

Pumpspeicherwerk Forbach – Neue Unterstufe

**Antragsunterlagen zum
Planfeststellungsverfahren**

Antragsteil B.VII.3 Felsbaustatik Kraftwerkskaverne

Stand: 30.11.2018



Pumpspeicherwerk Forbach – Neue Unterstufe

Antragsunterlagen zum Planfeststellungsverfahren

Antragsteil B.VII.3 Felsbaustatik Kraftwerkskaverne

Unterschriftenblatt:

Antragstellerin:

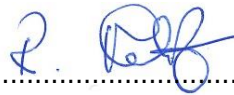
EnBW AG
Schelmenwasenstraße 15
70567 Stuttgart



.....
(i. A. U. Gommel)

Stuttgart, den 30.11.2018

Bearbeiter/Verfasser:



.....
(R. Achatz)

München, den 30.11.2018

Pumpspeicherwerk Forbach – Neue Unterstufe

Antragsunterlagen zum Planfeststellungsverfahren

Antragsteil B.VII.3 Felsbaustatik Kraftwerkskaverne

Dokumentenprüfblatt:

Rev.	Art der Änderung	erstellt (Datum)	Autor	geprüft, freig., Name
0	Ersterstellung	25.01.2018	IAF	geprüft: Achatz
1	Überarbeitung zur Vollständigkeitsprüfung	30.11.2018	IAF	geprüft: Achatz freig.: Gommel
2				

Projekt:

Pumpspeicherwerk Forbach

**Genehmigungsplanung Neue Unterstufe
B.VII.3
Felsbaustatik Kraftwerkskaverne**

Auftraggeber:

EnBW Energie Baden-Württemberg AG
Schelmenwasenstraße 15
70567 Stuttgart

Auftragnehmer:

Ingenieurarbeitgemeinschaft PSW Forbach
bestehend aus:
Lahmeyer Hydroprojekt GmbH
Geoconsult ZT GmbH
Lahmeyer International GmbH

c/o Lahmeyer Hydroprojekt GmbH
Elsenheimerstraße 11
80687 München

Projektleitung:

Dipl.-Ing. Robert Achatz

Bearbeitung:

Karsten Thermann

München, 16.11.2018

Ing.-ARGE PSW Forbach

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "R. Achatz".

Robert Achatz
Projektleiter

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "K. Thermann".

Karsten Thermann
Projektbearbeiter

INHALTSVERZEICHNIS

1	VERANLASSUNG	1
2	GEOTECHNISCHE PARAMETER.....	2
2.1	Trennflächen.....	2
2.1.1	Orientierung	2
2.1.2	Scherparameter	3
2.2	Gesteinsparameter	3
2.2.1	Dichte.....	3
2.2.2	Einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit.....	4
2.2.3	Verformungs-/Elastizitätsmodul.....	4
2.3	Gebirgsparameter.....	5
2.3.1	Wichte.....	5
2.3.2	Verformungs-/Elastizitätsmodul.....	5
2.3.3	Scherparameter	6
2.4	Primärspannungen.....	7
3	GEOTECHNISCHE BEMESSUNG	8
3.1	Empirische Betrachtung	8
3.2	Keilstatik	11
3.2.1	Allgemein	11
3.2.2	Eingangsparameter	11
3.2.3	Ergebnisse Kavernenteil Schwarzenbachwerk (KT SBW)	12
3.2.4	Ergebnisse Kavernenteil Murgwerk (KT MuW)	19
3.3	FE-Kontinuumsberechnungen	22
3.3.1	Allgemein	22
3.3.2	Geometrie und Ausbruchssequenzen	22
3.3.3	Eingangsparameter FE-Berechnung	27
3.3.4	Ergebnisse Kavernenteil Schwarzenbachwerk.....	27
3.3.5	Ergebnisse Kavernenteil Murgwerk	30
3.3.6	FE-Modellierung Felssicherungsmaßnahmen	33
3.4	Felssicherungsmaßnahmen	36
3.4.1	Felsanker	37

3.4.2	Spritzbeton.....	40
3.4.3	Vorspannanker.....	41
3.4.4	Drainage	41
3.4.5	Messtechnik.....	42
3.5	 Festlegung von Ausbruch und Sicherung.....	43
3.5.1	Ausbruchs- und Sicherungsreihenfolge.....	43
3.5.2	Freie Standzeiten.....	45
3.5.3	Kreuzende Stollen.....	45
3.5.4	Weitere Details.....	45
3.6	 Weitere Erkundungen	46
4	ZUSAMMENFASSUNG	47

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Stereoplot der für die Kraftwerkskaverne relevanten Kluftscharen mit Bandbreiten und gemittelten Orientierungen (rot gestrichelt)	2
Abbildung 2: Gebirgsverformungsmodul gegen maximale Überlagerungsspannung von 130 Wasserkraftkavernen plus der Kraftwerkskaverne der Neuen Unterstufe nach [Q6]	8
Abbildung 3: Gebirgsdruckfestigkeit gegen maximale Überlagerungsspannung von 130 Wasserkraftkavernen plus der Kraftwerkskaverne der Neuen Unterstufe nach [Q6]	8
Abbildung 4: Felssicherung nach dem Q-System [Q12] mit der Kraftwerkskaverne	9
Abbildung 5: Q-Diagramm mit Daten für Wasserkraft-Kavernen aus [Q14]	10
Abbildung 6: Unrealistischer, spitzwinkliger Keil der Trennflächenkombination 1-4-5	13
Abbildung 7: Gleitkeile (unskaliert) des KT SBW bei der Kombination 7) 2-3-4	14
Abbildung 8: Gleitkeile (unskaliert) des KT SBW bei der Kombination 10) 3-4-5	15
Abbildung 9: Gleitkeile (skaliert. max. 10 m Ausbisslänge) des KT SBW bei der Kombination 2) 1-2-4	17
Abbildung 10: Gleitkeile (skaliert. max. 10 m Ausbisslänge) des KT SBW bei der Kombination 3) 1-2-5	17
Abbildung 11: Gleitkeile (skaliert. max. 10 m Ausbisslänge) des KT SBW bei der Kombination 4) 1-3-4	17
Abbildung 12: Schematische Darstellung des orthogonalen Kluftgefüges im Granit	19
Abbildung 13: Gleitkeile (unskaliert) des KT MuW bei der Kombination 7) 2-3-4	20
Abbildung 14: Gleitkeile (skaliert max. 10 m Ausbisslänge) des KT MuW bei der Kombination 2) 1-2-4	21
Abbildung 15: Gleitkeile (skaliert max. 10 m Ausbisslänge) des KT MuW bei der Kombination 3) 1-2-5	21
Abbildung 16: Gleitkeile (skaliert max. 10 m Ausbisslänge) des KT MuW bei der Kombination 11) 3-5-6	21
Abbildung 17: FE-Modell des KT SBW (Querschnitt C-C)	23
Abbildung 18: FE-Modell des KT MuW (Querschnitt I-I)	24
Abbildung 19: Bauwerksabmessungen und Ausbruchsequenz des KT SBW	25
Abbildung 20: Bauwerksabmessung und Ausbruchsequenz des KT MuW	26
Abbildung 21: Totale Verschiebungen (Konturlinien) und plastifizierte Bereiche des KT SBW	28
Abbildung 22: Spannungsplot Sigma1 des KT SBW	29
Abbildung 23: Spannungsplot Sigma3 des KT SBW	29

Abbildung 24: Gebirgsauslastung um den KT SBW.....	30
Abbildung 25: Totale Verschiebungen (Konturlinien) und plastifizierte Bereiche des KT MuW	31
Abbildung 26: Spannungsplot Sigma1 des KT MuW	32
Abbildung 27: Spannungsplot Sigma3 des KT MuW	32
Abbildung 28: Gebirgsauslastung um den KT MuW	33
Abbildung 29: Totale Verschiebungen (Konturlinien) und plastifizierte Bereiche des KT SBW mit Felssicherungsmaßnahmen	34
Abbildung 30: Totale Verschiebungen (Konturlinien) und plastifizierte Bereiche des KT MuW mit Felssicherungsmaßnahmen	35
Abbildung 31: Totale Verschiebungen (Konturlinien) und axiale Ankerkräfte des KT SBW	35
Abbildung 32: Totale Verschiebungen (Konturlinien) und axiale Ankerkräfte des KT MuW	36

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Kluftorientierungen im Bereich der Kraftwerkskaverne nach [Q1]	2
Tabelle 2: Scherparameter der Trennflächen im Granit nach [Q2]	3
Tabelle 3: Ergebnisse der Dichtebestimmung des Forbach-Granits [Q3]	3
Tabelle 4: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche des Forbach-Granits gemäß [Q2] und [Q3] ...	4
Tabelle 5: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche hinsichtlich des Verformungsverhaltens gemäß [Q2] und [Q3]	4
Tabelle 6: Empirisch abgeschätzte Gebirgsverformungs-Moduln sowie Werte gemäß [Q2]	6
Tabelle 7: Gebirgsfestigkeitsparameter des Forbach-Granits	7
Tabelle 8: Primärspannungen im Forbach-Granit nach [Q3]	7
Tabelle 9: Kluftorientierungen, Ausbisslängen und Scherparameter im Kavernenbereich	12
Tabelle 10: Gleitkeile (unskaliert) im Bereich des KT SBW mit einem Sicherheitsfaktor $<1,5$	14
Tabelle 11: Gleitkeile (skaliert, max. Ausbisslänge 10 m) im Bereich des KT SBW mit einem Sicherheitsfaktor $<1,5$	16
Tabelle 12: Benötigte Ausbauwiderstände für den Kavernenteil Schwarzenbachwerk	18
Tabelle 13: Gleitkeile (unskaliert) im Bereich des KT MuW mit einem Sicherheitsfaktor $<1,5$	19
Tabelle 14: Gleitkeile (skaliert, max. Ausbisslänge 10 m) im Bereich des KT MuW mit einem Sicherheitsfaktor $<1,5$	20
Tabelle 15: Benötigte Ausbauwiderstände für die Bereiche des Kavernenteils Murgwerk	22
Tabelle 16: Verwendete Gebirgsfestigkeitsparameter	27
Tabelle 17: Vergleich max. Verschiebungen und Ausdehnung plastischer Zone mit und ohne Felssicherung (FS)	34
Tabelle 18: Vergleich maximaler Ankerkräfte für KT SBW und KT MuW	36
Tabelle 19: Erforderliche Mindest-Ankerlängen.	37
Tabelle 20: Ankerraster und –längen der Felsnägel für die Kavernenteile SBW und MuW	38
Tabelle 21: Spritzbeton des KT SBW und KT MuW	40
Tabelle 22: Vorläufige Felssicherungsmaßnahmen für die Kavernenteile Schwarzenbach- und Murgwerk	47

QUELLENVERZEICHNIS

Verwendete Unterlagen

- [Q1] gbm - Schreiben (30.01.2015): PSW Forbach, Unterstufe 50 MW Kavernenkraftwerk – Trennflächenauswertung im Bereich Standort Kraftwerkskaverne.
- [Q2] gbm – Schreiben (28.02.2015): PSW Forbach, Unterstufe 50 MW Kavernenkraftwerk – Gebirgskennwerte für Granitgebirge und Lockergesteine im Bereich Unterstufe Forbach.
- [Q3] gbm - Gesellschaft für Baugeologie und-meßtechnik mbH und Mailänder Consult GmbH: Pumpspeicherkraftwerk Forbach, Neubau Unterstufe - Geotechnisches und hydrogeologisches Gutachten. - Ettlingen/Karlsruhe; August 2017.
- [Q4] gbm (28.05.2015): PSW Forbach, Unterstufe 50 MW Kavernenkraftwerk - Geotechnischer Schnitt Kaverne - Geologie und Hydrogeologie mit Bewertungsband.
- [Q5] gbm-Schreiben (11.03.2015): PSW Forbach, Unterstufe 50 MW Kavernenkraftwerk – Vergrüßungsauswertung.

Literatur

- [Q6] Hönisch, K.: "The World's Large Hydro Power Caverns", International Water Power & Dam Construction, Yearbook 2004.
- [Q7] Hoek, E., Carranza-Torres, C. & Corkum, B. (2002): "Hoek-Brown Failure Criterion - 2002 edition". Proc.NARMS-TAC Conference, Toronto, 267-273.
- [Q8] Hoek & Diederichs (2006): "Empirical Estimation of Rock Mass Modulus", International Journal on Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 43, 203-215.
- [Q9] Hoek & Brown (1997): "Practical Estimates of Rock Mass Strength", International Journal on Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanical Abstracts, Vol. 34, No 8, 1165-1186.
- [Q10] Crowder, J.J. & Bawden, W.F. (2004): Review of Post-Peak Parameters and Behaviour of Rock Masses: Current Trends and Research.
- [Q11] M. John, B. Mattle, T. Zoidl (2003): Berücksichtigung des Materialverhaltens des jungen Spritzbetons bei Standsicherheitsuntersuchungen für Verkehrstunnel, Tunnelbau Taschenbuch 2003, S. 149-188.
- [Q12] GRIMSTAD, E. & BARTON, N., 1993, "Updating the Q-System for NMT", Proceedings International Symposium on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support.
- [Q13] BARTON, N. et al., 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mech. 6,p 189-236.
- [Q14] SAURER, E. et al., 2013, Decisive design basis and parameters for power plant caverns, Proceedings WTC 2013, p. 1858 – 1864.

- [Q15] BIENIAWSKI, Z. T. (1974): Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunneling. 3. Kongreß der IGFM Denver. In: Advances in Rock Mechanics, Band IIa, S. 27 bis 32.

Normen / Merkblätter

- DIN 21521 (1993) Gebirgsanker für den Bergbau und den Tunnelbau.
- DIN EN 1537 (2014) Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Verpressanker.
- DIN EN 14490 (2010) Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Bodenvernagelung.
- DIN EN 14199 (2013) Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten – Mikropfähle.
- DIN EN 1992-1-1 (2013): Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
- DIN 18551 (2014) Spritzbeton - Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN 14487 und Regeln für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen
- DIN EN 14487-1 (2006) Spritzbeton - Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität; Deutsche Fassung EN 14487-1: 2005
- DIN EN 14487-2 (2007) Spritzbeton - Teil 2: Ausführung; Deutsche Fassung EN 14487-2: 2006
- DIN EN 14488-1 (2005) Prüfung von Spritzbeton - Teil 1: Probenahme von Frisch- und Festbeton; Deutsche Fassung EN 14488-1: 2005
- DIN EN 14488-2 (2006) Prüfung von Spritzbeton - Teil 2: Druckfestigkeit von jungem Spritzbeton; Deutsche Fassung EN 14488-2: 2006
- DIN EN 14488-3 (2006) Prüfung von Spritzbeton - Teil 3: Biegefestigkeiten (Erstriss-, Biegezug- und Restfestigkeit) von faserverstärkten balkenförmigen Betonprüfkörpern; Deutsche Fassung EN 14488-3: 2006
- DIN EN 14488-4 (2008) Prüfung von Spritzbeton - Teil 4: Haftfestigkeit an Bohrkernen bei zentrischem Zug; Deutsche Fassung EN 14488-4: 2005+A1:2008
- DIN EN 14488-5 (2006) Prüfung von Spritzbeton - Teil 5: Bestimmung der Energieabsorption bei faserverstärkten plattenförmigen Prüfkörpern; Deutsche Fassung EN 14488-5: 2006
- DIN EN 14488-6 (2006) Prüfverfahren für Spritzbeton - Teil 6: Schichtdicke von Beton auf einem Untergrund; Deutsche Fassung EN 14488-6: 2006
- DIN EN 14488-7 (2006) Prüfung von Spritzbeton - Teil 7: Fasergehalt von faserverstärktem Beton; Deutsche Fassung EN 14488-7: 2006
- DIN EN 14889-1 (2006) Fasern für Beton - Teil 1: Stahlfasern - Begriffe, Festlegungen und Konformität; Deutsche Fassung EN 14889-1:2006
- Merkblätter Hohlraumbau, LGRB Referat 97 - Landesbergdirektion

1 VERANLASSUNG

Im Rahmen der Entwurfsplanung für das Pumpspeicherwerk Forbach Neue Unterstufe wurde die vorliegende Felsbaustatik für die Kraftwerkskaverne angefertigt und entsprechend Felssicherungsmaßnahmen für die entsprechenden Kavernenteile entworfen. Das Dokument basiert auf den Bohrungen und Erkundungsmaßnahmen, welche zwischen Januar 2011 und April 2011 für das vorliegende geotechnische und hydrogeologische Gutachten [Q1] abgeteuft und ausgeführt wurden, sowie der in 2012 durchgeführten Kartierung geologischer Strukturen in Geländeaufschlüssen im Bereich der Kraftwerkskaverne.

Die vorliegende Felsbaustatik wird als Bestandteil der Tragwerksplanung im Rahmen der Entwurfsplanung gesehen.

Für die Dimensionierung von Felssicherungsmaßnahmen wird das Gebirge zum einen als Diskontinuum im Rahmen einer Keilstatik betrachtet sowie als Kontinuum mittels FEM modelliert. Aus der kombinierten Betrachtung Diskontinuum-Kontinuum werden Felssicherungsmaßnahmen abgeleitet.

Die Felssicherungsmaßnahmen sind als vorläufig anzusehen und müssen entsprechend durch neue Erkenntnisse aus weiteren Erkundungsarbeiten, wie z. B. der momentan noch nicht abgeschlossenen Bohrkampagne 2018, überprüft und, falls erforderlich, somit sukzessive mit den nächsten Planungsphasen angepasst und erweitert werden.

Die neue Kraftwerkskaverne besteht aus den Kavernenteilen Schwarzenbachwerk, Transformatoren und Murgwerk.

2 GEOTECHNISCHE PARAMETER

2.1 Trennflächen

2.1.1 Orientierung

Das für die Kraftwerkskaverne relevante Trennflächensystem ist nach [Q1] in Tabelle 1 zusammengefasst. In Abbildung 1 sind die entsprechenden Bandbreiten mit gemittelten Orientierungen, welche für die keilstatische Betrachtung verwendet wurden, in einem Schmidt-Netz grafisch dargestellt. Die Kluftscharen HKR1 bis HKR4 treten als häufigste Klüfte auch als Großklüfte auf, während HKR5 und HKR6 nur untergeordnet vorkommen.

Tabelle 1: Kluftorientierungen im Bereich der Kraftwerkskaverne nach [Q1].

Kluftschar	Einfallsrichtung / -winkel [°]	gemittelte Orientierung [°]	Bemerkung
HKR1	040 – 060 / 55 – 75	050 / 65	Streichrichtung Sigma1 sowie Störungen
HKR2	080 / 48 – 55	080 / 52	Murgtal-Lineament
HKR3	225 / 03 – 15	225 / 09	Lagerklüfte
HKR4	305 / 75 – 85	305 / 80	Streichrichtung herzynische Störungen
HKR5	360 / 55	360 / 55	(untergeordnet), orthogonal zu Rhein- und Murgtal-Lineament
HKR6	285 / 68	285 / 68	(untergeordnet), Rheintal-Lineament

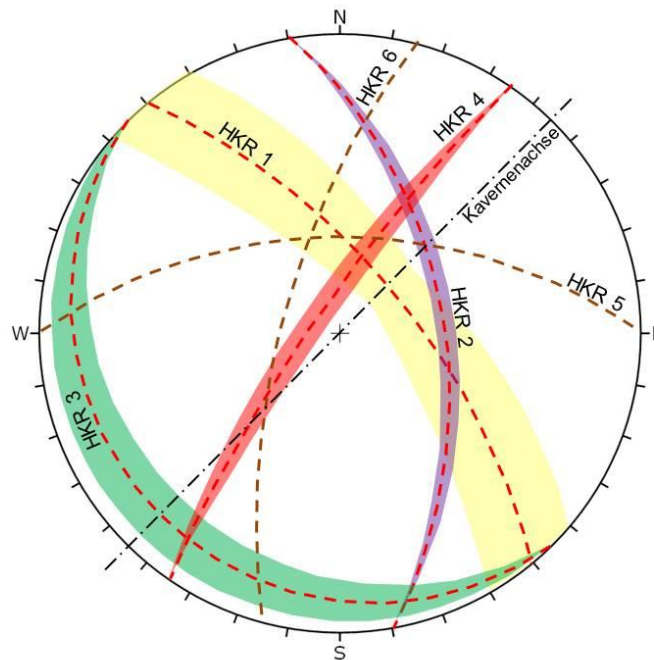


Abbildung 1: Stereoplot der für die Kraftwerkskaverne relevanten Kluftscharen mit Bandbreiten und gemittelten Orientierungen (rot gestrichelt)

2.1.2 Scherparameter

Die anzusetzenden Scherparameter entlang der Kluftflächen im Forbach-Granit sind in der nachfolgenden Tabelle entsprechend [Q2] zusammengefasst und je Teufe und Verwitterungsgrad des Granits gestaffelt. Für die keilstatistische Berechnung wurden die Werte für 100 m Teufe verwendet.

Tabelle 2: Scherparameter der Trennflächen im Granit nach [Q2]

Verwitterung	Teufe	φ_{KL} [°]	c_{KL} [kPa]	φ_{res} [°]
frisch bis gering verwittert, w0 - w1	10 m	42	20	34
	100 m	40	200	34
gering bis mäßig verwittert, w1 - w2	10 m	38	10	34
	100 m	38	100	34
überwiegend mäßig verwittert, w2 - w3	10 m	37	10	27
	100 m	35	50	27
stark verwittert, z.T. zersetzt, w3 - w4	10 m	30	5	20
	100 m	27	50	20

2.2 Gesteinsparameter

2.2.1 Dichte

An Bohrkernen, welche im Rahmen des geotechnischen und hydrogeologischen Gutachtens [Q3] beprobt wurden, sind u. a. Dichtebestimmungen des Forbach-Granits durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Ergebnisse der Dichtebestimmung des Forbach-Granits [Q3]

Verwitterung	Anzahl Versuche	Feuchtdichte [g/cm³]	
		Bandbreite	Mittelwert
frisch bis gering (w0 - w1)	25	2,38 – 2,63	2,58
überwiegend mäßig verwittert (w2 – w3)	6	2,36 – 2,60	2,49

Nach [Q2] werden letztendlich folgende Kennwerte für die Gesteinsdichte empfohlen:

- Granit (w0-w1) 2,60 g/cm³,
- Granit (w1-w2) 2,60 g/cm³,
- Granit (w2-w3) 2,55 g/cm³,
- Granit (w3-w4) 2,50 g/cm³.

2.2.2 Einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit

Die einaxiale Druckfestigkeit ist im Rahmen des geotechnischen und hydrogeologischen Gutachtens [Q3] an Bohrkernen für verschiedene Gesteine und Verwitterungsgrade untersucht worden. Tabelle 4 fasst die Ergebnisse für den Forbach-Granit zusammen und gibt den jeweils empfohlenen Kennwert nach [Q2] an.

Tabelle 4: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche des Forbach-Granits gemäß [Q2] und [Q3]

Verwitterung	Anzahl Versuche	einax. Druckfestigkeit [MPa]		empfohlener Kennwert nach [Q2] [MPa]
		Bandbreite	Mittelwert	
frisch bis gering (w0 - w1)	20	70,7 – 170,1	117,7	85
gering bis mäßig (w1 – w2)				60
überwiegend mäßig (w2 – w3)	2	36,8 – 37,6	37,2	35
stark verwittert, z.T. zersetzt (w3 - w4)	1	-	8,8	8

2.2.3 Verformungs-/Elastizitätsmodul

Die Auswertung der einaxialen Druckversuche hinsichtlich des Gesteins-Verformungsverhaltens ist in Tabelle 5 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 5: Ergebnisse der einaxialen Druckversuche hinsichtlich des Verformungsverhaltens gemäß [Q2] und [Q3]

Verwitterung	Anzahl Versuche	Wiederbelastungsmodul V_{40-60} [GPa]		empfohlener Kennwert nach [Q2]	
		Bandbreite	Mittelwert	E_{40-60} [GPa]	Poissonzahl
frisch bis gering (w0 – w1)	20	12,7 – 70,9	39,6	50	0,25
gering bis mäßig (w1 – w2)				25	0,25
überwiegend mäßig (w2 – w3)	6	0,4 – 17,3	11,7	10	0,25
stark verwittert, z.T. zersetzt (w3 – w4)				4	0,3

2.3 Gebirgsparameter

2.3.1 Wichte

Ausgehend von den Laborergebnissen für die Bestimmung der Gesteinsdichte sowie den empfohlenen Kennwerten werden für die weitere Bearbeitung folgende Werte für die Gebirgswichte angesetzt:

- Granit (w0-w1) 26,0 kN/m³,
- Granit (w1-w2) 26,0 kN/m³,
- Granit (w2-w3) 25,5 kN/m³,
- Granit (w3-w4) 25,0 kN/m³.

2.3.2 Verformungs-/Elastizitätsmodul

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wurden noch keine in-situ-Versuche, wie z. B. Bohrlochaufweitungsversuche, zur Bestimmung des Gebirgsverformungsverhaltens ausgeführt. Anhaltspunkte hinsichtlich des anzusetzenden Gebirgsverformungsmoduls resultieren daher allein aufgrund empirischer Formeln, Erfahrungswerten sowie dem Gesteinsverformungsverhaltens aus einaxialen Druckversuchen.

Ausgehend von der einaxialen Druckfestigkeit des Gesteins (UCS), dem GSI-Wert und den Materialparametern m_i bzw. MR kann nach Hoek/Carranza-Torres/Corkum [Q7] und Hoek/Diederichs [Q8] der Gebirgsverformungsmodul empirisch abgeschätzt werden. Die entsprechend resultierenden Verformungs-Moduln sowie die Werte, welche gemäß [Q2] empfohlen werden, sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Ersichtlich ist dabei, dass die Ergebnisse je nach angesetzter empirischer Formel streuen und eine gewisse Spannweite aufweisen.

Gemäß [Q2] werden letztendlich folgende Kennwerte für den Gebirgs-Verformungsmodul des Forbach-Granits empfohlen und für die weitere Bearbeitung verwendet:

- Granit (w0-w1) 25 GPa,
- Granit (w1-w2) 15 GPa,
- Granit (w2-w3) 3 GPa,
- Granit (w3-w4) 0,35 GPa.

Tabelle 6: Empirisch abgeschätzte Gebirgsverformungs-Moduln sowie Werte gemäß [Q2]

	Gebirgsverformungs-Modul [GPa]			
	Granit, w0-w1 (GSI = 70, UCS = 85 MPa)	Granit, w1-w2 (GSI = 70, UCS = 60 MPa)	Granit, w2-w3 (GSI = 50, UCS = 35 MPa)	Granit w3-w4 (GSI = 30, UCS = 8 MPa)
Hoek/Carranza-Torres/Corkum	38	27	10	1,5
simplified Hoek/Diederichs	39	39	9	1,6
Hoek/Diederichs mit: $E_i = 50 \text{ GPa (w0-w1)}$ $E_i = 25 \text{ GPa (w1-w2)}$ $E_i = 10 \text{ GPa (w2-w3)}$ $E_i = 4 \text{ GPa (w3-w4)}$	37	18	3	0,3
Hoek/Diederichs mit $MR_{\text{Granit}} = 425$	26,5	19	4,5	0,3
Werte gemäß [Q2]	25	15	3	0,35

2.3.3 Scherparameter

Die Gebirgsscherfestigkeit kann in-situ nur sehr aufwendig mittel Groß-Scherversuchen an entsprechend repräsentativen und großen Gebirgskörpern direkt bestimmt werden. Aus diesem Grund behilft man sich üblicherweise mit dem Hoek-Brown-Kriterium [Q9] um Reibungswinkel ϕ und Kohäsion c für das Gebirge aus den Parametern GSI, UCS und m_i herzuleiten. Das Hoek-Brown-Kriterium ist jedoch nichtlinear, so dass die hergeleiteten Scherparameter ϕ und c jeweils nur für einen bestimmten Spannungsbereich gelten.

In FE-Programmen werden die Scherparameter (ϕ , c) benötigt, um die Festigkeit des Gebirges elasto-plastisch mittels dem Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium zu modellieren. Tabelle 7 stellt die entsprechenden Parameter zusammen.

Tabelle 7: Gebirgsfestigkeitsparameter des Forbach-Granits

Verwitterung	Hoek-Brown			Mohr-Coulomb (325 m Überlagerung)	
	UCS [MPa]	GSI	m_i	φ [°]	c [MPa]
frisch bis gering (w0 – w1)	85	70	30	58	2,9
gering bis mäßig (w1 – w2)	60	70	30	55	2,5
überwiegend mäßig (w2 – w3)	35	50	30	45	1,4
stark verwittert, z.T. zersetzt (w3 – w4)	8	30	30	29	0,6

2.4 Primärspannungen

Im Zuge der Erkundungskampagne für die geplante Unterstufe sind Primärspannungsmessungen nach der Bohrlochentspannungsmethode mittels Triaxialzellen durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in [Q3] dargestellt und diskutiert.

Die größte Hauptnormalspannung ist horizontal in NW-SE (~140°) orientiert und beträgt zwischen dem 1,4 und 1,9-fachen der Vertikalspannung (im Mittel 1,7). Die kleinste Hauptnormalspannung ist ebenfalls nahezu horizontal (ca. 10°) in Richtung NE-SW (~50°) orientiert und beträgt im Mittel dem 0,65-fachen der Vertikalspannung. Tabelle 8 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 8: Primärspannungen im Forbach-Granit nach [Q3]

Hauptspannung	Orientierung	Bemerkung
S1	horizontal, NW-SE (~140°)	$\sigma_H = 1,7 \cdot \sigma_V$
S2	vertikal, /	$\sigma_V = \gamma \cdot h$
S3	nahezu horizontal (ca. 10°), NE-SW (ca. 50°)	$\sigma_h = 0,65 \cdot \sigma_V$

Die Kavernenlängsachse streicht mit 045° nahezu senkrecht zur Hauptspannungsrichtung S1, so dass sich für die Kaverne folgende Spannungsgrößen ergeben:

- in Kavernenlängsrichtung $\sigma_h = 0,65 \cdot \sigma_V$,
- quer zur Kavernenachse $\sigma_H = 1,7 \cdot \sigma_V$.

3 GEOTECHNISCHE BEMESSUNG

3.1 Empirische Betrachtung

Die Diagramme von Hönisch [Q6] erlauben es, Gebirgsdruckfestigkeit, Gebirgsverformungsmodul und Überlagerungsspannung von 130 Wasserkraftkavernen miteinander zu vergleichen. Diese Diagramme sind im Folgenden zusammen mit den Daten für die Kraftwerkskaverne dargestellt.

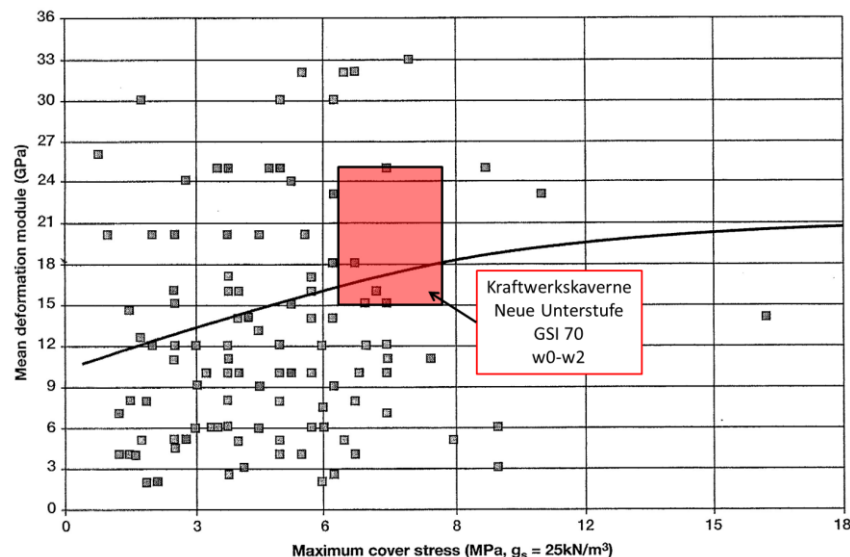


Abbildung 2: Gebirgsverformungsmodul gegen maximale Überlagerungsspannung von 130 Wasserkraftkavernen plus der Kraftwerkskaverne der Neuen Unterstufe nach [Q6]

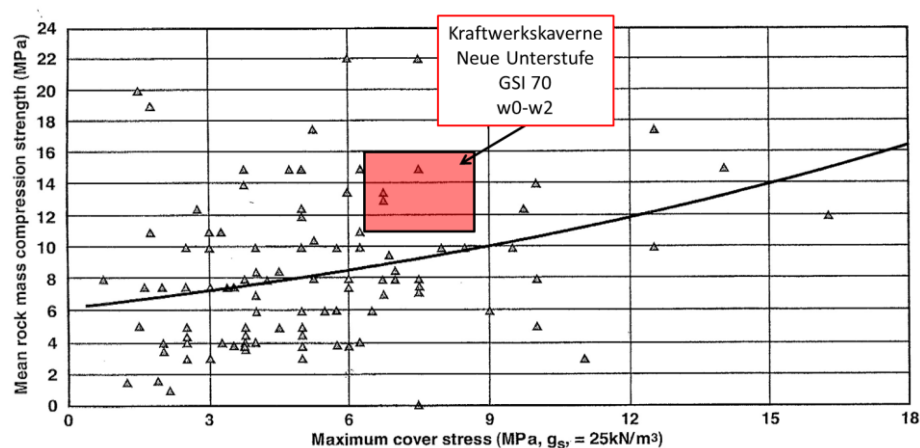


Abbildung 3: Gebirgsdruckfestigkeit gegen maximale Überlagerungsspannung von 130 Wasserkraftkavernen plus der Kraftwerkskaverne der Neuen Unterstufe nach [Q6]

Die Diagramme zeigen, dass die Kraftwerkskaverne der Neuen Unterstufe bezüglich des Gebirgsverformungsmoduls und der Gebirgsdruckfestigkeit für frisch bis gering verwitterten (w0-w1) sowie gering bis mäßig verwitterten (w1-w2) Granit deutlich über der Durchschnittsline liegt und somit die erwartet sehr guten Gebirgsverhältnisse des Forbach-Granits widerspiegelt werden. Für die Kraftwerkskaverne der Neuen Unterstufe wird laut geologischem Bewertungsband [Q4] frisch bis gering verwitterter Granit (w0-w1) mit vereinzelt vergrußten Bereichen (w3-w4) erwartet.

Ein empirischer Ansatz zur Ermittlung der Felssicherung kann über das Diagramm nach Grimstad und Barton [Q12] erfolgen (siehe . Hierzu ist das Gebirge mit dem Q-Rating nach Barton [Q13] zu klassifizieren. Für den Forbach-Granit im Bereich der Kraftwerkskaverne werden Q-Werte in einer Bandbreite von 1 (vergrußte Gebirgsbereiche, Verwitterung w3-w4 stark verwittert, z. T. zersetzt) bis 50 erwartet. Nach dem Q-System entspricht das einer Gebirgsqualität von ‚poor‘ bis ‚very good‘. Da nur vereinzelt vergrußte Gebirgsareale erwartet werden, liegen die Q-Werte für die Kraftwerkskaverne eher an der oberen Grenze, welche den frischen bis gering verwitterten Forbach-Granit (w0-w1) widerspiegeln.

Nach Abbildung 4 würde die Felssicherung der Kraftwerkskaverne konkret wie folgt aussehen:

- systematische Ankersicherung (Länge der Anker 4 – 9 m, Abstand 2,0 – 3,0 m) ohne Spritzbeton für Gebirgsverhältnisse „very good“,
- Sicherung mit stahlfaserverstärktem Spritzbeton (Dicke 12 – 15 cm) und systematischer Ankerung (Länge der Anker 4- 9 m, Abstand 2,1 – 1,7 m) für vergrußte Gebirgsbereich der Klasse „poor“.

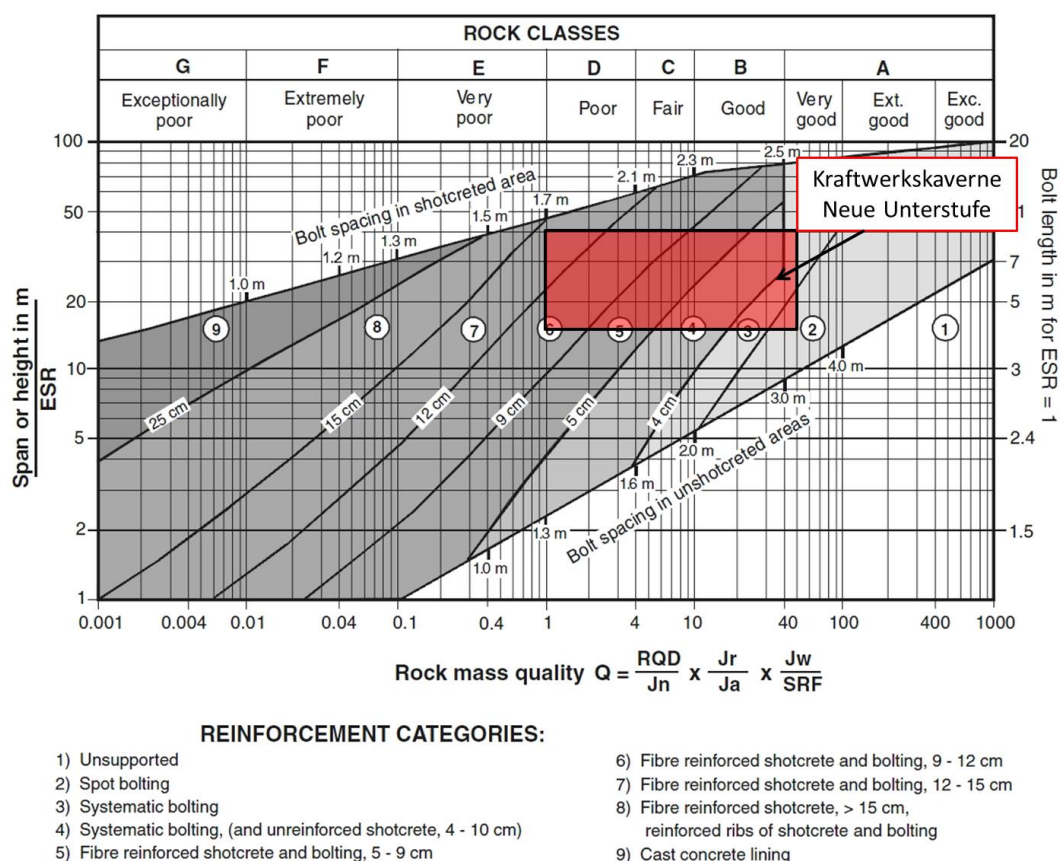


Abbildung 4: Felssicherung nach dem Q-System [Q12] mit der Kraftwerkskaverne

Abbildung 5 zeigt das Q-Diagramm mit Daten für Wasserkraftkavernen nach [Q14]. Die Daten, welche Wasserkraftanlagen in die Grafik eingeflossen sind, wurden leider nicht veröffentlicht. Zumal Q-Werte >100 bzw. >200 in der Praxis beim Auffahren von Kavernen nur eher selten anzutreffen sein sollten. Für den Großteil der ausgeführten Kavernen wäre demnach bereits eine sys-

tematische Ankersicherung ohne Spritzbeton für deren Standsicherheit ausreichend gewesen. Aus der Grafik ist allerdings ersichtlich, dass für die Kraftwerkskaverne die Felssicherung aus einer systematischen Ankersicherung ohne Spritzbeton bis zu einer Sicherung mit Ankern und stahlfaserverstärktem Spritzbeton bestehen könnte.

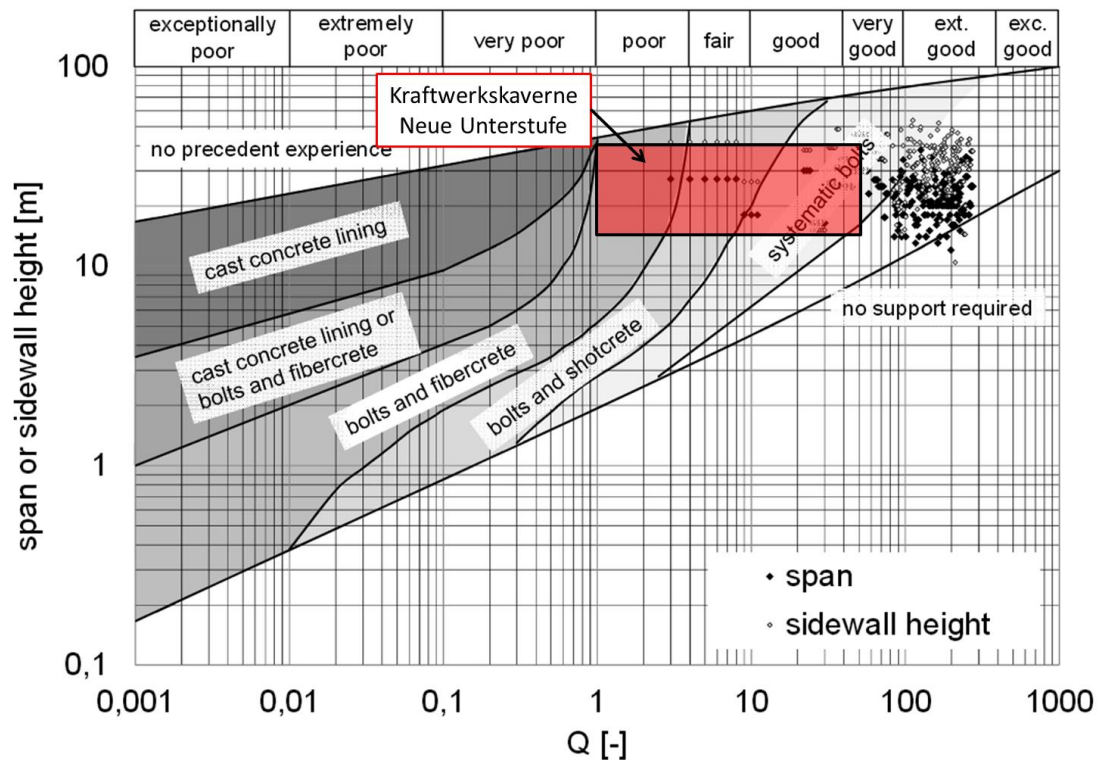


Abbildung 5: Q-Diagramm mit Daten für Wasserkraft-Kavernen aus [Q14]

3.2 Keilstatik

3.2.1 Allgemein

Für die Keilstatik wurde das Programm Unwedge Version 4.007, 2015 von Rocscience verwendet.

Unwedge wurde entworfen, um einfach und interaktiv die Geometrie und Stabilität von Untertagekeilen zu berechnen. Dabei werden die Keile durch sich verschneidende Trennflächen in der Umgebung untertägiger Hohlräume gebildet.

Die Keile haben die Form eines Tetraeders und werden durch drei sich verschneidende Trennflächen gebildet. Bei den einzelnen Berechnungen können immer nur drei Trennflächen gleichzeitig berücksichtigt werden. Falls mehr Trennflächen vorkommen, müssen entsprechend alle Kombinationen durchgespielt werden.

Die maßgebende Keilgeometrie wird durch die Orientierung und Geometrie des Tunnels, Schachtes oder der Kaverne, sowie jeder möglichen Kombination von drei Trennflächenorientierungen automatisch bestimmt.

3.2.2 Eingangsparameter

Als Gebirgswichte wurde $26,0 \text{ kN/m}^3$ angesetzt (Granit, unverwittert bis mäßig verwittert).

Die für die Kraftwerkskaverne der Neuen Unterstufe relevanten Gefügedaten sind im Kapitel 2.1 beschrieben und in der nachfolgenden Tabelle mit den angesetzten Scherparametern und Ausbisslängen der Trennflächen zusammengefasst. In [Q2] sind die Ausbisslängen für Kluftflächen im Granit mit 1 bis 10 m angegeben. Für die keilstatische Betrachtung wurde für alle Trennflächen gleichermaßen eine maximale Ausbisslänge von 10 m angenommen. Wie aus der nachfolgenden Tabelle ersichtlich ist, wurde bei diesen Kluftflächen konservativer Weise allein die Restscherfestigkeit angesetzt. Bei Trennflächen mit größeren Ausbisslängen wird davon ausgegangen, dass Materialbrücken auf den Trennflächen vorhanden sind, die zu deutlich höheren Scherfestigkeiten führen. Für diese Trennflächen wurden die Scherparameter gemäß [Q2] angesetzt.

In [Q4] und [Q5] ist eine Prognose zur Vergrußung des Gebirges im Kavernenbereich gegeben. Demnach ist damit zu rechnen, dass bis zu 8% des Gebirges im Kavernenbereich vergrußt sind. Die vertikale Mächtigkeit der Vergrußung beträgt $0,1 - 1,0 \text{ m}$. Der Granit in den Vergrußungsbereichen ist als stark verwittert, zum Teil zersetzt ($w_3 - w_4$) anzunehmen. Die Vergrußungszonen folgen vornehmlich den Hauptkluftrichtungen HKR1 und HKR4, untergeordnet auch HKR5. In einem weiteren Rechenlauf wurden deshalb für diese Kluftrichtungen die Trennflächenparameter für stark verwitterten, zum Teil zersetzten Granit verwendet ($\varphi = 27^\circ$, $c = 50 \text{ kPa}$, $\varphi_{\text{res}} = 20^\circ$, $c_{\text{res}} = 0 \text{ kPa}$).

Tabelle 9: Kluftorientierungen, Ausbisslängen und Scherparameter im Kavernenbereich

Kluftschar	Einfallsrichtung / -winkel [°]	Ausbisslänge [m]	Scherparameter	
			Kohäsion [kPa]	Reibungswinkel [°]
HKR1	050 / 65	10	0 (0)*	34 (20)*
		unendlich	200 (50)*	40 (27)*
HKR2	080 / 52	10	0	34
		unendlich	200	40
HKR3	225 / 09	10	0	34
		unendlich	200	40
HKR4	305 / 80	10	0 (0)*	34 (20)*
		unendlich	200 (50)*	40 (27)*
HKR5	360 / 55	10	0 (0)*	34 (20)*
		unendlich	200 (50)*	40 (27)*
HKR6	285 / 68	10	0	34
		unendlich	200	40

*Scherparameter für vergrußte Gebirgsbereiche

3.2.3 Ergebnisse Kavernenteil Schwarzenbachwerk (KT SBW)

Es wurde untersucht, welche Keilgeometrien sich in der Firste, den Seitenwänden und Stirnseiten der Kaverne bilden können und wie groß der Ausbauwiderstand ist, um diese Keile zu halten. Für die Ermittlung des Ausbauwiderstandes wurde dabei in Unwedge ein Sicherheitsfaktor (Design Factor of Safety) von 1,5 eingestellt, d. h., die Software bestimmt automatisch den Ausbauwiderstand (als gleichförmige Last normal zum Ausbruchsrund) um diesen Sicherheitsfaktor zu erreichen. Für Keile, die einen Sicherheitsfaktor >1,5 haben, beträgt der Ausbauwiderstand 0. Für Keile mit einem Sicherheitsfaktor <1,5 wird entsprechend ein Ausbauwiderstand angegeben. In den nachfolgenden Tabellen sind nur die Keile mit einem Sicherheitsfaktor <1,5 aufgeführt und gelistet.

Der Sicherheitsfaktor von 1,5 entstammt dem Globalsicherheitskonzept und stellt das Verhältnis von haltenden (Scherfestigkeit, Zugfestigkeit) zu treibenden (Eigengewicht, Seismik, Wasser) Kräften dar. Der Sicherheitsfaktor von 1,5 dient in erster Linie dazu, den benötigten Ausbauwiderstand der Ankersicherung zu bestimmen. Die Anker selbst beinhalten dann zusätzlich einen Sicherheitsfaktor von 1,75 (siehe Kapitel 3.4.1). Bei der Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes sind deshalb keine ungünstigeren Ergebnisse zu erwarten.

In einem ersten Rechenlauf erfolgte keine Skalierung der Keile aufgrund von maximalen Ausbisslängen. Es wurden somit auch Keile betrachtet, die sich über die gesamte Kavernenbreite bzw. -höhe erstrecken (Maximalkeile). Tabelle 10 fasst die Ergebnisse zusammen. Kombinationen, die aufgrund der Trennflächenorientierung zu spitzwinkligen und unrealistischen Keilgeometrien führen,

ren, wie zum Beispiel für die Trennflächenkombination 1-4-5 (siehe Abbildung 6), wurden in Tabelle 10 nicht mit aufgeführt.

Die größten sich ergebenden Auswiderstände der entsprechenden Kavernenbereiche sind in den nachfolgenden Tabellen jeweils schwarz hervorgehoben.

Nachfolgend zu den entsprechenden Tabellen sind jeweils exemplarisch einige Gleitkeile, unskaliert und skaliert, für den Bereich des Kavernenteils Schwarzenbachwerk (KT SBW) gezeigt.

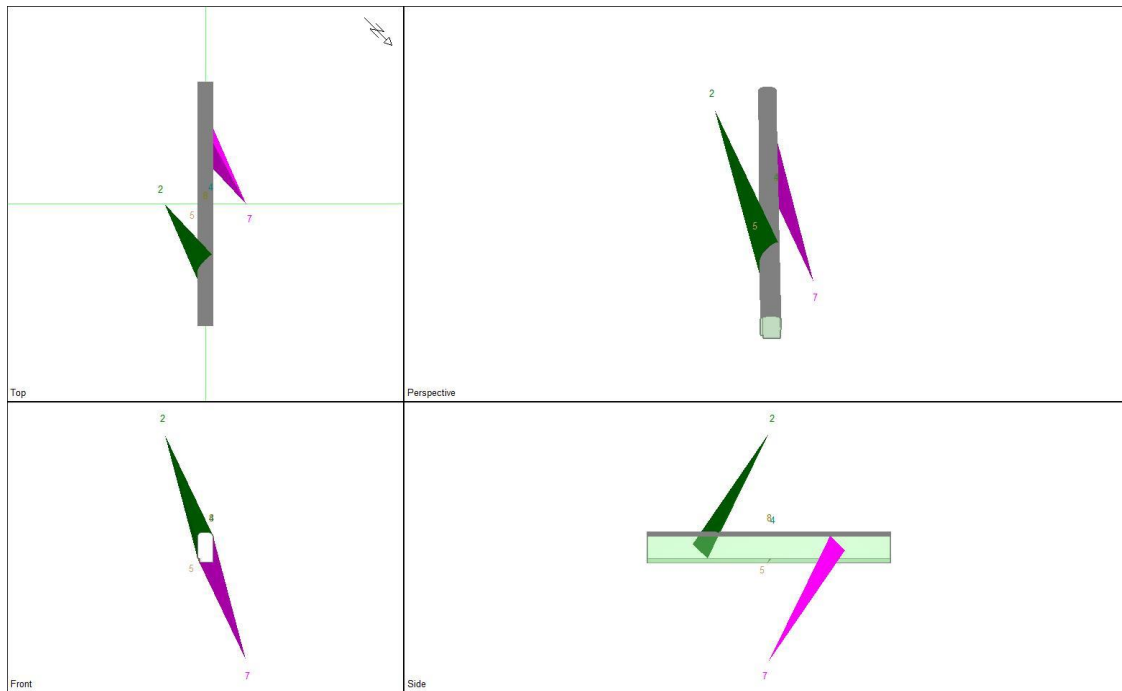


Abbildung 6: Unrealistischer, spitzwinkliger Keil der Trennflächenkombination 1-4-5

Tabelle 10: Gleitkeile (unskaliert) im Bereich des KT SBW mit einem Sicherheitsfaktor <1,5

Trennflächenkombination	Keilgewicht [MN]	maximale Keiltiefe [m]	benötigter Ausbauwiderstand [kPa]	Lage des Keils
01) 1-2-3	mit dieser Kombination bilden sich keine Gleitkeile mit einem Sicherheitsfaktor <1,5			
02) 1-2-4	(6,18	11,9	62	Firste)*
03) 1-2-5	mit dieser Kombination bilden sich keine Gleitkeile mit einem Sicherheitsfaktor <1,5			
04) 1-3-4	0,47	1,8	23	Firste
05) 1-3-5	(38,04	16,4	64	SE-Seitenwand)*
06) 1-3-6	0,11	1,1	13	Firste
07) 2-3-4	0,75	2,1	26	Firste
08) 2-3-6	0,06	0,8	10	Firste
09) 2-4-6	(12,67	11,9	18	Firste)*
10) 3-4-5	34,50	6,6	4 (62)*	SE-Seitenwand
	0,13	1,1	14	Firste
11) 3-5-6	0,03	0,6	7	Firste

*Ausbauwiderstände für vergrußte Gebirgsbereiche

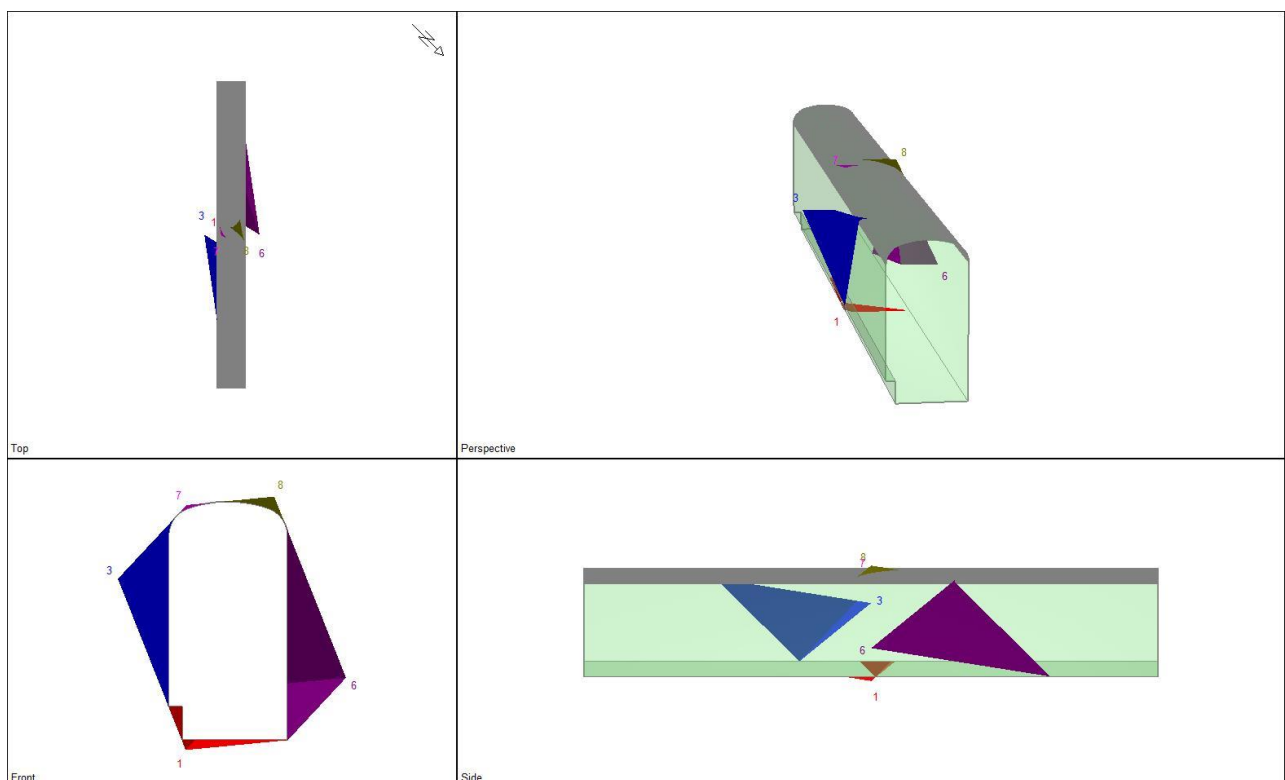


Abbildung 7: Gleitkeile (unskaliert) des KT SBW bei der Kombination 7) 2-3-4

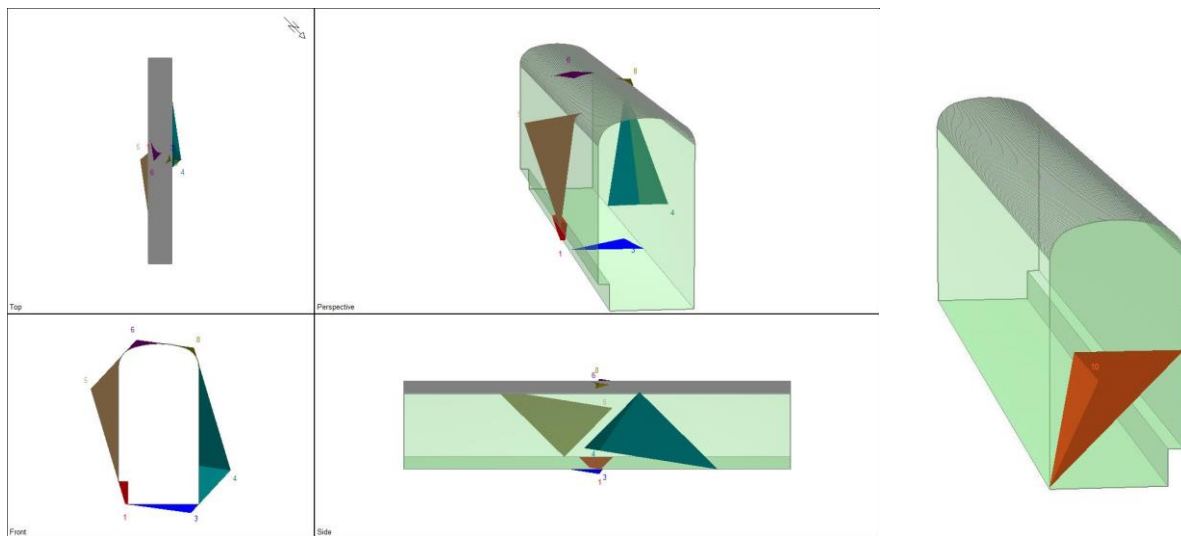


Abbildung 8: Gleitkeile (unskaliert) des KT SBW bei der Kombination 10) 3-4-5

Es ist ersichtlich, dass an der Bildung von Gleitkeilen in den Seitenwänden und Stirnseiten der Kaverne jeweils die nahezu sölige liegende Kluftschar HKR3 beteiligt ist, wobei diese Kluftschar dann jeweils die Oberkante der Keile bildet, an der sich die Keile ablösen und das Abgleiten dann auf den steil stehenden Kluftscharen (HKR1, HKR2, HKR4, HKR5 und HKR6) stattfindet (siehe z. B. Abbildung 7 und Abbildung 8). Ein Gleiten von Keilen auf der nahezu söligen liegenden Kluftschar HKR3 ist aufgrund der Reibung nicht möglich. Der gemittelte Einfallswinkel von HKR3 ist 9° (siehe Tabelle 1), der Restreibungswinkel auf den Kluftflächen ist je nach Verwitterungsgrad 34° bis 20° (siehe Tabelle 2), so dass sich selbst für einen Reibungswinkel von 20° noch ein deutlich größerer Sicherheitsfaktor als 1,5 ergibt. An der SE-Seite der Kaverne bilden sich vornehmlich Gleitkeile aus, an denen die Kluftschar HKR4 beteiligt ist, welche sehr spitzwinklig zur Kavernenachse streicht und in Richtung Kavernenwand einfällt. Auf der gegenüberliegenden Kavernenseite, der NW-Seite der Kaverne, fällt diese Kluftschar in Richtung Gebirge ein, so dass ein Abgleiten von Keilen entlang dieser Trennfläche nicht möglich ist. Selbiges gilt für die Kluftscharen HKR5 und HKR6, deren Vorkommen allerdings eh nur untergeordnet ist. Aus der keilstatischen Betrachtung resultieren deshalb allein auf der SE-Seite des KT SBW Gleitkeile mit einem Sicherheitsfaktor von $< 1,5$. Auch an der SW-Stirnwand und der OW-Wand, zeigen sich vorerst keine Gleitkeile mit einem Sicherheitsfaktor von $< 1,5$.

In einer weiteren keilstatischen Betrachtung wurden die Kluftflächen des Granits nach maximalen Ausbisslängen skaliert, die konservativ für alle Kluftscharen mit maximal 10 m angesetzt wurden. Die sich somit ergebenden Felskeile sowie entsprechend benötigte Ausbauwiderstände sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Durch den Verschnitt von steil stehenden Kluftscharen ergeben sich Keile, die gravitativ aus der Kavernenfirste herausfallen können und einen relativ großen Sicherungsaufwand erfordern, während sich in den Seitenwänden durch diese Kluftscharen dagegen geometrisch nur relativ kleine Gleitkeile ausbilden können, die einen deutlich geringeren Ausbauwiderstand erfordern (siehe z. B. Abbildung 9).

Tabelle 11: Gleitkeile (skaliert, max. Ausbisslänge 10 m) im Bereich des KT SBW mit einem Sicherheitsfaktor <1,5

Trennflächenkombination	Keilgewicht [MN]	maximale Keiltiefe [m]	benötigter Ausbauwiderstand [kPa]	Lage des Keils
01) 1-2-3	0,02	0,6	7	Firste
	0,77	6,2	2 (8)*	Firste / NE-Seitenwand
	0,04	0,7	6 (10)*	Stirnwand
02) 1-2-4	0,93	6,4	83	Firste
	0,23	1,8	14 (27)*	SE-Seitenwand
	0,59	3,5	32 (49)*	Stirnwand
03) 1-2-5	1,06	7,2	92	Firste
	0,15	1,6	27 (53)*	SE-Seitenwand
	0,53	3,4	30 (47)*	Stirnwand
04) 1-3-4	0,38	1,7	21	Firste
	0,07	0,7	8	Firste
	0,36	1,5	11 (22)*	SE-Seitenwand
	0,07	0,8	6 (10)*	Stirnwand
05) 1-3-5	0,68	4,4	31 (37)*	Firste
	0,03	0,8	8	Firste
	0,05	0,7	5 (9)*	Stirnwand
06) 1-3-6	0,11	1,1	13	Firste
	1,32	4,9	10 (17)*	SE-Seitenwand
	0,06	0,9	3 (6)*	Stirnwand
07) 2-3-4	0,28	1,5	18	Firste
	0,03	0,5	5	Firste
	(0,33	1,6	3	SE-Seitenwand)*
	(1,43	6,1	6	Stirnwand)*
08) 2-3-6	0,06	0,8	10	Firste
09) 2-4-6	0,35	3,8	40 (44)*	Firste
	(0,45	4,5	4	Stirnwand)*
10) 3-4-5	0,12	1,0	14	Firste
	0,19	1,1	12 (13)*	Firste
	0,27	1,3	12 (19)*	SE-Seitenwand
	0,78	4,4	13 (28)*	Stirnwand
11) 3-5-6	0,03	0,6	7	Firste
	0,82	3,5	19 (25)*	SE-Seitenwand
	0,26	2,2	21 (32)*	Stirnwand

*Ausbauwiderstände für vergrußte Gebirgsbereiche

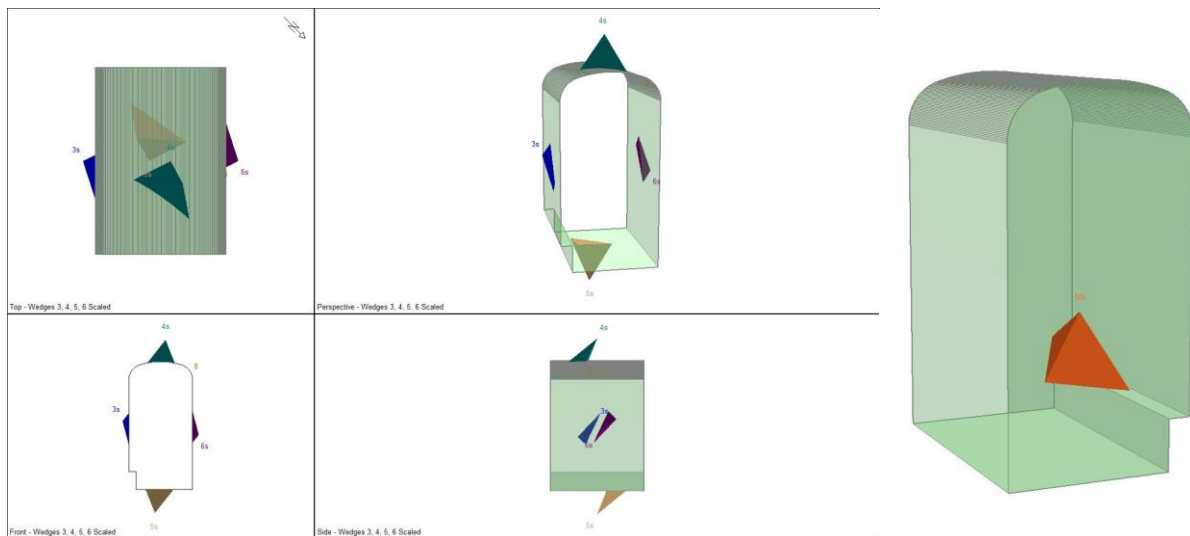


Abbildung 9: Gleitkeile (skaliert. max. 10 m Ausbisslänge) des KT SBW bei der Kombination 2) 1-2-4

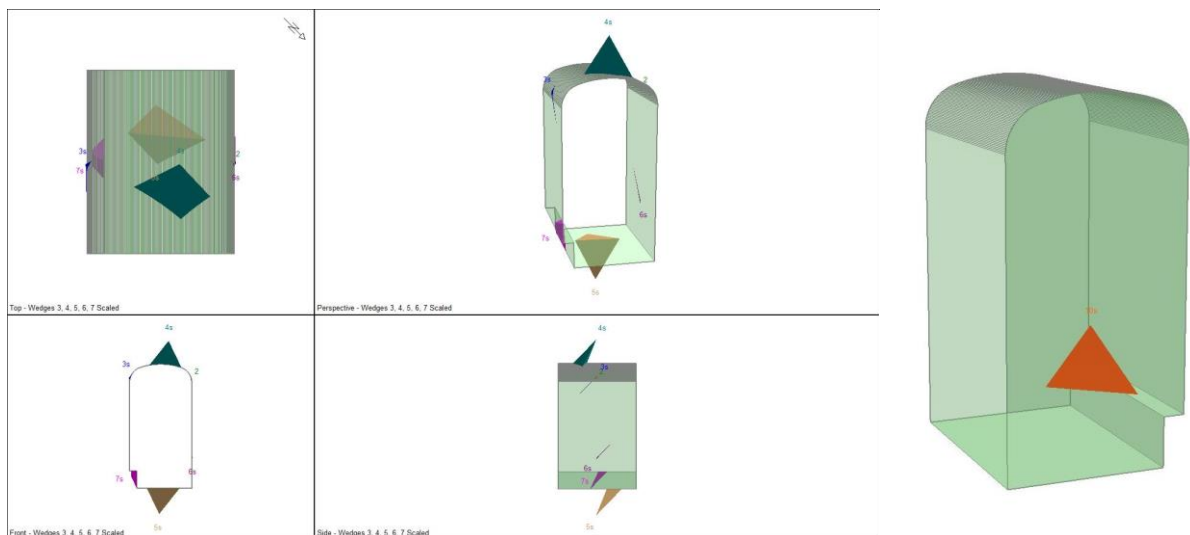


Abbildung 10: Gleitkeile (skaliert. max. 10 m Ausbisslänge) des KT SBW bei der Kombination 3) 1-2-5

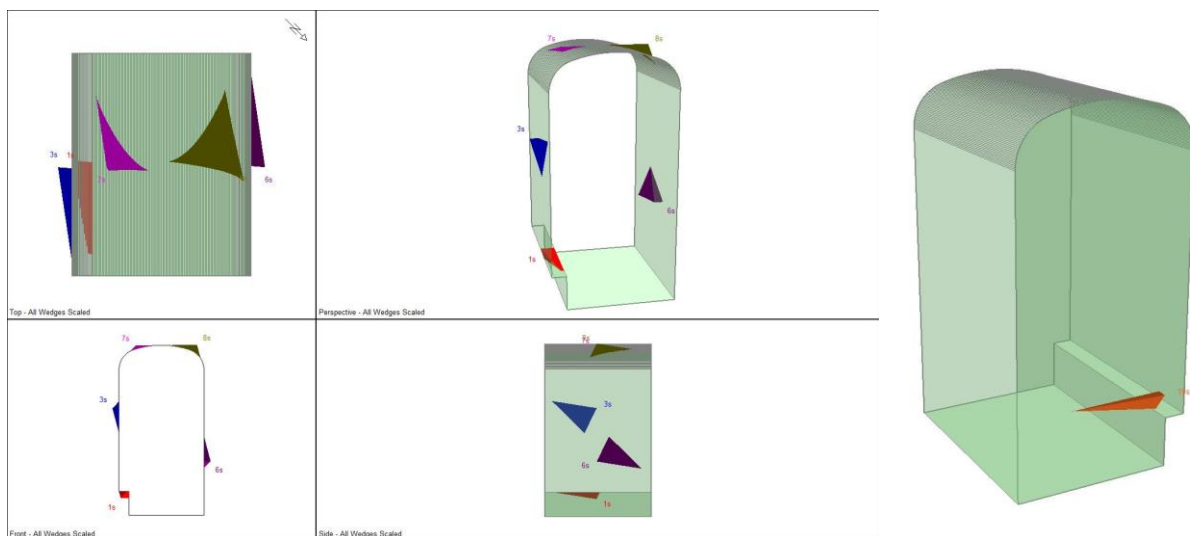


Abbildung 11: Gleitkeile (skaliert. max. 10 m Ausbisslänge) des KT SBW bei der Kombination 4) 1-3-4

Die keilstatistische Betrachtung hat gezeigt, dass durch die vornehmlich sehr steil stehenden Kluftscharen die erforderlichen Ausbauwiderstände in der Kavernenfirste deutlich größer sind als in den Seitenwänden und Stirnseiten der Kaverne (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Benötigte Ausbauwiderstände für den Kavernenteil Schwarzenbachwerk

	Benötigter Ausbauwiderstand (max. Keiltiefe)	
	ohne Skalierung, Scherfestigkeit	Skalierung nach Ausbisslänge, Restscherfestigkeit
Firste	26 kPa (2,1 m) [62 kPa (11,9 m)]*	92 / 83kPa (7,2 / 6,4 m) [92 / 83kPa (7,2 / 6,4 m)]*
SE-Seitenwand	4 kPa (6,6 m) [64 kPa (16,4 m)]*	27 kPa (3,5 m) [49 kPa (3,5m)]*
NW-Seitenwand (UW-Wand)	-	2 kPa (6,2 m) [8 kPa (6,2m)]*
Stirnseite (OW-Wand)	-	32 kPa (3,5 m) [53 kPa (3,5 m)]*

*Ausbauwiderstände für vergrußte Gebirgsbereiche

Nach [Q1] treten die Kluftscharen HKR5 und HKR6 nur untergeordnet auf, während die Kluftscharen HKR1 bis HKR4 als häufigste Klüfte auch als Großklüfte anzutreffen sind. Für den maximalen Ausbauwiderstand in der Kavernenfirste wird deshalb angenommen, dass die Trennflächenkombination 2) 1-2-4 in Tabelle 11 deutlich wahrscheinlicher ist als Kombination 3) 1-2-5 und der maßgebende Ausbauwiderstand dementsprechend 83 kPa bei einer maximalen Keiltiefe von 6,4 m ist.

Bei der Betrachtung von Vergrüßungen entlang der Hauptkluftscharen erhöht sich der maximale Ausbauwiderstand für die Seitenwänden der Kaverne auf 64 kPa bei einer Keiltiefe von 16,4 m (Maximalkeil). Für die Bildung eines solchen Maximalkeils sind Ausbisslängen von 20 – 50 m nötig. Sollten während des Kavernenaushubs solch weitreichend vergrüßte Zonen angetroffen werden, so sind diese Bereiche z. B. durch zusätzliche Vorspannanker (Länge 20 m) zu sichern. Für die Kavernenfirste erhöht sich der Ausbauwiderstand bei der Betrachtung vergrüßter Trennflächen nicht. Sollten in der Kavernenfirste allerdings ebenfalls lang anhaltende bzw. weit reichende Vergrüßungszonen angetroffen werden, so kann in diesen Bereichen ebenfalls über eine zusätzliche Sicherung mit Vorspannankern ($L > 15$ m) nachgedacht werden.

Die keilstatistische Betrachtung mit Unwedge berücksichtigt nur tetraederförmige Kluftkörper. Mit dem im Forbach-Granit teils vorhandenem orthogonalen Kluftgefüge aus nahezu rechtwinklig zueinander stehenden Kluftscharen sind jedoch auch andere Keilgeometrien wie z. B. quaderförmige Blöcke bzw. je nach Schnitfführung auch prismenförmige Blöcke mit dreieckiger Grundfläche denkbar (siehe Abbildung 10). Diese Blöcke würden allerdings eine ähnliche Verteilung der Ausbauwiderstände hervorrufen, wie sie in Tabelle 12 gezeigt ist, mit relativ großen Ausbauwiderständen in der Kavernenfirste (Herausfallen/-brechen von Blöcken oder Felsplatten) während in den Seiten- und Stirnwänden vergleichsweise niedrige Ausbauwiderstände benötigt werden. Eine Felsplatte von 3 Meter Dicke würde in der Kavernenfirste z. B. pro Laufmeter einen Ausbauwiderstand von ca. 78 kPa erfordern ($3 \text{ m} \cdot 26,0 \text{ kN/m}^3 = 78 \text{ kN/m}^2$).

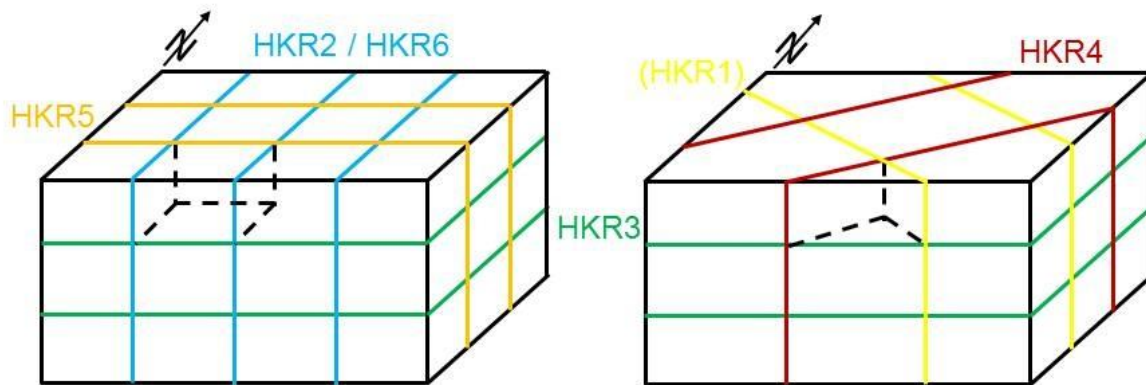


Abbildung 12: Schematische Darstellung des orthogonalen Kluftgefüges im Granit

3.2.4 Ergebnisse Kavernenteil Murgwerk (KT MuW)

Auch für den Bereich des Kavernenteils Murgwerk (KT MuW) wurde zunächst keine Skalierung der Felskeile vorgenommen. Die sich somit ergebenden Maximalkeile und entsprechend benötigte Ausbauwiderständen sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Äquivalent zu der keilstatistischen Betrachtung für den KT SBW, wurde im Anschluss für alle Kluftflächen im Granit eine maximale Ausbisslänge von 10 m angesetzt. Die sich daraus ergebenden Felskeile sowie die Ausbauwiderstände, um diese Keile zu sichern, sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 13: Gleitkeile (unskaliert) im Bereich des KT MuW mit einem Sicherheitsfaktor <1,5

Trennflächenkombination	Keilgewicht [MN]	maximale Keiltiefe [m]	benötigter Ausbauwiderstand [kPa]	Lage des Keils
01) 1-2-3	mit dieser Kombination bilden sich keine Gleitkeile mit einem Sicherheitsfaktor <1.5			
02) 1-2-4	(4,12	10,3	41	Firste)*
03) 1-2-5	mit dieser Kombination bilden sich keine Gleitkeile mit einem Sicherheitsfaktor <1.5			
04) 1-3-4	0,44	1,9	24	Firste
05) 1-3-5	(7,28	9,8	4	OW-Wand)*
06) 1-3-6	0,09	1,1	13	Firste
07) 2-3-4	0,60	2,0	26	Firste
08) 2-3-6	0,03	0,7	7	Firste
09) 2-4-6	(6,52	9,8	18	Firste)*
10) 3-4-5	0,15	1,2	16	Firste
	(5,41	3,5	27	OW-Wand)*
11) 3-5-6	0,04	0,7	9	Firste

*Ausbauwiderstände für vergrußte Gebirgsbereiche

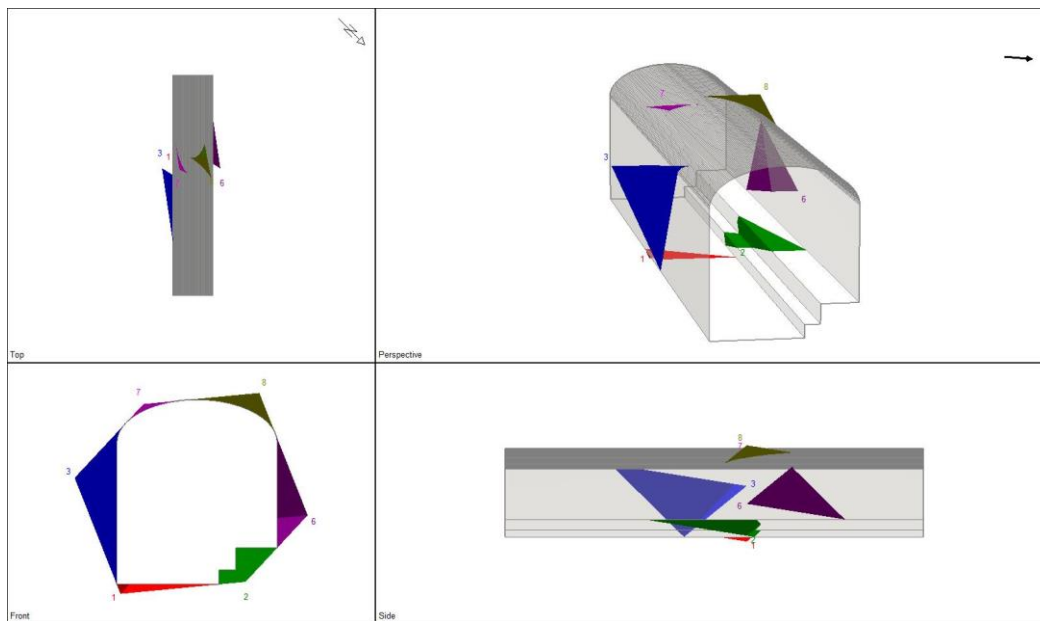


Abbildung 13: Gleitkeile (unskaliert) des KT MuW bei der Kombination 7) 2-3-4

Tabelle 14: Gleitkeile (skaliert, max. Ausbisslänge 10 m) im Bereich des KT MuW mit einem Sicherheitsfaktor <1,5

Trennflächenkombination	Keilgewicht [MN]	maximale Keiltiefe [m]	benötigter Ausbauwiderstand [kPa]	Lage des Keils
01) 1-2-3	0,02	0,7	8	Firste
	0,74	6,2	1 (5)*	UW-Wand
02) 1-2-4	0,86	6,3	80	Firste
	0,23	1,8	14 (27)*	OW-Wand
03) 1-2-5	0,92	6,9	87	Firste
04) 1-3-4	0,36	1,7	22	Firste
	0,05	0,7	7	Firste
	0,36	1,5	11 (21)*	OW-Wand
05) 1-3-5	0,64	4,1	31 (35)*	Firste
	0,04	0,9	11	Firste
06) 1-3-6	0,09	1,1	13	Firste
	1,32	4,9	10 (17)*	OW-Wand
07) 2-3-4	0,25	1,5	18	Firste
	0,03	0,5	5 (6)*	Firste
08) 2-3-6	0,03	0,7	7	Firste
09) 2-4-6	0,38	3,9	39 (45)*	Firste
10) 3-4-5	0,14	1,0	11	Firste
	0,15	1,1	16	Firste
	0,27	1,3	12 (19)*	OW-Wand
11) 3-5-6	0,04	0,7	9	Firste
	0,82	3,5	19 (25)*	OW-Wand

*Ausbauwiderstände für vergrußte Gebirgsbereiche

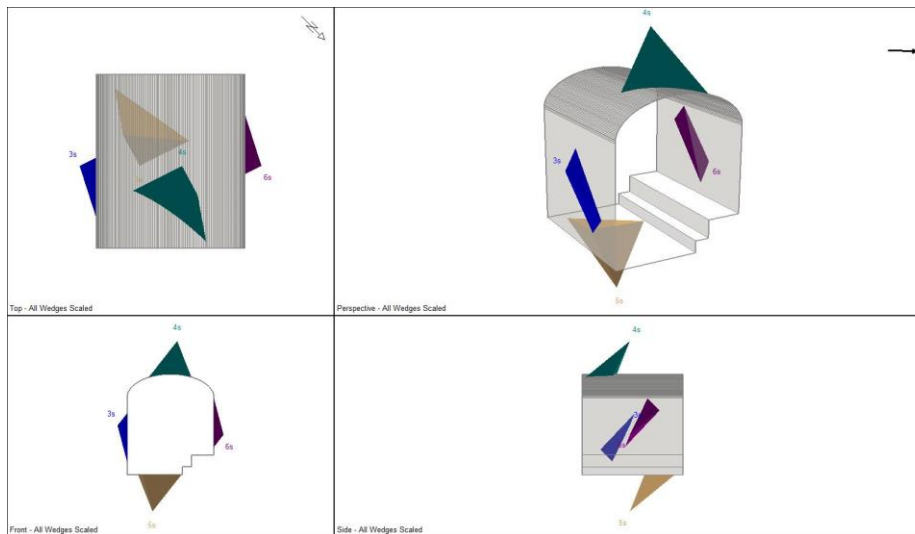


Abbildung 14: Gleitkeile (skaliert max. 10 m Ausbisslänge) des KT MuW bei der Kombination 2) 1-2-4

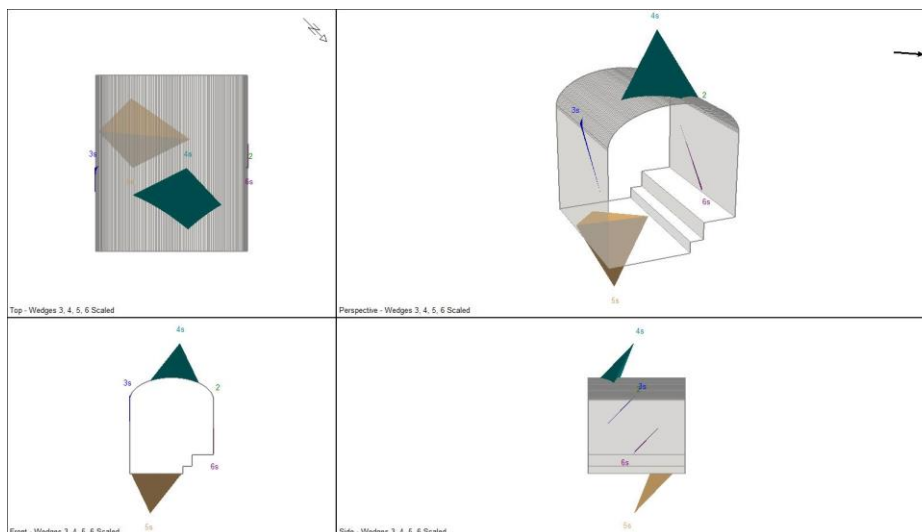


Abbildung 15: Gleitkeile (skaliert max. 10 m Ausbisslänge) des KT MuW bei der Kombination 3) 1-2-5

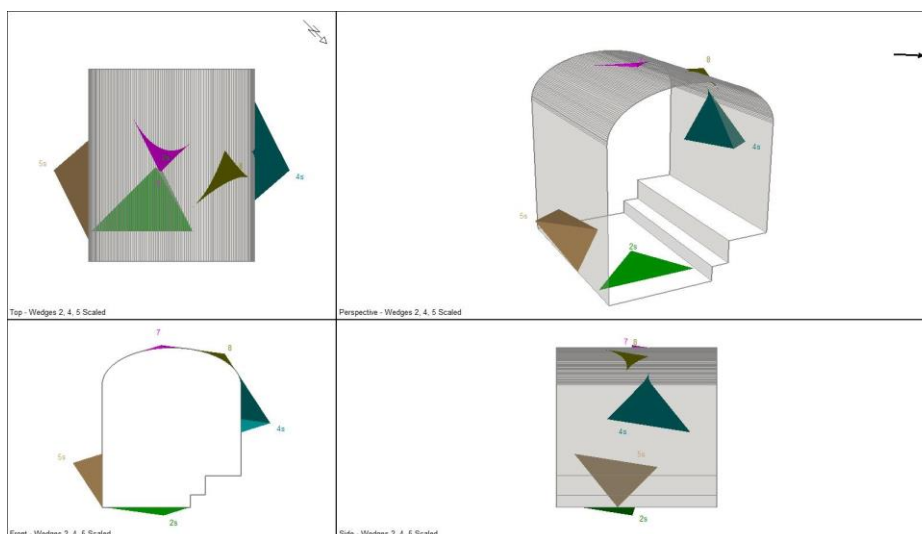


Abbildung 16: Gleitkeile (skaliert max. 10 m Ausbisslänge) des KT MuW bei der Kombination 11) 3-5-6

Aus Tabelle 15 ist ersichtlich, dass sich die benötigten Ausbauwiderstände für die nach Ausbisslängen skalierten Keile für den KT MuW nicht sonderlich von denen des KT SBW unterscheiden. Die Keilgeometrien für den KT MuW sind nicht wesentlich kleiner als die Keile für den KT SBW, so dass die resultierenden Ausbauwiderstände ebenfalls nur marginal kleiner sind.

Tabelle 15: Benötigte Ausbauwiderstände für die Bereiche des Kavernenteils Murgwerk

	Benötigter Ausbauwiderstand (max. Keiltiefe)	
	ohne Skalierung, Scherfestigkeit	Skalierung nach Ausbisslänge, Restscherfestigkeit
Firste	26 kPa (2,0 m) [41 kPa (10,3 m)]*	87 / <u>80 kPa</u> (6,9 / 6,3 m) [87 / <u>80 kPa</u> (6,9 / 6,3 m)]*
OW-Wand	- [27 kPa (3,5 m)]*	19 kPa (3,5 m) [27 kPa (1,8 m)]*
UW-Wand	-	1 kPa (6,5 m) [5 kPa (6,5 m)]*
Stirnseite	-	-

*Ausbauwiderstände für vergrußte Gebirgsbereiche

3.3 FE-Kontinuumsberechnungen

3.3.1 Allgemein

Die Berechnungen wurden mit der Software Phase2, Version 9.004, 2014 anhand eines zweidimensionalen Modells mit der Annahme konstanter Dehnungen senkrecht zur Modellebene („plain strain“) durchgeführt. Dabei wird das Gebirge als Kontinuum mit elasto-plastischem Materialverhalten simuliert. Die verwendeten FE-Modelle für die Bereiche der Kavernenteile Schwarzenbachwerk und Murgwerk sind in Abbildung 17 und Abbildung 18 dargestellt. Die Modelle bestehen jeweils aus insgesamt 3849 bzw. 3420 Elementen mit 7772 bzw. 6939 Knotenpunkten. Die Diskretisierung des Netzes wurde computer-generiert semi-automatisch vorgenommen und um die Ausbruchhöhlräume zusätzlich verfeinert.

3.3.2 Geometrie und Ausbruchssequenzen

Die modellierten Querschnitte der Kavernenteile Schwarzenbachwerk (KT SBW) und Murgwerk (KT MuW) mit den jeweiligen Bauwerksabmessungen sowie der Ausbruchsreihenfolge sind der Abbildung 19 und Abbildung 20 zu entnehmen. Für den KT SBW entspricht der Querschnitt einem Schnitt durch die Turbine (QS C-C) für den KT MuW dem Querschnitt I-I. Es wird von einem Kalottenaushub mit anschließenden Strossenaushüben ausgegangen. Bei der Modellierung wurde angenommen, dass der Kalottenaushub in 3 Teilausbrüchen erfolgt. Für die erwartet sehr guten Gebirgsverhältnisse ist es jedoch auch denkbar, dass der Kalottenaushub in nur 2 Teilausbrüchen bzw. sogar über die komplette Breite erfolgen kann.

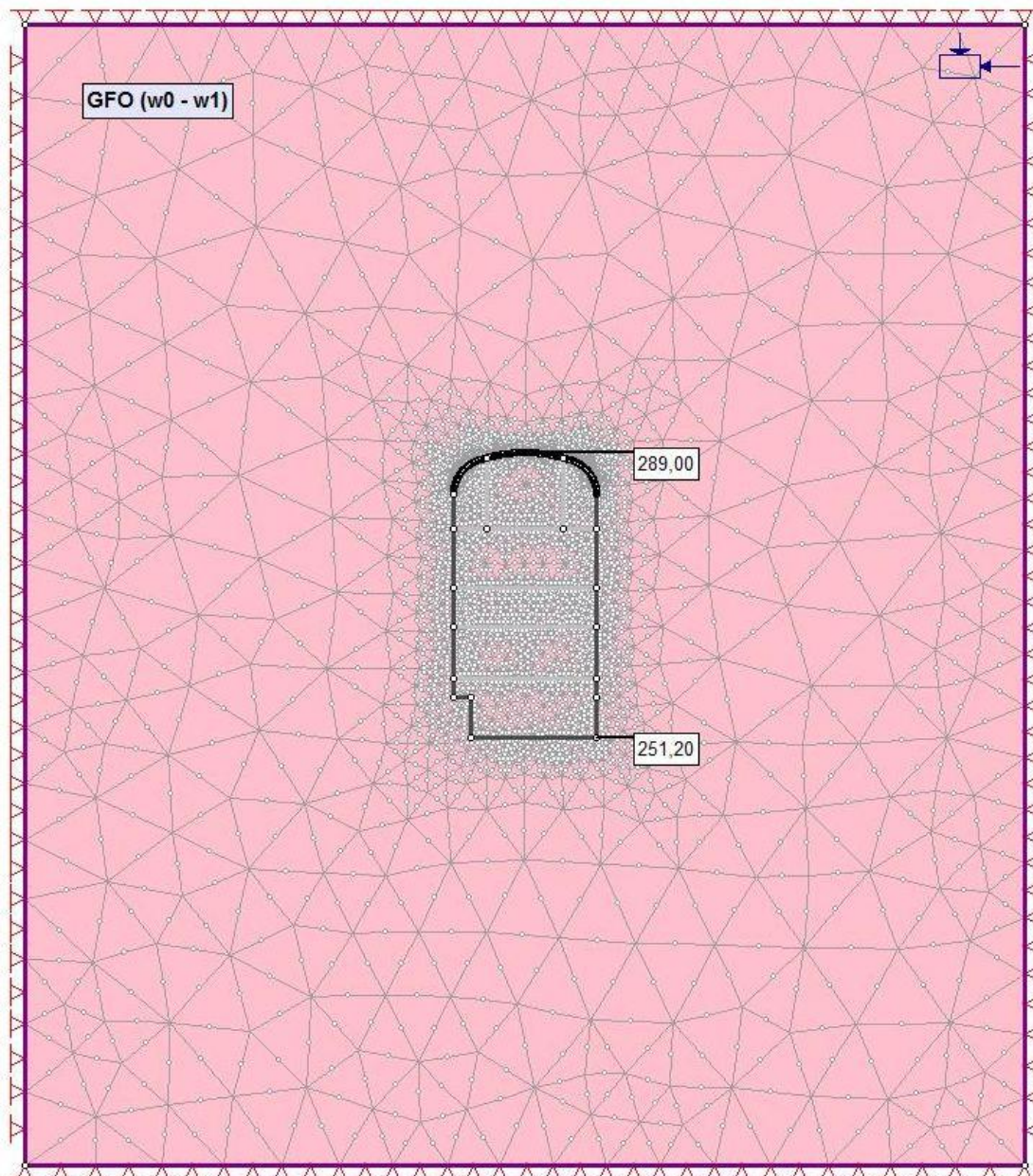


Abbildung 17: FE-Modell des KT SBW (Querschnitt C-C)

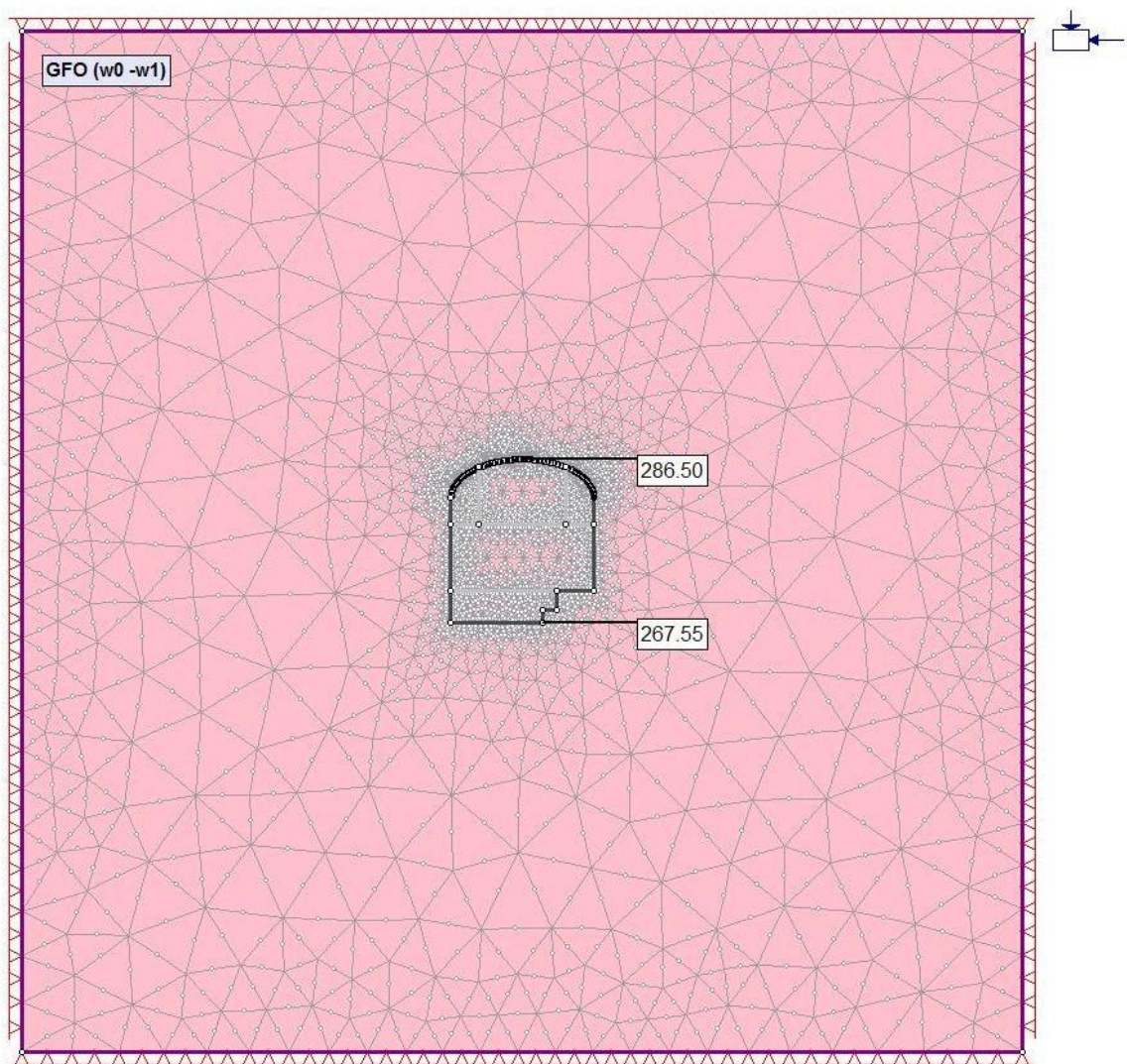


Abbildung 18: FE-Modell des KT MuW (Querschnitt I-I)

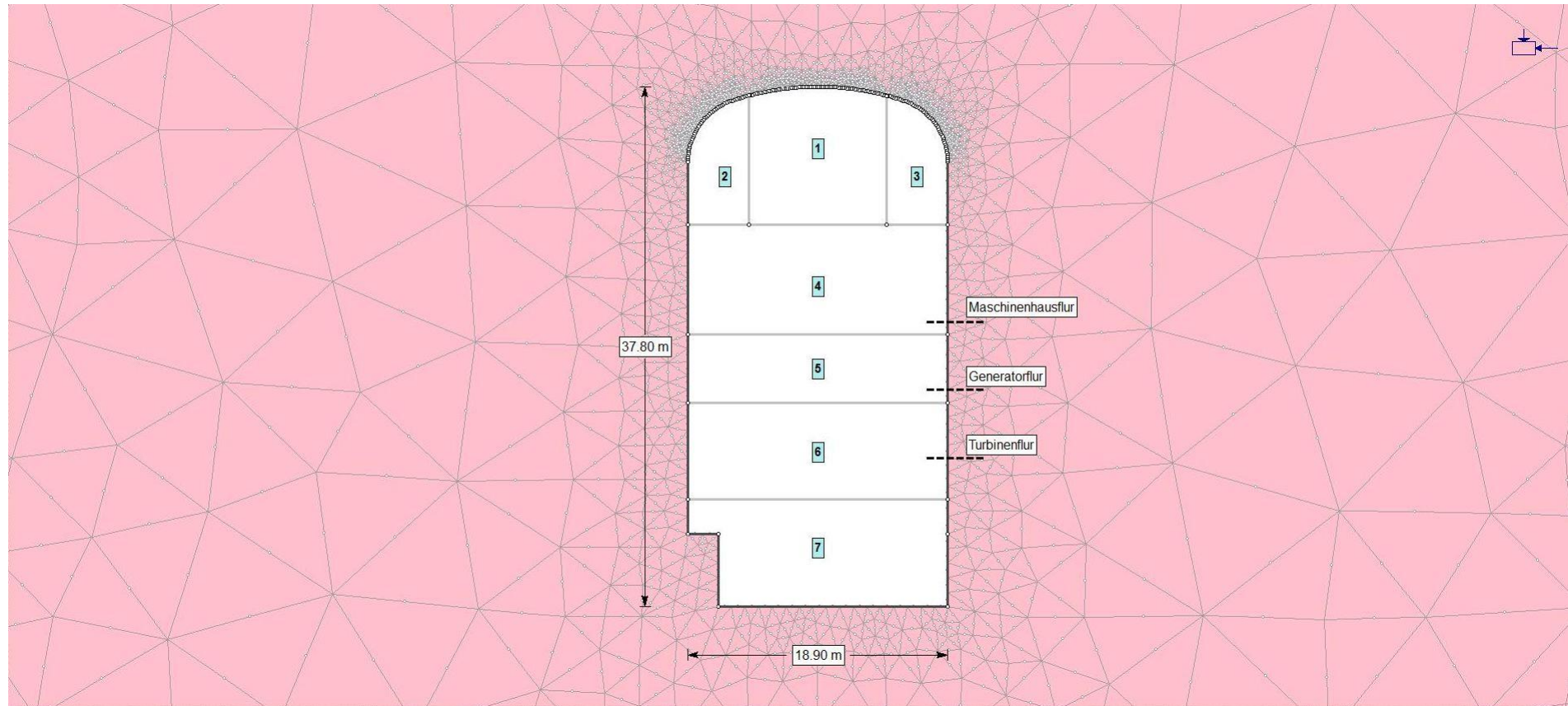


Abbildung 19: Bauwerksabmessungen und Ausbruchsequenz des KT SBW

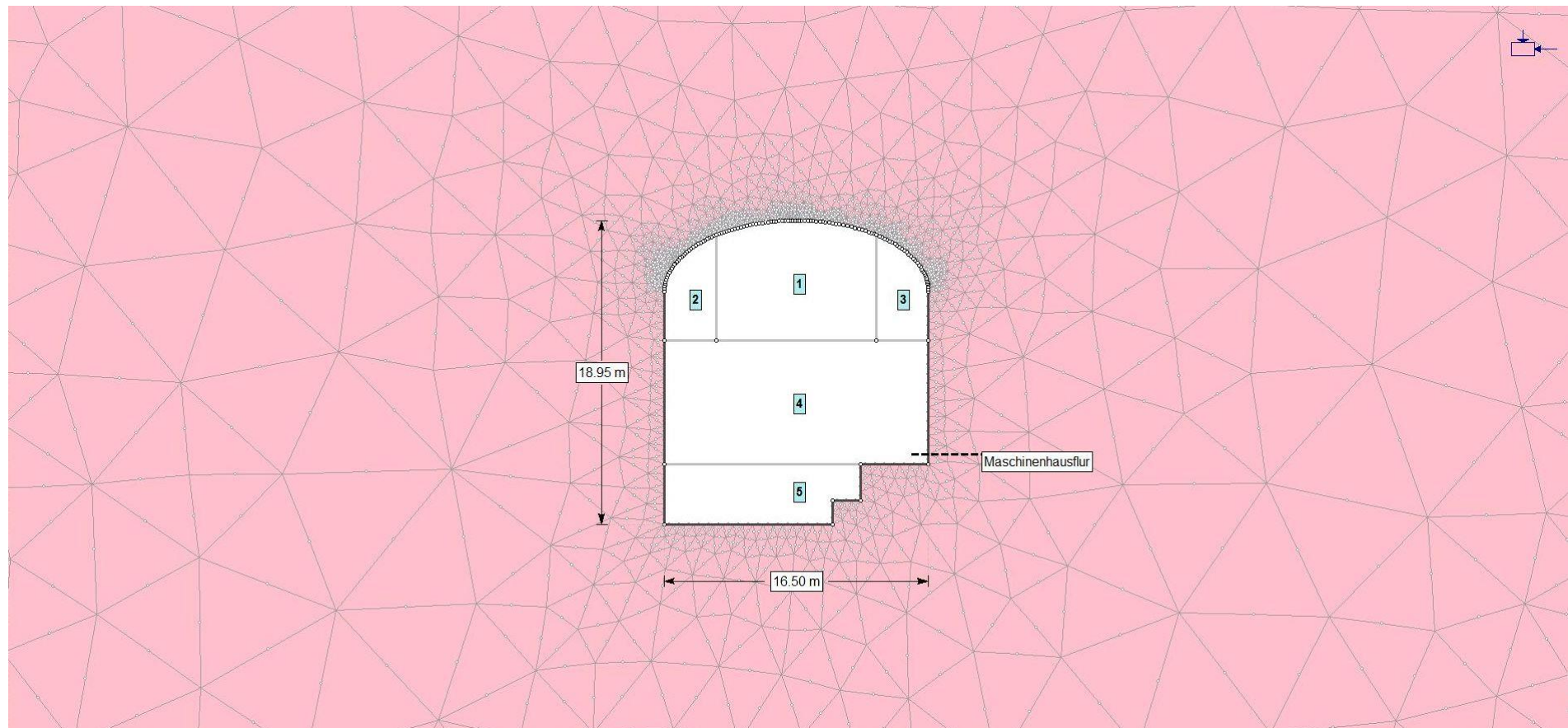


Abbildung 20: Bauwerksabmessung und Ausbruchsequenz des KT MuW

3.3.3 Eingangsparmeter FE-Berechnung

Als Gebirgswichte wurde $26,0 \text{ kN/m}^3$ angesetzt (Granit, unverwittert bis mäßig verwittert). Als Gebirgsverformungsmodul wurden 25 GPa sowie eine Poissonzahl von $0,25$ verwendet.

Als Stoffgesetz wurde ‚Mohr-Coulomb‘ gewählt mit den in der nachfolgender Tabelle aufgelisteten Parameter für Spitzen- und Restscherfestigkeit des Gebirges. Die Werte der Spitzenscherfestigkeit entsprechen Tabelle 7 (Kapitel 2.3.3 Scherparameter). Die Werte der Restscherfestigkeit des Gebirges wurden nach [Q10] abgeschätzt.

Tabelle 16: Verwendete Gebirgsfestigkeitsparameter

Stoffgesetz / Parameter	peak	residual
‘Mohr-Coulomb’		
$\varphi [^\circ]$	58	48
$c [\text{MPa}]$	2,9	1,6
$\sigma_t [\text{MPa}]$	0,3	0

3.3.4 Ergebnisse Kavernenteil Schwarzenbachwerk

In Abbildung 21 sind die totalen Verschiebungen sowie die plastifizierten Bereiche nach Ausbruch des KT SBW dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Gebirgsplastifizierung in den Seitenwänden und der Firste bis zu $3,5 \text{ m}$ bzw. $3,8 \text{ m}$ in das Gebirge reicht. Die größten totalen Verschiebungen am Ausbruchsrund treten mit 19 mm in den Seitenwänden etwa auf der Höhe zwischen Maschinenhaus- und Generatorflur auf. Die totalen Verschiebungen in der Firste betragen $6\text{-}8 \text{ mm}$. Die tatsächlich mit Extensometern messbaren Verformungen unter Berücksichtigung von Einbauzeitpunkt und Länge der Extensometer würden entsprechend in einem Bereich von nur wenigen Millimetern liegen ($3 \text{ bis } 8 \text{ mm}$ für Kavernenfirste und Seitenwände).

Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen jeweils die Spannungsplots für σ_1 bzw. σ_3 .

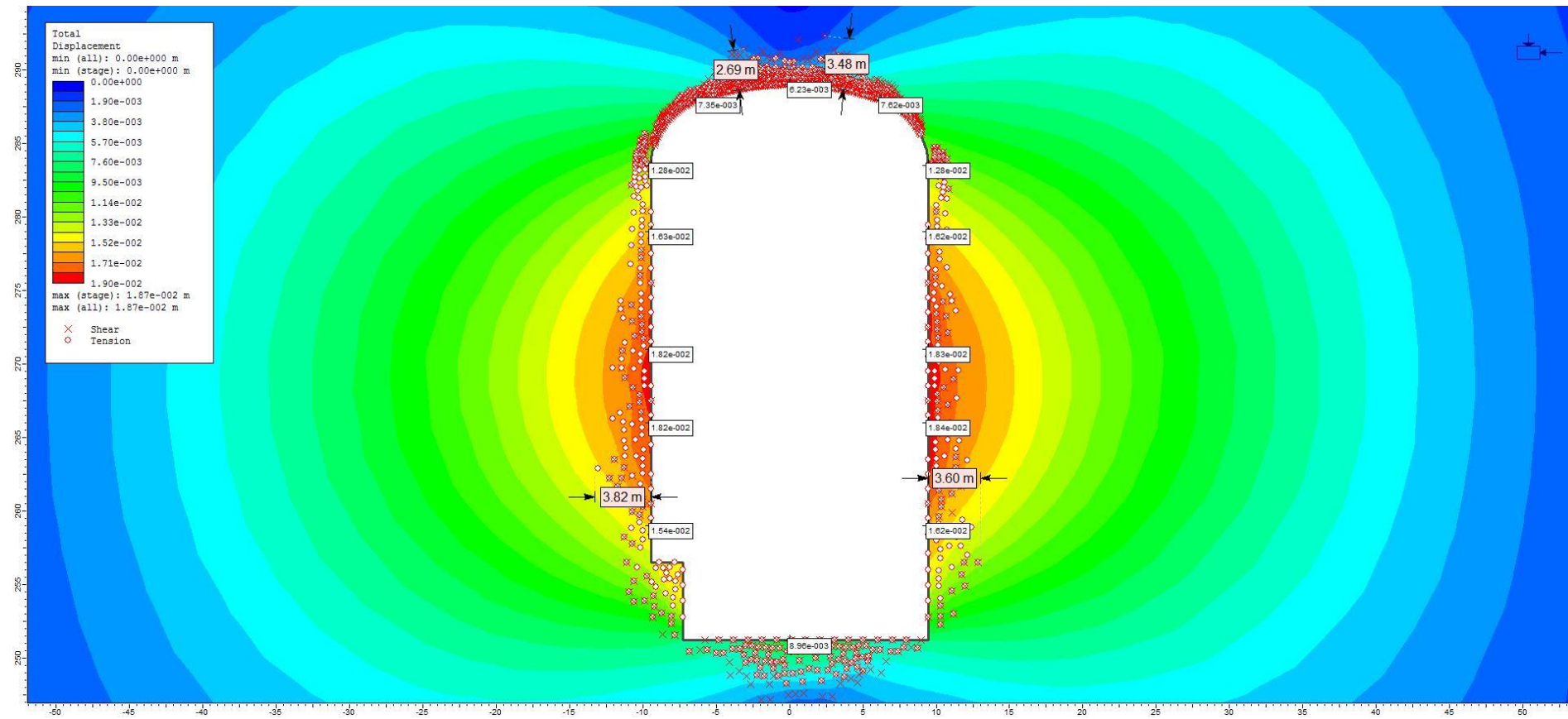


Abbildung 21: Totale Verschiebungen (Konturlinien) und plastifizierte Bereiche des KT SBW

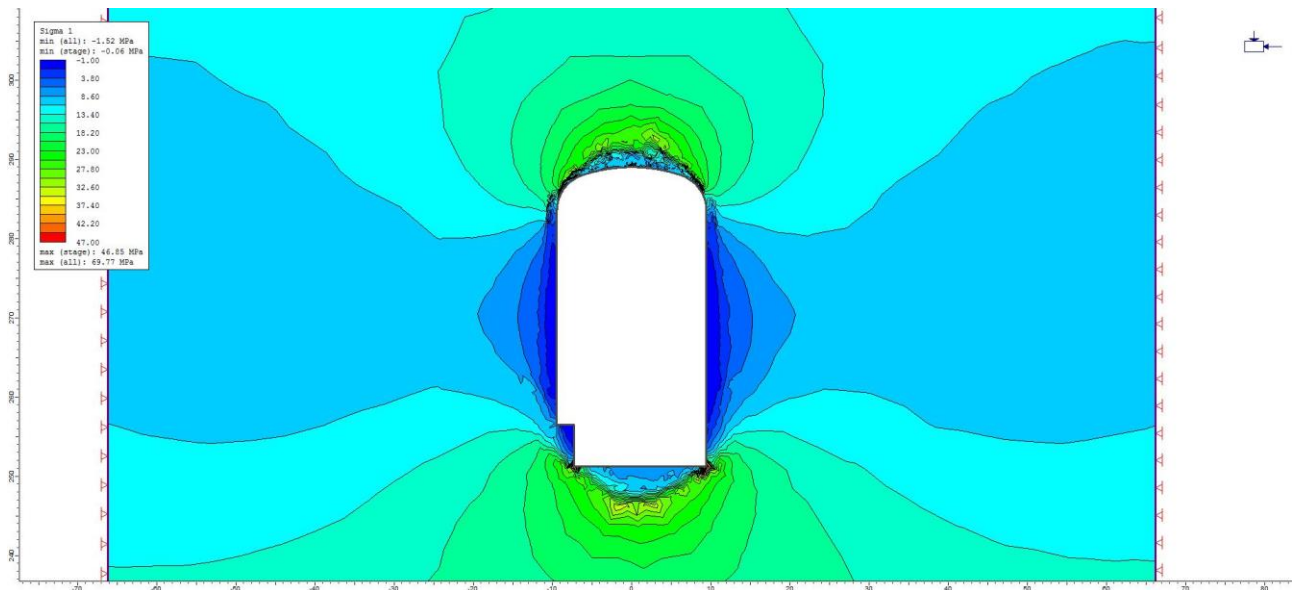


Abbildung 22: Spannungsplot Sigma1 des KT SBW

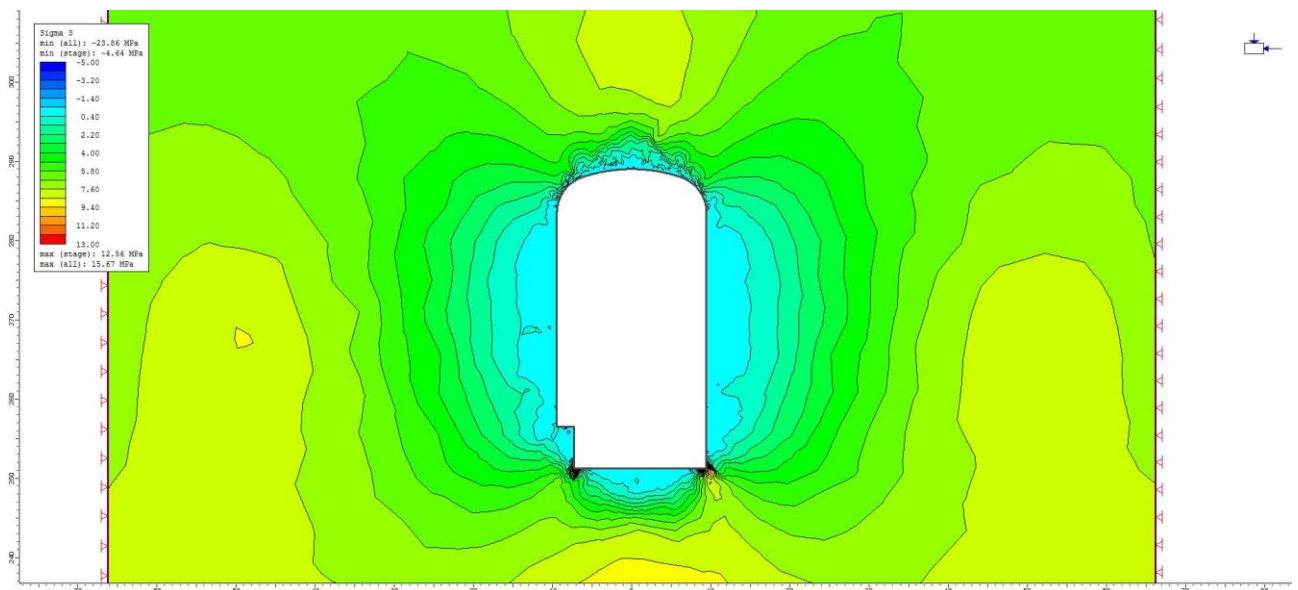


Abbildung 23: Spannungsplot Sigma3 des KT SBW

Bei der keilstatischen Betrachtung wurden Gleitkeile mit einer Tiefe von bis zu 7,2 m in der Kavernefirste (bei einer Skalierung nach Ausbisslängen) berücksichtigt. Die Gebirgsplastifizierung reicht jedoch nur bis 3,5 m in das Gebirge, so dass die Bildung neuer Trennflächen durch die Plastifizierung des Gebirges eher unwahrscheinlich ist und sich dadurch auch keine größeren Keile ausbilden können als die, die ohnehin schon bei der keilstatischen Betrachtung berücksichtigt wurden.

In Abbildung 24 ist die Gebirgsauslastung um die Kaverne dargestellt. Die Gebirgsauslastung ist das Verhältnis von Gebirgsfestigkeit zu Gebirgsspannung. Aufgrund der plastischen Modellierung des Gebirges ist der Wert der Gebirgsauslastung bei Erreichen der Gebirgsfestigkeit mit 1,0 gekennzeichnet. Gebirgsauslastungen < 1,0 sind demnach nicht möglich, da in diesem Falle Span-

nungen auf weniger beanspruchte Bereiche umgelagert werden. Bei der Gebirgsauslastung wird der komplette Spannungstensor (alle 3 Hauptnormalenspannungen) berücksichtigt, so dass der 3-dimensionale Fall dargestellt wird. Für das 2-D- Modell („plain strain“) kann die verwendete Software zwar nur Verschiebungen in der betrachteten Ebene berechnen und darstellen, allerdings wird bezüglich der Spannungen der komplette Spannungstensor (3D) berücksichtigt, wie z. B. für die Festigkeitskriterien (Mohr-Coulomb, Hoek-Brown, etc.) oder der Darstellung der Gebirgsauslastung („strength factor“). Sind die Werte für die Gebirgsauslastung knapp größer 1 (orange Bereiche in Abbildung 24), so bedeutet dies, dass sich die Spannungen im Gebirge der Gebirgsfestigkeit annähern und diese Bereiche möglicherweise bei bereits kleinen Spannungsänderungen ebenfalls zum Überschreiten des Festigkeitskriteriums und zur Gebirgsplastifikation tendieren.

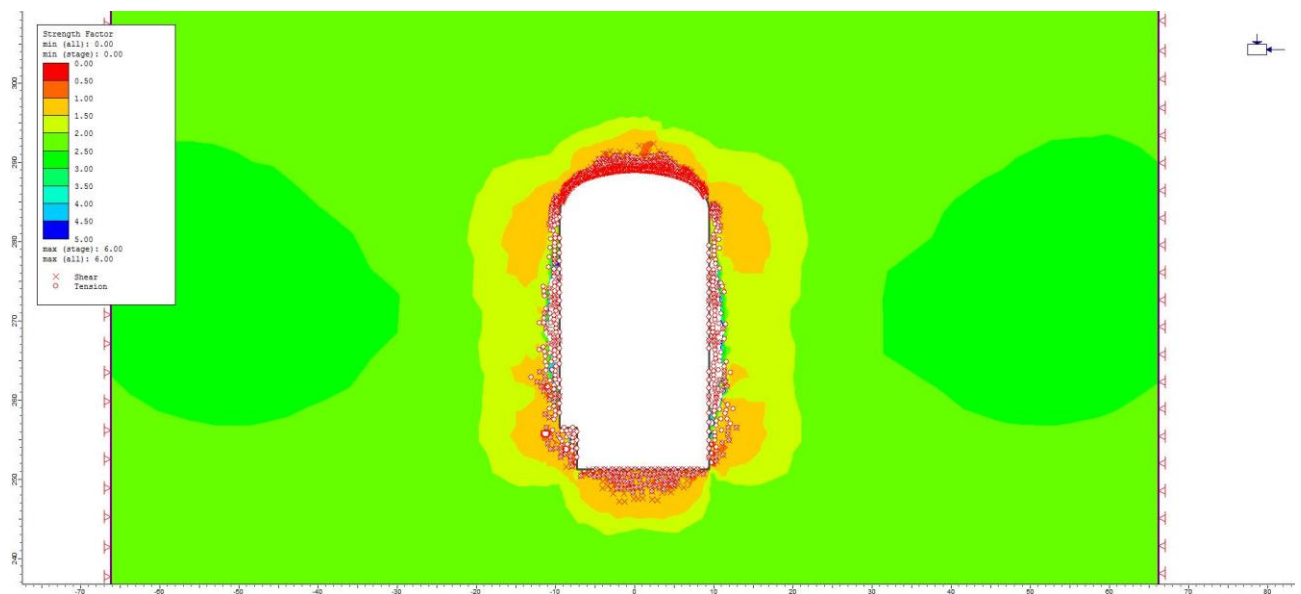


Abbildung 24: Gebirgsauslastung um den KT SBW

3.3.5 Ergebnisse Kavernenteil Murgwerk

Äquivalent zu den Ergebnissen des KT SBW sind in Abbildung 25 die totalen Verschiebungen und plastifizierten Bereiche für des KT MuW dargestellt, in den beiden anschließenden Abbildungen entsprechend die Spannungsplots für Sigma1 und Sigma3, sowie in Abbildung 28 die Gebirgsauslastung.

Die maximalen Verschiebungen des Kavernenteils Murgwerk betragen in der Firste 5-6 mm, sowie in den Seitenwänden 10 mm. Die Ausdehnung der plastischen Zone reicht in der Firste bis zu 2,6 m in das Gebirge während die Gebirgsplastifikation in den Seitenwänden nur bis zu 1,8 m reicht. Die Verschiebungen und die Ausdehnung der plastischen Zone für den Kavernenteil Murgwerk sind aufgrund der geringen Höhe der Seitenwände deutlich geringer als im Kavernenteil Schwarzenbachwerk. Für die Firste liegen dagegen die Verschiebungen und die Ausdehnung der plastischen Zone für den Kavernenteil Murgwerk und Schwarzenbachwerk in etwa derselben Größenordnung.

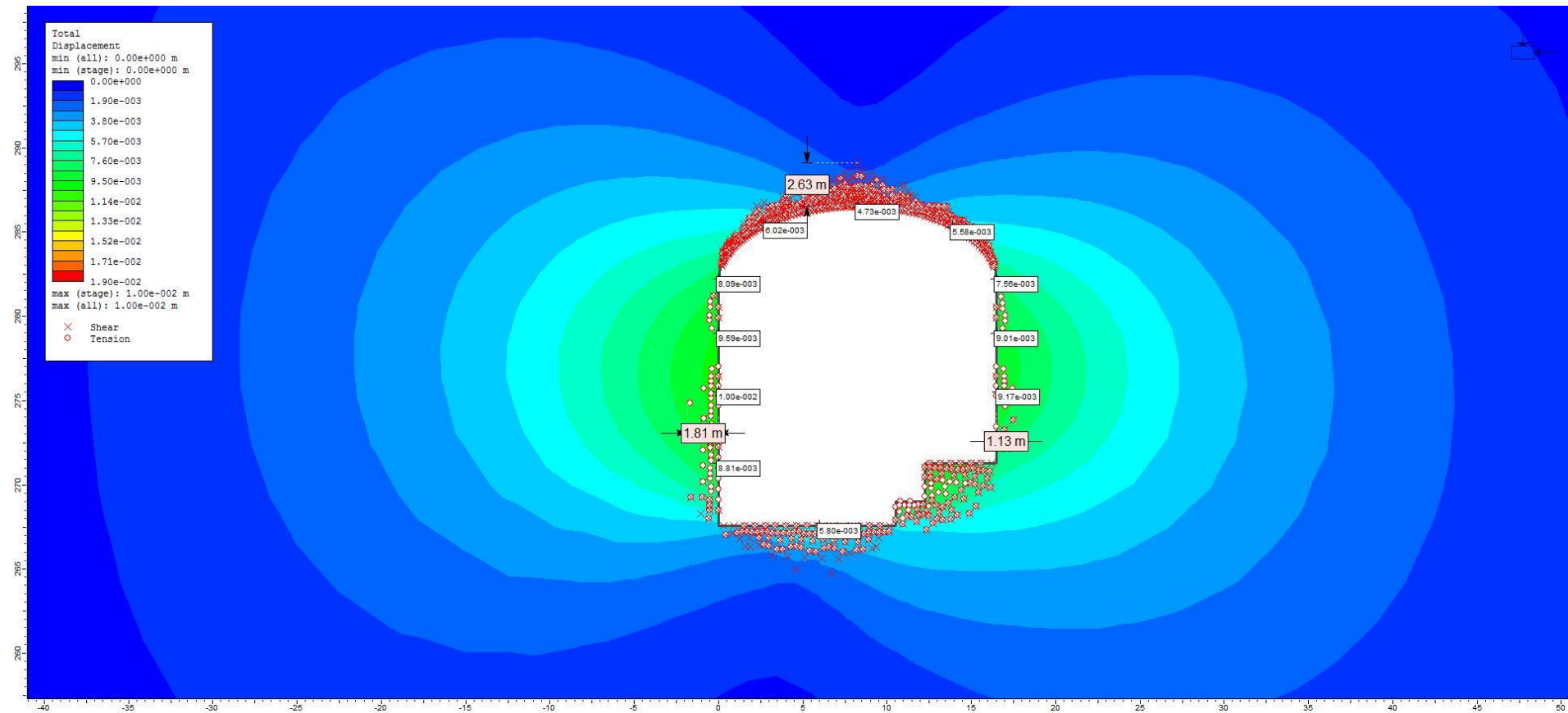


Abbildung 25: Totale Verschiebungen (Konturlinien) und plastifizierte Bereiche des KT MuW

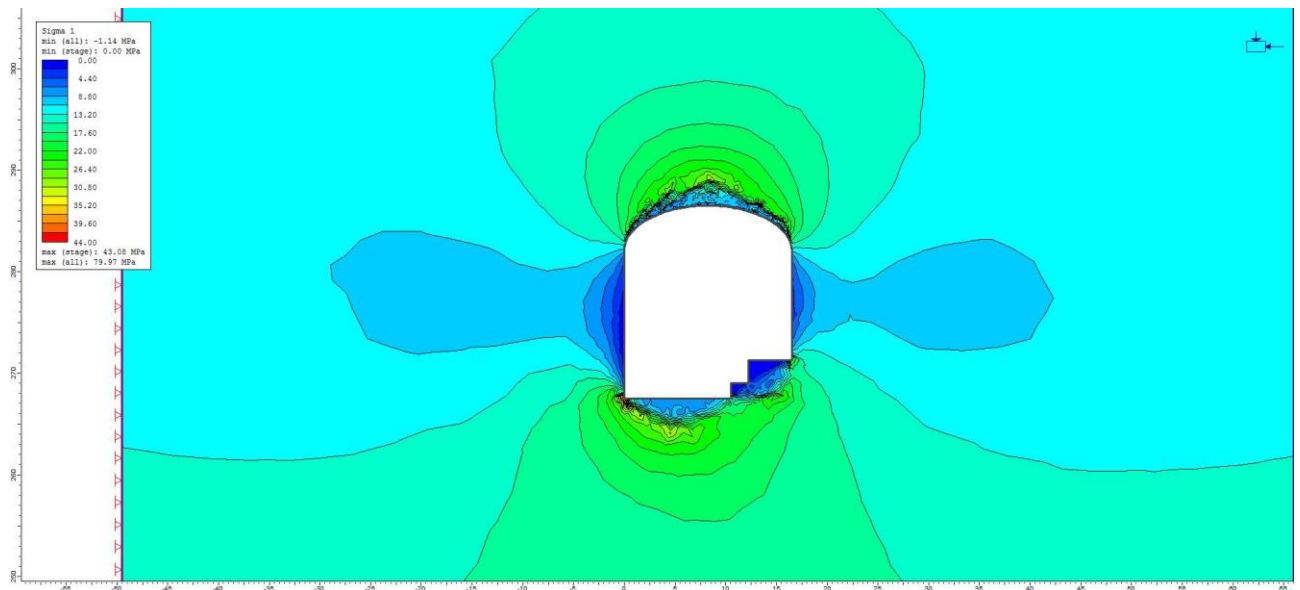


Abbildung 26: Spannungsplot Sigma1 des KT MuW

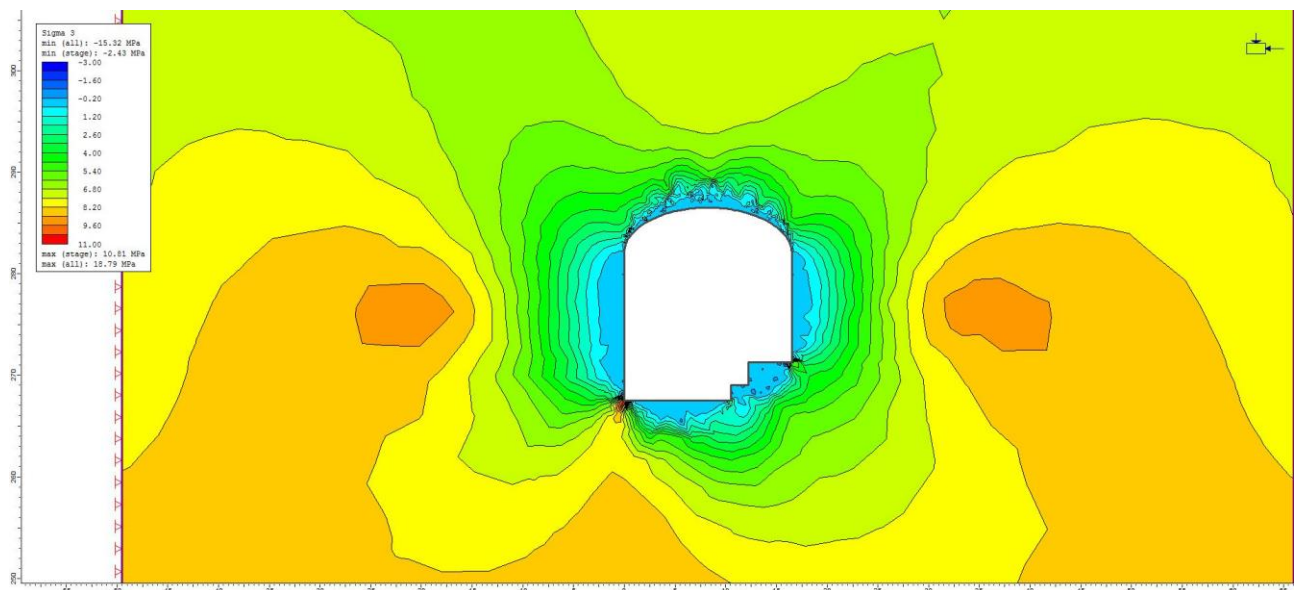


Abbildung 27: Spannungsplot Sigma3 des KT MuW

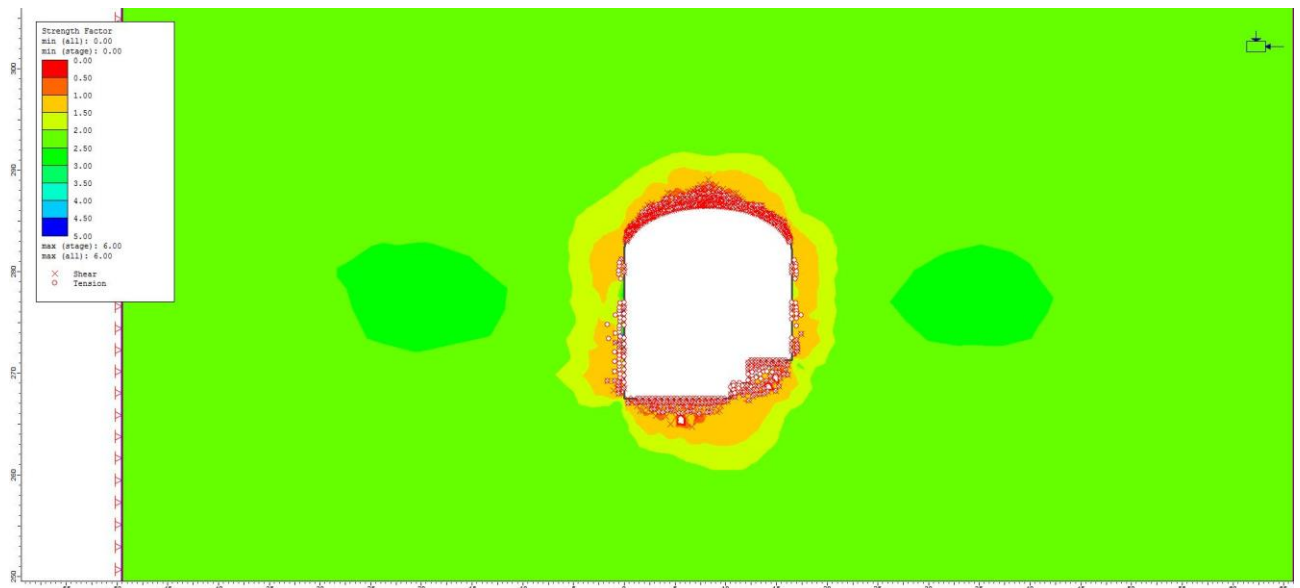


Abbildung 28: Gebirgsauslastung um den KT MuW

3.3.6 FE-Modellierung Felssicherungsmaßnahmen

Die vorangegangenen Rechenläufe haben gezeigt, dass die Kraftwerkskaverne in den Bereichen des Kavernenteils SBW und MuW, als Kontinuum betrachtet, selbsttragend ist. Die Anker sind bei der Betrachtung des Gebirges als Kontinuum nicht erforderlich. Die Dimensionierung der Felssicherungsmaßnahmen basiert deshalb primär auf der Keilstatik (Diskontinuum).

Durch die Modellierung der Felssicherungsmaßnahmen mittels FEM soll jedoch geprüft werden, ob sie sich als zweckmäßig erweisen und nicht durch zu starke Gebirgsverformungen (insbes. plastische) überbeansprucht werden. Zu diesem Zweck wurden die Felsnägel und die Spritzbetonschale in das FE-Modell implementiert.

In der Firste wurden für den KT SBW und den KT MuW jeweils 8 m lange, voll vermörtelte Felsnägel mit einer Nennlast von 176 kN in einem Raster von 2 m², sowie eine 20 cm dicke Spritzbetonschale modelliert, für die Seitenwände jeweils Felsnägel mit 8 m bzw. 6 m Länge in einem Raster von 5 m².

Die Felsnägel in den Seitenwänden wurden horizontal modelliert. Während der Bauausführung sind diese jedoch um mindestens +10° oder -10° gegen die Horizontale zu neigen, um Lufteinschlüsse zu vermeiden. Für die FE-Modellierung sind diese Ankerneigungen jedoch nicht relevant.

Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen die sich ergebenden Verformungen und plastifizierten Gebirgsbereich der Kavernen unter der Berücksichtigung von Felsnägeln und Spritzbeton. Die beiden Abbildungen zeigen, dass die simulierten Felssicherungsmaßnahmen kaum Einfluss auf die ohnehin nur sehr geringen Deformationen des Ausbruchsrands haben. Die Ausdehnung der plastischen Zone in der Firste der Kavernenteile ist mit den simulierten Felssicherungsmaßnahmen jedoch etwa 1m geringer (vgl. auch Tabelle 17).

Tabelle 17: Vergleich max. Verschiebungen und Ausdehnung plastischer Zone mit und ohne Felssicherung (FS)

		KT SBW		KT MuW	
		mit FS	ohne FS	mit FS	ohne FS
Firste	max. Verschiebungen	6,3 mm	6,2 mm	4,8 mm	4,7 mm
	Ausdehnung plast. Zone	2,6 m	3,5 m	2,1 m	2,6 m
Seitenwand	max. Verschiebungen	18,2 mm	18,6 mm	9,9 mm	10,0 mm
	Ausdehnung plast. Zone	3,6 m	3,8 m	1,7 m	1,8 m

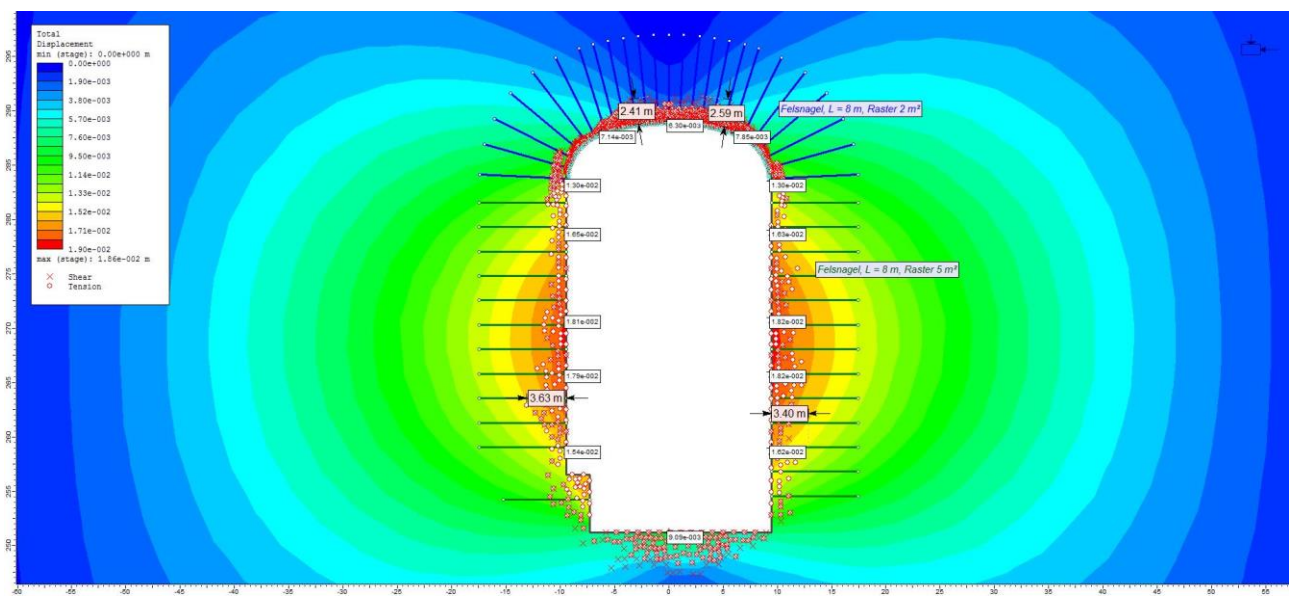


Abbildung 29: Totale Verschiebungen (Konturlinien) und plastifizierte Bereiche des KT SBW mit Felssicherungsmaßnahmen

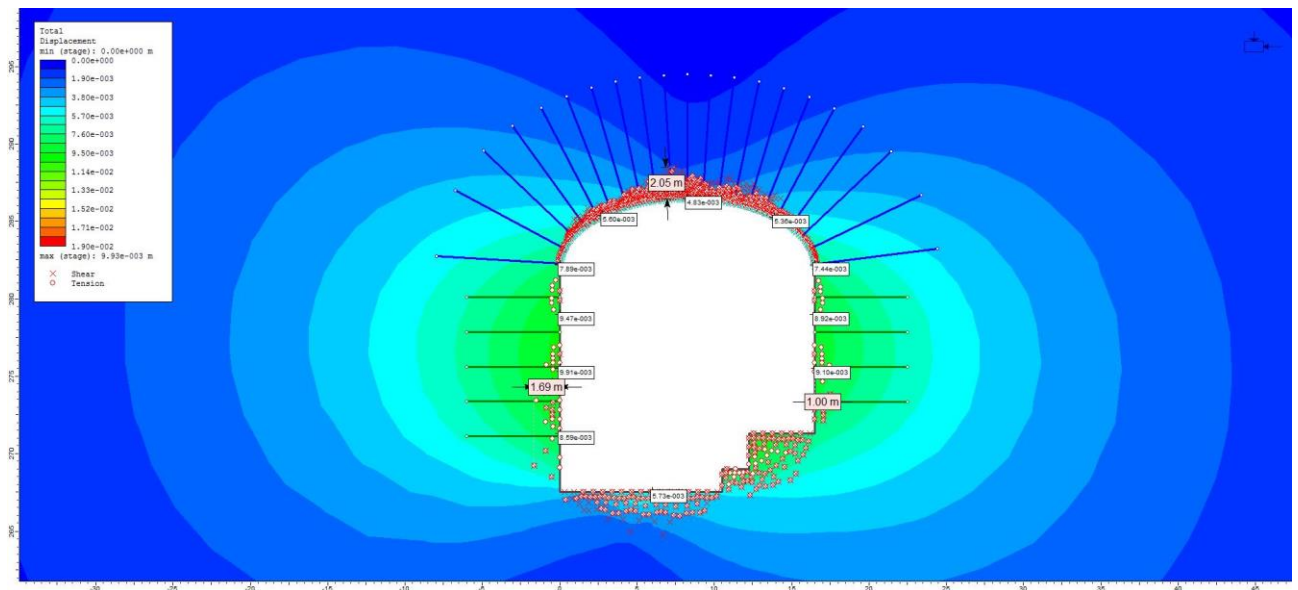


Abbildung 30: Totale Verschiebungen (Konturlinien) und plastifizierte Bereiche des KT MuW mit Felssicherungsmaßnahmen

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen jeweils für die Kavernenteile SBW und MuW die Ankerkräfte der simulierten Felsnägel während Tabelle 18 die jeweils maximalen Ankerkräfte zusammenfasst. Die maximalen Ankerkräfte für KT SBW sind mit 96 kN für die Seitenwände und 102 kN für die Firste nahezu identisch. Für den KT MuW betragen die maximalen Ankerkräfte jeweils 77 kN für die Seitenwände und 59 kN für die Firste. Durch die Gebirgsverschiebungen werden die Felsnägel somit bis etwa 30 bis 60 % ihrer Nennlast (176 kN) belastet. Für die Felsnägel ergeben sich somit keine Überbeanspruchungen, welche zu Ankerausfällen führen könnten.

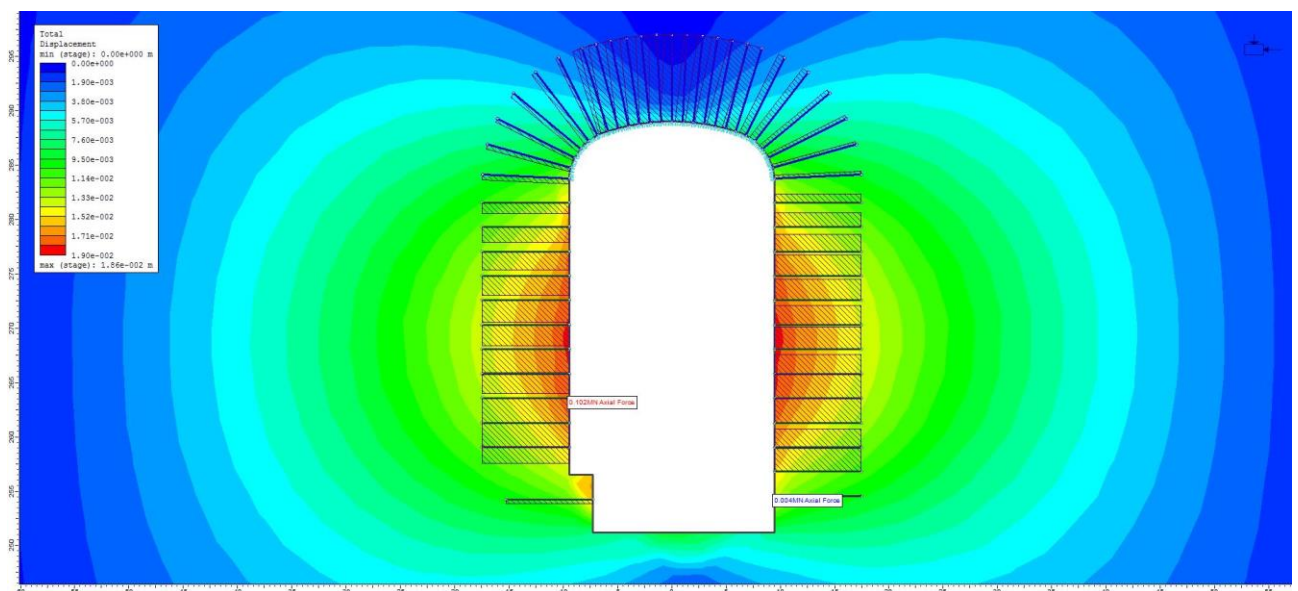


Abbildung 31: Totale Verschiebungen (Konturlinien) und axiale Ankerkräfte des KT SBW

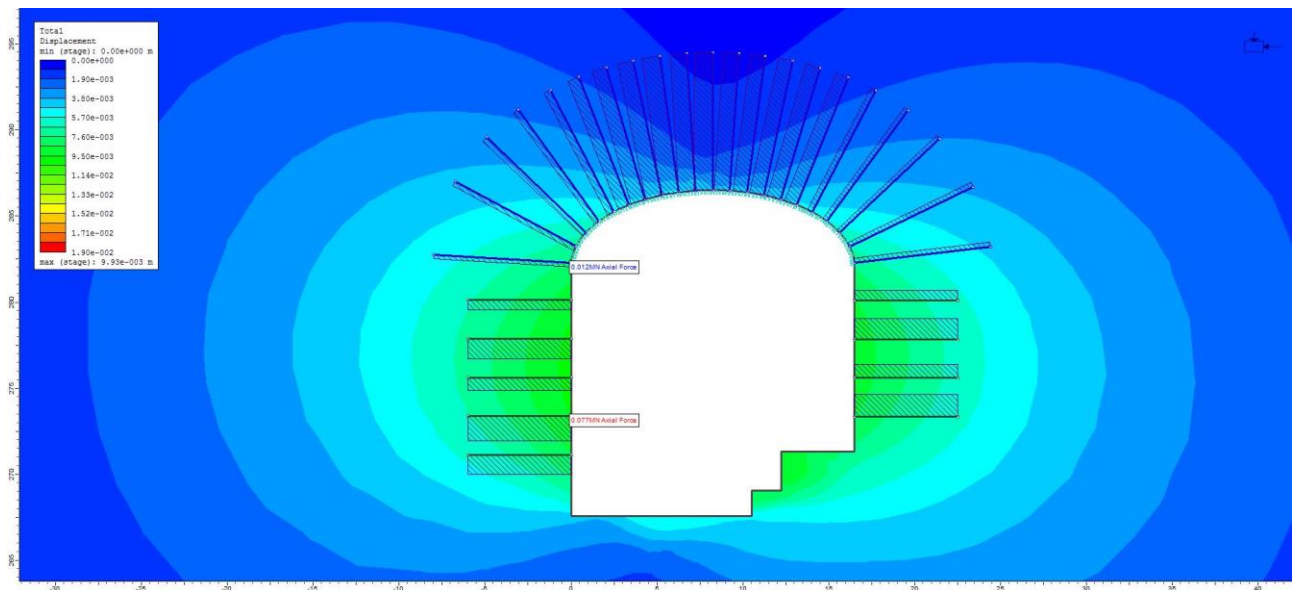


Abbildung 32: Totale Verschiebungen (Konturlinien) und axiale Ankerkräfte des KT MuW

Tabelle 18: Vergleich maximaler Ankerkräfte für KT SBW und KT MuW

	maximale Ankerkraft [kN]	
	KT SBW	KT MuW
Firste	96	59
Seitenwand	102	77

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Felssicherungsmaßnahmen durch die durch den Aushub hervorgerufenen Gebirgsdeformationen nicht überbeansprucht werden und als wirksam angesehen werden können.

3.4 Felssicherungsmaßnahmen

Im Folgenden werden Felssicherungsmaßnahmen beschrieben, welche beim Ausbruch der Kavernenteile SBW und MuW als permanente Felssicherung eingebaut werden. Es wird generell davon ausgegangen, dass die geotechnischen Gebirgsverhältnisse im Kavernenbereich als günstig beurteilt werden können. Größere Störungszonen bzw. größere Bereiche stark verwitterten oder zersetzten Granits (w3-w4), welche einen erhöhten Sicherungsaufwand erfordern, werden gegenwärtig nicht erwartet. Laut [Q1] ist mit dem momentanen Erkundungsstand allerdings nicht komplett auszuschließen, dass im Kavernenbereich lokal begrenzt einzelne vergrußte Granitareale (entlang von Großklüften) auftreten. Durch Anpassung der Sicherungsmittel (siehe auch Vorhaltung von Vorspannankern) können diese lokal sehr begrenzten Schwächezonen beherrscht werden. Auch Änderungen der Spannungsgrößen und -richtungen, welche in einem kleinen Umfang liegen können, sind durch Anpassung der Sicherungsmittel gut beherrschbar.

3.4.1 Felsanker

Die erforderlichen Ankerlängen, welche sich aus der Keilstatik sowie der FE-Analyse (Ausdehnung der plastischen Zone) ergeben, sind in Tabelle 19 zusammengefasst. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Anker mindestens ca. 1 m hinter den keiltiefsten Punkt bzw. über die plastische Zone hinaus reichen müssen, um als wirksam angesetzt werden zu können.

Tabelle 19: Erforderliche Mindest-Ankerlängen.

	Erforderliche Ankerlängen [m]	
	Keilstatik	FE-Modellierung
Kavernenteil Schwarzenbachwerk		
Firste	7,5	4,5
Seitenwände	4,5	4,6
Stirnseite	4,5	/
Kavernenteil Murgwerk		
Firste	7,5	3,6
Seitenwände	4,5	2,8
Stirnseite	-	/

Aus den in der Keilstatik ermittelten Ausbauwiderständen ergeben sich die in Tabelle 20 aufgeführten Ankerraster. Die Ankerlängen für die Seiten- und Stirnwände der Kavernenteile Schwarzenbach- und Murgwerk sind länger gewählt, als sie aufgrund der keilstatischen Betrachtung erforderlich wären, um ggf. auch ungünstigere Keilformen, als die betrachteten, absichern zu können (konservativer Ansatz).

Als Ankertyp wurde ein Felsnagel, vollvermörtelt mit einer Stahlgüte St 500/550 und einem Durchmesser von 32 mm gewählt. Anzumerken ist, dass die angegebene Nennlast dieses Ankertyps einen Sicherheitsfaktor von 1,75 sowie einen Abrostungszuschlag auf den Durchmesser von 4 mm enthält.

Tabelle 20: Ankerraster und –längen der Felsnägel für die Kavernenteile SBW und MuW

	Länge [m]	Raster [m²]	Ø [mm]	Nenn- last*¹ [kN]	Ausbauwiderstand [kPa]	
					erreicht	benötigt
Kavernenteil Schwarzenbachwerk (SBW)						
Firste	8	2	32	176	88	92 / <u>83</u>
SE-Seitenwand	8	5	32	176	35	27 (64)*²
NW-Seitenwand	8	5	32	176	35	2 (8)*²
OW-Stirnseite	6	5	32	176	35	32 (53)*²
Kavernenteil Murgwerk (MuW)						
Firste	8	2	32	176	88	87 / <u>80</u>
OW-Wand	6	5	32	176	35	19 (27)*²
UW-Wand	6	5	32	176	35	1 (5)*²
Stirnseite	6	5	32	176	35	-

*¹ Nennlast = Last an der Streckgrenze / 1,75; unter Berücksichtigung eines Abrostungszuschlages von 4 mm auf den Durchmesser

*² Ausbauwiderstand für vergußte Gebirgsbereiche

Der erreichte Ausbauwiderstand in vorangegangener Tabelle ergibt sich aus der Nennlast der Anker dividiert durch das jeweilige Ankerraster:

$$\text{Erreichter Ausbauwiderstand [kPa]} = \text{Nennlast des Ankers [kN]} / \text{Ankerraster [m}^2\text{]}.$$

Sollten während des Kavernenaushubs weiträumige und lang anhaltende vergußte Gebirgsbereiche angetroffen werden, so sind diese in der Kavernenfirste und vor allem in den Seitenwänden der Kaverne über zusätzliche Vorspannanker zu sichern (siehe Kapitel 3.4.3 Vorspannanker).

Im Folgenden ein paar Gedanken zum Abrostungszuschlag:

Die DIN 21521 (1993) Gebirgsanker für den Bergbau und den Tunnelbau, der die Felsnägel zuzuordnen sind, spricht nicht von Dauer- bzw. Temporärankern.

In der DIN EN 1537 E (2014) Verpressanker sind ausschließlich vorgespannte Anker geregelt. Felsnägel fallen nicht darunter. Daueranker sind dort mit einer geplanten Lebensdauer von mehr als 2 Jahren definiert (3.1.18). Entsprechend sind Kurzzeitanker, Anker mit einer geplanten Lebensdauer von weniger als 2 Jahren (3.1.21).

In DIN EN 14490 (2010) Bodenvernagelung geht es nicht um Felsnägel im Fels. Allerdings könnte man eine Felsvernagelung ähnlich der einer Bodenvernagelung betrachten. Diese Norm spricht von Lebensdauer (Haltbarkeit) der Vernagelung im Vergleich zum Bauwerk. Es finden sich folgende interessante Passagen, die argumentativ auf die Felsvernagelung der Kaverne angewendet werden können:

B.3.4.3 Die folgenden Ansätze zum Erreichen der gewünschten Betriebsdauer werden gewöhnlich bei metallischen Bewehrungen, üblicherweise bei Bewehrungen aus Stahl angewendet:

- Korrosionszugabe;
- Einkapselung mit einem geeigneten Einpressmittel, Mörtel oder Beton;

- Oberflächenbeschichtung;
- geripptes Hüllrohr mit Einpressmittel;
- nicht rostender Stahl;
- eine Kombination der oben genannten Ansätze.

Für die Kavernenteile SBW und MuW sind die beiden folgenden Absätze relevant, so dass Felsnägel zur dauerhaften Sicherung der Kavernen Verwendung finden können:

B.3.4.4 Korrosionszugabe

Bei diesem Verfahren wird davon ausgegangen, dass keine Oberflächenbehandlung oder Einkapselung durch Einpressmittel erfolgt ist. Es beruht auf der Überdimensionierung des Querschnitts der Bewehrung und weiterer Teile, um Korrosion zuzulassen. Der vorhergesagte Wert für den Dickenverlust auf Grund von Korrosion basiert auf historischen Angaben, die von in ähnlichen Umgebungen mit unterschiedlichen Graden von Bodenaggressivität eingebauten Bodennägeln, Spundwänden und eingegrabenen Bauwerken aus geripptem Stahl gewonnen wurden. Dieses Verfahren ist nicht für Bewehrungen mit kleinen Querschnitten oder für Stähle mit einem hohen Kohlenstoffanteil zu empfehlen. Dieses Verfahren der Stahlzugabe für Korrosion wird im Allgemeinen bei Bodennägeln angewendet, bei denen der prozentuale Anteil des Querschnittverlustes die Hälfte ihres ursprünglichen Querschnittes nicht überschreitet. Es wird normalerweise dort angewendet, wenn die Nägel an ziemlich angeschlossenen Zentren eingebaut sind und sie bis zu einem gewissen Grad überzählig sind.

B.3.4.5 Einkapselung mit Einpressmittel

Der durch die Alkalität von hydratisiertem Einpresszement geleistete Korrosionsschutz ist unter der Voraussetzung annehmbar, dass ein hoher Grad der Alkalität (pH-Wert 9,5 bis 13,5) aufrechterhalten wird. Die Forschung hat gezeigt, dass überprüfte Rissbreiten von weniger als 0,1 mm als selbstheilend betrachtet werden können. Deshalb wird Einpresszement als eine annehmbare, undurchlässige Schutzeinkapselung erachtet, vorausgesetzt, die Rissbreite im Einpressmittelkörper von 0,1 mm wird nachweislich nicht überschritten. Das Einpressmittel darf während oder nach dem Bohren eingebracht und kann über eine hohle Bewehrung oder ein getrenntes Betonierrohr injiziert werden. Die Anwendung von Einpresstechniken kann die Dicke und Qualität des Einpresszementes erhöhen und seine Eigenschaften als Korrosionsschutzhülle verbessern. In Abhängigkeit der geplanten Nutzungsdauer des Bauwerkes sowie dem Zustand des Bodens sind für die Einkapselung Minstdicken von 10 bis 75 mm angegeben. Diese Werte beziehen sich auf eine Einkapselung mit Einpressmittel ohne weitere zusätzliche Schutzmaßnahmen (z. B. Galvanisierung oder Hüllrohr, Korrosionszuschlag etc.)

In der DIN EN 14199 (2013) Mikropfähle finden sich ähnliche Überlegungen zum Korrosionsschutz.

7.6.2 Der Korrosionsschutz muss aus folgenden Komponenten bestehen:

- eine wirksame Überdeckung aus geeignetem Mörtel oder Beton;
- eine entsprechend der durch die Korrosion bedingten Materialschwächung dimensionierten Vergrößerung des Stahlquerschnitts;
- besonderen Vorkehrungen (wie z. B. Verwendung besonderer Zemente; dem Einsatz eines geeigneten Stahles; die Verwendung von Einhüllungen).

3.4.2 Spritzbeton

Zur Sicherung von kleineren Felskeilen, welche bedingt durch das Kleinkluftgefüge gravitativ aus der Kavernenfirste fallen können, ist für die Kavernenteile SBW und MuW Spritzbeton mit einer Stärke von 20 cm in der Firste vorgesehen. Für die Seitenwände ist für Gebirgsbereiche mit einem GSI > 70 (Verwitterungsklasse w0 – w2) keine zusätzliche Sicherung mit Spritzbeton nötig. Für Gebirgsbereiche mit einem GSI < 70 sind in den Seitenwänden 10 cm Spritzbeton sowie für vergrußte Gebirgsbereiche 15 cm vorzusehen. Als Bewehrung für den Spritzbeton ist eine doppelagige Mattenbewehrung (Typ Q 188) mit jeweils 5 cm Überdeckung auf der Innen- und Außenseite vorgesehen. Alternativ kann auch Stahlfaserspritzbeton verwendet werden (Fasergehalt min. 40 kg/m³). Für entsprechende Nachweise ist die DBV-Richtlinie zu beachten.

Zur Modellierung der Spritzbetonschale wird vollständiger Schubverbund, kraft- und kontaktschlüssig mit dem Gebirge angenommen sowie der in Tabelle 21 aufgeführte E-Modul verwendet. Der E-Modul wurde nach [Q11] gewählt, um das Kriech- und Relaxationsverhalten des jungen Spritzbetons auch modelltechnisch zu berücksichtigen. Durch die Verwendung des E-Moduls des jungen Spritzbetons anstatt des Moduls nach 28 Tagen liefern die Berechnungen hinsichtlich der Verschiebungen am Ausbruchsrund der Kaverne konservativere Ergebnisse.

Tabelle 21: Spritzbeton des KT SBW und KT MuW

	Dicke	Bewehrung	Festigkeitsklasse	modellierter E-Modul [MPa]
Firste	20	Matte * 2 x Q 188	C25/30	7500
Seitenwände	15	Matte * 2 x Q 188	C25/30	7500

* anstelle von Mattenbewehrung können dem Spritzbeton auch Stahlfasern (Gehalt: 40 kg/m³) beigelegt werden

Anzumerken ist, dass der Spritzbeton rein konstruktiv und nicht statisch bei der Dimensionierung der Felssicherung angesetzt wurde (Rückfallebene). Entsprechende Nachweise, wie zum Beispiel die Darstellung von Schnittgrößen, wurden für den Spritzbeton deshalb nicht erbracht. Der Spritzbeton stellt somit eine weitere Sicherheit dar. Bei einem statischen Ansatz des Spritzbetons würde sich der Ausbauwiderstand entsprechend deutlich erhöhen.

3.4.3 Vorspannanker

Die FE-Analyse hat gezeigt, dass das Gebirge um die Kraftwerkskaverne nicht tiefreichend plastifiziert und es sich deshalb voraussichtlich nur Felskeile mit den bereits angelegten und vorhandenen Trennflächen ausbilden werden. Durch eine etwaige tiefgreifende Gebirgsplastifikation wäre es andernfalls denkbar, dass Materialbrücken auf Trennflächen aufgebrochen werden bzw. neue Trennflächen entstehen, so dass sich auch Felskeile oder Gebirgsbereiche ausbilden können, die tiefer in das Gebirge hineinreichen und einen erhöhten Sicherungsaufwand erfordern. Dies ist für die Kraftwerkskaverne der Neuen Unterstufe jedoch nicht der Fall und es ergeben sich geometrisch Felskeile, die allein mit Felsnägeln ohne den zusätzlichen Einsatz von Vorspannankern gesichert werden können. Auch die erwarteten Verformungen in den Seitenwänden der Kraftwerkskaverne (siehe Kapitel 3.3.3) sind so gering, dass diese nicht zusätzlich durch Vorspannanker kompensiert oder limitiert werden müssen. Der Einsatz von Vorspannankern wird deshalb zum gegenwärtigen Zeitpunkt als nicht notwendig erachtet.

Die keilstatische Betrachtung hat jedoch gezeigt, dass sich unter Berücksichtigung von Vergrußungszonen entlang der Haupttrennflächen vor allen in den Seitenwänden der Kraftwerkskaverne auch tiefer in das Gebirge reichende Gleitkeile (Maximalkeile) ausbilden können, mit Keiltiefen von bis zu 12 m in der Firste und 16 m in den Seitenwänden. Sollten während des Kavernenaushubs solche weiträumigen Vergrußungszonen angetroffen werden bzw. Klüfte mit lang anhaltenden Ausbisslängen und diese so orientiert sein, dass sich Maximalkeilen ähnliche Kluftkörper ausbilden können, so sind diese entsprechend lokal mit zusätzlichen Vorspannankern zu sichern.

Es wird deshalb empfohlen, während der Aushubarbeiten eine gewisse Anzahl Vorspannanker mit einer Länge von 15 m für den Firstbereich, sowie 20 m für die Seitenwände der Kraftwerkskaverne vorzuhalten, um diese kurzfristig und schnell, ohne größere Stillstandzeiten während des Aushubs einbauen zu können. Diese Maßnahme kann ebenfalls im Sinne einer Rückfallebene oder Reaktionsmöglichkeit im Hinblick auf nicht prognostizierte, ungünstige Gebirgsverhältnisse verstanden werden.

Als Ankertyp ist dabei ein Einstab-Daueranker, doppelt korrosionsgeschützt, mit einem Durchmesser von 63,5 mm, Stahlgüte 555/700 und entsprechend einer Nennlast von 1 MN vorzusehen.

Je nach gewähltem Raster (10-20m²) würde sich dann lokal ein zu den Felsnägeln zusätzlicher Ausbauwiderstand von 50-100kPa ergeben.

3.4.4 Drainage

Zum jetzigen Zeitpunkt sind noch keine genaueren Informationen bezüglich anzutreffendem Bergwasser im Bereich der späteren Kavernenlage verfügbar. Gemäß [Q3] ist der Forbach-Granit jedoch allgemein als gering wasserdurchlässig anzusehen. In [Q1] ist für den Forbach-Granit ein kf-Wert von 10^{-7} bis 10^{-9} m/s angegeben. Vergrußte Granitbereiche zeigen dabei die gleichen Wasserdurchlässigkeiten wie unverwitterter Granit. Durch die Vergrußungszonen im Granit findet somit keine Erhöhung der Durchlässigkeit statt. Der bauzeitliche Wasseranfall für die Kaverne ist mit 6-20 l/s angegeben. Etwaiges anfallendes Bergwasser ist durch entsprechende Drainagebohrungen abzuleiten und das Gebirge entsprechend im unmittelbaren Kavernenumfeld zu drainieren. Identifizierte wasserführende Klüfte/Scherzonen sollten dabei gezielt angebohrt werden. Eventuell kann über Injektionen dieser Elemente nachgedacht werden, um eine dauerhafte Durchströmung

zu vermeiden, die langfristig zu einer Reduktion der Standfestigkeit des betroffenen Gebirges führen könnte.

3.4.5 Messtechnik

Der Ausbruch der Kraftwerkskaverne soll von einem Messprogramm mit entsprechend eingerichteten Messquerschnitten begleitet werden. Beim Ausbruch der Kraftwerkskaverne soll die Beobachtungsmethode angewendet werden, d. h. die Messwerte sind kontinuierlich zu erfassen und mit Erwartungswerten zu vergleichen. Bei Abweichungen muss der Planer eine Bewertung durchführen. Die Kavernenwände sind nach jedem Ausbruch detailliert zu kartieren und aufzunehmen, sowie die Verformungen durch Extensometermessungen und Konvergenzmessungen zu verfolgen. Bei Abweichungen zwischen den Mess- und den Prognosewerten kann so rechtzeitig eingegriffen und die Felssicherungsmaßnahmen ggf. angepasst werden. Als mögliche Zusatzmaßnahmen im Rahmen von Reaktionsmöglichkeiten auf nicht prognostizierte, ungünstige Gebirgsverhältnisse kann der Einsatz von Vorspannankern, eine Verstärkung der Felsnagelsicherung (Reduzierung des Ankerrasters), sowie eine Verstärkung des Spritzbetons erfolgen. Anzumerken ist hierbei, dass der Spritzbeton in der bisherigen Betrachtung rein konstruktiv und nicht statisch angesetzt wurde. Der statische Ansatz des Spritzbetons stellt somit eine weitere mögliche Rückfallebene und zusätzliche Sicherheit dar.

Zur Kontrolle und Überwachung der Kavernendeformation während und nach der Aushubphase werden verschiedene messtechnische Verfahren zur Anwendung kommen. Neben Extensometern zur Überwachung von Verschiebungen werden Anker mit Kraftmessdosen ausgerüstet sowie Konvergenzmessprofile eingerichtet. Ein vorläufig angedachtes Messprogramm sieht wie folgt aus:

Extensometer

- | | |
|-----------------------------|--|
| Stirnwand KT SBW: | - zwei 4-fach-Extensometer an der OW-Wand auf Höhe Kranbahn- und Maschinenhausflur, Länge 25 m, |
| pro Messquerschnitt KT SBW: | - je drei 4-fach-Extensometer in beiden Seitenwänden auf Höhe Kranbahn-, Maschinenhaus- und Turbinenflur, Länge 25 m,
- je drei 4-fach-Extensometer im Kavernendach, Länge 15 m |
| pro Messquerschnitt KT MuW: | - je ein 4-fach-Extensometer in beiden Seitenwänden auf Höhe Kranbahnflur, Länge 15 m,
- je ein 4-fach-Extensometer in Dachmitte, Länge 15 m, |
| Stirnwand KT MuW: | - ein 4-fach Extensometer auf Höhe Krahnbahnflur, Länge 15 m. |

Die Extensometer in den Seiten- und Stirnwänden sind in der jeweiligen Ebene ca. 1,0 m oberhalb des Bodens zu installieren. Für den KT SBW inklusive Kavernenteil Transformatoren sind 3 und für den KT MuW 2 Messquerschnitte angedacht.

Kraftmessdosen

Die Kranbahnanker in den jeweiligen Messquerschnitten sollen mit Kraftmessdosen (KMD) ausgerüstet werden. Der Messbereich der KMD soll bis zur Bruchlast der Anker gehen.

Weiterhin sollen mindestens 10% aller Vorspannanker mit Kraftmessdosen ausgerüstet werden. Nach Möglichkeit sollen sich diese in den oder nahe der Messquerschnitte befinden.

Die Kraftmessdosen zeigen an, ob sich die Ankerkraft planmäßig entwickelt und sie in akzeptablen Grenzen bleibt. Weiterhin kann die Kraftänderung der Anker in eine Verformungsänderung längs des Ankers umgerechnet und so mit den Extensometermessungen verglichen werden.

Konvergenzmessungen

An oder bei jedem Extensometerkopf soll ein Konvergenzmesspunkt angebracht werden. In einer Nische, zum Beispiel in der OW-Stirnwand des Kavernenteils SBW, soll ein Messpfeiler eingebaut werden, von dem aus die Konvergenzmesspunkte eingemessen werden können. Zwischen den Extensometerköpfen in einem Messquerschnitt kann noch ein weiterer Konvergenzmesspunkt eingerichtet werden. In allen kreuzenden Stollen soll in einem Abstand von ca. 3 m von der jeweiligen Wand des Kavernenteils SBW ein Konvergenzmessquerschnitt eingerichtet werden.

Die Konvergenzmessungen werden im Wesentlichen nur während der Bauzeit durchgeführt.

Weitere Beobachtungen

Im Allgemeinen soll der Spritzbeton in regelmäßigen Abständen auf mögliche Rissbildung untersucht werden. Eventuell auftretende Risse sind zu kartieren und ihre mögliche Entwicklung ist zu verfolgen. Hierzu können auch Gipsmarken oder Risspione verwendet werden.

Die anfallenden Sickerwassermengen sind ebenfalls zu erfassen. Die Rohre, Rinnen, Messwehre, etc. sind in die späteren Betonstrukturen der entsprechenden Kavernenteile zu integrieren.

Lokal können Piezometer eingebaut werden, um den Wasserdruck im Gebirge in verschiedenen Entfernungen von der Kraftwerkskaverne zu erfassen. Da von undurchlässigem Gebirge ausgegangen wird, fallen etwaige Piezometer in den Bereich von Zusatz- /Notfallmaßnahmen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt wird nicht davon ausgegangen, dass der Einbau von Piezometern nötig wird.

Das aufgezeigte Überwachungsprogramm stellt einen Mindestumfang dar, der gegebenenfalls erweitert werden kann.

3.5 Festlegung von Ausbruch und Sicherung

Es wird davon ausgegangen, dass der KT SBW und KT MuW generell nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT) aufgefahen werden. Die Vorgaben der Landesbergdirektion zu Untertagearbeiten (z. B. Tunnelsicherheit) sind dabei zusätzlich zu beachten.

3.5.1 Ausbruchs- und Sicherungsreihenfolge

Für den Kavernenaushub wird voraussichtlich der spätere Energieableitungs- und Fluchtstollen als Zugang zur Firste etwa auf Kote 282 ü NN genutzt. Ausgehend von diesem Stollen wird die Kalotte

zunächst in Richtung KT SBW aufgefahren. Der Kalottenaushub erfolgt typischerweise in 3 Teilausbrüchen mit einem Pilotstollen. Für die erwartet sehr guten Gebirgsverhältnisse im Forbach-Granit kann der Aushub jedoch voraussichtlich auch nur in 2 Teilausbrüchen bzw. evtl. sogar über die komplette Breite erfolgen. Letzteres hätte den Vorteil, dass im gesamten Bereich bereits die endgültige Felssicherung eingebaut werden kann. Für den Fall, dass der Aushub in Teilausbrüchen vorgenommen wird, muss ansonsten in den jeweiligen (temporären) Seitenwänden zunächst eine temporäre Sicherung, bestehend aus Spritzbeton und Reibrohrankern (z. B. Swellex, Split-set), eingebaut werden. Im Kavernendach sollen an den vorgesehenen Positionen frühestmöglich die Extensometer eingebaut werden. Dies erlaubt die frühzeitige Überwachung des Gebirgsverhaltens in der Kalotte.

Der Einbau der Felssicherung sollte wie folgt ablaufen:

Während des Auffahrens der Kalotte bzw. der Aufweitung auf die volle Breite soll die komplette Sicherung nicht weiter als 8 m von der Ortsbrust entfernt sein, d. h., nach einem Abschlag von 4 m sind zumindest die erste Lage Spritzbeton sowie die Felsnägel einzubauen. Beim zurückliegenden Abschnitt ist dann die komplette Sicherung einzubauen. Folgende Schritte sind dabei durchzuführen:

- Bohren, Sprengen, Schüttern; Abschlagslänge ≤ 4 m,
- Aufbringen der ersten Lage Spritzbeton,
- kompletter Einbau der Felsnägel (mit Ankerplatte, Nuss und Anspannen auf etwa 5 kN),
- Anbringen der ersten Bewehrungslage und der zweiten Spritzbetonlage,
- Anbringen der zweiten Bewehrungslage und der dritten Spritzbetonlage.

Während des Strossenabbaus sollen nicht mehr als 30 m² ohne Sicherung verbleiben. Sollte der Einbau von Vorspannankern notwendig werden, so sind diese dann einzubauen, wenn die Strosse die jeweilige Kote erreicht. Sie sollen gespannt werden, bevor die temporäre Sohle tiefer als 5 m unterhalb des jeweiligen Vorspannankers ist. Die Felsnägel sollen jeweils sobald wie möglich eingebaut werden.

Beim Strossenabbau soll folgendes Prinzip bzgl. kreuzender Stollen beachtet werden:

- | | |
|-----------|--|
| entweder: | Der kreuzende Stollen soll vollständig ausgebrochen (bis zur jeweiligen Wand der Kraftwerkskaverne) und gesichert sein, bevor der Aushub in der Kraftwerkskaverne etwa einen Stollendurchmesser oberhalb der Stollenfirste angekommen ist. |
| oder: | Der Stollen wird von der Kraftwerkskaverne aus auf eine Strecke von drei Stollendurchmesser aufgefahren, bevor der Strossenaushub in der Kraftwerkskaverne weitergeht. Die Stollen sollen nicht in die offene Kraftwerkskaverne hineingefahren werden! |

Sollten Stollen von der Kraftwerkskaverne aus aufgefahren werden, so kann, je nach angetroffenen Gebirgsverhältnissen, ein zusätzlicher Ring Felsnägel (St 500/550, Durchmesser 32 mm, Länge 8 m) im Abstand von einem Meter vom Stollen-Profil in Achsrichtung des Stollens notwendig werden.

Die erste Variante wird voraussichtlich auf die jeweiligen UW-Stollen Schwarzenbachwerk und Murgwerk zutreffen, sprich, die UW-Stollen werden die Kraftwerkskaverne erreicht haben, bevor der entsprechende Strossenaushub das Niveau des UW-Stollens erreicht hat.

3.5.2 Freie Standzeiten

Die zulässige ungesicherte Fläche ist 5-6 m vertikal und 10 m horizontal. Im Dach können 3-4 m in Achsrichtung bei einer Spannweite von 10 m ungesichert sein. Diese Angaben sind als ungefähre Angaben basierend auf Erfahrungswerten zu verstehen. Die erste Spritzbetonlage soll unmittelbar nach dem Abschlag aufgebracht werden. Die Felsnägel sollen nach spätestens einem Tag eingebaut sein.

3.5.3 Kreuzende Stollen

Stollen, die die Kraftwerkskaverne kreuzen, können durch Gebirge führen, das (laut den obigen Berechnungen) plastifiziert sein kann. Aus diesem Grund sollen die Stollen auf den letzten 10 m vor der jeweiligen Kaverne stärker gesichert werden, als dies allein auf Grund der geologischen Verhältnisse notwendig wäre.

Zusätzlich zur Felssicherung, die aus dem jeweiligen Stollen eingebaut wird, soll aus der Kraftwerkskaverne ein Ring von Felsnägeln um das Profil der Stollen eingebaut werden. Dies sollen Felsnägel, Durchmesser 32 mm, Nennlast 176 kN (unter Berücksichtigung eines Abrostungszuschlages von 4 mm auf den Durchmesser), Länge 8 m, im Abstand von 1 m sein.

Konvergenzmessquerschnitte sollen etwa 3 m von der Wand der Kraftwerkskaverne in dem jeweils kreuzenden Stollen eingebaut werden.

3.5.4 Weitere Details

Alle Felsnägel sind mit Abstandhaltern auszurüsten. Des Weiteren sollen die Anker mit Hilfe von Injektions- und Entlüftungsschläuchen vermörtelt werden. Auf diese Weise soll die vollständige Vermörtelung sichergestellt werden, die die Lasteintragung und den Korrosionsschutz gewährleistet.

Alle Vorspannanker sind Daueranker nach geltenden Vorschriften. Sie können Einstab- oder Litzenanker sein. Beim Einbau der Vorspannanker sind die Bestimmungen des jeweiligen Herstellers und der Zulassungsbescheid zu beachten. Ein nachträgliches Ablassen und Spannen der Anker soll möglich sein. Der Korrosionsschutz des Ankerkopfes soll nach dem Vollausschub der Kraftwerkskaverne fertig gestellt werden. Die in Kapitel 3.4.3 angesprochenen Vorspannanker sollen zu jeder Zeit einsatzbereit auf der Baustelle verfügbar sein, um sie im Notfall schnell einbauen zu können. Das zum Einbau notwendige Gerät soll ebenfalls vorhanden sein.

3.6 Weitere Erkundungen

Die Datengrundlage der Kavernenstatik beruht auf den Erkundungsmaßnahmen, welche für das vorliegende geotechnische und hydrogeologische Gutachten [Q3] durchgeführt wurden sowie Untersuchungen und Auswertungen, die im Nachhinein durchgeführt wurden, um Gesteins-, Trennflächen und Gebirgskennwerte zu verifizieren [Q1], [Q2], [Q4], [Q5].

Neue, für die Kraftwerkskaverne projektspezifische Erkundungsmaßnahmen wurden jedoch bisher nicht durchgeführt, so dass einige Annahmen und Angaben mit Unsicherheiten behaftet sind. So wurde zum Beispiel bisher nur der Firstbereich der Kaverne durch eine Bohrung (KS BK 4) angebohrt und aufgeschlossen. Auch die Werte des E-Moduls des Gebirges beruhen bisher allein auf Aufnahmen und empirischen Überlegungen und sind bisher nicht versuchstechnisch untermauert.

Im Rahmen weiterer Erkundungen gilt es deshalb, weitere projektespezifische Angaben und Kennwerte für die Kraftwerkskaverne zu gewinnen und die vorhandenen Angaben zu verifizieren bzw. zu bestätigen. Auch das Vorhandensein und Ausmaß etwaiger Vergrußungszonen sowie die Gebirgsqualität (GSI, Trennflächen) im Kavernenbereich sollte weiter erkundet werden, um die Prognosesicherheit zu erhöhen. Die Bohrkampagne 2018, welche zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht abgeschlossen war, hat das Ziel, den obig aufgeführten Fragestellungen nachzugehen. Sobald die Ergebnisse dieser Bohrkampagne vorliegen, sollten die Angaben und Kennwerte des Berichtes nochmals überprüft und, fall erforderlich, angepasst werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Felssicherungsmaßnahmen dadurch weiter optimiert werden können.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Die vorläufigen Felssicherungsmaßnahmen, welche aus den durchgeführten keilstatischen und FE-Berechnungen resultieren, sind in nachfolgender Tabelle zusammenfassend dargestellt.

Der Ausbruch der Kraftwerkskaverne soll mit der Beobachtungsmethode erfolgen. Mittels eines umfangreichen Messprogramms soll das tatsächliche Gebirgsverhalten während des Auffahrens der Kraftwerkskaverne erfasst und mit den erwarteten Werten verglichen werden, um bei signifikanten Abweichungen sofort eingreifen und die Felssicherungsmaßnahmen entsprechend anpassen zu können (Ankerraster und/oder Spritzbetondicke).

Die Felssicherungsmaßnahmen, die in Tabelle 22 dargestellt sind, sind aus heutiger Sicht ein pragmatischer und konservativer Ansatz, die entsprechend an neue Erkenntnisse aus weiteren Erkundungen angepasst werden sollten.

Tabelle 22: Vorläufige Felssicherungsmaßnahmen für die Kavernenteile Schwarzenbach- und Murgwerk

	Felsnagel			Vorspannanker			Spritzbeton		Ausbau- widerstand über Anker [kPa]
	Raster [m²]	Nenn- last [kPa]	Länge [m]	Raster [m²]	Nenn- last [kPa]	Länge [m]	Stärke [cm]	Beweh- rung [kg/m²]	
Kavernenteil Schwarzenbachwerk									
Firste	2	176	8		(1000	15)* ¹	20	2 x 3,5	88
Seiten- wände	5	176	8		(1000	20)* ¹	(10-15	2 x 3,5)* ²	35
Stirn- seite	5	176	5				(10-15	2 x 3,5)* ²	35
Kavernenteil Murgwerk									
Firste	2	176	8		(1000	15)* ¹	20	2 x 3,5	88
Seiten- wände	5	176	6				(10-15	2 x 3,5)* ²	35
Stirn- seite	5	176	5				(10-15	2 x 3,5)* ²	35

*1 Die Vorspannanker sind optional für den Fall, dass während des Aushubs lokal weiträumige Vergrußzonen angetroffen werden.

*2 Spritzbeton lokal im Bereich von Vergrußzonen bzw. Gebirgsbereichen mit einem GSI < 70.

Sollten während des Aushubs weiträumige Vergrußzonen entlang von Hauptkluftscharen angetroffen werden, die zur Bildung von größeren Felskeilen (Maximalkeilen) beitragen, so sind diese in der Firste bzw. den Seitenwänden lokal zusätzlich mit Vorspannanker zu sichern.

In den Seitenwänden der Kraftwerkskaverne wird für Gebirgsbereiche mit einem GSI > 70 neben der Sicherung mit Felsnägeln keine zusätzliche Sicherung mit Spritzbeton nötig sein. Die Orientierung der Trennflächen ist für Seitenwände günstig (vgl. 3.2 Keilstatik) sowie die Trennflächenab-

stände ausreichend groß, so dass die Sicherung mit Felsnägeln vollkommen ausreichend ist. Für Gebirgsbereiche mit einem GSI < 70 und dementsprechend geringeren Trennflächenabständen sind die Seitenwände zusätzlich mit einer 10 cm dicken Lage Spritzbeton zu verstärken, um die Kraftwerkskaverne gegen Felskeile bedingt durch das Kleinkluftgefüge zu sichern. Vergrußte Gebirgsbereiche sind dagegen generell zusätzlich mit 15 cm Spritzbeton zu sichern. Gemäß [Q2] und [Q4] wird davon ausgegangen, dass das Gebirge im Kavernenbereich bis maximal 8 % aus vergrußten Gebirgsbereichen (Verwitterung w3-w4) bestehen wird, während für den überwiegenden Kavernenbereich frischer bis mäßig verwitterter Granit mit GSI-Werten > 70 erwartet wird. Es wird somit davon ausgegangen, dass der Großteil der Kavernenwände unverspritzt bleiben kann.

Zum derzeitigen Kenntnisstand weisen vergrußte Gebirgsbereiche keine größeren Wasserdurchlässigkeiten auf als der intakte und unverwitterte Forbach-Granit und sind somit ebenfalls als nur sehr gering wasserundurchlässig anzusehen. Nichtsdestotrotz kann im Rahmen einer Gebirgsverbesserung evtl. auch über Injektionen dieser Bereiche mit Feinstzementen nachgedacht werden.

Zusätzlich zu den Felsnägeln und etwaigen Vorspannankern wird ein Drainagesystem zu installieren sein, um etwaig anfallendes Gebirgswasser abzuleiten und den Aufbau eines Gebirgswasserdruckes auf die Spritzbetonschale zu verhindern. Bei wider Erwarten größerem Wasseranfall können auch Zement-Injektionen notwendig werden.

Abschließend ist anzumerken, dass die durchgeführten keilstatischen Betrachtungen sowie FE-Berechnungen allein auf Kenntnissen und Daten aus den Bohrungen des Erkundungsprogramms beruhen, welches zum damaligen Zeitpunkt für den Neubau Unterstufe noch ein Schachtkraftwerk auf dem Gelände des Rudolf-Fettweis-Werkes favorisiert hatte. Im Rahmen weiterer Erkundungsmaßnahmen gilt es deshalb, die für die Kraftwerkskaverne getroffenen Annahmen und Angaben zu untermauern bzw. zu verifizieren. Sobald entsprechend neue Daten vorliegen, sollten die in diesem Bericht getroffenen Annahmen überprüft und bei Bedarf revidiert werden, um eine abschließende Beurteilung der Felssicherungsmaßnahmen vorzunehmen.