (DS-0)

Schicht	GSI	E [GPa]	v [-]	c [MPa]	ϕ [°]	UCS [MPa]	σ_t [MPa]	ρ [kg/m ³]
res2	30	1.0	0.40	0.073	24.2	0.23	0.001	2200
sty	40	3.2	0.25	0.344	50.2	1.90	0.060	2500
mo	35	1.7	0.30	0.253	45.0	1.22	0.043	2600

Die Querdehnzahlen wurde nicht explizit ermittelt, sondern geschätzt. Auf die Berechnungsergebnisse haben sie aber ebenso wie der Dilatanzwinkel, der generell auf 1/3 des Reibungswinkels gesetzt wurde, keinen signifikanten Einfluss. Das primäre Spannungsfeld wurde messtechnisch nicht bestimmt. Es wurden daher eine gravitativ getriebene Vertikalspannung sowie horizontale Komponenten angenommen, die sich aus einem Seitendruckbeiwert von 0.6 herleiten. Dieser Ansatz ist konservativ.

Tabelle 2: Konservativer Gebirgsdatensatz (DS-I)

Schicht	RQD	GSI	E [GPa]	v [-]	c [MPa]	ϕ [°]	UCS [MPa]	σ_t [MPa]	ρ [kg/m ³]
y-lg	70	74	16.0	0.25	0.75	43.3	3.50	0.26	2330
y2	70	74	12.0	0.25	1.12	46.0	5.88	0.44	2330
ZM	50	62	0.6	0.25	0.28	27.1	0.72	0.09	2300
Y1	80	77	19.4	0.25	1.59	47.7	8.90	0.71	2340
Liegendes	80	77	32.9	0.25	3.87	54.3	25.03	1.77	2500

Tabelle 3: Optimistischer Gebirgsdatensatz (DS-II)

Schicht	RQD	GSI	E [GPa]	v [-]	c [MPa]	ϕ [°]	UCS [MPa]	σ_t [MPa]	ρ [kg/m ³]
y-lg	80	77	16.9	0.25	1.27	46.8	6.95	0.55	2330
y2	80	77	16.9	0.25	1.27	46.8	6.95	0.55	2330
ZM	60	65	1.9	0.25	0.64	43.4	2.84	0.18	2300
Y1	90	80	22.0	0.25	1.85	48.3	10.52	0.89	2340
Liegendes	90	80	37.0	0.25	4.92	52.2	29.60	2.49	2500

Für das Zwischenmittel ZM gilt folgendes:

Da die Dicke der Schicht ZM im Modell konstant 1,5 m beträgt, wird mittig ein Bereich der Schicht mit 1 m Dicke immer mit DS-I gerechnet und beiderseits werden die umliegenden Schichten bis zur vollen Dicke mit DS-II angenommen.

Für die hier genutzte Pfeilerbreite von 21 Meter wird das Modell mit den Parametern aus DS-I gerechnet (Ausnahme: obiges Verhalten des ZM).

Mit einem speziellen Laborprogramm wurde die Entwicklung der Permeabilität von Gesteinsmaterial aus der Barriere durch Belastung und damit Schädigungsentwicklung untersucht, um die Fähigkeit der Barrieregesteine (Ton-Sulfat-Wechselagerung) zur Selbstabdichtung einschätzen zu können.

Die Versuche wurden unter einer geringen Einspannung durchgeführt, damit in etwa die in-situ vorherrschenden Spannungsbedingungen abgebildet werden, andererseits aber mussten auch messbare Durchflüsse bei den sehr geringen Permeabilitäten erreicht werden. Der absolute Wasserdruck muss dabei zwingend unter dem Druck der seitlichen Einspannung liegen, um Undichtigkeiten zu vermeiden.

Während des Versuches wurde der Manteldruck zu jedem Zeitpunkt konstant gehalten. Zu Beginn eines Versuches ist ein hydrostatischer Spannungszustand von 2.50 MPa angefahren worden. Daraufhin wurde vorsichtig begonnen, die Gesteinsprobe aufzusättigen, bis das System luftleer war. Anschließend begann die erste Messung der Durchströmung und Berechnung der Permeabilität. Dieser Ausgangszustand wurde ebenso als Referenz für die Entwicklung der volumetrischen Deformation im Schädigungsprozess angesetzt. Im weiteren Verlauf ist die axiale Spannung mit einer geringen Belastungszunahme bis zum Erreichen der Dilatanzgrenze erhöht worden. An dieser wurde die Lasterhöhung temporär gestoppt, der Schädigungszustand konstant gehalten sowie eine zweite Messung der Permeabilität durchgeführt. Nach erneuter Lasterhöhung bis an den Bruchpunkt heran, wurde der Schädigungszustand ebenfalls konstant gehalten und die Permeabilität bestimmt. Der letzte Versuchsschritt umfasste eine weitere Deformation über den Bruchpunkt bis weit in den Nachbruchbereich hinein. Hier wurde je nach Prüfkörperzustand nach einer gewissen weiteren plastischen Deformation die Schädigung gestoppt und die Permeabilität bestimmt. Daraufhin war der Versuch beendet. Die detaillierten Versuchsergebnisse sowie Aufnahmen der Proben sind im Anhang zu sehen. Die Versuche führen zu zwei wesentlichen Erkenntnissen (siehe Tab.4 sowie Tabellen im Anhang):

- (a) Die initiale Permeabilität der Proben liegt etwa $1\text{E-}17\text{ m}^2$ (dies entspricht auch den Werten, wie sie die DMT (2023) ermittelt hat)
- (b) Die Permeabilität im Nachbruchbereich liegt bei einer volumetrischen Dilatanz von ca. 0.01 immer noch in der Größenordnung $5\text{E-}16\text{m}^2 - 1\text{E-}17\text{ m}^2$

Tabelle 4: Permeabilitätsentwicklung Ton-Sulfat-Wechselagerung

PK	Teufe [m]	Quell- Tonanteil [%]	$\Delta\varepsilon_v$ [-]	K_{ini} [m ²]	K_{end} [m ²]
UD4_TSW_P3-P4	95-96	0.1	+6.06E-03	1.51E-18	2.89E-17
UD1_TSW_P4	97-98	3.6	+1.27E-02	5.44E-17	4.53E-17
UD3_TSW_P4	123-124	0.6	+3.35E-03	1.53E-17	7.56E-16
UD3_TSW_P4	124-125	0.8	-3.12E-03	4.13E-16	5.73E-16
UD1_TSW_P1	92-93	3.2	+4.01E-03	7.74E-17	3.65E-17
UD1_TSW_P5	99-100	2.0	+1.17E-02	1.20E-17	1.03E-17
UD4_TSW_P5	99-100	1.3	+6.92E-03	2.57E-19	7.45E-19

Wie aus Tab. 4 ersichtlich, bleibt die Permeabilität der Gesteine der Ton-Sulfat-Wechselagerung bis hinein in den Nachbruchbereich (relativ große volumetrische Dilatanz bis ca. $1\text{e-}2$) überwiegend in der gleichen Größenordnung. Vier der sieben Proben zeigen trotz erheblicher volumetrischer Deformation nahezu keine bzw. nur sehr geringe Permeabilitätsänderungen, zwei davon sogar eine geringe Reduktion der Permeabilität. Zwei der sieben Proben dagegen zeigen eine Permeabilitätserhöhung um eine reichliche Größenordnung.

Modellaufbau

Das Modell ist schichtweise mit variierender Diskretisierung aufgebaut. Der mittlere Gitterpunktabstand im Abbaubereich und in der Barriere y-lg beträgt 1 bis 3 m in der Längsachse des Profils. In den anderen Schichten ist der Gitterpunktabstand teilweise deutlich größer (> 5 m). Damit enthält das Modell etwa 706.000 Zonen.

Die Grundwasserleiter hkh und sty werden mittels Initialisierung der Porenwasserdrücke berücksichtigt. 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 DMT (2023) ermittelten Grundwassergleichen genutzt (Abbildung 3).

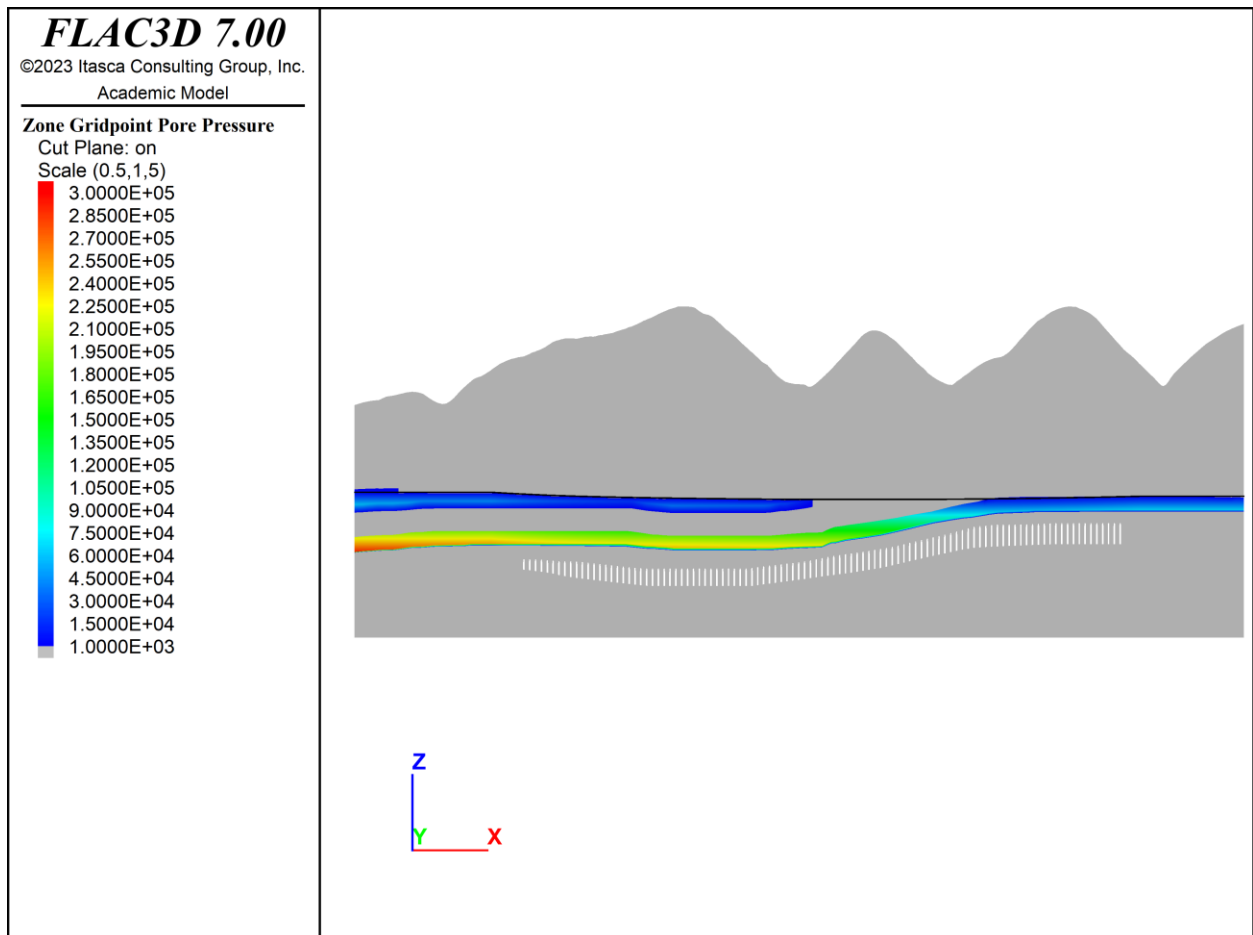


Abbildung 3: In das Modell eingeschriebene Porenwasserdrücke für die Schichten hkh und sty. Der Grundwasserstand (schwarze Linie im Plot stammt von der DMT (2023)). Das Modell ist in x-Richtung um den Faktor 0,5 gestaucht und in z-Richtung um den Faktor 5 überhöht dargestellt.

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.

Danach werden über das gesamte Modell die Festigkeiten mit den Reduktionsfaktoren $F = 1.5$, und 2.0 reduziert und die Modelle erneut für jeden Reduktionsfaktor ins

Gleichgewicht gerechnet. Dabei berechnen sich die reduzierten Werte für Kohäsion c , Zugfestigkeit σ_t und Reibungswinkel ϕ nach:

$$c_{red} = \frac{c}{F}$$

$$\sigma_t^{red} = \frac{\sigma_t}{F}$$

$$\tan\phi_{red} = \frac{\tan\phi}{F}$$

Berechnungsergebnisse

Für die Abbildungen gelten folgende Konventionen:

- Spannungen in Pa, Druck: negativ, Zug: positiv
- Plastifizierungen:
 - 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 (Werte > 3 sind in grauer Farbe dargestellt)
- Die Darstellungen aus FLAC3D sind zur besseren Lesbarkeit jeweils 5-fach überhöht dargestellt

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).

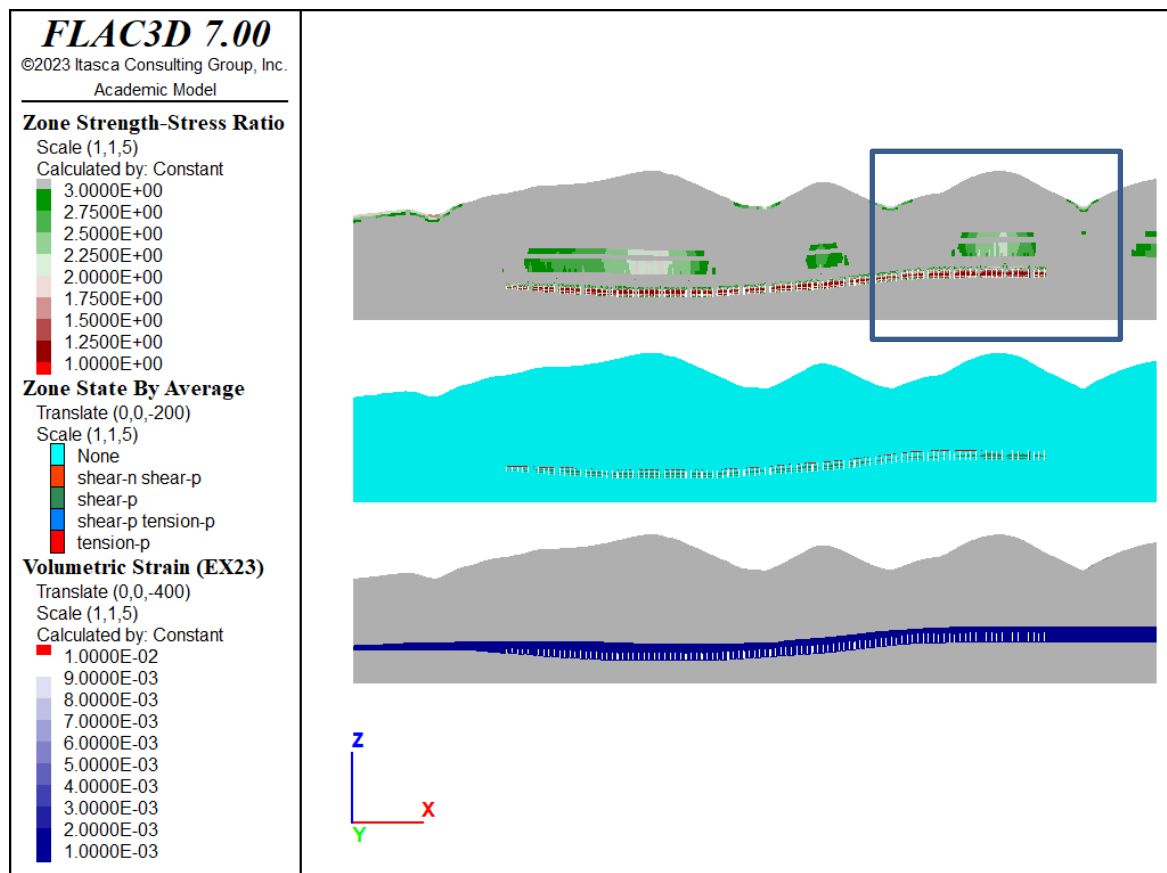


Abbildung 4: Finales Berechnungsergebnis im abgebauten Zustand ohne Festigkeitsreduktion mit Kennzeichnung des Fensters für die Detailansichten

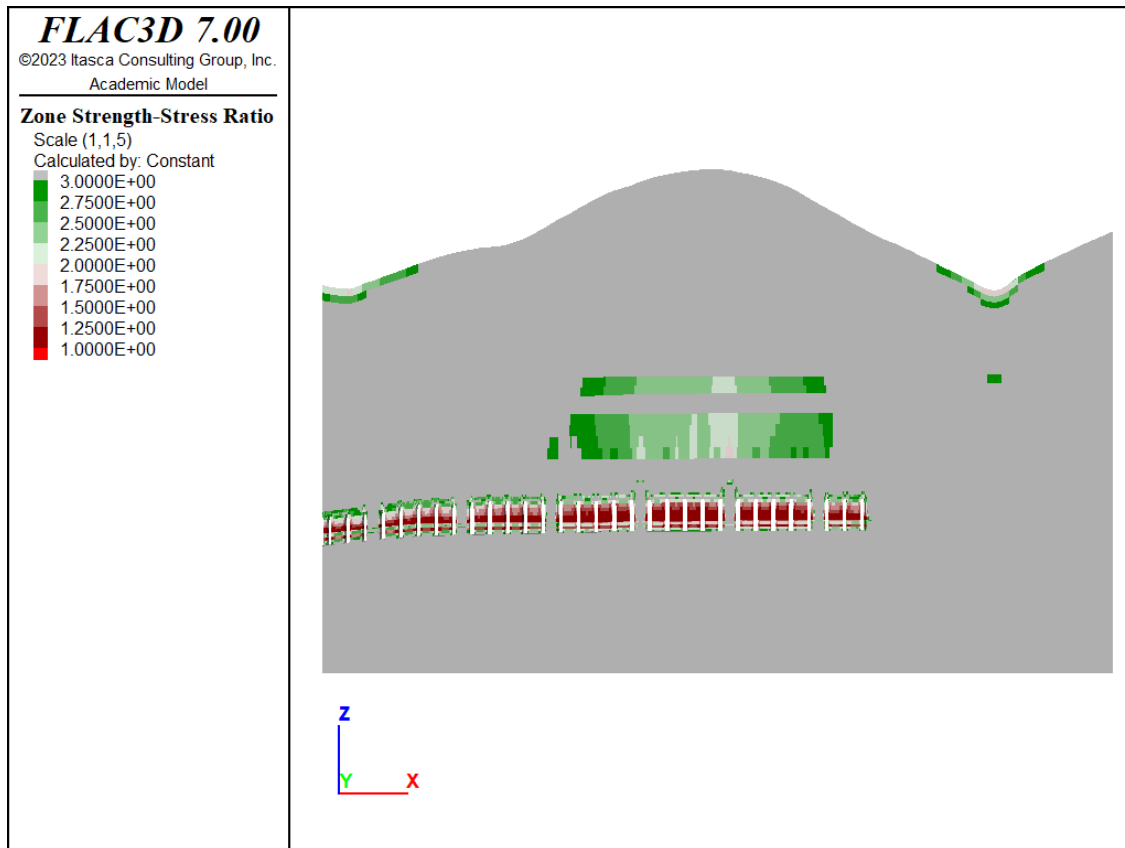


Abbildung 5: Detailansicht des abgebauten Zustands ohne Festigkeitsreduktion - SSR

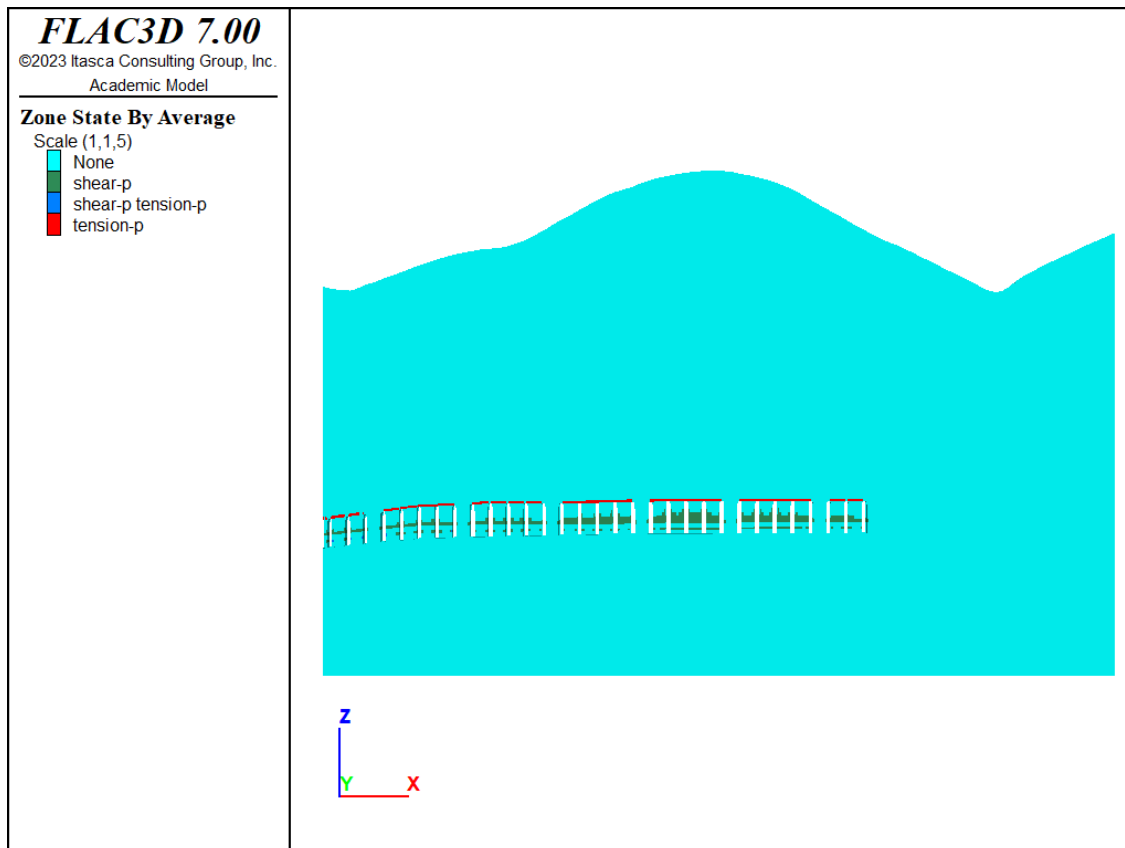


Abbildung 6: Detailansicht des abgebauten Zustands ohne Festigkeitsreduktion - Plastifizierung

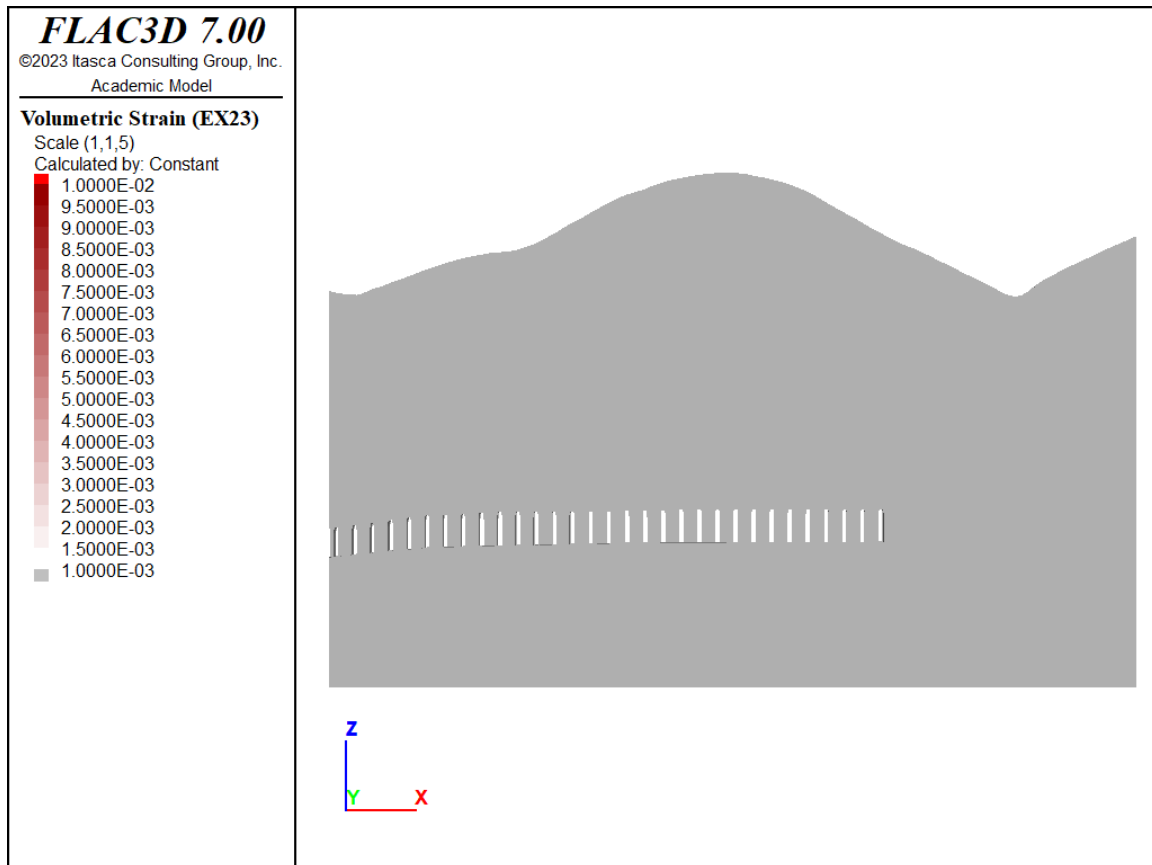


Abbildung 7: Detailansicht des abgebauten Zustands ohne Festigkeitsreduktion - VSI

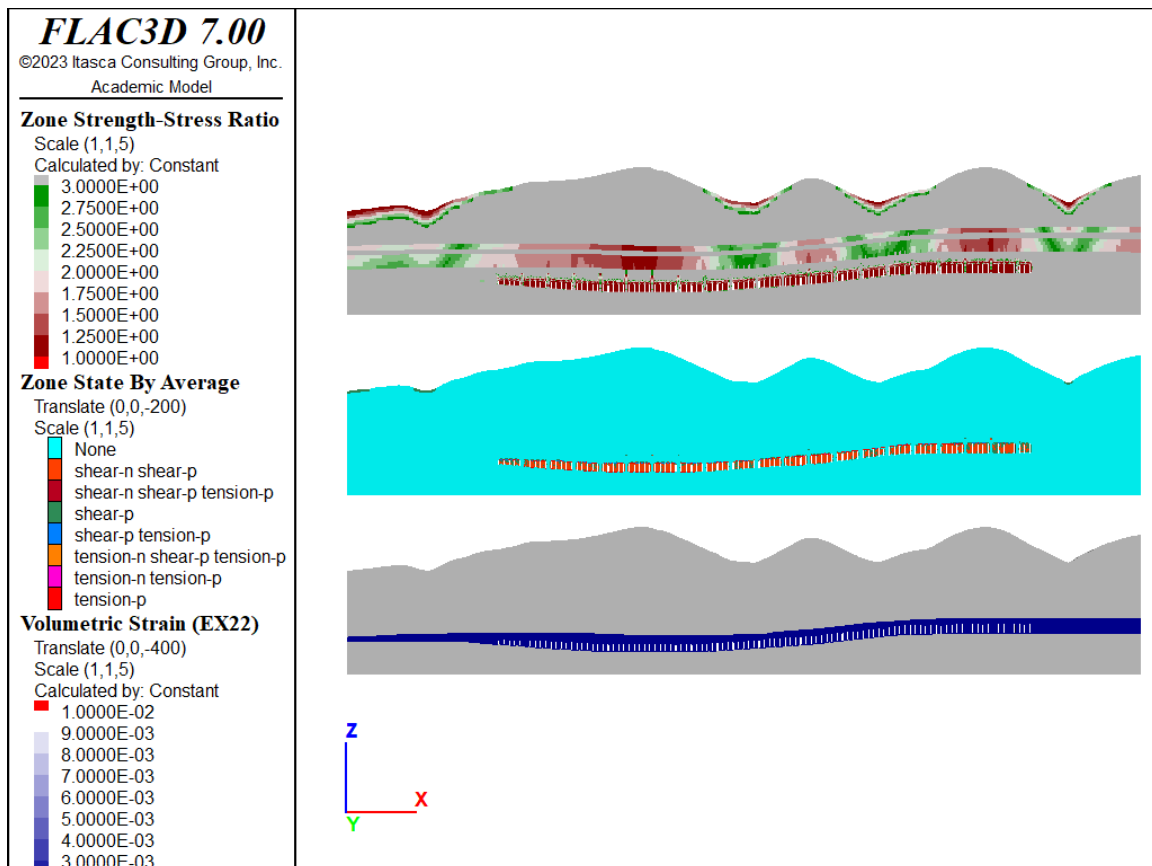


Abbildung 8: Finales Berechnungsergebnis im abgebauten Zustand mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5

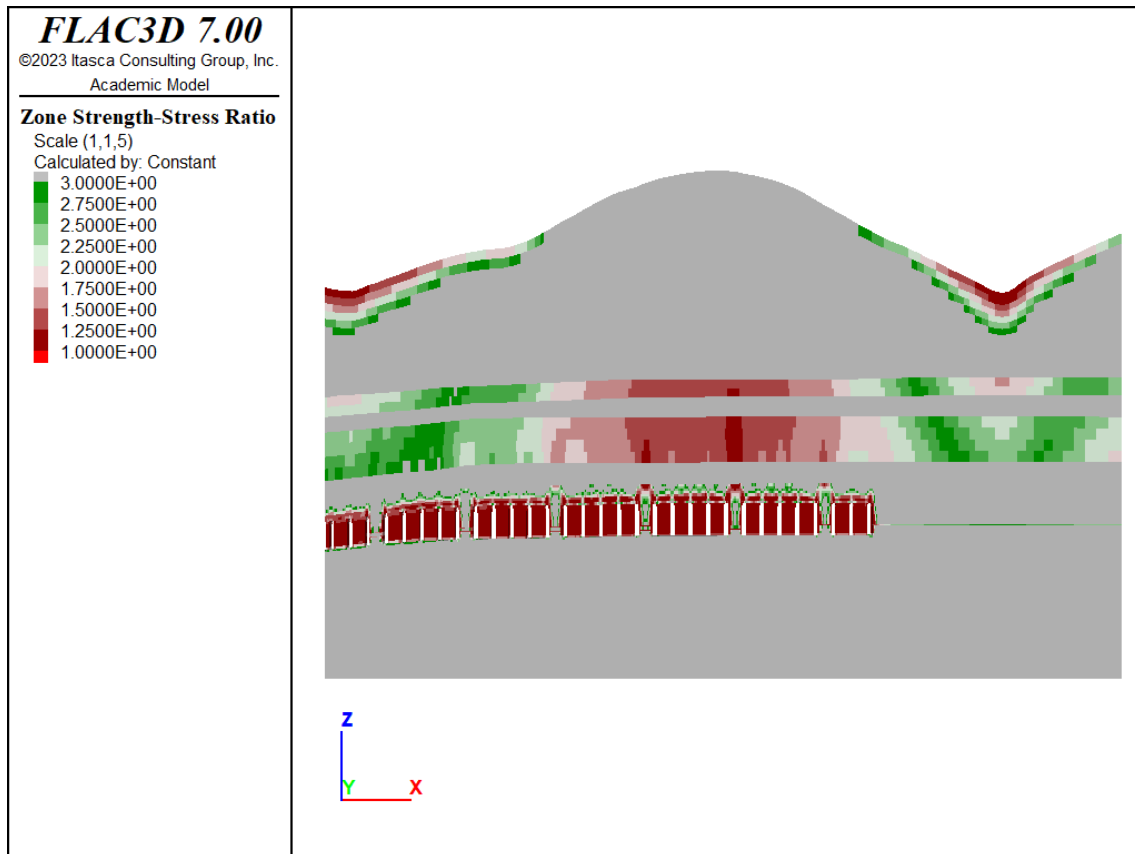


Abbildung 9: Detailansicht des abgebauten Zustands mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5 - SSR

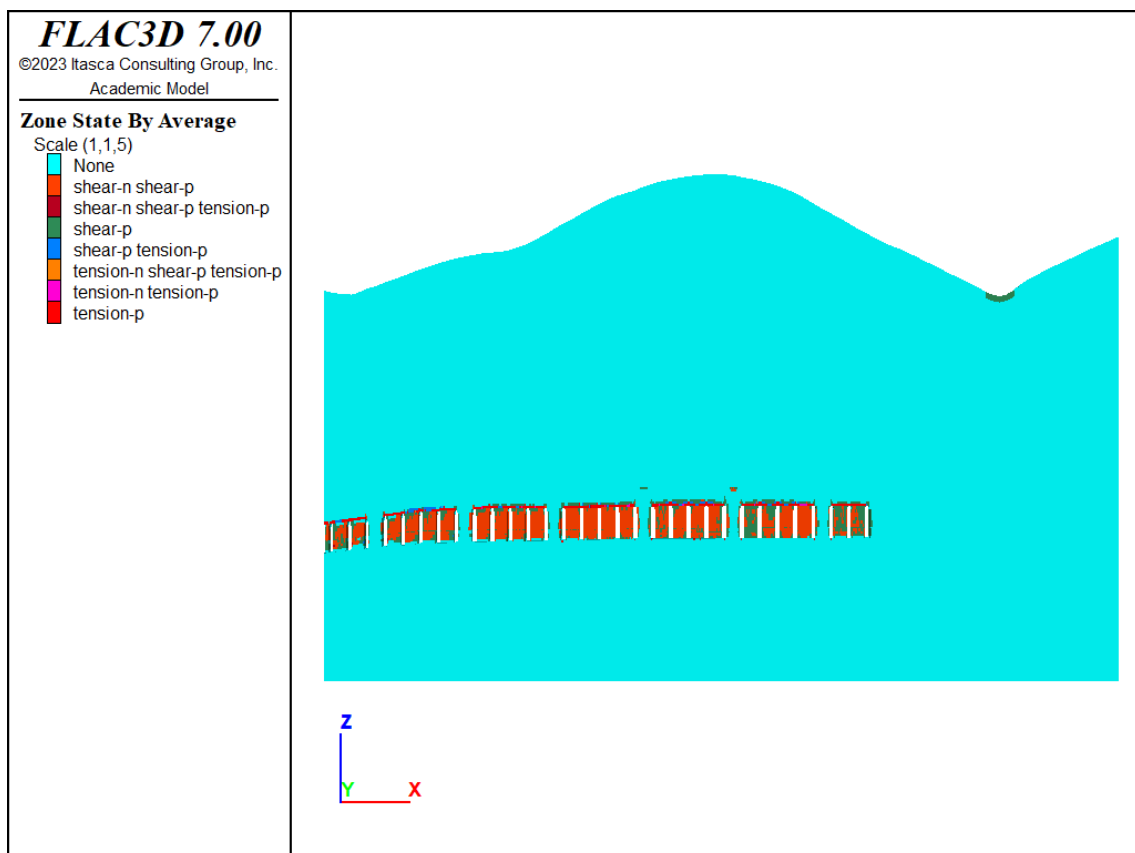


Abbildung 10: Detailansicht des abgebauten Zustands mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5 - Plastifizierung

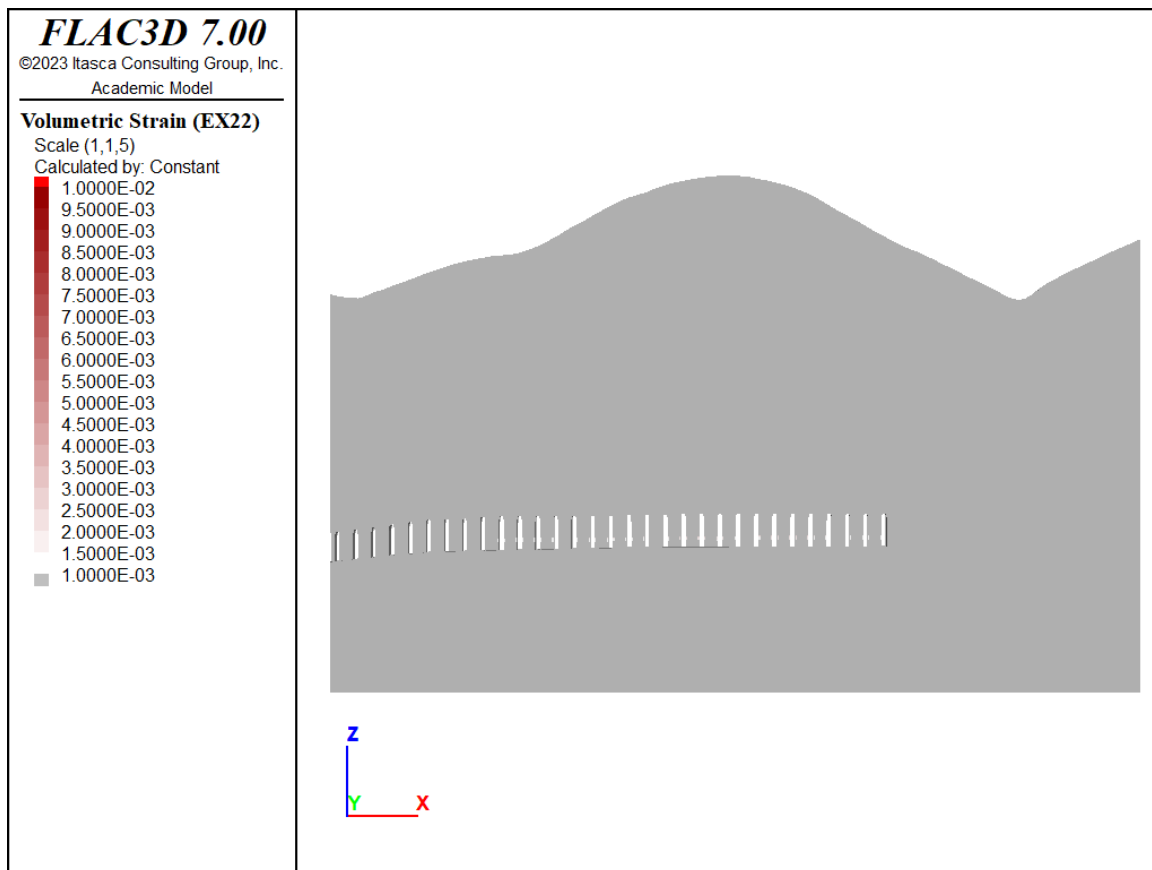


Abbildung 11: Detailansicht des abgebauten Zustands mit Festigkeitsreduktion um Faktor 1.5 - VSI

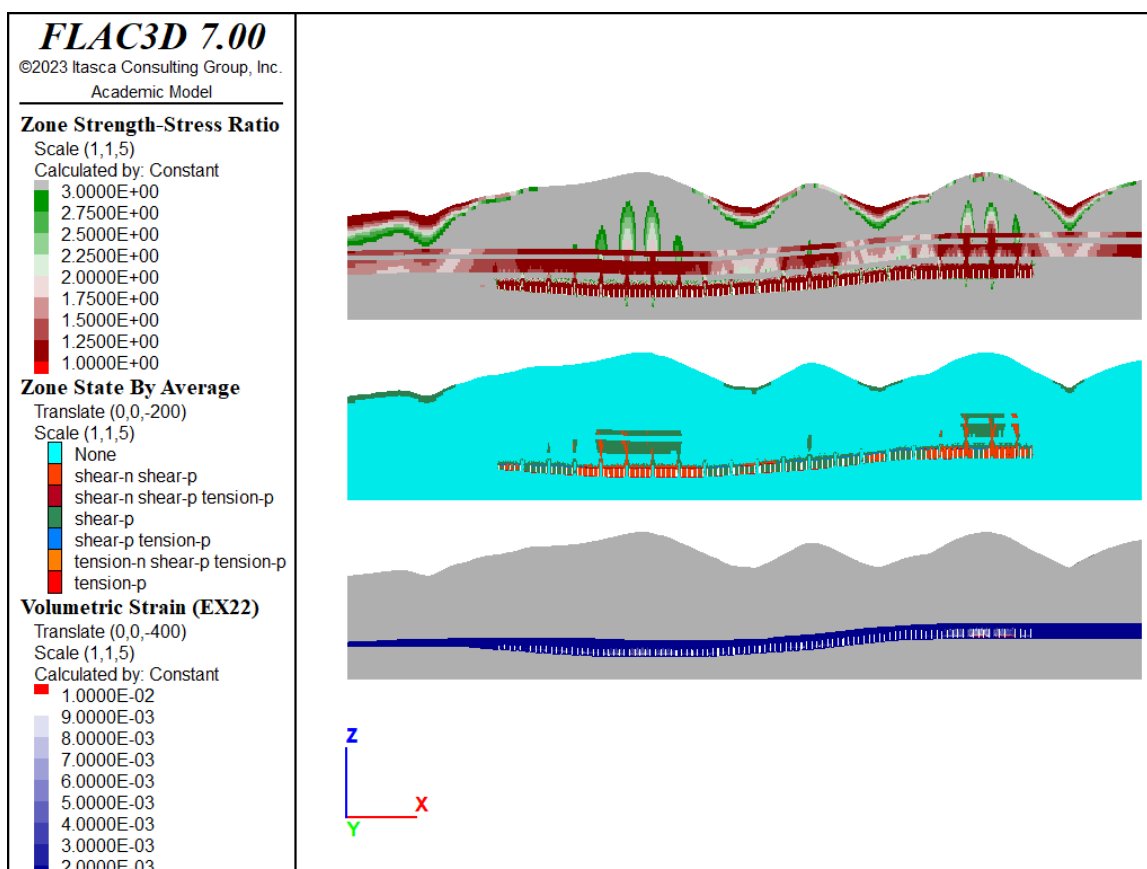


Abbildung 12: Finales Berechnungsergebnis im abgebauten Zustand mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0

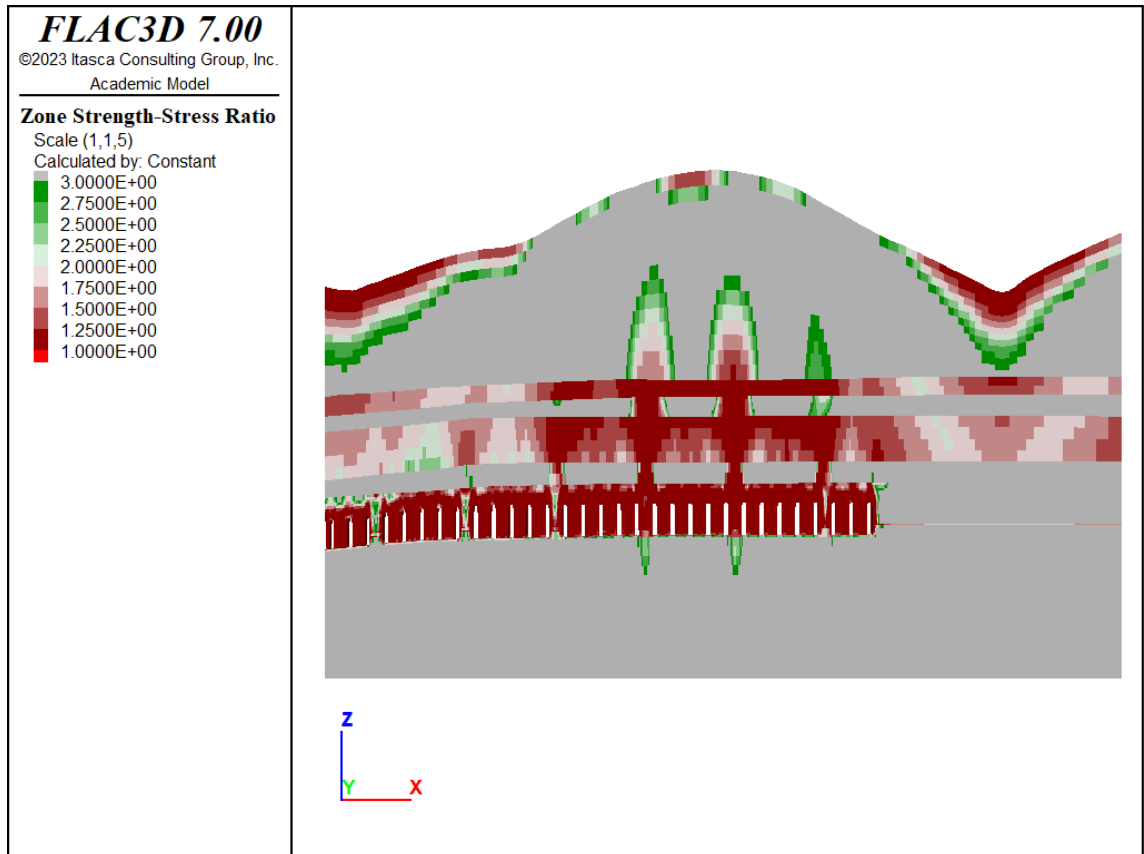


Abbildung 13: Detailansicht des abgebauten Zustands mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0 - SSR

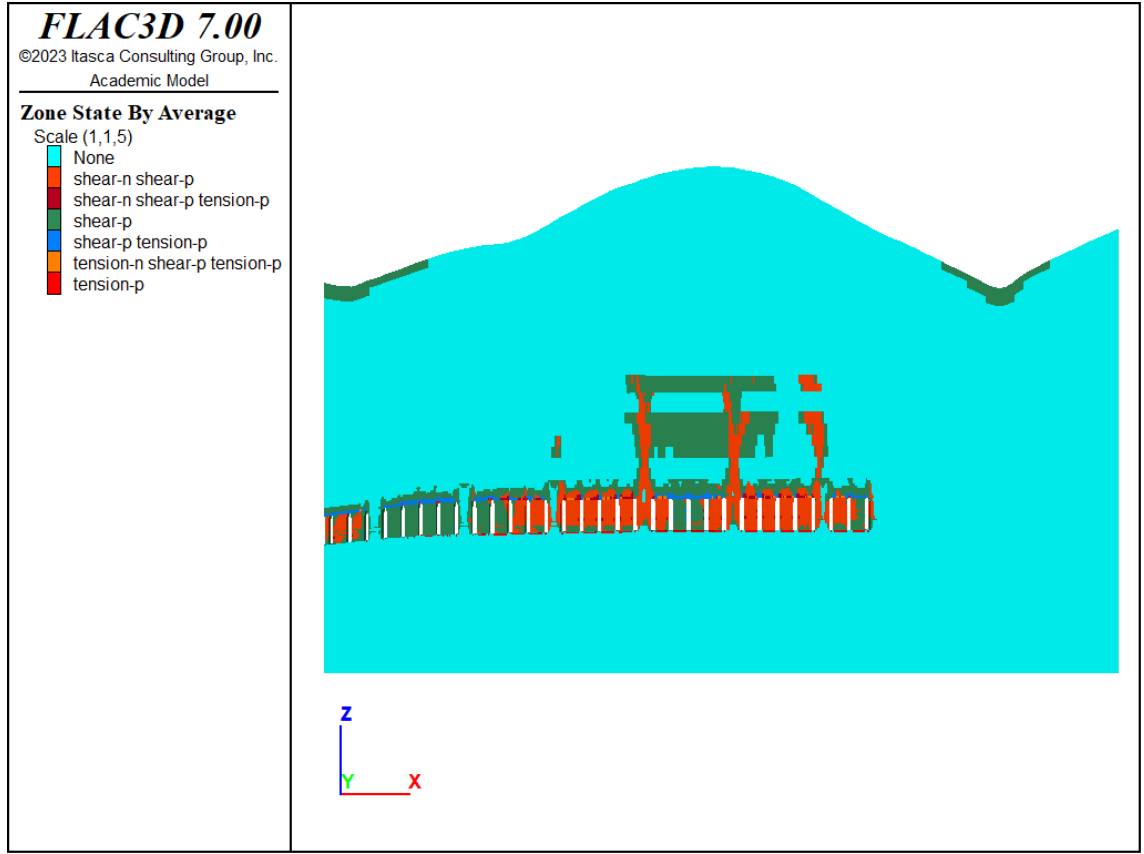


Abbildung 14: Detailansicht des abgebauten Zustands mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0 - Plastifizierung

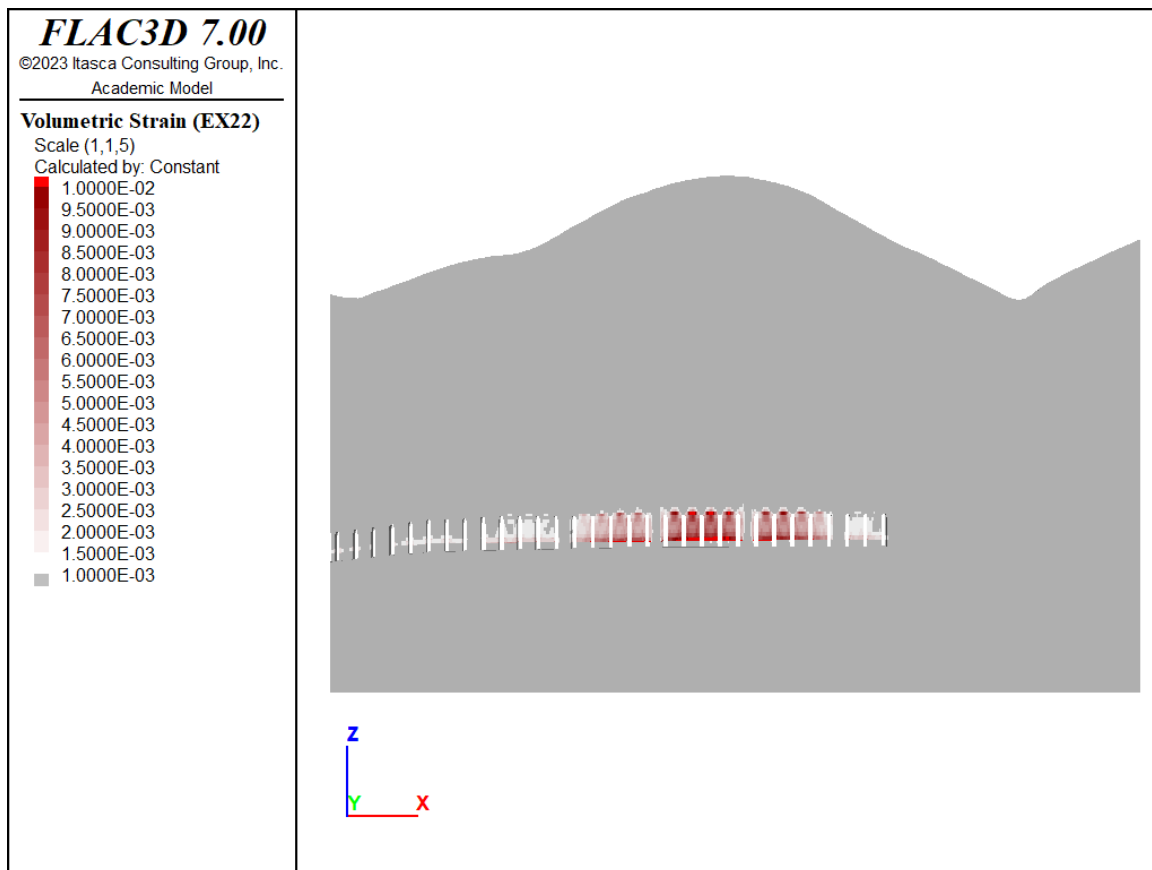


Abbildung 15: Detailansicht des abgebauten Zustands mit Festigkeitsreduktion um Faktor 2.0 - VSI

Besondere Bedeutung kommt der Barriere y_{lg} direkt oberhalb der Abbaue sowie den beiden GW-Leitern zu, weshalb der Zustand dieser Bereiche durch zusätzliche spezielle Plots (siehe Fenster in Abb. 4) analysiert wird. Diese Detailplots zeigen den kritischsten Bereich (größte Deformationen und Plastifizierungen).

Die Barrierschicht y_{lg} (Ton-Sulfat-Wechselagerung) wird numerisch in 5 Einzelschichten unterteilt (siehe Abb. 16). Sie wird von Oberkante y_{lg} aus gemessen. Es werden jeweils die Mittelwerte sowie minimalen und maximalen Werte der volumetrischen Dehnung aus allen Zonen der entsprechenden Schicht ausgelesen und in Form von Balkendiagrammen dargestellt.

Abb. 16 verdeutlicht folgendes:

- Sowohl im realen in-situ Zustand als auch nach einer Festigkeitsreduktion um den Faktor 1.5 liegt die maximal beobachtete volumetrische Dilatanz bei $< 1E-4$, der Mittelwert sogar bei $< 1E-5$.
- Bei einer Festigkeitsreduktion um den Faktor 2.0 kommt es zu einem Anstieg der volumetrischen Deformationen, allerdings bleiben die maximalen Werte noch deutlich unter $1E-2$ und der Mittelwert unter $1E-4$. In den obersten 4/5 der Barrierschicht liegen die Maximalwerte die volumetrische Dilatanz unter $1E-3$ und die Mittelwerte deutlich unter $1E-4$.

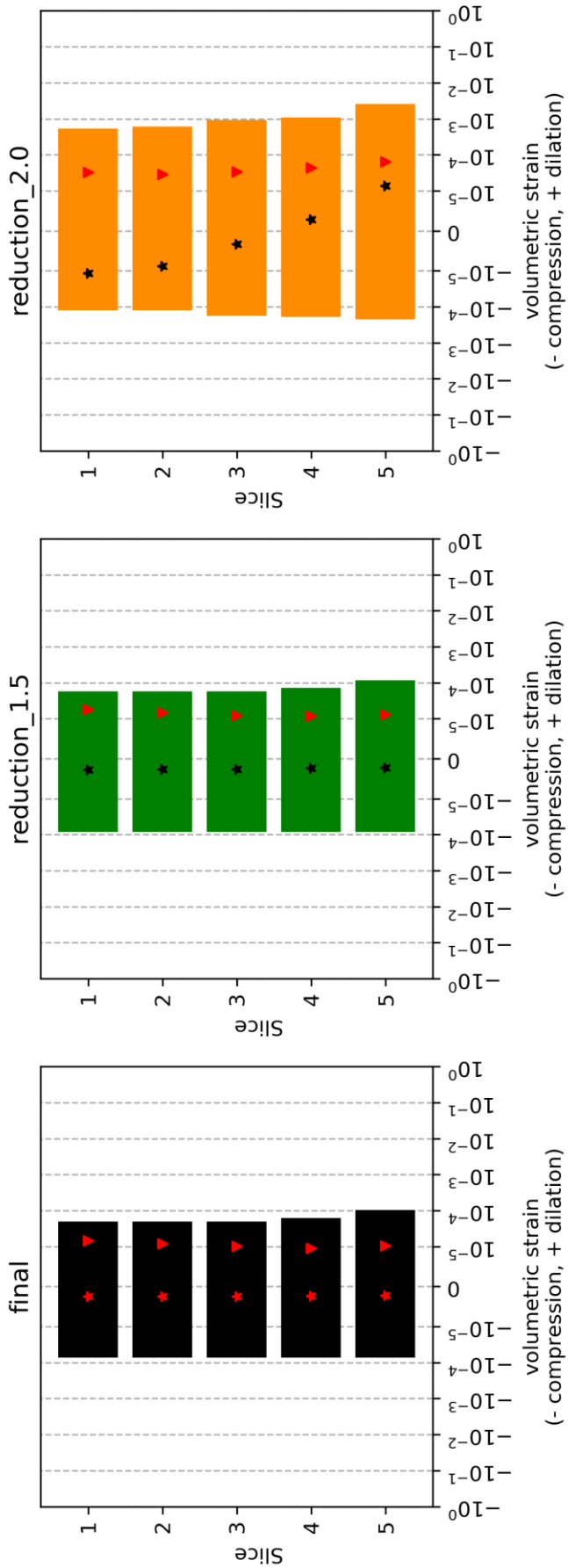


Abbildung 16: Volumetrische Dehnung der Einzelschichten aus y -Ilg für die drei untersuchten Zustände. Die Sterne stellen den Mittelwert aus der gesamten Einzelschicht und die Dreiecke die Mittelwerte des dilatanten Anteils in der Schicht dar (*final* bezeichnet die Berechnungen ohne Festigkeitsreduktion, d.h. den realen in-situ Zustand).

Diskussion der Ergebnisse

Aufgrund der relativ geringen Festigkeitswerte des Kernmaterials (mit Ausnahme des Liegenden) und der geringen Gebirgsgüte (sprich Gebirgsklassifikation) ergibt sich auch eine relativ geringe Gebirgsfestigkeit. Dieser wird mit einer Pfeilerdimensionierung von 21 m x 21 m Rechnung getragen, um die Barriereintegrität zu gewährleisten. In der Vorplanung wurde noch von geringeren Pfeildicken ausgegangen, da nur die Pfeilerstandsicherheit allein betrachtet wurde. Wenn man Pfeilerstandsicherheit und Barriereintegrität gemeinsam betrachtet, so ergeben sich die Pfeilerabmasse von 21 x 21 m.

In dieser Modellierung wurden, aufgrund der langen Rechenzeiten, nur die diskreten Festigkeitsreduktionsfaktoren $F = 1.5$, und 2.0 betrachtet. Für langfristig standsichere Grubenbaue sind Sicherheitswerte von ≈ 2.0 erforderlich. Dies konnte für den betrachteten Fall nachgewiesen werden (siehe Morgenstern, Konietzky & Frühwirt, 2023). Dabei ist wichtig anzumerken, dass die Standsicherheitsbetrachtung auf Basis der FOS-Werte die globale Standsicherheit betrifft. Lokaler Steinfall im Abbaubereich kann damit nicht betrachtet werden und ist durch Beobachtung und Ergreifen entsprechender Maßnahmen vor Ort (bedarfsgerechte Ankerung, Bereissen etc.) zu gewährleisten.

Das besondere Gewicht der in diesem Bericht vorgestellten Modellierung ist aber die Gewährleistung der Integrität der Barrierschicht y-Ig. Hier zeigt sich, dass bei den durchgeführten Modellierungen in der Firste lokale Plastifizierungen erst bei Anwendung eines Reduktionsfaktors von 2.0 an einigen wenigen Stellen die Barriere betreffen (vgl. Abbildung 12 und 14). Bei unreduzierten und um den Faktor 1.5 reduzierten Festigkeitswerten reagieren Barrierschicht und GW-Leiter rein elastisch (Abbildung 4 und 6 bzw. Abbildung 8 und 10).

Ausgehend von Permeabilitätsuntersuchungen im Labor kann die Dilatanzgrenze, ab der eine potentielle Fluidwegsamkeit auftritt, auf einen Wert $> 1E-2$ festgelegt werden (siehe Tab. 4 und Anhang A). Aus Abb. 7 und 11 geht hervor, dass diese Grenze bis zu einem Reduktionsfaktor von mindestens 1.5 im gesamten Modell nirgendwo erreicht bzw. überschritten wird. Bei einem Reduktionsfaktor von 2.0 kommt es nur ganz unmittelbar an der Kontur und nur an wenigen Stellen zu volumetrischen Dilatanzwerten in der Größenordnung von $1E-2$ (siehe Abb. 15). Damit ist die Integrität der Barriere auch für größere Festigkeitsreduktionen bei einem FOS von 2 nachgewiesen.

Weiterhin zeigen analytische Abschätzungen (siehe Anhang B) dass bei einer volumetrischen Deformation von $1E-3$ bzw. $1E-2$ mit einer maximalen Permeabilitätserhöhung etwa um den Faktor 5 zu rechnen ist, d.h. die Permeabilität bleibt im Bereich dieser volumetrischen Deformationen in der gleichen Größenordnung wie im ungestörten Zustand.

Sehr wichtig ist folgendes Ergebnis: Wie Abb. 16 belegt, liegen in den oberen $4/5$ der Barriere die volumetrischen Deformation selbst in den wenigen lokalen Stellen maximal bei $1E-3$, im Mittel aber deutlich unter $1E-4$ und damit im Bereich rein elastischer Deformationen. D.h. selbst wenn es in der Barrierschicht in unmittelbarer Hohlraumnähe zu Plastifizierungen mit volumetrischer Dilatanz ($\Delta\varepsilon_v$) bis ca. $1E-2$ kommen sollte, ist die Funktionsfähigkeit (hydraulische Barrierewirkung) der Ton-Sulfat-Wechselagerung nicht beeinträchtigt, da ca. 80% der Barrieremächtigkeit störungsfrei (rein elastisch reagieren).

Die Berechnungen lassen unter den gemachten Modellannahmen folgende generelle Schlussfolgerungen für das Deckgebirge zu:

- Im Ist-Zustand mit offenen Kammern herrscht im Deckgebirge ein hoher Sicherheitsfaktor in allen Horizonten mit Werten deutlich über 2. Das Deckgebirge inkl. der Barriere reagieren rein elastisch. Selbst bei einer Festigkeitsreaktion im gesamten Modell mit einem Faktor 1.5 ändert sich die Situation nicht signifikant.
- Bei einer Festigkeitsreduktion mit dem Faktor 2.0 kommt es in der Barriere ganz lokal und hohlraumnah zu geringen plastischen Deformationen mit Dilatanzwerten, bei denen sich die Permeabilität erhöhen kann. Ca. 80% der Mächtigkeit der Barriere jedoch reagieren elastisch mit sehr geringen volumetrischen Deformationen, die signifikante Permeabilitätsänderungen ausschließen. Dies ist belegt durch die numerischen Simulationen, aber auch analytische Betrachtungen gemäß Anhang B, die dies ebenfalls belegen.

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 Entfestigung zu rechnen ist. Für das Deckgebirge trifft dies nur bedingt zu. Daher ist der gewählte Ansatz, alle Schichten in die Festigkeitsreduktion einzubeziehen, sehr konservativ. Weiterhin konservativ sind die Betrachtung eines Seitendruckbeiwertes von nur 0.6 sowie die Annahme, dass der Reibungswinkel beim SSR-Verfahren genauso stark heruntergefahren wird wie die Kohäsion. Eine weitere konservative Annahme besteht darin, dass der Biot-Koeffizient auf 1 gesetzt wurde. Es liegen keine Messdaten zum Biot-Koeffizienten für den Untersuchungsraum vor, allerdings darf vermutet werden, dass der Biot-Koeffizient unter 1 liegt (typischerweise zwischen 0.5 und 0.8) und damit die sich negativ auf die Standsicherheits- und Deformationsberechnungen auswirkenden effektiven Spannungen in der Realität weniger stark reduziert sind.

Literaturverzeichnis

- Abbas, S.M.; Konietzky, H. (2017): Rock Mass Classification Systems
(<https://geotechnics.webador.de/ebook>)
- DMT (2023): mündliche und schriftliche Mitteilungen
- Frühwirt, T. (2019): Laborbericht ‚Ergebnisse von Gesteinsphysikalischen Laborversuchen – Gipsvorkommen Altertheim‘, Institut für Geotechnik, TU BAF, 18.09.2019
- Frühwirt, T. (2020): Laborbericht ‚Ergebnisse von Gesteinsphysikalischen Laborversuchen – Gipsvorkommen Altertheim‘, Institut für Geotechnik, TU BAF, 26.10.2020
- 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

ANHANG A

**Daten zu triaxialen Laborversuchen zur Ermittlung der Permeabilität
unter komplexen Spannungs- und Schädigungszuständen**

Tab. A1: Daten zu Proben und Versuchsregime

Quellton anteil [%]	PK -	Teufe [m]	Dichte [g/m ³]	Länge [mm]	Durchmesser [mm]	Mantel druck [MPa]	P _{H2O} (Einlauf) [MPa]	P _{H2O} (Auslauf) [MPa]	ΔP _{H2O} [MPa]
0,1	UD4_TSW_P3-P4	95-96	2,3	100,58	49,98	2,5	1,50	0,70	0,80
3,6	UD1_TSW_P4	97-98	2,24	80,22	49,86	2,5	0,90	0,70	0,20
0,2	UD3_TSW_P1-P2_2	118-119	2,31	100,39	49,87	2,5	-	-	-
n.N.	UD3_TSW_P3	121-122	2,34	100,53	50,05	2,5	-	-	-
0,6	UD3_TSW_P4	123-124	2,35	101,22	49,94	2,5	1,20	0,70	0,50
0,8	UD3_TSW_P4	124-125	2,38	97,77	50,01	2,5	0,80	0,70	0,10
3,2	UD1_TSW_P1	92-93	1,97	92,66	49,53	2,5	1,00	0,70	0,30
2,0	UD1_TSW_P5	99-100	2,13	100,9	49,95	2,5	1,30	0,70	0,60
1,3	UD4_TSW_P5	99-100	2,37	87,39	49,88	2,5	1,70	0,70	1,00

Bei den Proben UD3_TSW_P1-P2_2 sowie UD3_TSW_P3 wurden Umläufigkeiten festgestellt, so dass keine Ergebnisse abgeleitet werden konnten.

Tab. A2: Daten zu Proben und Spannungswerte im Bruchzustand

Prüfkörper- bezeichnung	Prüfkörper- durchmesser d [mm]	Prüfkörper- länge l [mm]	Rohdichte ρ [g/cm ³]	σ _{3,1} [N/mm ²]	σ _{u,1} [N/mm ²]
UD1-TSW P1 (92-93m)	49.53	92.66	1.97	2.50	7.47
UD1-TSW P4 (97-98m)	49.86	80.22	2.24	2.50	8.35
UD1-TSW P5 (99-100m)	49.95	100.90	2.13	2.50	7.52
UD3-TSW P1 (118-	49.87	100.39	2.31	2.50	38.42
UD3-TSW P3 (121-122m)	50.05	100.53	2.34	2.50	25.48
UD3-TSW P4 (123-124m)	49.94	101.22	2.35	2.50	28.44
UD3-TSW P4 (124-125m)	50.01	97.77	2.38	2.50	45.41
UD4-TSW P3-P4 (95-	49.98	100.58	2.30	2.50	34.37
UD4-TSW P5 (99-100m)	49.88	87.39	2.37	2.50	22.73

Tab. A3: Probenangaben sowie Kennwerte im Ausgangszustand

Quellto nanteil [%]	PK -	Teufe [m]	ΔP_{H_2O} [MPa]	Ausgangszustand					
				Axial- spannung [MPa]	Deviator- spannung [MPa]	ϵ_{Vol} [mm/mm]	Q [μ l/min]	K [m ²]	k_f [m/s]
0,1	UD4_TSW_P3- P4	95-96	0,80	2,60	0,10	0,00E+00	1,41	1,51E-18	1,47E-11
3,6	UD1_TSW_P4	97-98	0,20	2,60	0,10	0,00E+00	15,86	5,44E-17	5,31E-10
0,2	UD3_TSW_P1- P2_2	118-119	-	-	-	-	-	-	-
n.N..	UD3_TSW_P3	121-122	-	-	-	-	-	-	-
0,6	UD3_TSW_P4	123-124	0,50	2,60	0,10	0,00E+00	8,89	1,53E-17	1,50E-10
0,8	UD3_TSW_P4	124-125	0,10	2,60	0,10	0,00E+00	49,68	4,13E-16	4,03E-09
3,2	UD1_TSW_P1	92-93	0,30	2,60	0,10	0,00E+00	28,93	7,74E-17	7,57E-10
2,0	UD1_TSW_P5	99-100	0,60	2,60	0,10	0,00E+00	8,35	1,20E-17	1,17E-10
1,3	UD4_TSW_P5	99-100	1,00	2,60	0,10	0,00E+00	0,34	2,57E-19	2,52E-12

Tab. A4: Probenangaben sowie Kennwerte an der Dilatanzgrenze

Quellto nanteil [%]	PK -	Teufe [m]	ΔP_{H_2O} [MPa]	Dilatanzgrenze					
				Axial- spannung [MPa]	Deviator- spannung [MPa]	ϵ_{Vol} [mm/mm]	Q [μ l/min]	K [m ²]	k_f [m/s]
0,1	UD4_TSW_P3- P4	95-96	0,80	17,39	14,89	-1,65E-04	1,41	1,50E-18	1,47E-11
3,6	UD1_TSW_P4	97-98	0,20	3,98	1,48	-1,54E-04	15,08	5,17E-17	5,05E-10
0,2	UD3_TSW_P1- P2_2	118-119	-	-	-	-	-	-	-
n.N..	UD3_TSW_P3	121-122	-	-	-	-	-	-	-
0,6	UD3_TSW_P4	123-124	0,50	25,69	23,19	-6,96E-05	15,62	2,69E-17	2,63E-10
0,8	UD3_TSW_P4	124-125	0,10	-	-	-	-	-	-
3,2	UD1_TSW_P1	92-93	0,30	5,98	3,38	-5,76E-03	14,14	3,79E-17	3,70E-10
2,0	UD1_TSW_P5	99-100	0,60	4,94	2,44	+6,38E-04	7,40	1,06E-17	1,04E-10
1,3	UD4_TSW_P5	99-100	1,00	11,68	9,18	-1,97E-03	0,56	4,21E-19	4,12E-12

Tab. A5: Probenangaben sowie Kennwerte in der Nachbruchphase (fortgeschrittene Schädigung)

Quellto nanteil [%]	PK -	Teufe [m]	ΔP_{H_2O} [MPa]	Fortgeschrittene Schädigung (vor Bruch)					
				Axial- spannung [MPa]	Deviator- spannung [MPa]	ϵ_{Vol} [mm/mm]	Q [μ l/min]	K [m ²]	k_f [m/s]
0,1	UD4_TSW_P3- P4	95-96	0,80	29,94	27,44	+9,63E-04	3,92	4,20E-18	4,10E-11
3,6	UD1_TSW_P4	97-98	0,20	7,65	5,15	+1,28E-02	13,49	4,63E-17	4,52E-10
0,2	UD3_TSW_P1- P2_2	118-119	-	-	-	-	-	-	-
n.N..	UD3_TSW_P3	121-122	-	-	-	-	-	-	-
0,6	UD3_TSW_P4	123-124	0,50	28,34	25,84	+6,75E-04	90,19	1,56E-16	1,52E-09
0,8	UD3_TSW_P4	124-125	0,10	44,97	42,47	-	68,25	5,73E-16	5,60E-09
3,2	UD1_TSW_P1	92-93	0,30	7,18	4,68	-3,12E-03	13,48	3,61E-17	3,53E-10
2,0	UD1_TSW_P5	99-100	0,60	5,98	3,48	+4,20E-03	6,95	9,96E-18	9,73E-11
1,3	UD4_TSW_P5	99-100	1,00	13,59	11,09	+2,25E-04	0,65	4,88E-19	4,77E-12

Tab. A6: Probenangaben sowie Kennwerte zum Versuchsende (weit fortgeschrittene Schädigung)

Quellto nanteil [%]	PK -	Teufe [m]	ΔP_{H_2O} [MPa]	Fortgeschrittene Schädigung (nach Bruch)					
				Axial- spannung [MPa]	Deviator- spannung [MPa]	ϵ_{Vol} [mm/mm]	Q [μ l/min]	K [m ²]	k_f [m/s]
0,1	UD4_TSW_P3- P4	95-96	0,80	31,30	28,80	+6,06E-03	27,02	2,89E-17	2,83E-11
3,6	UD1_TSW_P4	97-98	0,20	7,03	4,53	+1,27E-02	13,21	4,53E-17	4,43E-10
0,2	UD3_TSW_P1- P2_2	118-119	-	-	-	-	-	-	-
n.N.	UD3_TSW_P3	121-122	-	-	-	-	-	-	-
0,6	UD3_TSW_P4	123-124	0,50	0,00	-2,50	+3,35E-03	428,13	7,56E-16	7,39E-09
0,8	UD3_TSW_P4	124-125	0,10	-	-	-	-	-	-
3,2	UD1_TSW_P1	92-93	0,30	7,39	4,89	+4,01E-03	13,62	3,65E-17	3,56E-10
2,0	UD1_TSW_P5	99-100	0,60	6,42	3,92	+1,17E-02	7,16	1,03E-17	1,00E-10
1,3	UD4_TSW_P5	99-100	1,00	14,53	12,03	+6,92E-03	1,00	7,45E-19	7,28E-12



Abbildung 1: UD1-TSW P1 (92-93m) - VOR Versuch



Abbildung 2: UD1-TSW P1 (92-93m) - NACH Versuch



Abbildung 3: UD1-TSW P4 (97-98m) - VOR Versuch



Abbildung 4: UD1-TSW P4 (97-98m) - NACH Versuch



Abbildung 5: UD1-TSW P5 (99-100m) - VOR Versuch



Abbildung 6: UD1-TSW P5 (99-100m) - NACH Versuch



Abbildung 7: UD3-TSW P1 (118-119m)_2 - VOR Versuch



Abbildung 8: UD3-TSW P1 (118-119m)_2 - NACH Versuch



Abbildung 9: UD3-TSW P3 (121-122m) - VOR Versuch



Abbildung 10: UD3-TSW P3 (121-122m) - NACH Versuch



Abbildung 11: UD3-TSW P4 (123-124m) - VOR Versuch



Abbildung 12: UD3-TSW P4 (123-124m) - NACH Versuch



Abbildung 13: UD3-TSW P4 (124-125m) - VOR Versuch



Abbildung 14: UD3-TSW P4 (124-125m) - NACH Versuch



Abbildung 15: UD4-TSW P3-P4 (95-96m) - VOR Versuch



Abbildung 16: UD4-TSW P3-P4 (95-96m) - NACH Versuch



Abbildung 17: UD4-TSW P5 (99-100m) - VOR Versuch



Abbildung 18: UD4-TSW P5 (99-100m) - NACH Versuch

ANHANG B

Analytische Abschätzungen zur Permeabilitätsentwicklung als Funktion der volumetrischen Deformation (Dilatanz)

Abschätzung der Permeabilitätsänderung mittels empirischer Beziehungen

Die Barriere im Deckgebirge (Ton-Sulfat-Wechselagerung) bilden Schichten ausreichender Mächtigkeit mit hinreichend geringer Permeabilität. Es besteht potentiell die Möglichkeit, dass durch darunter stattfindende bergmännische Tätigkeiten (Hohlraumerstellung) die Integrität der Barriere verletzt wird. Eine solche potentielle Verletzung entsteht durch Rissbildung und äußert sich in einer signifikanten Erhöhung der Permeabilität. Eine solche Permeabilitätserhöhung erfordert eine entsprechend starke mechanische Beanspruchung (Veränderung des Spannungs- und Deformationszustandes). Solange solche Deformationen rein elastisch (poro-elastisch) ablaufen, sind die Permeabilitätsänderungen gering, d.h. bleiben in der gleichen Größenordnung. Wenn jedoch die Grenzfestigkeit erreicht bzw. überschritten wird, kann es je nach Beanspruchungszustand zu erheblichen Permeabilitätsänderungen kommen, die mehrere Größenordnungen betragen können und damit die Integrität einer Barriere potentiell in Frage stellen könnten. Wichtig anzumerken ist dabei, dass die Barrierewirkung erst dann verletzt ist, wenn sich eine signifikante Permeabilitätserhöhung über die gesamte Höhe der Barriere ausbreitet. Zur analytischen Abschätzung der Permeabilitätsänderung bieten sich grundsätzlich 3 verschiedene Vorgehensweisen (Kopplungen) an:

- (1) Permeabilität als Funktion des aktuellen Spannungszustandes
- (2) Permeabilität als Funktion eines Schädigungsindex
- (3) Permeabilität als Funktion der volumetrische Deformation (Dilatanz)

Variante (1) funktioniert gut im poro-elastischen Bereich, ist aber ungeeignet, wenn lokales Versagen (Plastifizierung, Nachbruchverhalten) auftritt, da dann die Beziehung nicht mehr eindeutig ist. Außerdem sind die meisten Beziehungen an bestimmte Spannungspfade gekoppelt. Hier ausgewählte Literaturquellen dazu: Reinicke (2011), Papay (2012), Meng et al. (2016), Zhu et al. (2007), Gong et al. (2019), Zheng et al. (2015).

Variante (2) funktioniert auch und gerade im Nachbruchbereich, verlangt aber spezielle Materialgesetze und Parameterermittlung und ist daher für die Ingenieurpraxis eher ungeeignet. Hier ausgewählte Literaturquellen dazu: Liu et al. (2018), Pognacnik et al. (2014). Mitchell & Faulkner (2012).

Variante (3) funktioniert sowohl im Vor- als auch Nachbruchbereich, ist die am weitesten verbreitete Technik und gut kombinierbar mit etablierten geotechnischen Materialgesetzen. Hier ausgewählte Literaturquellen dazu: Chin et al. (2000), Van Golf-Racht (1982), GRS (2002, 2010), David et al. (2018), Liu et al. (2020), Lamur et al. (2017). Kuhlmann & Matteo (2017), Rutquist (2009), Tan et al. (2014), Wang et al. (2020), Zhao (2020), Gong et al. (2019).

Aus oben skizzierten Gründen wird im Folgenden nur noch Variante (3) betrachtet. Die meisten Ansätze gehen auf die sogenannten Carman-Kozeny-Beziehung bzw. Relationen bzgl. Porosität und Permeabilität (siehe Gl. 1) zurück.

$$k_{rat} = \frac{k}{k_0} = \left(\frac{\phi}{\phi_0} \right)^a \quad (1)$$

wobei:

- k aktuelle Permeabilität mit aktueller Porosität Φ
- k_0 Ausgangspermeabilität mit Ausgangsporosität Φ_0
- a Materialparameter (typischerweise zwischen 3 und 5 für karbonatische Gesteine und Sandsteine)

Die aktuelle Porosität lässt sich über die volumetrische Deformationsänderung abschätzen:

$$\phi = 1 - (1 - \phi_0) \cdot e^{-\Delta \epsilon_v} \quad (2)$$

Dabei ist zu beachten, dass es sich stets um die hydraulisch aktive Porosität handelt, d.h. Porenraum, der am Fluidfluss beteiligt ist.

Die Auswertung der Permeabilitätsänderung im numerischen Modell erfolgt wie folgt:

- I. Ermittlung der durch den Abbau hervorgerufenen volumetrischen Deformation für jedes einzelne Element des numerischen Modells
- II. Errechnung der aktuellen hydraulisch aktiven Porosität gemäß Gl. 2
- III. Ermittlung des Permeabilitätsfaktors gemäß Gl. 1, wobei für a zwei Werte zugrunde gelegt werden: 3 und 5.

Aus den numerischen Modellrechnungen (siehe Simulationsergebnisse in diesem Bericht oben) ergeben sich für die Barriere maximale volumetrische Dehnungen von etwa 10^{-3} bis 10^{-2} . Die Porosität der Barrierschicht dürfte etwa 3% bis maximal 10% betragen. Damit ergeben sich die in Tab. B1 gezeigten Permeabilitätserhöhungen als Funktion der volumetrischen Deformation. Die Abschätzungen zeigen, dass bei einer volumetrischen Deformation bis ca. 10^{-2} mit einer maximalen Permeabilitätserhöhung etwa um den Faktor 5 zu rechnen ist, d.h. die Permeabilität bleibt im Bereich dieser volumetrischen Deformationen in der gleichen Größenordnung wie im ungestörten Zustand.

Tab. B1: Relative Permeabilitätsänderung k_{rat} als Funktion der volumetrischen Deformation

k_{rat}	ϵ_v	Φ_0	Φ	a
1.10	10^{-3}	0.03	0.031	3
1.03	10^{-3}	0.10	0.101	3
2.37	10^{-2}	0.03	0.040	3
1.33	10^{-2}	0.10	0.110	3
1.18	10^{-3}	0.03	0.031	5
1.05	10^{-3}	0.10	0.101	5
4.21	10^{-2}	0.03	0.040	5
1.61	10^{-2}	0.10	0.110	5

Literatur Anhang B

- Chin, L.Y. (2000): Fully coupled geomechanics and fluid-flow analysis of wells with stress-dependent permeability, SPE Journal, 5(1): 32-45
- David, C. et al. (2018): KG²B, a collaborative benchmarking exercise for estimating the permeability of the Grimsel granodiorite, Geophysical Journal international, 215(2): 825-843
- Gong, P. et al. (2019): Experimental investigation on sandstone permeability under plastic flow: permeability evolution law with stress increment, Geofluids, ID 2374107
- GRS (2003): Final evaluation of the project "thermal simulation of drift emplacement", GRS-194
- GRS (2010): Coupled thermal-hydrological-mechanical-chemical processes in repository safety assessment, GRS-262
- Kuhlmann, L.K. & Matteo, E.N. (2017): Porosity and permeability: literature review and summary, SAND2017-12697C
- Lamur, A. et al. (2017): The permeability of fractured rocks in pressurized volcanic and geothermal Systems, Scientific reports, 7: 6173
- Liu, X. et al. (2018): Mechanism of permeability evolution for reservoir sandstone with different physical properties, Geofluids, ID 5327895
- Liu, B. et al. (2020): Analysis of damage and permeability evolution for mudstone material under coupled stress-seepage, materials, 13: 3755
- Meng, Z. et al. (2016): Deformation, failure and permeability of coal-bearing strata during longwall Mining, Engineering Geology, 208: 69-80
- Mitchell T.M. & Faulkner, D.R. (2012): Towards quantifying the matrix permeability of fault damage zones in low porosity rocks, Earth and Planetary Science Letter, 339-340: 24-31
- Pan, Z. & Connell, L.D. (2012): Modelling permeability for coal reservoirs: a review of analytical models and testing data, Int. Journal of Coal Geology, 92(1): 1-44
- Papay, J. (2012): Permeability as function of rock mechanical behavior, NAFTA 63: 99-104
- Petunin, V.V. et al. (2013): Porosity and permeability change under stress and correlation to rock texture, Poromechanics V, 1017-1046
- Pogacnik, J. et al. (2014): A damage mechanical approach to model permeability enhancement in Thermo-hydro-mechanical simulations, Proc. 49. Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, SGP-TR-202
- Reinicke, A. (2011): Mechanical and hydraulic aspects of rock-proppant systems, GFZ Potsdam, STR11/09

- Rutquist, J. (2009): Modeling of damage, permeability changes and pressure response during excavation of the TSX tunnel in granitic rock at URL, Canada, <https://escholarship.org/uc/item/8f12b5cf>
- Tan, X., Konietzky, H. & Frühwirt, T. (2014): Laboratory observations and numerical simulation of permeability evolution during progressive failure of brittle rocks, *IJRMMSci.*, 68: 167-176
- Tan, X. & Konietzky, H. (2019): Numerical simulation of permeability evolution during progressive failure of Aue granite at the grain size level, *Computer & Geotechnics*, 112: 185-196
- Van Golf-Racht, T.D. (1982): *Fundamentals of fractured reservoir engineering*, Elsevier
- Wang, Z.H. et al. (2020): Experimental and numerical study on hydromechanical coupled deformation behavior of Beishan granite considering permeability evolution, *Geofluids*, ID 8855439
- Zhao, Y. (2020): Stress-induced permeability evolution in coal: lab testing and numerical simulation, PhD thesis, Geotechnical Institut, Chair for Rock Mechanics, TU Bergakademie Freiberg
- Zheng, J. et al. (2015): relationships between permeability, porosity and effective stress for low-permeable sedimentary rock, *IJRMMSci.*, 78: 304-318
- Zhu, W. et al. (2007): A probabilistic damage model of stress-induced permeability anisotropy during cataclastic flow, *Journal of Geophysical Research*, 112: B10207