



## Numerische Standsicherheitsuntersuchungen für das geplante Bergwerk „Alterthelm“ – Teilprojekt I

Auftraggeber: Knauf Gips KG  
Am Bahnhof 7  
97346 Iphofen

Bearbeiter: M. Sc. Roy Morgenstern  
Prof. Dr. habil. Heinz Konietzky  
Dr. Thomas Frühwirt

Datum: 03.03.2023

## Inhaltsverzeichnis

Einleitung / Aufgabenstellung .....	3
Vorgehensweise / Datengrundlage.....	3
Modellaufbau .....	8
Berechnungsergebnisse .....	9
Diskussion der Ergebnisse .....	16
Pfeilerdimensionierung für FOS $\approx 2.0$ .....	17
Diskussion der Ergebnisse zur Pfeilerdimensionierung für FOS $\approx 2.0$ .....	21
Literaturverzeichnis .....	22

## Einleitung / 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. Diese bilden die Grundlage für nachfolgende numerische Standsicherheitsuntersuchungen für einen Abbau nach dem Örter-Festen-Abbauverfahren.

Gegenstand der weiteren Untersuchungen sollen folgende Betrachtungen sein:

1. Abbau von Basis Y1 + 0,5 m - ZM - Y2 mit einer Abbauhöhe von 7 m. Das Zwischenmittel soll mit verschiedenen Mächtigkeiten (0,5 m; 1 m; 1,5 m; 2 m; 2,5 m) gerechnet werden (**Variante I**)
2. Abbau von Basis Y2 + 0,5 m mit einer Abbauhöhe von 4.5 m (**Variante II**)

Als Streckenbreite werden vorerst für beide Abbaulagen 8 Meter angenommen. Es soll untersucht werden, welche Streckenbreite in Verbindung mit der Dimensionierung der Festen (und unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors  $> 2$ ) eine bestmögliche Nutzung der Lagerstätte erlaubt. Die angenommene Mächtigkeit des Schichtpakets von Y1, Y2 und ZM ist immer 7.5 m, wobei das ZM immer mittig zwischen Y1 und Y2 angelegt ist.

## Vorgehensweise / Datengrundlage

Zur Bewertung der Standsicherheit wurden 3-dimensionale numerische Berechnungen mit dem Programm FLAC<sup>3D</sup> (Vers. 7.0) 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.

Die Berechnungen wurden an einem Kammer-Pfeiler-Modell durchgeführt, das geometrisch dem gegenwärtigen Standardprofil entspricht. Aufgrund der Symmetriebedingungen konnte ein 1/4-Modell (1/4-Pfeiler und jeweils 1/2-Kammerbreite) verwendet werden. Es wird angenommen, dass die gesamte Deckgebirgslast als Vertikalspannung wirkt. Die Überlagerungshöhe (EO bis Firste Kammer) wird mit 120 m angenommen, sodass im Firstbereich des Abbaubereichs eine Vertikalspannung von 2.74 MPa herrscht.

Die gebirgsmechanischen Parameter für das Mohr-Coulomb Stoffgesetz wurden mittels einer Gebirgsklassifizierung (siehe z.B. Abbas & Konietzky, 2017) abgeleitet. Dabei wurden zwei Gebirgsdatensätze generiert, welche in den nachfolgenden Berechnungen verwendet werden:

- **DS-1:** Konservativer Gebirgsdatensatz
- **DS-2:** Optimistischer Gebirgsdatensatz

Die Tabellen 1 – 5 fassen die im gesteinsmechanischen Labor der TU BAF ermittelten Parameter zusammen (Frühwirt, 2019). Aus diesen Werten wurden ein konservativer und ein optimistischer **Gesteins**datensatz (Tabellen 6 und 7) abgeleitet.

Diese wiederum bilden die Grundlage für die Ableitung konservativer und optimistischer **Gebirgs**datensätze.

Gemäß Hoek et al. (2013) lässt sich mittels der Parameter RQD sowie JCond<sub>89</sub> ein GSI-Wert bestimmen:

$$GSI = 1.5 \cdot Jcond_{89} + RQD / 2 \quad (1)$$

Der Wertebereich von JCond<sub>89</sub> reicht von 0 bis 30 je nach Charakterisierung der Trennflächen. Für die hier angewandten Abschätzungen wurde ein Wert von JCond<sub>89</sub> = 25 angenommen.

Damit lassen sich gemäß (1) die GSI-Werte (siehe Tab. 8 und 9) ermitteln.

Mittels des Software-Tools Rocdata (Rocscience, 2019) können gebirgsmechanische Parameter abgeschätzt werden. Als Input dienen:

- GSI-Wert
- UCS-Wert der Gesteinsmatrix (Laborwert)
- E-Modul der Gesteinsmatrix (Laborwert)
- Gesteinstyp
- Spannungszustand

Als Ergebnis werden geliefert (siehe Tabellen 8 und 9):

- Verformungsmodul des Gebirges  $E_{V,Gebirge}$
- Einaxiale Druckfestigkeit des Gebirges  $UCS_{Gebirge}$
- Einaxiale Zugfestigkeit des Gebirges  $UTS_{Gebirge}$
- Kohäsion  $c$  und Reibungswinkel  $\Phi$  gemäß Mohr-Coulomb-Gesetz

Die Querdehnzahl wurde nicht explizit ermittelt und daher mit 0.25 angenommen. Dieser Parameter hat eine geringe Bandbreite und zudem keinen signifikanten Einfluss auf die Standsicherheitsbetrachtungen.

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.

Die konservativen Datensätze entsprechen 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.

Tab. 1: Zusammenfassung **Gesteins**parameter für das Zwischenmittel (siehe Anhang)

ZM (Ton etc.)	H10	UA21	H9	UA20	UA19	UA18
RQD	0 – 50	52 – 70	67	58	76 - 92	----
UCS [MPa]	1 - 2	1 - 15	8 – 30	2 - 4	0 - 12	3 – 10
BTS [MPa]	----	----	----	----	0.5	1
$E_v$ [GPa]	0.02	0.02 - 15	3	0.02	0.02 - 12	----
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2120 - 2190	2000 - 2300	2220 - 2400	2030 - 2280	2350	----
c [MPa]	----	----	----	----	4.7	----
$\phi$ [°]	----	----	----	----	23.1	----

Tab. 2: Zusammenfassung **Gesteins**parameter für den Gipshorizont y1 (siehe Anhang)

y1 (Gips)	H10	UA21	H9	UA20	UA19	UA18
RQD	----	80 – 90	80 - 95	55 – 100	78 - 92	----
UCS [MPa]	----	32	30 – 50	22	18 – 34	20 – 45
BTS [MPa]	----	1.7	3 – 3.5	1.3	2.2	3
$E_v$ [GPa]	----	27	25 - 32	23	17 - 20	----
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	----	2350	2350	2330	2350	----
c [MPa]	----	----	12	----	10.5	----
$\phi$ [°]	----	----	28	----	21.6	----

Tab. 3: Zusammenfassung **Gesteins**parameter für den Gipshorizont y2 (siehe Anhang)

y2 (Gips)	H10	UA21	H9	UA20	UA19	UA18
RQD	----	75 – 100	40 - 95	70 – 95	30 – 100	----
UCS [MPa]	----	21	15 – 40	25 – 35	9 – 33	5 – 30
BTS [MPa]	----	2	1.3 – 2.1	----	0.8 – 2.5	1 - 2
$E_v$ [GPa]	----	17 - 32	3 - 21	17 -28	5 - 22	----
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	----	2300	2300 - 2350	2330	2350	----
c [MPa]	----	----	9.3	----	10.8	----
$\phi$ [°]	----	----	33.7	----	26.5	----

Tab. 4: Zusammenfassung **Gesteinsparameter** für den liegenden Dolomit (siehe Anhang)

<b>Liegendes (Dolomit)</b>	H10	UA21	H9	UA20	UA19	UA18
RQD	20 - 30	90 – 100	75 - 95	85 – 98	42 – 88	----
UCS [MPa]	----	90	120	155	34	----
BTS [MPa]	----	5.5	9	8.5	----	----
$E_v$ [GPa]	----	31	43	44	39 – 40	----
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	----	2530	2470	2580	2900	----
c [MPa]	----	----	----	----	----	----
$\phi$ [°]	----	----	----	----	----	----

Tab. 5: Zusammenfassung **Gesteinsparameter** für den Hangendhorizont y-lg (siehe Anhang)

<b>Hangendes (y-lg)</b>	H10	UA21	H9	UA20	UA19	UA18
RQD	0 - 10	68 – 88	65 – 90	0 – 63	31 – 59	----
UCS [MPa]	----	27 – 32	27 – 41	1 – 3	8 – 9	----
BTS [MPa]	----	2 – 2.5	2.3 – 2.9	0.1 – 0.5	1.5 – 2	----
$E_v$ [GPa]	----	----	----	---	----	----
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	----	----	----	----	----	----
c [MPa]	----	----	----	4.3	6.1	----
$\phi$ [°]	----	----	----	28.6	19.3	----

Tab. 6: Konservativer **Gesteinsdatensatz**

<b>Schicht</b>	<b>RQD</b>	<b><math>E_v</math> [GPa]</b>	<b><math>\nu</math> [-]</b>	<b>UCS [MPa]</b>	<b>BTS [MPa]</b>	<b>c [MPa]</b>	<b><math>\phi</math> [°]</b>	<b><math>\rho</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>
y-lg	70	20	0.2	15	1.5	3.0	30	2330
y2	70	15	0.2	25	1.3	10.0	30	2330
<b>ZM*</b>	50	1	0.2	6	0.5	4.7	23	2300
Y1	80	23	0.2	32	2.0	11.0	25	2340
Liegend es	80	39	0.2	90	7.0	----	----	2500

Tab. 7: Optimistischer **Gesteinsdatensatz**

<b>Schicht</b>	<b>RQD</b>	<b><math>E_v</math> [GPa]</b>	<b><math>\nu</math> [-]</b>	<b>UCS [MPa]</b>	<b>BTS [MPa]</b>	<b>c [MPa]</b>	<b><math>\phi</math> [°]</b>	<b><math>\rho</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>
y-lg	80	20	0.2	25	2.0	3.0	30	2330
y2	80	20	0.2	25	1.5	10.0	30	2330
<b>ZM*</b>	60	3	0.2	20	0.8	4.7	23	2300
Y1	90	25	0.2	32	2.0	11.0	25	2340
Liegend es	90	42	0.2	90	7.0	----	----	2500

Tab. 8: Konservativer **Gebirgsdatensatz** (DS-1)

Schicht	RQD	GSI	$E_v$ [GPa]	$\nu$ [-]	$c$ [MPa]	$\phi$ [°]	UCS [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
y-lg	70	74	16.0	0.25	0.75	43.3	3.5	0.26	2330
y2	70	74	12.0	0.25	1.12	46.0	5.88	0.44	2330
<b>ZM*</b>	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

Tab. 9: Optimistischer **Gebirgsdatensatz** (DS-2)

Schicht	RQD	GSI	$E_v$ [GPa]	$\nu$ [-]	$c$ [MPa]	$\phi$ [°]	UCS [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
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
<b>ZM*</b>	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	29.6	2.49	2500

Für **ZM\*** gilt in der Modellabbildung folgendes:

- (a) In jedem Modell wird bis 1 m Dicke der Datensatz DS-1 verwendet
- (b) Wenn 1 m Dicke überschritten wird, so wird für den Rest DS-2 verwendet, wobei der Bereich mit DS-1 immer mittig im ZM abgeordnet ist

Das  $c$ - $\phi$ - $\sigma_t$ -Reduktionsverfahrens ist ein inzwischen in der Geotechnik und dem Bauingenieurwesen etabliertes Verfahren (EUROCODE-konform), um die Standsicherheit zu bewerten. Der ursprünglich aus der Bodenmechanik stammende Ansatz musste um die Zugfestigkeit erweitert werden, um in der Felsmechanik angewendet zu werden. Nähere Erläuterungen und Anwendungen sind u.a. zu finden in Konietzky, 2022; Chakraborti, Konietzky & Walter 2012; Chakraborti, Konietzky & Otparlik 2012; Schmidt & Konietzky 2012 und Walter & Konietzky 2008. Der Reduktionsfaktor  $S$  entspricht im Übergang von Stabilität zu Instabilität dem Sicherheitswert (Standsicherheitsfaktor):

$$S = RED = \frac{\tan\phi}{\tan\phi_{red}} = \frac{c}{c_{red}} = \frac{\sigma_t}{\sigma_{t,red}}$$

Die Iterationen zur Ermittlung des FOS auf Basis des  $c$ - $\phi$ - $\sigma_t$ -Reduktionsverfahrens werden mit einem Iterationsintervall (Genauigkeit) von 0.1 durchgeführt.

## Modellaufbau

In den Berechnungen wird eine Streckenbreite von 8 m angenommen. Die Pfeilerbreite variiert zwischen 8 und 14 m (immer quadratischer Querschnitt), wobei konkret Modelle mit Pfeilerdicken von 8, 10, 12 und 14 m berechnet wurden.

Das Modell wird als 1/4-Modell schichtenweise mit horizontal verlaufenden Schichtgrenzen aufgebaut. Die vereinfachte Schichtenabfolge ist dabei von unten nach oben immer gleich:

- **Liegendes** (20 m Mächtigkeit)
- **y1** (variable Mächtigkeit, aber mindestens 1 m)
- **ZM** (variable Mächtigkeit, wenn Mächtigkeit größer als 1 m, dann setzt sich das ZM aus drei Lagen zusammen und der genutzte Parametersatz ändert sich:
  - **ZM\*** Parametersatz *DS-2*
  - **ZM** Parametersatz *DS-1*, konstant 1 m mächtig
  - **ZM\*** Parametersatz *DS-2*)
- **y2** (variable Mächtigkeit in Variante I, konstant 5 m mächtig in Variante II)
- **y-Ig** (120 m Mächtigkeit, davon 20 m im Modell abgebildet, der Rest wird als statische Vertikallast abgebildet)

Der Dilatanzwinkel wird im gesamten Modell jeweils auf 1/4 des Reibungswinkels gesetzt.

Die numerischen Modelle bestehen je nach Variante zwischen 24.000 und 48.000 Zonen. Der Knotenpunktastand (Zonengröße) beträgt 0.5 m, zur Abbildung des Zwischenmittels partiell auch 0.25 m.

## Berechnungsergebnisse

Folgende Sicherheitsfaktoren wurden für die Varianten I und II bestimmt. Dabei wurde eine Zonendiskretisierung von 0.5 Meter betrachtet. Die schwarzen Punkte stellen die tatsächlich berechneten Sicherheitsfaktoren dar.

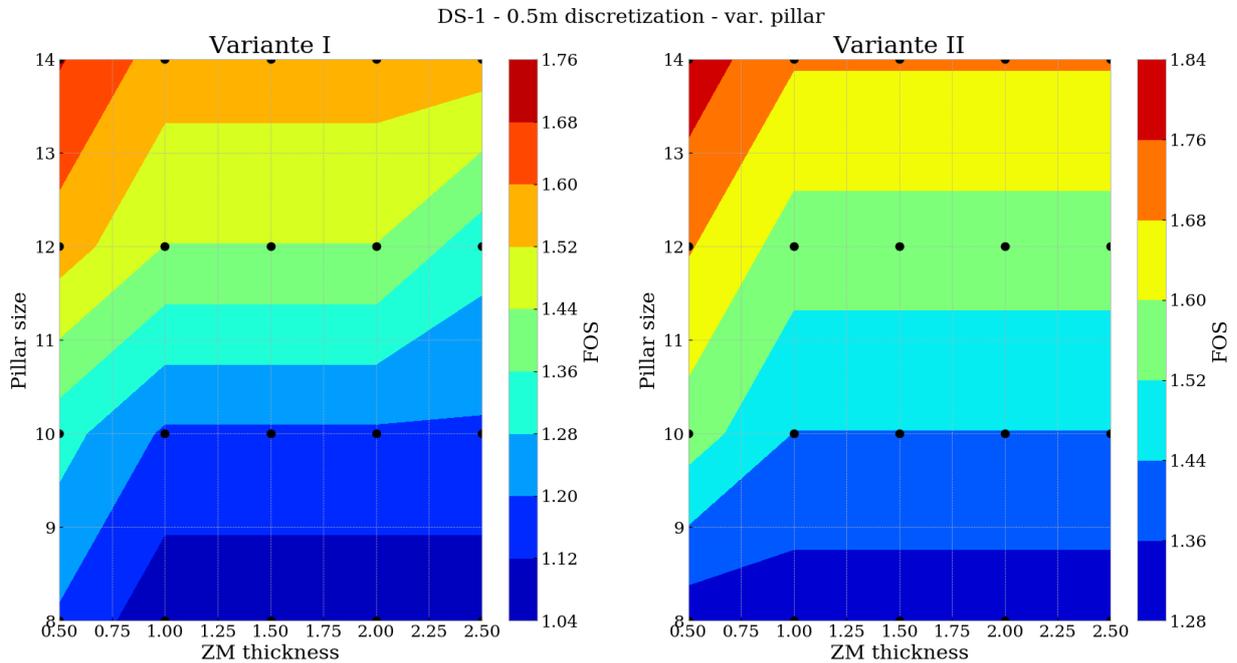


Abb. 1: Sicherheitsfaktoren für den Parametersatz **DS-1** in Abhängigkeit der ZM-Dicke und der Pfeilerdicke.

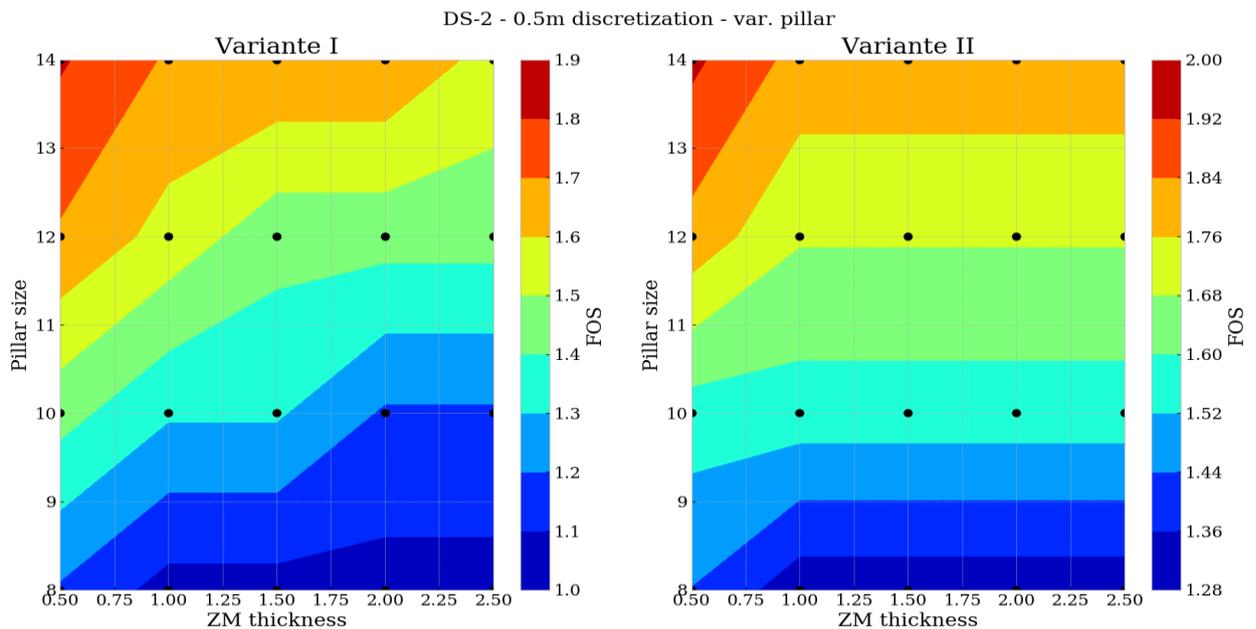


Abb. 2: Sicherheitsfaktoren für den Parametersatz **DS-2** in Abhängigkeit der ZM-Dicke und der Pfeilerdicke.

Exemplarisch soll hier die Variante I mit einer Pfeilergröße von 12 m und einer ZM-Dicke von 1.5 m genauer diskutiert werden. Der zugrunde liegende numerische Modellaufbau ist exemplarisch in Abb. 3 gezeigt. Analoge Ergebnisse für die anderen Rechenfälle sind im Anhang gezeigt.

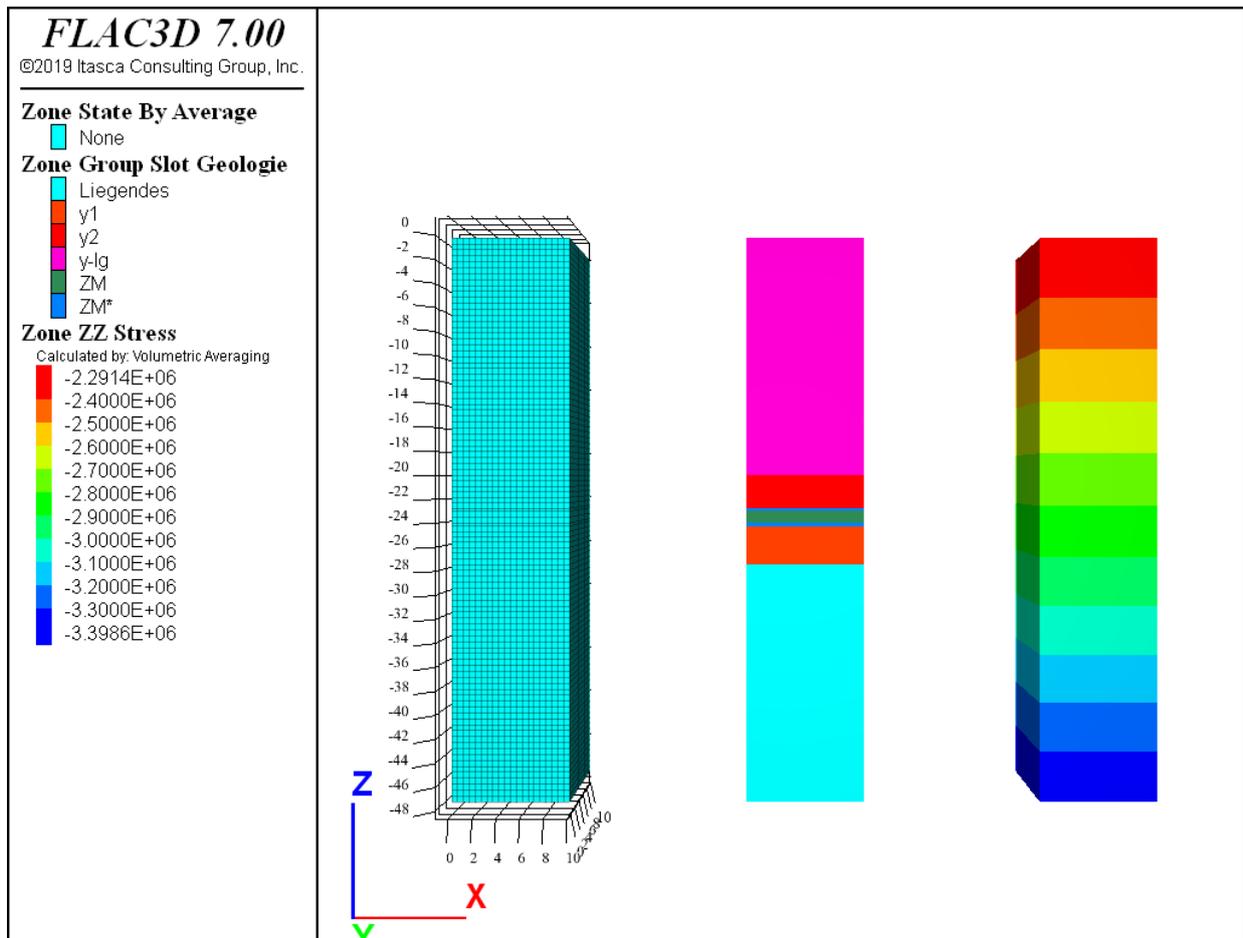


Abb. 3: Netzdiskretisierung, geologischer Aufbau und initialer Vertikalspannungszustand für das Modell Variante I, ZM-Dicke 1.5 m und Pfeilergröße 12 m.

Bis zu einer Mächtigkeit von 1 m für das Zwischenmittel werden für das ZM jeweils die Parameter der Datensätze DS-1 und DS-2 gemäß Tabellen 8 und 9 verwendet. Wenn das Zwischenmittel die Mächtigkeit von 1 m übersteigt, wird das Zwischenmittel aus drei verschiedenen Schichten (**ZM\***, **ZM**, **ZM\***) aufgebaut. Dabei wird mittig und 1 m mächtig in allen Fällen der Datensatz DS-1 angewendet. Der verbleibende Bereich ober- und unterhalb ist immer jeweils mit dem Datensatz DS-2 belegt. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass das Zwischenmittel sehr unterschiedlich ausgeprägt ist und extrem schwache Zonen auch nur lokal und in begrenzter Mächtigkeit auftreten.

Das Hangende und Liegende werden als Schichtenpakete von jeweils 20 m Mächtigkeit modelliert, wobei der Teufendruck des restlichen Hangenden als statische Auflast modelliert wird.

Nach Auffahrung der Kammer erfolgen elasto-plastische Spannungsumlagerungen und Deformationen. Wesentlichen Ergebnisse für die Datensätze DS-1 und DS-2 sind in den Abb. 4 und 5 zu sehen.

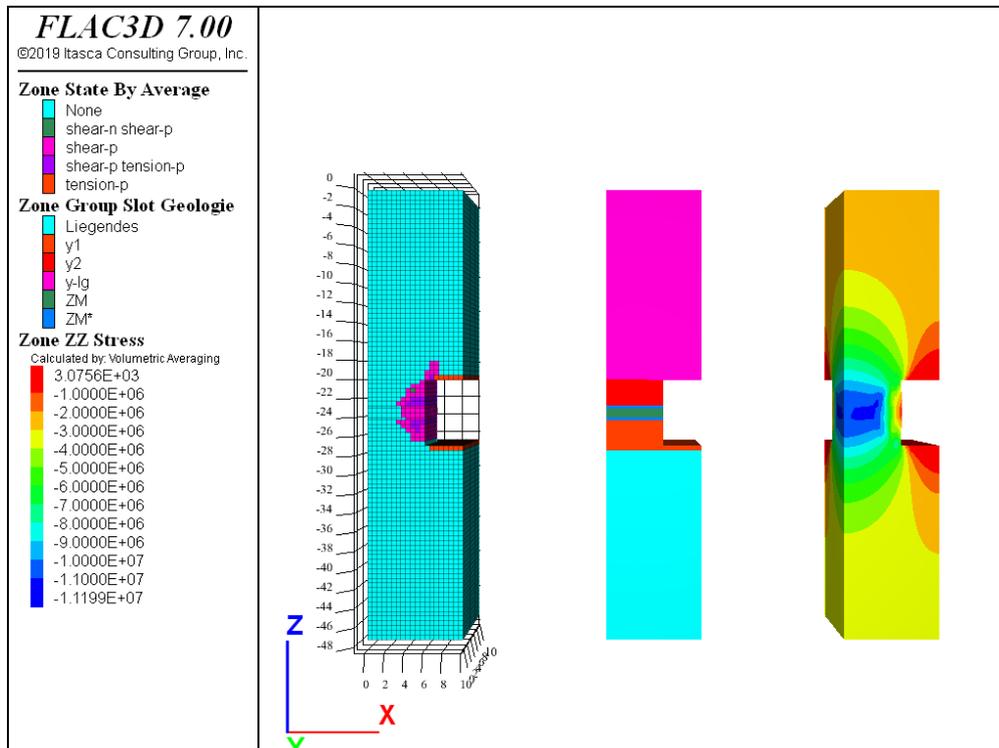


Abb. 4: Plastifizierungszustand, geologischer Aufbau und resultierender Vertikalspannungszustand für das Modell Variante I, ZM-Dicke 1.5 m und Pfeilergröße 12 m für den Parametersatz DS-1 (FOS = 1.44).

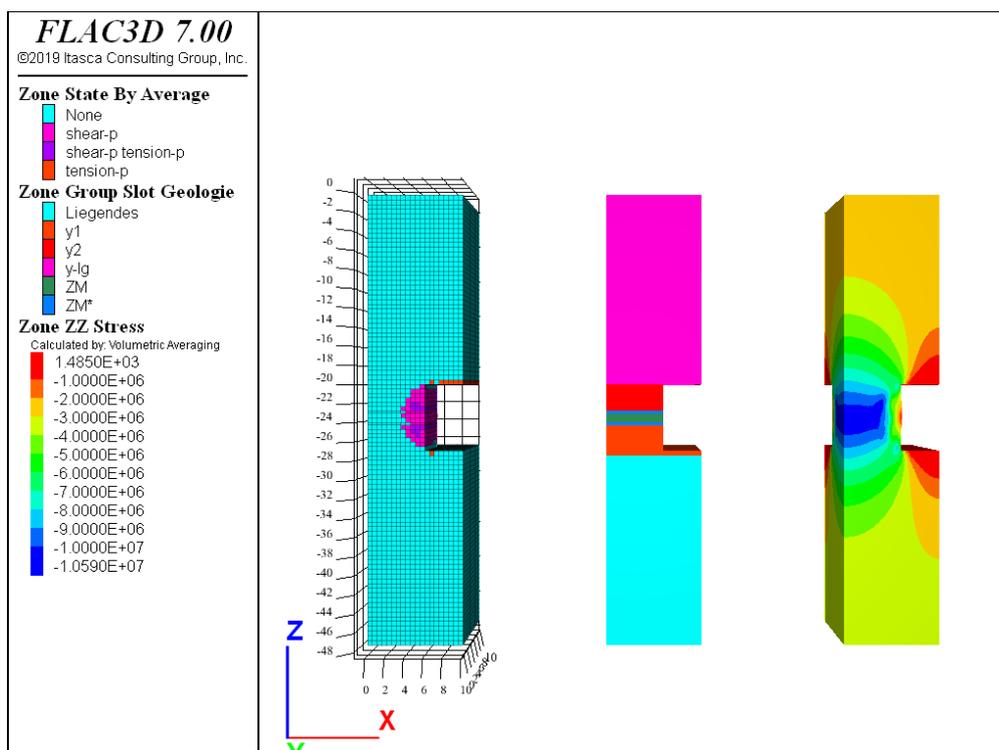


Abb. 5: Plastifizierungszustand, geologischer Aufbau und resultierender Vertikalspannungszustand für das Modell Variante I, ZM-Dicke 1.5 m und Pfeilergröße 12 m für den Parametersatz DS-2 (FOS = 1.44).

In beiden Abbildungen erkennt man die teilweise Plastifizierung des Pfeilers, wobei bei dem Parametersatz DS-1 die Plastifizierung noch etwas weiter in den Pfeiler und das Hangende hinein reicht. Generell gilt, dass bei Rechnungen mit dem Parametersatz

DS-1 die Plastifizierungen etwas stärker sind, als bei Datensatz DS-2, der einen um etwa 10% höheren FOS erzeugt. Dies ist den geringeren Gebirgsfestigkeiten geschuldet. In allen Modellen tritt an der Firste Zugversagen auf.

Die vom AG gewünschte langfristige Standsicherheit (FOS > 2.0) wird allerdings nicht erreicht. Höchstens bei der Variante II mit einer Pfeilerdicke von 14 m und einer ZM-Dicke von 0.5 m kann ein Sicherheitsfaktor von 1.94 mit dem optimistischen Gebirgsdatensatz DS-2 erreicht werden. Die hier auftretenden Plastifizierungen sind nur noch marginal.

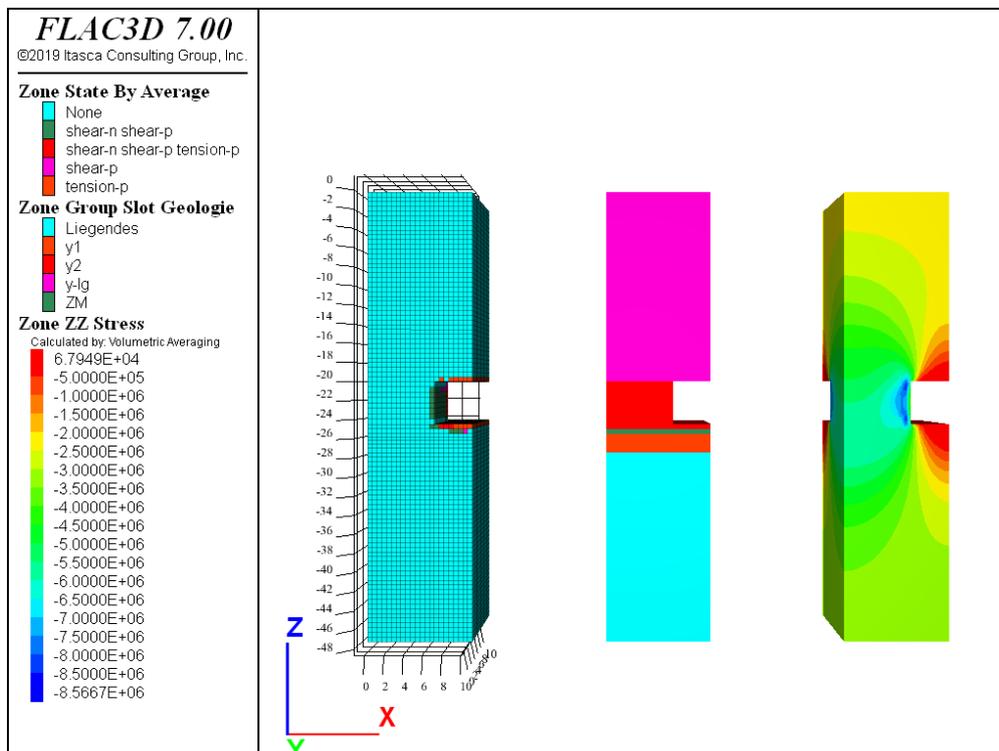


Abb. 6: Versagensmodell, geologischer Aufbau und resultierender Vertikalspannungszustand für das Modell Variante II, ZM-Dicke 0.5 m und Pfeilergröße 14 m für den Parametersatz DS-2 (FOS = 1.94).

Die folgende Tabelle zeigt die wesentlichen Ergebnisse aller berechneten Varianten. Kernaussage ist der Sicherheitsfaktor (FOS). Die angegebenen Verschiebungen  $\Delta z$  und Geschwindigkeiten  $v_z$  beziehen sich auf einen Beobachtungspunkt an der Firste in Kammermitte und sind jeweils der Modellvariante ohne Festigkeitsreduktion entnommen (entspräche dem realem Ist-Zustand nach Auffahrung).

Tab. 10: Ausgewählte Modellergebnisse

Variante	Parameter	ZM-Dicke [m]	Pfeiler [m]	$\Delta z$ [m]	$v_z$ [m/s]	FOS [-]
Variante I	DS-1	0.5	8.0	-0.02681	-1.609e-07	1.19
Variante I	DS-2	0.5	8.0	-0.01859	-3.825e-09	1.19
Variante I	DS-1	0.5	10.0	-0.01330	-4.819e-08	1.31
Variante I	DS-2	0.5	10.0	-0.01108	-1.336e-08	1.44
Variante I	DS-1	0.5	12.0	-0.00975	-2.908e-08	1.56
Variante I	DS-2	0.5	12.0	-0.00849	-2.941e-08	1.69
Variante I	DS-1	0.5	14.0	-0.00797	-3.651e-09	1.69
Variante I	DS-2	0.5	14.0	-0.00708	-5.370e-08	1.81
Variante I	DS-1	1.0	8.0	-0.11562	-3.574e-07	1.06
Variante I	DS-2	1.0	8.0	-0.06778	1.468e-07	1.06
Variante I	DS-1	1.0	10.0	-0.02820	1.061e-07	1.19
Variante I	DS-2	1.0	10.0	-0.02253	-2.893e-07	1.31
Variante I	DS-1	1.0	12.0	-0.01654	-1.458e-10	1.44
Variante I	DS-2	1.0	12.0	-0.01451	1.559e-08	1.56
Variante I	DS-1	1.0	14.0	-0.01272	9.545e-08	1.56
Variante I	DS-2	1.0	14.0	-0.01139	1.206e-09	1.69
Variante I	DS-1	1.5	8.0	-0.19475	-3.208e-07	1.06
Variante I	DS-2	1.5	8.0	-0.10529	-4.559e-07	1.06
Variante I	DS-1	1.5	10.0	-0.03585	1.576e-07	1.19
Variante I	DS-2	1.5	10.0	-0.02912	1.379e-07	1.31
Variante I	DS-1	1.5	12.0	-0.01990	-1.974e-07	1.44
Variante I	DS-2	1.5	12.0	-0.01755	-1.797e-07	1.44
Variante I	DS-1	1.5	14.0	-0.01491	-2.188e-07	1.56
Variante I	DS-2	1.5	14.0	-0.01335	-1.200e-07	1.69
Variante I	DS-1	2.0	8.0	-0.27960	-3.045e-07	1.06
Variante I	DS-2	2.0	8.0	-0.15733	-4.313e-07	1.06
Variante I	DS-1	2.0	10.0	-0.04363	1.736e-07	1.19
Variante I	DS-2	2.0	10.0	-0.03565	1.472e-07	1.19
Variante I	DS-1	2.0	12.0	-0.02355	9.144e-08	1.44
Variante I	DS-2	2.0	12.0	-0.02085	7.864e-08	1.44
Variante I	DS-1	2.0	14.0	-0.01697	7.201e-08	1.56
Variante I	DS-2	2.0	14.0	-0.01513	-1.313e-07	1.69
Variante I	DS-1	2.5	8.0	-0.43292	-3.116e-07	1.06
Variante I	DS-2	2.5	8.0	-0.25594	-3.189e-07	1.06

Variante I	DS-1	2.5	10.0	-0.05545	2.145e-07	1.19
Variante I	DS-2	2.5	10.0	-0.04597	2.059e-07	1.19
Variante I	DS-1	2.5	12.0	-0.02806	1.688e-07	1.31
Variante I	DS-2	2.5	12.0	-0.02463	1.221e-07	1.44
Variante I	DS-1	2.5	14.0	-0.01957	1.203e-07	1.56
Variante I	DS-2	2.5	14.0	-0.01756	-2.671e-07	1.56
Variante II	DS-1	0.5	8.0	-0.01274	-3.824e-08	1.31
Variante II	DS-2	0.5	8.0	-0.01069	8.447e-08	1.44
Variante II	DS-1	0.5	10.0	-0.00949	-1.610e-08	1.56
Variante II	DS-2	0.5	10.0	-0.00812	-4.540e-08	1.56
Variante II	DS-1	0.5	12.0	-0.00774	-2.566e-08	1.69
Variante II	DS-2	0.5	12.0	-0.00674	-7.130e-08	1.81
Variante II	DS-1	0.5	14.0	-0.00663	-2.435e-08	1.81
Variante II	DS-2	0.5	14.0	-0.00580	-1.005e-08	1.94
Variante II	DS-1	1.0	8.0	-0.01758	1.351e-07	1.31
Variante II	DS-2	1.0	8.0	-0.01491	-5.195e-09	1.31
Variante II	DS-1	1.0	10.0	-0.01280	-1.682e-07	1.44
Variante II	DS-2	1.0	10.0	-0.01126	-3.206e-08	1.56
Variante II	DS-1	1.0	12.0	-0.01030	-4.208e-08	1.56
Variante II	DS-2	1.0	12.0	-0.00927	2.153e-08	1.69
Variante II	DS-1	1.0	14.0	-0.00879	7.239e-09	1.69
Variante II	DS-2	1.0	14.0	-0.00788	5.302e-10	1.81
Variante II	DS-1	1.5	8.0	-0.01862	-2.002e-07	1.31
Variante II	DS-2	1.5	8.0	-0.01621	-2.674e-07	1.31
Variante II	DS-1	1.5	10.0	-0.01335	-6.008e-08	1.44
Variante II	DS-2	1.5	10.0	-0.01196	3.476e-08	1.56
Variante II	DS-1	1.5	12.0	-0.01087	-8.596e-08	1.56
Variante II	DS-2	1.5	12.0	-0.00975	6.460e-08	1.69
Variante II	DS-1	1.5	14.0	-0.00911	-1.890e-09	1.69
Variante II	DS-2	1.5	14.0	-0.00831	3.238e-08	1.81
Variante II	DS-1	2.0	8.0	-0.01977	1.174e-07	1.31
Variante II	DS-2	2.0	8.0	-0.01681	-2.697e-07	1.31
Variante II	DS-1	2.0	10.0	-0.01384	-1.078e-09	1.44
Variante II	DS-2	2.0	10.0	-0.01240	-5.514e-08	1.56
Variante II	DS-1	2.0	12.0	-0.01129	4.832e-08	1.56
Variante II	DS-2	2.0	12.0	-0.01009	2.084e-08	1.69
Variante II	DS-1	2.0	14.0	-0.00944	-3.305e-08	1.69
Variante II	DS-2	2.0	14.0	-0.00854	-1.725e-08	1.81
Variante II	DS-1	2.5	8.0	-0.01966	-2.365e-07	1.31
Variante II	DS-2	2.5	8.0	-0.01709	-1.774e-07	1.31
Variante II	DS-1	2.5	10.0	-0.01426	-1.228e-07	1.44
Variante II	DS-2	2.5	10.0	-0.01274	-1.695e-07	1.56

Variante II	DS-1	2.5	12.0	-0.01156	-5.846e-08	1.56
Variante II	DS-2	2.5	12.0	-0.01042	-6.408e-08	1.69
Variante II	DS-1	2.5	14.0	-0.00979	-6.175e-08	1.69
Variante II	DS-2	2.5	14.0	-0.00885	-3.156e-08	1.81

Zusätzliche Abbildungen befinden sich im Anhang. Dabei ist jeweils der Gleichgewichtszustand für die einzelnen Varianten ohne Festigkeitsreduktion gezeigt, wobei im Einzelnen pro Konstellation drei Abbildungen zu sehen sind:

- 1. Abbildung:
  - Geometrie und Ausgangsnetz
  - Geologischer Schichtenaufbau
  - Primärer vertikaler Spannungszustand
  
- 2. Abbildung (für DS-1):
  - Plastifizierungszustand nach Herstellung Kammer
  - Geologischer Schichtenaufbau mit Kammer
  - Sekundärer vertikaler Spannungszustand
  
- 3. Abbildung (für DS-2):
  - Plastifizierungszustand nach Herstellung Kammer
  - Geologischer Schichtenaufbau mit Kammer
  - Sekundärer vertikaler Spannungszustand

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)

## Diskussion der Ergebnisse

Aufgrund der relativ geringen Festigkeitswerte des Kernmaterials (mit Ausnahme des Liegenden) und der geringen Gebirgsgüte (sprich Gebirgsklassifikation) ergibt sich auch eine geringe Gebirgsfestigkeit.

Diese führt in allen Berechnungsfällen zu Sicherheitsfaktoren zwischen 1.0 und 2.0. Für langfristig standsichere Grubenbaue sind Sicherheitswerte von  $>\approx 2.0$  erforderlich. Dies wird in keinem der Berechnungsfälle erreicht. Die ermittelten FOS-Werte für die verschiedenen Pfeilerdicken sind:

- 8 m:  $1.06 < \text{FOS} < 1.44$
- 10 m:  $1.19 < \text{FOS} < 1.56$
- 12 m:  $1.31 < \text{FOS} < 1.81$
- 14 m:  $1.56 < \text{FOS} < 1.94$

Temporär sind Grubenbaue ohne systematischen Ausbau standsicher, wenn die Sicherheitswerte größer etwa 1.2 - 1.3 sind (das hieße, dass bei der gegebenen Kammerbreite eine Pfeilerdicke zwischen 10 m und 12 m erforderlich wäre). Dabei ist wichtig anzumerken, dass die Standsicherheitsbetrachtung (FOS) die globale Standsicherheit betrifft. Lokaler Steinfall kann damit nicht betrachtet werden und ist durch Beobachtung und Ergreifen entsprechender Maßnahmen vor Ort (bedarfsgerechte Ankerung, Bereissen etc.) zu gewährleisten. Eine langfristige Standsicherheit kann durch Ausbau- und Sicherungsmaßnahmen, insbesondere Versatzmaßnahmen (Teil- oder Vollversatz), erreicht werden. Das kritische Element bzgl. der globalen Standsicherheit sind hier die Pfeiler.

Von besonderem Interesse sind die Plastifizierungen. Hier werden zwei Phänomene beobachtet:

- a) Plastifizierungen durch Zug im unmittelbaren Firstbereich: Dieses hat keinen Einfluss auf das globale Standsicherheitsverhalten, zeigt aber an, dass lokale Sicherungsmaßnahmen (z.B. Ankerung evtl. mit Bewehrungsnetzen) nötig sind. Die Reichweite der Plastifizierungen ist sehr beschränkt und reicht meist nur etwa 0.5 m in die Firste. Ausgehend von Plastifizierungen im Pfeiler erreicht die Auflockerungszone in der Firste lokal auch Werte von bis ca. 2 m. Die Herstellung gewölbter Firsten würde die Firstsicherheit erhöhen und den potentiellen Ausbaur Aufwand reduzieren.
- b) Plastifizierungen der Pfeiler durch Scherversagen: Die Auflockerungszone beginnt jeweils an der Pfeilerkontur und pflanzt sich nach innen fort. Solange der Pfeilerkern nicht voll durchplastifiziert ist, ist die globale Standsicherheit zumindest kurzzeitig gewährleistet, bei geringem Plastifizierungsgrad auch längerfristig.

Es zeigt sich in allen Rechenfällen, dass bei Festigkeitsreduktion immer die Pfeiler das final versagende Element sind. Dies bedeutet im Umkehrschluss auch, dass durch Vergrößerung des Pfeilerdurchmessers ( $> 14$  m) prinzipiell auch langfristige Standsicherheit hergestellt werden kann, allerdings erkauft durch zunehmende Abbauverluste.

Eine weitere überlegenswerte Optionen bestände darin, das Baufeld durch mächtige Sicherheitspfeiler zu unterteilen, die den Hauptteil der Deckgebirgslast abtragen. Damit würde die Last auf die Abbaupfeiler reduziert und der FOS-Wert erhöht bzw. könnte man mit gering mächtigeren Pfeilern den angestrebten FOS-Wert erreichen. Im Sinne einer Optimierung könnte man auch daran denken, die Kammern etwas zu verbreitern.

Die Standsicherheitsunterschiede zwischen den Varianten I und II sind nur klein, so dass im Augenblick eher andere Aspekte den Ausschlag geben sollten, welche Variante bevorzugt geplant werden sollte.

Der angewandte Berechnungsansatz (Abminderung der Laborwerte auf Basis von Gebirgsklassifizierung) basiert auf einer Verallgemeinerung von sehr umfangreichen und fundierten Erfahrungswerten aus dem Berg- und Tunnelbau und stellt zum gegenwärtigen Zeitpunkt bzw. Stand des Projektes die beste Näherung an die Problematik dar.

### **Pfeilerdimensionierung für FOS $\approx$ 2.0**

In einer weiteren Berechnungskampagne wurden optimierte Pfeilerabmessungen unter folgenden Randbedingungen gesucht:

- Kammerbreite = 8 m
- Deckgebirgsmächtigkeit (EO bis Firste Kammer) = 80 oder 120 m
- Mächtigkeit ZM = 0.5 oder 2.5 m
- Abbauvariante I
- Gebirgsdatensatz DS-1 oder DS-2

In allen Fällen sollen Pfeilerdicken ermittelt werden, die einen FOS von ca. 2.0 erzeugen, um damit Langzeitsicherheit nachzuweisen. Damit waren insgesamt  $2^3 = 8$  Konstellationen gesucht, d.h. optimierte Pfeilerdicken.

Tab. 11 zeigt die optimierten Rohdaten aus den Iterationsrechnungen, die Pfeilerdicke zwischen 15 und 21 m umfassten. Die Abbildungen 7 – 10 zeigen die berechneten FOS-Werte in Abhängigkeit der gewählten Parameter. Im Anhang sind weitere entsprechende Abbildungen zu finden.

Tab. 11: Berechnete Pfeilerdicken für FOS-Werte  $\geq 2$

Pfeilerdicke [m]	FOS	Datensatz	ZM-Dicke [m]	Variante	Deckgeb.- mächtigkeit [m]
16	2.06	DS-1	0.5	I	80
19	2.06	DS-1	2.5	I	80
15	2.31	DS-2	0.5	I	80
16	2.06	DS-2	2.5	I	80
21	2.06	DS-1	0.5	I	120
21	1.94	DS-1	2.5	I	120
16	2.06	DS-2	0.5	I	120
19	2.06	DS-2	2.5	I	120

Aus der Interpolation (siehe Abb. 7 - 10) lassen sich die in Tab. 12 dargestellten optimierten Werte für die Pfeilerdicken ableiten.

Tab. 12: Optimale Pfeilerdicken für FOS-Werte für FOS  $\geq 2$

Optimierte Pfeilerdicke [m]	FOS	Datensatz	ZM-Dicke [m]	Variante	Deckgeb.- mächtigkeit [m]
15.0	$\geq 2$	DS-1	0.5	I	80
18.5	$\geq 2$	DS-1	2.5	I	80
14.0	$\geq 2$	DS-2	0.5	I	80
15.5	$\geq 2$	DS-2	2.5	I	80
20.0	$\geq 2$	DS-1	0.5	I	120
21.5	$\geq 2$	DS-1	2.5	I	120
15.5	$\geq 2$	DS-2	0.5	I	120
18.5	$\geq 2$	DS-2	2.5	I	120

DS-1 - 0.5m discretization - var. pillar - 80 Ueberdeckung

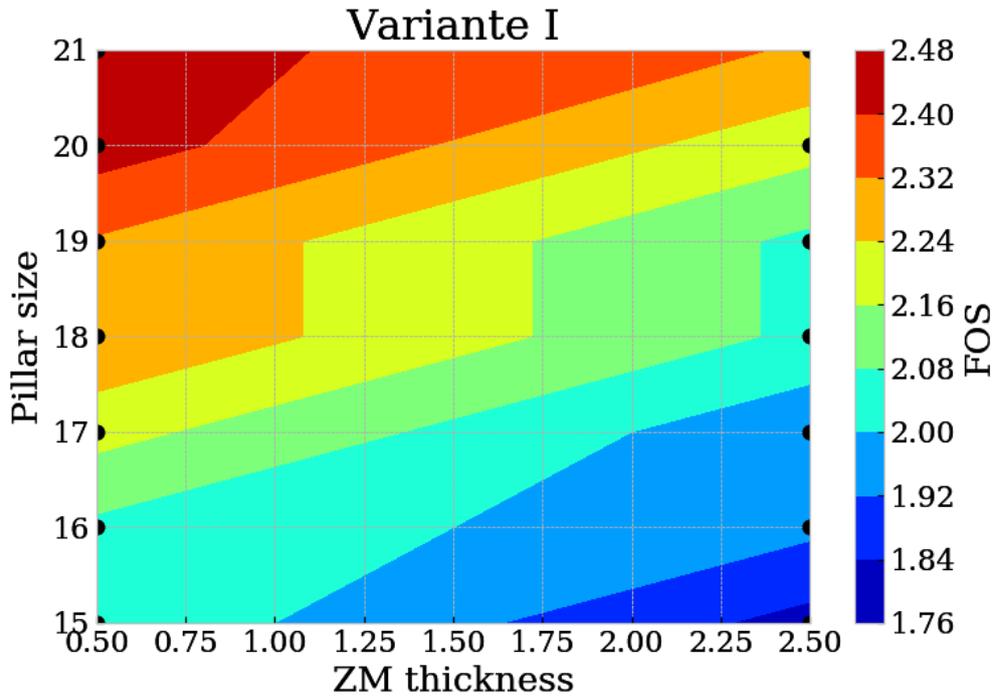


Abb. 7: FOS-Werte für Var. I und DS-1 als Funktion von Pfeilerdicke und ZM-Mächtigkeit bei 80 m Überdeckung

DS-2 - 0.5m discretization - var. pillar - 80 Ueberdeckung

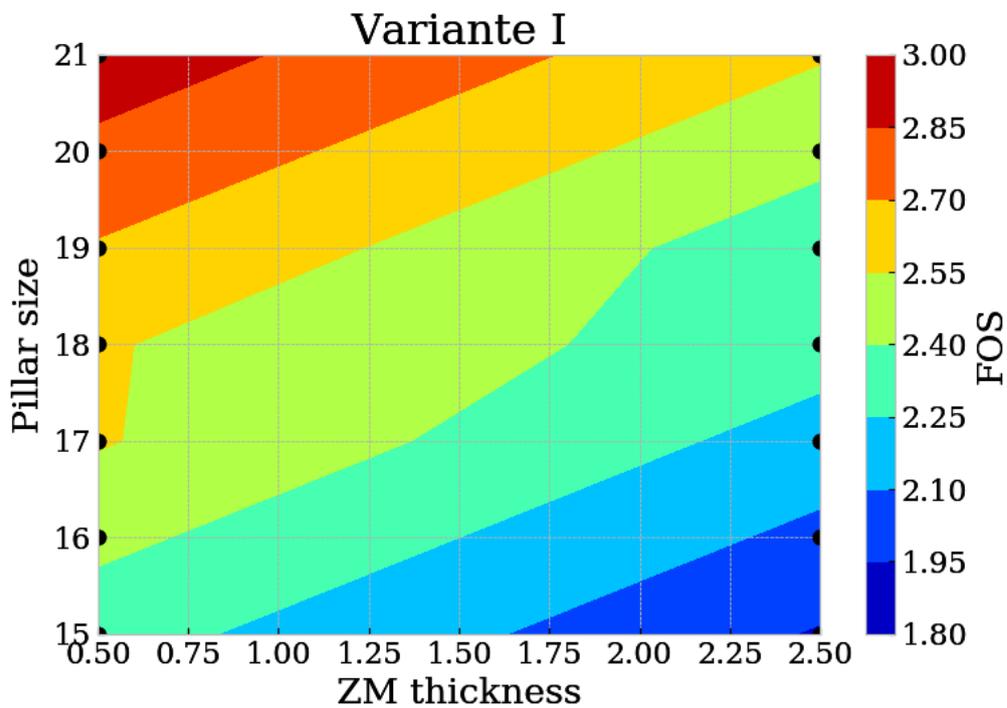


Abb. 8: FOS-Werte für Var. I und DS-2 als Funktion von Pfeilerdicke und ZM-Mächtigkeit bei 80 m Überdeckung

DS-1 - 0.5m discretization - var. pillar - 120 Ueberdeckung

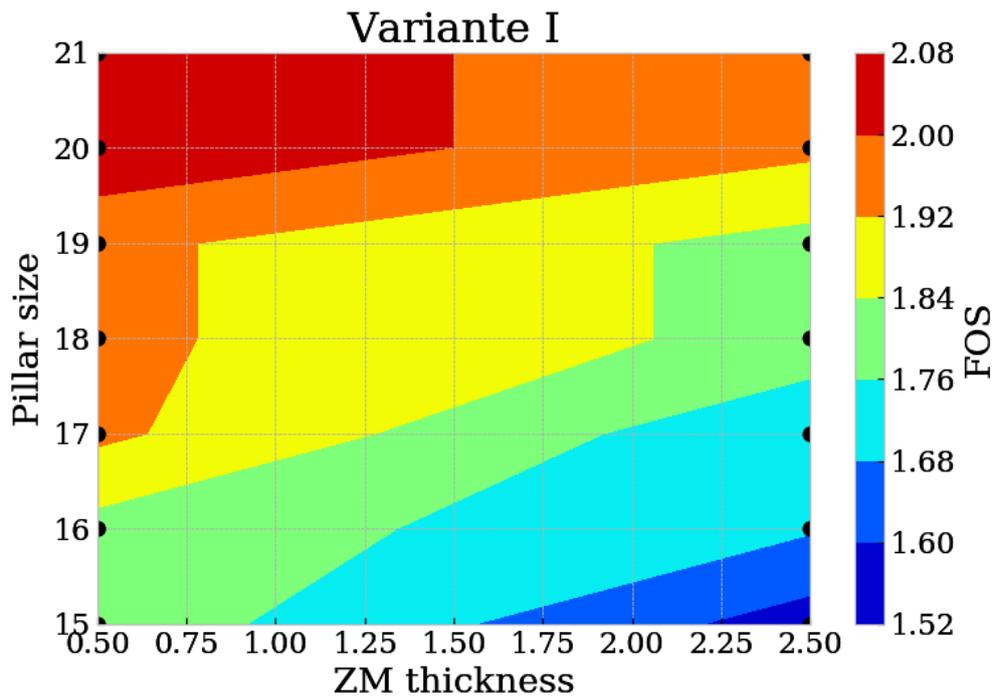


Abb. 9: FOS-Werte für Var. I und DS-1 als Funktion von Pfeilerdicke und ZM-Mächtigkeit bei 120 m Überdeckung

DS-2 - 0.5m discretization - var. pillar - 120 Ueberdeckung

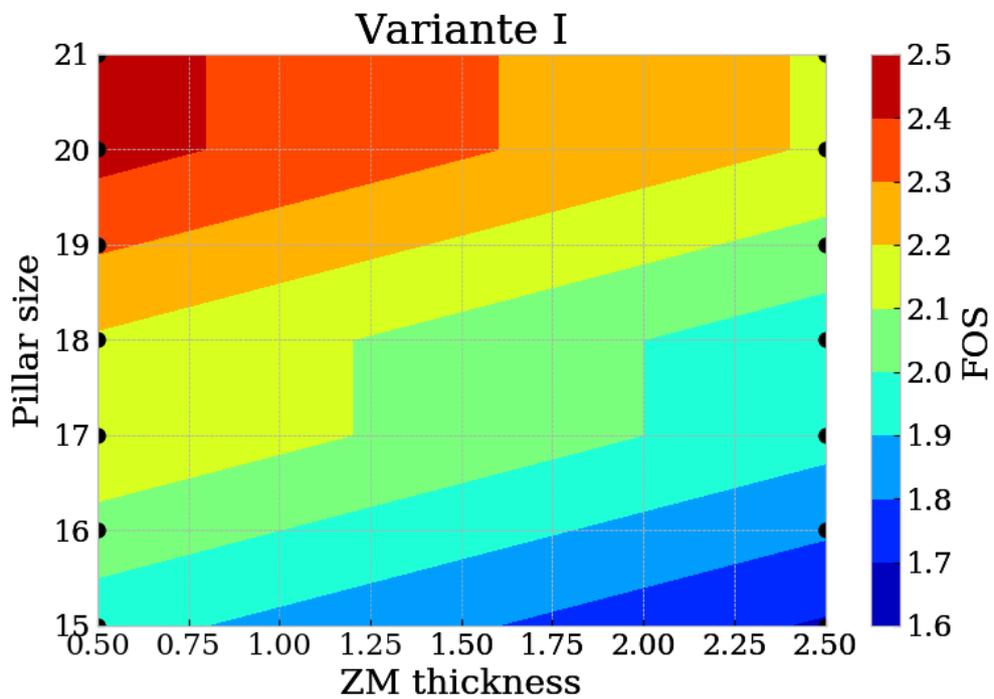


Abb. 10: FOS-Werte für Var. I und DS-2 als Funktion von Pfeilerdicke und ZM-Mächtigkeit bei 120 m Überdeckung

## Diskussion der Ergebnisse zur Pfeilerdimensionierung für FOS $\approx 2.0$

Nach jetzigem Kenntnisstand wurden folgende Pfeilerdicken (Kantenlänge) gemäß Tabelle 12 und Abb. 7 – 10 (stets Annahme von Pfeilern mit quadratischem Querschnitt) als Grundlage für eine Abbauplanung ermittelt, wenn davon ausgegangen wird, dass das Hohlraumsystem ohne Versatz dauerhaft standsicher sein soll:

- 14.0 – 18.5 m bei 80 m Überdeckung (je nach Geologie und Parametern)
- 15.5 – 21.5 m bei 120 m Überdeckung (je nach Geologie und Parametern)

Zu beachten sind dabei drei wesentliche Aspekte:

- (1) Die abgeleiteten und den Berechnungen zugrunde liegenden Gebirgsparameter entsprechen zwar einer gut begründeten und vielfach bewährten Methodik, lokalspezifische Abweichungen können aber auftreten.
- (2) Die abgeleiteten Gebirgsparameter sind konservativ, d.h. es ist gut möglich, dass sich im Rahmen der Erschließung zeigt, dass die Pfeilerdicken noch etwas reduziert werden können.
- (3) Die Berechnungen berücksichtigen den ungünstigsten Belastungsfall im Zentrum der Abbaufäche. Positiv wirkende Druckschatten durch Baufeldränder bzw. Sicherheitspfeiler sind noch nicht berücksichtigt.

Aus praktischen Gründen empfiehlt es sich, für eine Vorplanung vereinheitlichte Pfeilerdicken anzunehmen. Aufgrund der oben genannten Aspekte wird daher folgendes für die Vorplanung vorgeschlagen:

- 15 m – Pfeiler bei Überdeckung von 80 m (minimale Überdeckung)
- 17 m – Pfeiler bei Überdeckung von 120 m (maximale Überdeckung)

Das Abbaugebiet kann dabei in Bereiche mit etwa gleicher Überdeckungshöhe eingeteilt werden und bzgl. der Pfeilerdicken gemäß konkreter Überlagerung linear interpoliert werden.

Durch den Einsatz von Teil- oder Vollversatz in den Kammern könnte der Pfeilerquerschnitt deutlich reduziert werden. In welchem Umfang dies möglich ist, hängt von der Versatzhöhe und den Versatzeigenschaften ab und wäre separat zu prüfen.

Es besteht international Konsens, dass beim Kammer-Pfeiler- bzw. Örter-Festen-Abbau FOS-Werte von etwa 2 und darüber eine langfristig standsichere Abbausituation darstellen. Die Festlegung von spezifischen Grenzwerten variiert diesbezüglich international leicht und liegt für langfristig stabile Systeme zwischen etwa 1,6 und 2,1 (siehe z.B. Konietzky & Schleinig (2021), Hoek (2022), Hill (2005), Galvin (2006), Gordon Geotechniques (2020), Gale & Hebblewhite (2005), Kishore (2021)). Gestützt werden diese Werte durch umfangreiche Auswertungen von existierenden Bergwerksanlagen in unterschiedlichen Gesteinsarten und dem Fakt, dass solche Grenzwerte durch Aufsichts- bzw. Genehmigungsbehörden vorgeschrieben werden.

## Literaturverzeichnis

- Abbas, S.M.; Konietzky, H. (2017): Rock mass classification systems, ebook, Lehrstuhl Felsmechanik, TU BAF
- Chakraborti, D.; Konietzky, H.; Walter, K. (2012): A Comparative Study of Different Approaches for Factor of Safety Calculations by Shear Strength Reduction Technique for Non-linear Hoek-Brown Failure Criterion, Geotech Geol Eng, 30: 925-934
- Chakraborti, S.; Konietzky, H.; Otparlik, K. (2012): Global and local approach of numerical shear strength reduction techniques for materials characterised by Hoek-Brown criterion: a comparative study, Proc. EUROCK2012, 124: 1-13
- Frühwirt, T. (2019): Laborbericht 'Gesteinsmechanische Untersuchungen Gipslagerstätte Altersheim', Institut für Geotechnik, TU BAF
- Gale, W., Hebblewhite, B.K. (2005): Systems approach to pillar design, ACARP Project C90018
- Galvin, J.M. (2006): Considerations associated with the application of UNSW and other pillar design formulae, Proc. ARMA, USRMS 06-1129
- Gordon Geotechniques (2020): Subsidence report for the ensham life of mine extension project, ACN 127 420 839
- Hill, D. (2005): Coal pillar design criteria for surface protection, Proc. 2005 Coal Operators' conference, University of Wollongong, February 2009, 18-20
- Hoek, E. et al. (2013): Quantification of the Geological Strength Index Chart, Proc. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium
- Hoek, E. (2022): Practical rock engineering, chapter 2: When is a rock engineering design acceptable ? (<https://www.rocscience.com>)
- Kishore, S. (2021): Optimization of pillar sizes in underground coal mines, IJIRT, 8(6): 153013
- Konietzky, H. (2022): Factor-of-safety calculations in geomechanics, ebook, Lehrstuhl Felsmechanik, TU BAF
- Konietzky, H., Schleinig, J.-P. (2021): Geomechanical issues, ebook, Lehrstuhl Felsmechanik, TU BAF
- Rocscience (2019): Rocdata 5.0 (<https://www.rocscience.com/software/rocdata>)
- Schmidt, F.; Konietzky, H. (2012): Geomechanical Problems at the Copper mines Jezkazgan (Kazakhstan), Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg zum 41. Geomechanik-Kolloquium, TU Bergakademie Freiberg, 27-40
- Walter, K.; Konietzky, H. (2008): Room pillar dimensioning for gypsum and anhydrite mines in Germany, Proc. of the International Conference on Advances in Mining and Tunneling 2008, Hanoi and Vietnam, 349-362

# Anhang