



Teresa Hirschmann, BSc

**Untersuchung des Systemverhaltens einer großen Kaverne unter  
Verwendung eines duktilen Ausbaus**

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer:

O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Wulf Schubert

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität Graz

2. Betreuer

Dipl.-Ing. Dr. Albert Steindorfer

Graz, Juni 2018

---

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

01.06.2018

---

Datum / Date



---

Unterschrift / Signature

## Danksagung

Allen voran möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Dr. Albert Steindorfer danken, der die Idee zu dieser Masterarbeit hatte und mir dabei immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden hat. Ebenso ein danke an alle Mitarbeiter des SBT 2.1, die mir Daten zu Verfügung gestellt haben und mich tatkräftig unterstützt haben.

Danke auch den Mitarbeitern des Felsmechanik und Tunnelbauinstitut der TU Graz, die mir bei großen und kleinen Problemen immer weitergeholfen haben. Besonders Herrn O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Wulf Schubert, der mir immer wertvolle Inputs gegeben hat.

Natürlich geht mein besonderer Dank an meine Familie und Freunde, die mich immer auf meinem Weg unterstützt haben. Für jedes offene Ohr, die vielen Ratschläge, die finanzielle Unterstützung und auch dem Teilen der Freude nach jeder bestandenen Prüfung.

## Abstract

For every tunnel project a support and auxiliary system has to be chosen, that allows a safe and economic way of excavation. The knowledge of the system behaviour is necessary to make a choice of a support system that fits to the ground behaviour and the requirements. The excavation in weak ground under high overburden can lead to large deformations. Therefore, the support has to handle those without being damaged. A ductile support system complies to this requirement.

The target of this thesis is the evaluation of the system behaviour of a big cavern that uses a ductile support. The Semmering base tunnel, a 27,3 km long railway tunnel includes a cavern at the central emergency station. Large displacements were observed during the construction. 2-D Simulations were carried out to clarify following questions:

The issue in the first step was to prove if the ductile support is necessary or not. In the model without ductile elements the shotcrete was overstressed, while no damage was observed with the ductile system. Therefore the ductile system is necessary. This investigation includes the explanation of the function of ductile elements. Eventually the measured displacements were compared to the numerical results. The same behavior of the displacements occurs which is marked by great displacements of the crown.

The influence of the change of the position of the ductile elements was not significant. The base model which consists of four ductile elements was compared to models with three and five ductile elements. The more ductile elements were supplied the more ductile the system behavior became.

The last point of investigation was the consideration of the influence of the lateral pressure coefficient. In case of higher horizontal stresses the crown displacements are higher due to the overstressing of the ground. In case the horizontal primary stresses are smaller than the vertical the rock mass above the crown slightly relaxes. The displacements are small in this area and are larger at the sidewalls. To work against that behaviour a change of the position of the ductile elements would be an option.

## Kurzfassung

Bei jedem Tunnelbauwerk ist das Ausbaukonzept so zu wählen, dass ein sicherer und wirtschaftlicher Vortrieb möglich ist. Damit ein passendes Konzept erstellt werden kann, muss das Systemverhalten bekannt sein. Beim Durchörteren von Störungszonen oder Gebirge mit geringer Qualität, auf die hohe Primärspannungen wirken, können große Verformungen entstehen. Ein duktiler Ausbau ist imstande, diese aufzunehmen ohne dabei zu versagen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung des Systemverhalten einer großen Kaverne unter Verwendung eines duktilen Ausbaus. Abgeleitet von einer ausgeführten Kaverne in der Nothaltestelle des 27,3 km langen Semmering-Basistunnels erfolgen 2-D Simulationen. Diese befassen sich mit folgenden Fragenstellungen:

Als Erstes wird die Notwendigkeit des duktilen Ausbaus untersucht, bei dem kein Versagen der Spritzbetonschale auftritt. Durch das Versagen beim Modell mit steifen Ausbau kann die Notwendigkeit bestätigt werden. Ebenso wird bei dieser Untersuchung die Wirkung der Stauchelemente erklärt und die Verschiebungen des Bauwerks mit den Ergebnissen der Numerik verglichen. Qualitativ wird das gleiche Verschiebungsverhalten beobachtet, welches durch hohe Firstverschiebungen geprägt ist.

Die Änderungen am Systemverhalten, die aufgrund der Variation der Lage der Stauchelemente entstehen, sind von eher untergeordneter Bedeutung. Zusätzlich zum Basismodell (4 Stauchelemente) wurden zwei Vergleichsmodelle mit drei und fünf Stauchelementen simuliert. Je mehr Stauchelemente eingebaut wurden, desto duktiler verhielt sich das System.

Die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Seitendruckbeiwerte führt bei höheren horizontalen Primärspannungen zu höheren Firstsetzungen, die aufgrund der lokalen Überbeanspruchung des Gebirges entstehen. Sind die horizontalen Primärspannungen kleiner als die Vertikalen, wird das Gebirge über der Firste entlastet. Die Verschiebungen in diesem Bereich sind gering und erhöhen sich im Kämpferbereich. Um diesem Verhalten entgegen zu wirken, kann eine Änderung der Lage der Stauchelemente erfolgen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung / Ziel der Arbeit</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Projektbeschreibung</b>	<b>2</b>
2.1	Überblick .....	4
2.1.1	Tunnel Gloggnitz .....	4
2.1.2	Tunnel Fröschnitzgraben .....	5
2.1.3	Zwischenangriff Grautschenhof .....	6
2.1.4	Portalbaustelle Mürzzuschlag .....	7
2.2	Zwischenangriff Fröschnitzgraben .....	7
2.2.1	Aufbau der NHS .....	7
2.2.2	Bauausführung der NHS .....	8
2.2.3	Längskaverne .....	9
2.2.3.1	<i>Geometrie</i> .....	10
2.2.3.2	<i>Geologie</i> .....	11
2.2.3.3	<i>Ausbau</i> .....	12
2.2.3.4	<i>Verschiebungsentwicklung in der Längskaverne</i> .....	13
<b>3</b>	<b>Numerische Simulation</b>	<b>14</b>
3.1	RS <sup>2</sup> .....	14
3.2	Gebirgskennwerte .....	14
3.3	Primärspannungszustand .....	15
3.4	Geometrie .....	15
3.5	Netzparameter und Randbedingungen .....	16
3.6	Ausbau .....	17
3.6.1	Spritzbeton .....	18
3.6.2	Stachelemente .....	18
3.6.2.1	<i>Funktionsweise</i> .....	19
3.6.2.2	<i>Arbeitslinie</i> .....	20
3.6.2.3	<i>Implementierung der Stachelemente in RS<sup>2</sup></i> .....	21
3.6.3	Anker .....	22
3.7	Bauablauf .....	23

<b>4</b>	<b>Numerik - Modelle, Ergebnisse, Interpretation</b>	<b>27</b>
4.1	Duktiler - steifer Ausbau .....	28
4.1.1	Modellbeschreibung .....	28
4.1.2	Ergebnisse und Interpretation.....	28
4.1.2.1	<i>Versagen der Spritzbetonschale</i> .....	29
4.1.2.2	<i>Firstverschiebungen</i> .....	29
4.1.2.3	<i>Plastische Zone</i> .....	31
4.2	Variation der Lage und Anzahl der Stauchelemente.....	32
4.2.1	Modellbeschreibung .....	32
4.2.2	Ergebnisse und Interpretation.....	33
4.2.2.1	<i>Verschiebungsvektoren</i> .....	33
4.2.2.2	<i>Gesamt- und Radialverschiebungen</i> .....	35
4.2.2.3	<i>Gebirgsverformungen in Ausbruchsnähe</i> .....	36
4.2.2.4	<i>Plastische Zoen</i> .....	38
4.2.2.5	<i>Gebirgsverformungsbild in großer Distanz zum Ausbruch</i> ..	38
4.2.2.6	<i>Spannungen (Sigma 1 - Hauptnormalspannung)</i> .....	39
4.3	Änderung des $K_0$ -Werts.....	41
4.3.1	Modellbeschreibung .....	41
4.3.2	Ergebnisse und Interpretation.....	42
4.3.2.1	<i>Gesamt- und Radialverschiebungen</i> .....	42
4.3.2.2	<i>Gebirgsverformungen in Ausbruchsnähe</i> .....	44
4.3.2.3	<i>Horizontale Gebirgsverformung</i> .....	46
4.3.2.4	<i>Plastische Zonen</i> .....	47
4.3.2.5	<i>Gebirgsverformungsbild in großer Distanz zum Ausbruch</i> ..	50
4.3.2.6	<i>Spannungen (Sigma 1 - Hauptnormalspannung)</i> .....	53
4.3.2.7	<i>Änderung des Ausbaus bei <math>K_{0,7}</math></i> .....	55
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>57</b>
	<b>Literatur</b>	<b>58</b>
	<b>Anhang A - Pre-Relaxation Factor</b>	<b>60</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verlauf des baltisch-adriatischen Korridors und der Südstrecke (dunkelblau) (Plank & Poimer, 2017).....	3
Abbildung 2: Verlauf des Semmering-Basistunnels (Gobiet et al., 2017).....	4
Abbildung 3: Zwischenangriff Göstritz (Haas et al., 2017).....	5
Abbildung 4: Zwischenangriff Grautschenhof (Klais et al., 2017).....	6
Abbildung 5: Anbindung an den Bahnhof Mürzzuschlag (Gobiet, 2017).....	7
Abbildung 6: Grundriss der Nothaltestelle. (ÖBB Infra-1, 2016). ....	8
Abbildung 7: Verschneidungsbereich LK West und QK 2. (Foto: ÖBA SBT 2.1). ....	9
Abbildung 8: Auszug aus dem tunnelbautechnischen Rahmenplan der NHS, rot eingerahmt der untersuchte Bereich (ÖBB Infra-1, 2016). ....	10
Abbildung 9: Ausbruchsquerschnitt mit Innenausbau im Betriebszustand (ÖBB Infra-2, 2016) .....	11
Abbildung 10: Auszug aus der geotechnischen Prognose. (ÖBB Infra, 2014).....	11
Abbildung 11: Ausbau der Längskaverne nach dem Ausbruch der Kalotte (Foto: ÖBA SBT 2.1).....	12
Abbildung 12: Gemessene vertikale Verschiebungen bei TM 176,00 (ÖBB Infra, 2018)..	13
Abbildung 13: Geometrie des Ausbruchs, unterteilt in Kalotte, Strosse und Sohle; Lage der 4 Stauchelemente (blau).....	16
Abbildung 14: Stauchelemente im eingebauten Zustand, 4 Stauchrohre, mit zwei unterschiedlichen Längen (Foto: ÖBA SBT 2.1).....	19
Abbildung 15: Schnitt durch ein gestauchtes LSC Element (Schubert, 2006). ....	20
Abbildung 16: Arbeitslinie der getesteten LSC (Schubert, 2006).....	21
Abbildung 17: Ablauf der Simulation (1): links oben: Primärspannungszustand, rechts oben: Ausbruch der Kalotte - $p_i = 100\%$ , links in der Mitte: Reduktion auf $p_i = 40\%$ , rechts in der Mitte: Einbau Spritzbeton (Frühfestigkeit) und Stauchelemente, links unten: Reduktion auf $p_i = 0\%$ , Spritzbeton erreicht Endfestigkeit, rechts unten: Ausbruch der Strosse - $p_{i,abg} = 100\%$ . ....	24

Abbildung 18: Ablauf der Simulation (2): links oben: Reduktion auf $p_{i,abg} = 40 \%$ , rechts oben: Einbau Spritzbeton (Frühfestigkeit), links in der Mitte: Reduktion auf $p_{i,abg} = 0 \%$ , Spritzbeton erreicht Endfestigkeit, rechts in der Mitte: Ausbruch der Sohle - $p_{i,abg} = 100 \%$ , links unten: Reduktion auf $p_{i,abg} = 40 \%$ , rechts unten: Einbau Spritzbeton (Frühfestigkeit). .....	25
Abbildung 19: Modell im Endzustand: Reduktion auf $p_{i,abg} = 0 \%$ , Spritzbeton erreicht Endfestigkeit. ....	26
Abbildung 20: Eingabeparameter und Auswertung der Spannungen an der Ulme mithilfe der Formeln nach Feder, Radialspannung (blau), Tangentialspannung (rot).....	28
Abbildung 21: Versagen der Spritzbetonschale (in rot dargestellt) bei Msteif, links: nach dem Kalottenausbruch, rechts: im Endzustand .....	29
Abbildung 22: Horizontale Verschiebungen im Endzustand, links: S4K1, rechts: Msteif...	30
Abbildung 23: Vergleich S4K1 (links) und Msteif (rechts), oben: vertikale Verschiebungsvektoren , unten: vertikale Gebirgsverformung. ....	30
Abbildung 24: Gemessene vertikale Verschiebungen am Bauwerk zufolge des Kalottenvortriebs (ÖBB Infra, 2017). ....	31
Abbildung 25: Plastische Zone (in rot dargestellt) mit Angabe der horizontalen Distanz vom Ausbruchsrund, links: Msteif, rechts: S4K1. ....	32
Abbildung 26: Variation der Lage und Anzahl der Stauchelemente der Modelle. ....	33
Abbildung 27: Verschiebungsvektoren bei S4K1 im Endzustand. ....	34
Abbildung 28: Gesamtverschiebungen von S3 (blaue Linien), S4K1 (orange-rote Linien) und S5 (grüne Linien) nach dem Kalottenausbruch und im Endzustand. ....	36
Abbildung 29: Gesamtverformungen des Gebirges in Ausbruchsnähe, oben: S3, Mitte: S4K1, unten: S5.....	37
Abbildung 30: Darstellung der Horizontalverformungen von der Ulme weg.....	38
Abbildung 31: Darstellung der Hauptnormalspannungen (dunkelblau 0 MPa, rot 17 MPa), oben: S3, Mitte: S4K1, unten: S5. ....	40
Abbildung 32: Verschiebungsvektoren im Endzustand, oben: K0,7, Mitte: S4K1, unten: K1,3. ....	43
Abbildung 33: Gesamtverschiebungen von K0,7 (blaue Linien), S4K1 (orange-rote Linien) und K1,3 (grüne Linien) nach dem Ausbruch der Kalotte und im Endzustand.....	44
Abbildung 34: Darstellung der Gebirgsverformungen in Ausbruchsnähe, oben: K0,7, Mitte:	

---

S4K1, unten: K1,3.....	45
Abbildung 35: Darstellung der horizontalen Gebirgsverformungen, oben: K0,7, Mitte: S4K1, unten: K1,3.....	46
Abbildung 36: Ausbildung der plastischen Zonen, oben: K0,7, Mitte: S4K1, unten: K1,3.	48
Abbildung 37: Ausbildung der plastischen Zone im gestützten Zustand ( $p_i=40\%$ ), oben: S4K1, unten: K1,3.....	49
Abbildung 38: Gesamtverformungen im Gebirge bei K0,7. ....	50
Abbildung 39: Gesamtverformungen im Gebirge bei S4K1. ....	51
Abbildung 40: Gesamtverformungen im Gebirge bei K1,3. ....	52
Abbildung 41: Verlauf der radialen Verformungen ausgehend von der Firste und Ulme bei Modell K1,3.....	52
Abbildung 42: Darstellung der Hauptnormalspannungen (dunkelblau 0 MPa, rot 17 MPa), Oben: K0,7, Mitte: S4K1, Unten: K1,3.....	54
Abbildung 43: Horizontale Verschiebungen von K0,7 beim Modell mit 4 Stauchelementen. ....	55
Abbildung 44: Horizontale Verschiebungen von K0,7 mit 3 Stauchelementen .....	56
Abbildung 45: Gesamtverschiebungen von K0,7 bei 3 Stauchelementen (grüne Linien) und bei 4 Stauchelementen (blau). ....	56

---

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gebirgskennwerte .....	14
Tabelle 2: Steifigkeits- und Festigkeitsparameter des Spritzbetons.....	18
Tabelle 3: Errechnete Primärspannungen bei unterschiedlichen $K_0$ -Werten.....	42

---

# Abkürzungen

SBT .....Semmering-Basistunnel

NHS .....Nothaltestelle

LK .....Längskaverne

QK .....Querkaverne

TVM.....Tunnelvortriebsmaschine

GA .....Gebirgsart

TM .....Tunnelmeter

MQ.....Messquerschnitt

GVT .....Gebirgsverhaltenstyp

$p_i$  .....Innendruck (in % der Primärspannungen)

$p_{i,abg}$  .....Innendruck (in % der abgeminderten Primärspannungen )

# 1 Aufgabenstellung / Ziel der Arbeit

Bei der Durchörterung von Störungszonen kommt es oft zu großen Verformungen. Trotz einer starken Überbeanspruchung des Gebirges, bedingt durch ein hohes Spannungsniveau in Kombination mit schlechter Gebirgsqualität, muss ein sicherer und wirtschaftlicher Vortrieb gewährleistet sein. Die Wahl des Ausbaukonzepts spielt dabei eine große Rolle.

Die Anwendung von Stauchelementen ist heutzutage Stand der Technik. Berechnungsmethoden zur Auslegung der Elemente sind jedoch nicht weit verbreitet. (Radončić & Schubert, 2011) Ebenso verhält es sich mit praxisnahen numerischen Simulationen zu diesem Thema. Diese Arbeit soll deshalb Anregungen zur Wahl des Ausbaukonzeptes in einem stark beanspruchten Gebirge geben.

Im Falle einer starken Überbeanspruchung empfiehlt sich ein Ausbau, der Verformungen soweit zulässt, dass keine Schäden an der Auskleidung entstehen und die Spannungen kontrolliert begrenzt werden. Diese Arbeit untersucht deshalb das Systemverhalten einer Kaverne mit großem Ausbruchsquerschnitt. Bei dieser erfolgt der Ausbau duktil. Dabei wird analysiert, welchen Einfluss die Stauchelemente auf das Systemverhalten haben. Zusätzlich werden deren Lage und Anzahl variiert und diskutiert, welche möglichen Veränderungen sich aufgrund unterschiedlicher Seitendruckbeiwerte ergeben.

Beim Bauprojekt des Semmering-Basistunnels werden in der Nothaltestelle (NHS) des Bauloses Fröschnitzgraben Kavernen ausgebrochen. Anhand einer dieser Kavernen, die duktil ausgebaut wurde, wird ein Modell erstellt und 2-D Simulationen durchgeführt. Zusätzlich werden die Verschiebungen der ausgeführten Kaverne betrachtet und mit den Ergebnissen der Simulation verglichen.

## 2 Projektbeschreibung

Ein Projekt der Österreichischen Bundesbahnen Infrastruktur AG (ÖBB), das bis zum Jahr 2026 realisiert werden soll, ist der Bau bzw. der Ausbau der "Südstrecke". Darunter versteht man den durch Österreich verlaufenden Teil des baltisch-adriatischen Korridors. Dieser umfasst ein Netzwerk aus Trassen, die das Eisenbahnnetzwerk im Osten von Europa durch eine Nord-Süd-Verbindung - von Polen bis in den Norden Italiens - leistungsfähiger machen.

Ab der Grenze Österreichs führen ein Ast von Tschechien und einer von der Slowakei bis nach Wien, wo diese zusammentreffen. Im darauffolgenden Abschnitt - von Wien bis Bruck an der Mur - befindet sich das Bauprojekt des Semmering-Basistunnels (SBT). In Bruck an der Mur teilt sich die Strecke in die bereits bestehende Trasse, die über den Neumarkter Sattel nach Klagenfurt verläuft und dort mit dem über Graz führenden Ast zusammentrifft. Dieser schließt die Koralmbahn ein, die sich momentan im Bau befindet. Von Klagenfurt weg führt die Trasse vorbei an Villach bis zur italienischen Grenze. Zusätzlich wird die Verbindung nach Slowenien durch die Strecke von Graz nach Spielfeld ausgebaut. (Plank & Poimer, 2017)

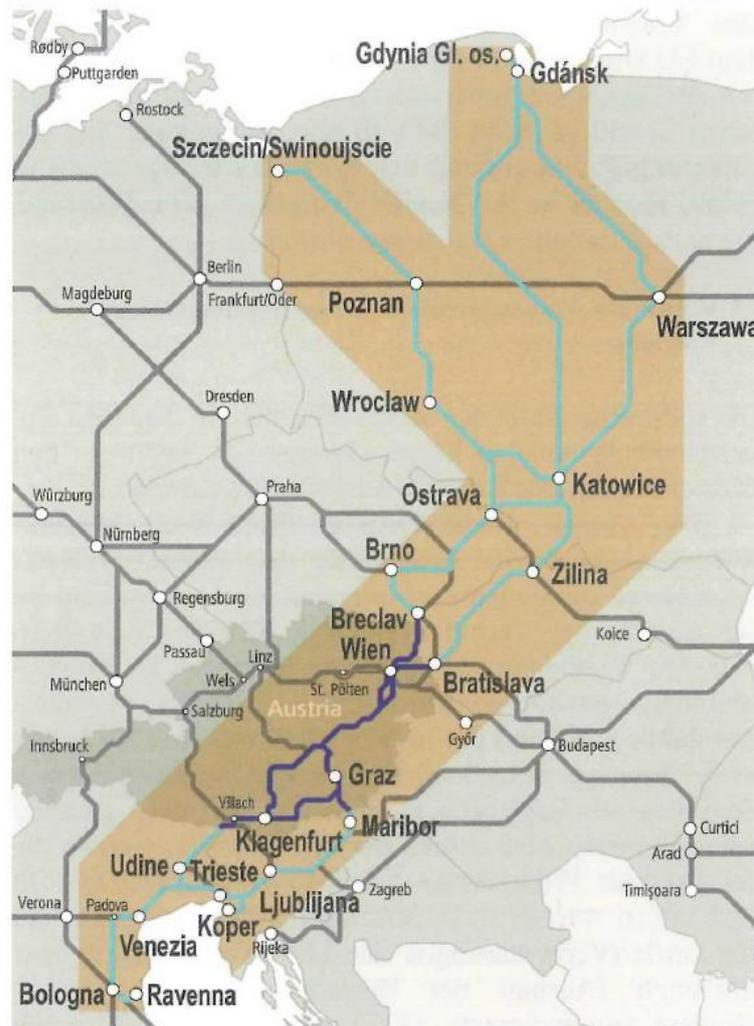


Abbildung 1: Verlauf des baltisch-adriatischen Korridors und der Südstrecke (dunkelblau) (Plank & Poimer, 2017)

Der SBT wird ein Teil der Hochleistungsstrecke *Wien Südbahnhof - Spielfeld / Strass* sein. Die Fahrzeit von Wien nach Graz reduziert sich damit von 2:35 Stunden auf 1:50 Stunden. (Plank & Poimer, 2017) Die momentan genutzte "Ghega-Strecke" der Semmeringbahn, dessen enge Kurvenradien wartungsintensiv sind und die durch das starke Gefälle nur bedingt für den Güterverkehr geeignet ist, wird somit im Fernverkehr durch den Tunnel ersetzt. Die unter UNESCO Weltkulturerbe stehende Semmeringbahn, wird damit entlastet und kann für den Tourismus und als Ausweichroute im Falle von Tunnelwartungen genutzt werden.

Mit einer Länge von 27,3 km wird der SBT zu einer der längsten Tunnelbaustrecken in Österreich zählen. Diese verbindet dann das niederösterreichische Gloggnitz mit dem steirischen Mürzzuschlag. Der schematische Verlauf der beiden eingleisigen Streckenröhren, die alle 500 Meter durch Querschläge verbunden sind, ist in Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: Verlauf des Semmering-Basistunnels (Gobiet et al., 2017).

## 2.1 Überblick

Für die Ausführung des Tunnelprojekts wurden die geologischen Verhältnisse und die Randbedingungen berücksichtigt und dementsprechend in die Baulose SBT 1.1 Tunnel Gloggnitz, SBT 2.1 Tunnel Fröschnitzgraben, SBT 3.1 Tunnel Grautschenhof und den Portalbereich Mürzzuschlag unterteilt. (Gobiet et al., 2017) Die Baulose umfassen folgende Bauwerke:

- Portalbereich Gloggnitz (SBT 1.1)
- Zwischenangriff Göstritz (SBT 1.1)
- Zwischenangriff Fröschnitzgraben (SBT 2.1)
- Deponie Longsgraben (SBT 2.1)
- Zwischenangriff Grautschenhof (SBT 3.1)
- Portalbereich Mürzzuschlag

Der im weiteren Verlauf der Arbeit untersuchte Bereich ist Teil des Zwischenangriffs Fröschnitzgraben. Es wird im Folgenden ein kurzer Überblick über alle Bauwerke gegeben und dann im Speziellen auf den Zwischenangriff Fröschnitzgraben eingegangen.

### 2.1.1 Tunnel Gloggnitz (Haas et al., 2017)

Das Baulos des Tunnels Gloggnitz umfasst den Zwischenangriff Göstritz und die Portalbaustelle Gloggnitz. Bereits von 2012 bis 2014 fand der Umbau des Bahnhofs Gloggnitz statt, um einen schienengebundenen Abtransport des Ausbruchmaterials zu ermöglichen. Außerdem wurde eine Baustraße zum Zwischenangriff (ZA) Göstritz angelegt, um den Verkehr in der Gemeinde Maria Schutz zu entlasten.

Der Zwischenangriff Göstritz befindet sich im Nahbereich der Graßberg-Schlagl-Störung. Der über die gesamte Länge zyklisch ausgeführte Vortrieb beträgt 7,4 km je Streckenröhre. Mit Hilfe eines geologischen Erkundungsprogramms wurde ein komplexes Schachtkavernensystem entwickelt, das die geologischen Gegebenheiten und die bauleistungsanforderungen berücksichtigt. Durch den Einfluss von gestörten Bereichen, erfolgte eine Adaptierung des Schachtkavernensystems. Abbildung 3 zeigt das ausgeführte System.

Zuerst wurde ein rund 1000 Meter langer Zugangstunnel aufgeföhren, der zum Schachtkomplex föhrt. Dieser befindet sich auf zwei Ebenen. Von dort aus wurden zwei 250 Meter tiefe Schächte auf Tunnelniveau abgeteuft. Die Ver- und entsorgung der Streckenvortriebe erfolgt über die Schächte und den Zugangstunnel.

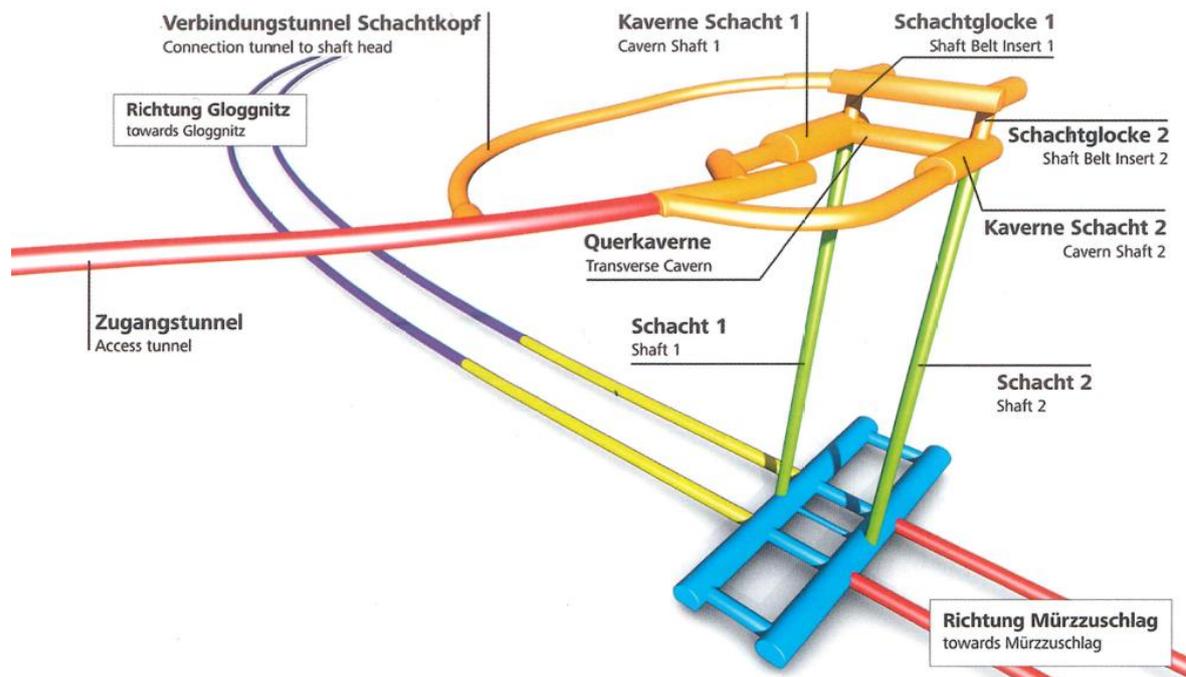


Abbildung 3: Zwischenangriff Göstritz (Haas et al., 2017).

### 2.1.2 Tunnel Fröschnitzgraben (Nipitsch & Pacher, 2017)

Der Zwischenangriff Fröschnitzgraben befindet sich in etwa in der Mitte des Tunnelbauwerks. Auf diesen wird im Unterpunkt 2.2 detailliert eingegangen.

Die Errichtung der Deponie Longsgraben ist ebenso Teil des Bauloses. Das Ausbruchsmaterial des Tunnels Fröschnitzgraben wird über ein Förderband direkt von den Schachtköpfen bis zur Abwurfstelle der Deponie befördert. Das Ausbruchsmaterial der anderen Baulose wird mittels LKW zur Deponie gebracht, dessen Fassungsvermögen

rund 5 Mio. m<sup>3</sup> beträgt. Die Einlagerung des gesamten Ausbruchsmaterial erfolgt getrennt in "Bodenaushub" und "Baurestmasse".

Die Vorarbeiten für die Errichtung der Deponie wurden bereits vor Baubeginn der Tunnel fertiggestellt. Diese umfassen Arbeiten, wie etwa die Errichtung einer Zufahrt zur Deponie und einer Baustraße, die eine direkte Verbindung zur Schnellstraße ermöglicht, um den LKW Verkehr in Steinhaus am Semmering zu vermeiden.

### 2.1.3 Zwischenangriff Grautschenhof (Klais st al., 2017)

Der Zwischenangriff Grautschenhof liegt im Fröschnitztal - nahe Müzzschlag - und ist durch komplexe Baugrundverhältnisse geprägt, die umfangreiche Injektionsmaßnahmen erfordern. Zusätzlich dazu wird der Vortrieb der beiden rund 100 Meter tiefen Schächte, der drei Querkavernen (Abbildung 4) und der vier Streckenvortriebe durch ein umfangreiches Monitoring-Programm begleitet. Damit können übertägige Zwangspunkte, wie die Hochdruckgasleitungen, kontrolliert und Schäden an diesen vermieden werden.

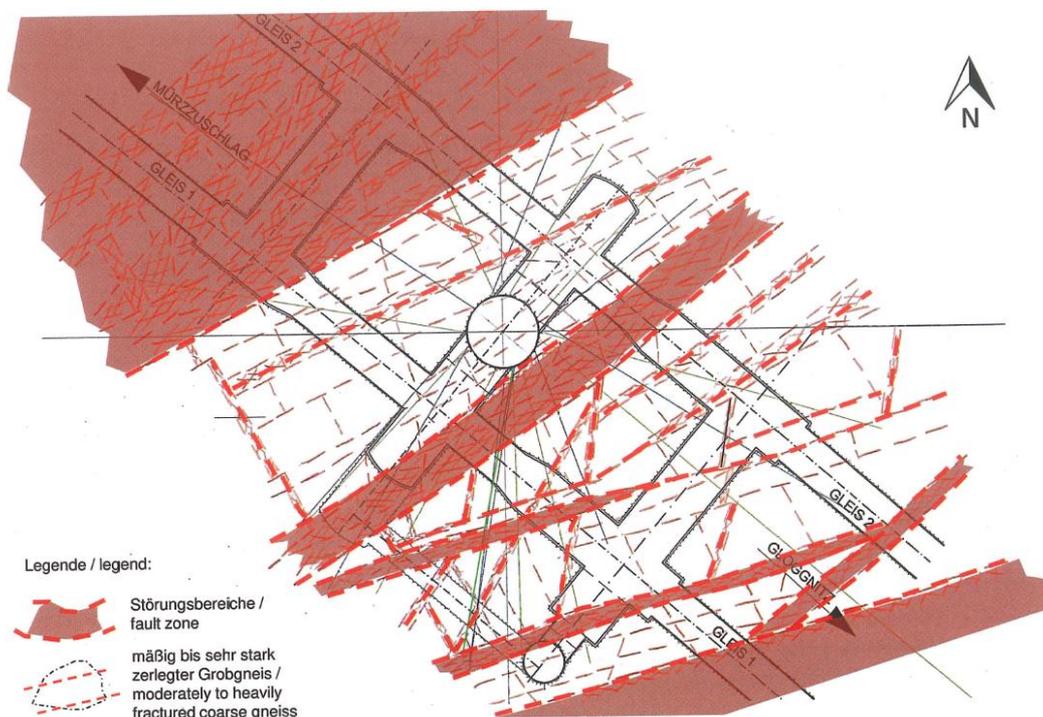


Abbildung 4: Zwischenangriff Grautschenhof (Klais st al., 2017).

Die Streckenröhren werden über die gesamte Länge zyklisch aufgeföhren und umfassen je Streckenröhre eine Länge von knapp 4 km in Richtung Gloggnitz bis zur Baugrenze von SBT 2.1 und eine Länge von 3 km in Richtung Müzzschlag. Die mittlere der drei Querkavernen bleibt im Betriebszustand als Querschlag erhalten.

### 2.1.4 Portalbaustelle Mürzzuschlag

Um den Höhenunterschied zwischen Mürzzuschlag und Gloggnitz so gering wie möglich zu halten, wurde die Neubautrasse im Portalbereich so tief gelagert, dass die "Ghega-Strecke" sie überquert. Die Ausführung im Querungsbereich wird durch eine rund 170 Meter lange Unterwerfung bewerkstelligt. Diese ist in Abbildung 5 dargestellt. Danach erfolgt die Sicherung der offenen Strecke mit Hilfe von Bohrfahlwänden und Stützmauern, bis die Neubaustrecke an den Bahnhof Mürzzuschlag angebunden ist. (Gobiet, 2017)

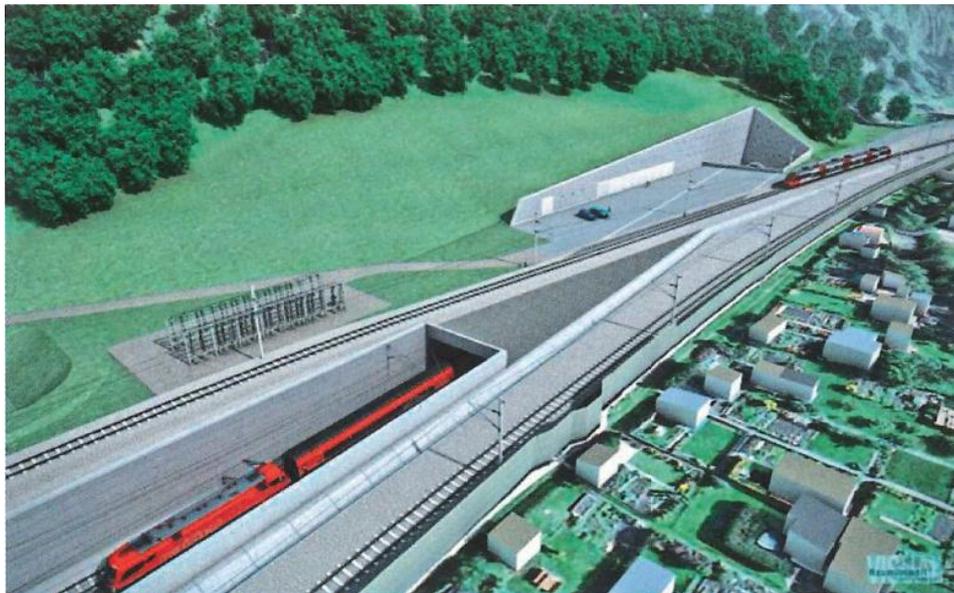


Abbildung 5: Anbindung an den Bahnhof Mürzzuschlag (Gobiet, 2017).

## 2.2 Zwischenangriff Fröschnitzgraben

Zwei rund 400 Meter tiefe Schächte münden in die, vom Schachtfuß aus zyklisch aufgefahrene Nothaltestelle (NHS). Auf rund 16.000 m<sup>2</sup> Fläche entsteht ein komplexes Stollensystem, das in der Bauphase für den Baubetrieb notwendig ist. Von der NHS aus wird der 8,6 km lange maschinelle Vortrieb Richtung Gloggnitz und der 4,3 km lange zyklische Vortrieb Richtung Mürzzuschlag gestartet. Die Schächte und die NHS bleiben in der Betriebsphase erhalten und werden um ein Betriebs- und Lüftungsgebäude beim Schachtkopf erweitert. (Nipitsch & Pacher, 2017)

### 2.2.1 Aufbau der NHS

Der Grundriss der NHS wird in Abbildung 6 gezeigt. Der Schacht Fröschnitz 1 (größerer Kreis) mündet in die Längskaverne (LK), der Schacht Fröschnitz 2 (kleinerer Kreis) in die Querkaverne (QK) 2. Die drei Querkavernen verlaufen von Nord nach Süd. Die

Längskaverne, die in der Mitte der beiden Streckenröhren situiert ist, geht am östlichen und westlichen Ende in den Rettungsraum über. Dabei verringert sich der Querschnitt. Die Verbindungsstollen, quer zu den Streckenröhren verlaufend, sind Fluchtstollen oder Absaugstollen. Da der maschinelle Vortrieb Richtung Gloggnitz gleisgebunden stattfindet, fahren die Züge während der Bauphase von der LK in den Rettungsraum und von dort über die Logistikstollen zu den jeweiligen Streckenröhren.

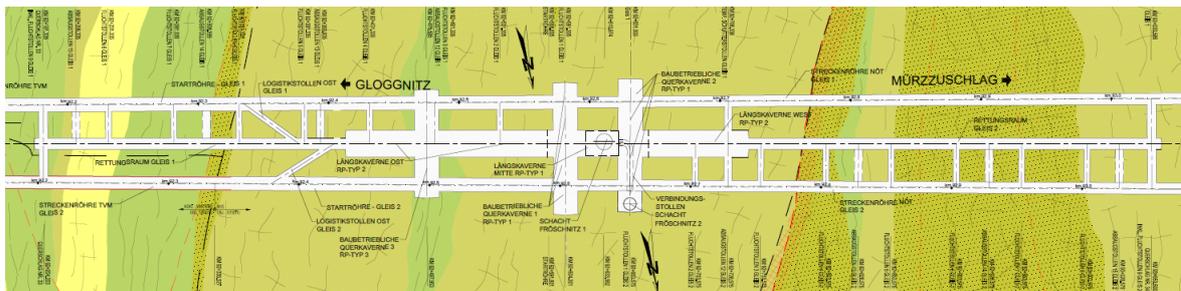


Abbildung 6: Grundriss der Nothaltestelle. (ÖBB Infra-1, 2016).

Im Betriebszustand kann über die NHS eine Evakuierung von der Streckenröhre, in der die Störung auftritt, über einen der Fluchtstollen in den Rettungsraum erfolgen. Analog dazu kann danach durch einen weiteren Fluchtstollen die Evakuierung über die andere Streckenröhre erfolgen. Die Regelung der Be- und Entlüftung erfolgt mit Hilfe der Absaugstollen, ebenfalls quer zu den Tunnelröhren angelegt. (Nipitsch & Pacher, 2017)

In der Bauphase erfolgt die gesamte Materialver- und entsorgung der Vortriebe über die beiden Schächte, die einen lichten Durchmesser von 8,5 m und 11 m haben. In der NHS finden baulogistische Tätigkeiten statt, wie der Aufbau der Tunnelvortriebsmaschine (TVM), dessen Verschub in die Streckenröhren und die Materialaufbereitung. (Nipitsch & Pacher, 2017)

### 2.2.2 Bauausführung der NHS

Bevor der Vortrieb der Längs- und Querkavernen beginnen konnte, wurden die Schächte bis auf Tunnelniveau abgeteuft und durch einen Pilotstollen miteinander verbunden. Wenn einer der beiden Schächte ausfallen sollte, kann so die Versorgung über den anderen sichergestellt werden. (Nipitsch & Pacher, 2017)

Danach wurden die Längskaverne und die Querkavernen 1 und 2 in Teilquerschnitten aufgeföhren. Da in der Längskaverne West der Bunker für die Materialaufbereitung situiert ist und in der Längskaverne Ost die TVMs aufgebaut werden, umfassen deren Querschnitte eine Ausbruchsfläche von rund 300 m<sup>2</sup> (Abbildung 7).



Abbildung 7: Verschneidungsbereich LK West und QK 2. (Foto: ÖBA SBT 2.1).

Zusätzlich zu den Kavernen wurden in der Phase der Herstellung der NHS die Streckenröhren, die Flucht- und Absaugstollen und die Querschläge aufgeföhren und alle Kavernen fertiggestellt. Nach dem Einrichten der, für die Baulegistik notwendigen Anlagen, die der Materialver- und entsorgung dienen, erfolgt der Aufbau der TVMs und das Bereitstellen der Röhren Richtung Osten, in die die TVMs eingeschoben werden. Nach dem Fertigstellen der NHS im westlichen Bereich beginnt direkt im Anschluss der zyklische Vortrieb Richtung Mürzzuschlag.

### 2.2.3 Längskaverne

In dieser Arbeit wird der Teilbereich der Längskaverne untersucht, der sich innerhalb der roten Markierung in Abbildung 8 befindet. Die dortigen geologische Verhältnisse, die Querschnittsform und der Ausbau sind die Basis für die Modellbildung der Numerik. Die Untersuchung der Verschiebungen erfolgt anhand eines Messquerschnittes dieses Bereichs.



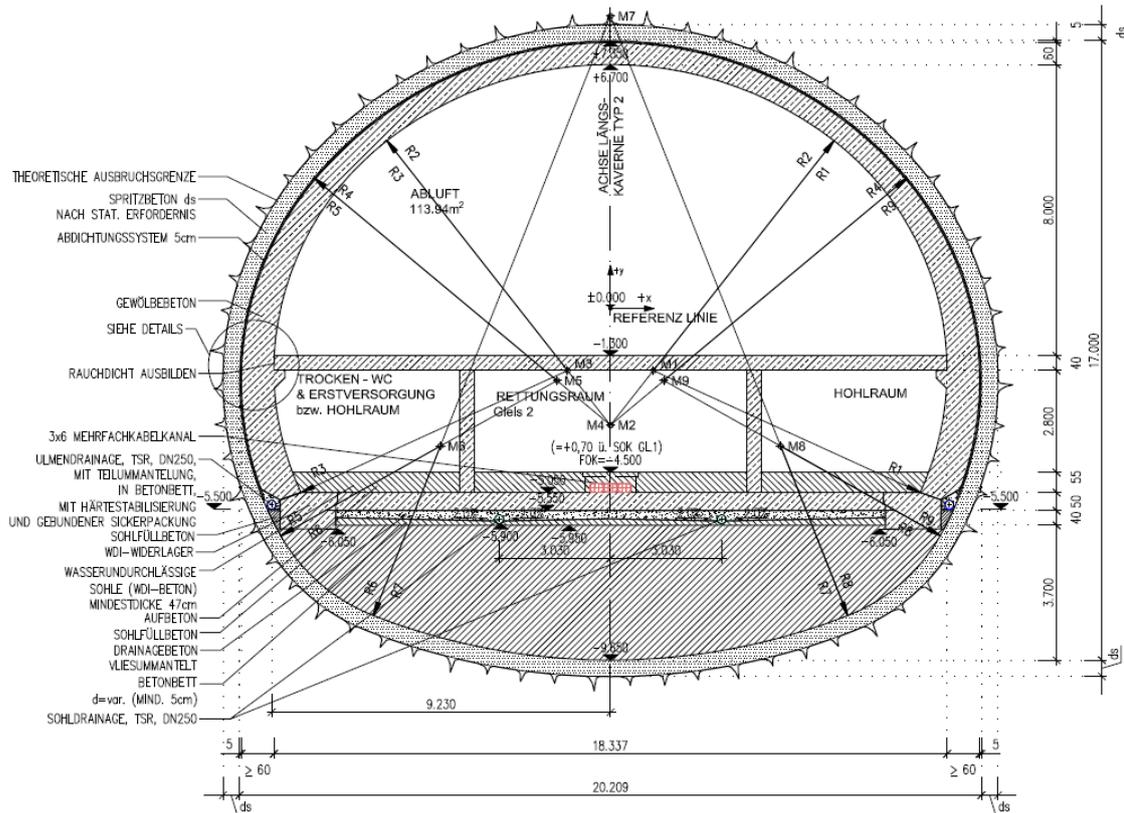


Abbildung 9: Ausbruchquerschnitt mit Innenausbau im Betriebszustand (ÖBB Infra-2, 2016)

2.2.3.2 Geologie (ÖBB Infra, 2014)

In der geologischen Prognose wurde der NHS die geologische Großeinheit der Wechselkristalline, genauer der "Wechselgneise" mit den Gebirgsarten (GA) 6d-6f, zugeordnet. Die Unterteilung der Wechsel-Kristalline wird in Abbildung 10 gezeigt.

Gruppe 6	Wechsel-Kristallin	GA 6a "Wechselschiefer"; bankig	Albitphyllit („Wechselschiefer“)
		GA 6b "Wechselschiefer"; plattig	Albitphyllit („Wechselschiefer“) (Phyllit, graphitreich („graphitreicher Wechselschiefer“))
		GA 6c "Wechselschiefer"; blättrig bzw. geschert	Albitphyllit („Wechselschiefer“) Phyllit, graphitreich („graphitreicher Wechselschiefer“)
		GA 6d-1 "Wechselgneis"; gering zerlegt	Albitgneis („Wechselgneis“) Gneis, quarzreich („quarzreicher Wechselgneis“)
		GA 6d-2 „Wechselgneis“; mäßig bis gering zerlegt	Albitgneis („Wechselgneis“) Gneis, quarzreich („quarzreicher Wechselgneis“) (Albitschiefer, graphitisch („graphitischer Wechselgneis“))
		GA 6e „Wechselgneis“; stark geschiefert, mäßig bis stark zerlegt	Albitgneis („Wechselgneis“) Albitschiefer, graphitisch („graphitischer Wechselgneis“)
		GA 6f "Wechselgneis"; phyllitisch, stark geschert	Serizit-Chlorit-Quarz-Schiefer („phyllitischer Wechselgneis“) Albitschiefer, graphitisch („graphitischer Wechselgneis“)

Abbildung 10: Auszug aus der geotechnischen Prognose. (ÖBB Infra, 2014)

Im untersuchten Bereich ist der Zerlegungsgrad sehr hoch, weshalb diesem die GA 6f zugeordnet wird. Durch die starke Scherung wird eine Überbeanspruchung des Gebirges erwartet. Eine Plastifizierung im Gebirge die mit großen Deformationen einhergeht, charakterisiert das Gebirgsverhalten. Lang anhaltende Radialverschiebungen im oberen Dezimeterbereich werden im Geotechnischen Bericht prognostiziert.

### 2.2.3.3 Ausbau

Der duktile Ausbau umfasste eine Spritzbetonschale, die mit vier in der Kalotte eingebauten Stauchelementreihen ausgeführt wurde. Die eingebauten Stützmittel, die zusätzlich ein dichtes Netz aus Ankern beinhalteten, werden in Abbildung 11 gezeigt.



Abbildung 11: Ausbau der Längskaverne nach dem Ausbruch der Kalotte (Foto: ÖBA SBT 2.1).

2.2.3.4 Verschiebungsentwicklung in der Längskaverne

Im untersuchten Bereich der Längskaverne (bei TM 176,00) wurden 17 Tage nach dem Vortrieb der Kalotte und Strosse 1.1, Verschiebungen in der Firste von bis zu 23 cm gemessen. Bis zum Auffahren des nächsten Teilquerschnitts wurden bis zu 31 cm Verschiebungen in der Firste gemessen. Durch den Ausbruch der restlichen Teilquerschnitte erhöhten sich die Verschiebungen auf bis zu 41 cm. Der Großteil der Verschiebungen entstand bereits durch den Ausbruch der Kalotte. Abbildung 12 zeigt die Verschiebungsentwicklung der Längskaverne bei Messquerschnitt (MQ) 176, aufgetragen über die Zeit.

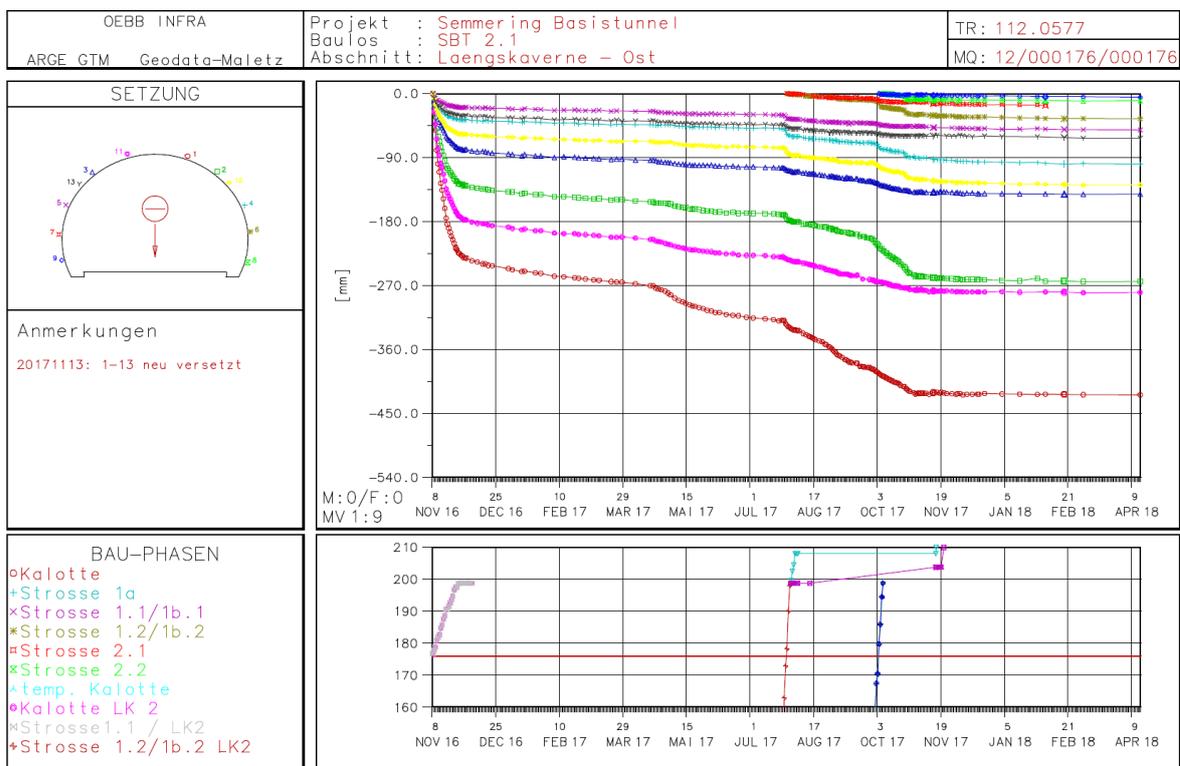


Abbildung 12: Gemessene vertikale Verschiebungen bei TM 176,00 (ÖBB Infra, 2018)

## 3 Numerische Simulation

In diesem Kapitel wird einerseits auf die für die Simulation verwendeten Werte eingegangen und andererseits die Annahmen erläutert, mit denen aus dem ausgeführten Bauwerk ein numerisches Modell erstellt wurde. Die Parameter des Basismodells, mit der Bezeichnung *S4K1*, werden in diesem Kapitel erläutert.

### 3.1 RS<sup>2</sup>

Die Simulation wurde mit der Software RS<sup>2</sup> durchgeführt, ein Programm, das auf der Finite-Elemente Methode basiert und mit dem 2-D Simulationen in der Fels- und Bodenmechanik durchgeführt werden. (Rocscience Inc., 2018)

Eine 2-D Simulation unterliegt einigen Restriktionen. So können der Einfluss der Längsentwicklung entlang der Tunnelachse und der zeitliche Aspekt nur schwer berücksichtigt werden. Um den Bauablauf trotzdem simulieren zu können, wird ein Vorentlastungsfaktor angenommen.

### 3.2 Gebirgskennwerte

Die in der Simulation verwendeten Gebirgskennwerte sind der Gebirgsart 6f, einem stark gescherten, phyllitischen Wechselgneis, zugeordnet und wurden dem *Technischen Bericht Rechenwerte* (ÖBB Infra, 2013) entnommen. Im Rahmen der Kalibrierung des Modells wurden diese Werte geringfügig adaptiert. Zumal die Berechnung plastisch durchgeführt wurde, mussten auch Restfestigkeiten im Programm berücksichtigt werden. Dazu wurden der Reibungswinkel und die Kohäsion abgemindert. Eine Auflistung der Rechenwerte des Berichts und den Werten, die in der Simulation verwendet wurden sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Gebirgskennwerte

	$\Phi$ [°]	c [MPa]	E [MPa]	$\gamma$ [ $\frac{KN}{m^3}$ ]
Rechenwerte des Berichts	22,5	1,5	3000	26
Werte der Simulation	22,5	1,5	2500	25
Restfestigkeiten der Simulation	21,0	1,0	-	-

Ein Ziel der Arbeit ist den Einfluss der Stauchelemente auf das Systemverhalten zu untersuchen. Daher wird das Gebirge als homogen angenommen. Somit werden die Einflüsse von Inhomogenitäten in der Gebirgsstruktur nicht betrachtet. Da die Verformungen bei der Ausführung größere Werte als angenommen annahmen, wurde der E-Modul abgemindert.

Bei der Simulation wird das Mohr-Coulomb Bruchkriterium angewendet. Dieses geht von dem Prinzip aus, dass das Versagen eines Festkörpers eintritt, wenn die äußeren Schubspannungen den inneren Scherwiderstand übersteigen.

### 3.3 Primärspannungszustand

Die vertikale Primärspannung wird durch die Überlagerungshöhe des Gebirges und dessen Eigengewichts bestimmt. Die Gleichung (3.1) zeigt die die Berechnung der vertikalen Primärspannung.

$$\sigma_v = \gamma * h \quad (3.1)$$
$$10 = 0,025 * 400$$

$\sigma_v$ ...vertikale Primärspannung [MPa]

$\gamma$ ... Wichte des Gebirges [KN/m<sup>3</sup>]

$h$ ... Höhe der Überlagerung [m]

Die Wichte des Gebirges wurde der Tabelle 1 entnommen. Die Überlagerung entspricht in diesem Bereich in etwa 400 Meter. Demzufolge ergibt sich eine vertikale Primärspannung von 10 MPa. Der Tunnel kann in diesem Bereich durch die gegebene Überlagerung als *"tief liegender Tunnel"* behandelt werden. Die Primärspannungen werden somit im gesamten Modellbereich als konstant angenommen. Der Seitendruckbeiwert wird mit eins angenommen.

### 3.4 Geometrie

Die Querschnittsfläche des Modells beträgt über 300 m<sup>2</sup> und der Vortrieb ist in drei Ausbruchsquerschnitte (Kalotte, Strosse, Sohle) unterteilt. Diese sind in Abbildung 13 dargestellt. Die 4 Stauchelemente werden in der Kalotte positioniert. Die Anordnung erfolgt symmetrisch links und rechts der Firste in zwei unterschiedlichen Höhen.

Beim Ausbruch der Kalotte wird der untere Bereich ausgerundet. Damit wird versucht den Einfluss von unrealistischen Spannungsspitzen - die bei Programmen entstehen können die auf der Finite-Elemente Methode basieren - so klein zu halten, dass sie keinen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

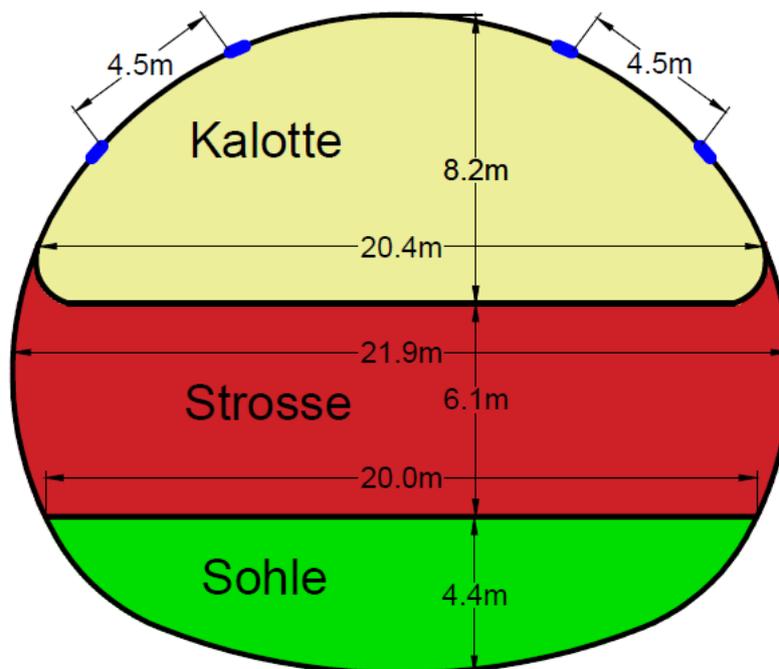


Abbildung 13: Geometrie des Ausbruchs, unterteilt in Kalotte, Strosse und Sohle; Lage der 4 Stauchelemente (blau).

### 3.5 Netzparameter und Randbedingungen

Bedingt durch die hohe Beanspruchung und der daraus folgenden Plastifizierung, bleibt der Einfluss der Spannungen in großer Distanz zum Hohlraumausbruch bestehen. Damit sich am Rand in jeder Phase der Primärspannungszustand einstellen kann, wurde ein quadratischer Modellbereich mit 420 x 420 m gewählt.

Die Auflager entlang der Y-Achse wurden als in vertikale Richtung bewegliche Auflager festgelegt. Entlang der X-Achse wurden die Auflager als in horizontale Richtung bewegliche Auflager fixiert. An den Ecken des Modellrands sind die Auflager sowohl in X als auch Y Richtung unbeweglich.

Aus "6-Noded Triangles" wurde im Programm ein Netz generiert. Dieses besteht somit aus Dreiecken, die im Umkreis von 60 m um den Ausbruch zur Erhöhung der Genauigkeit verdichtet wurden.

### 3.6 Ausbau

Im tunnelbautechnischen Rahmenplan wird für eine Gebirgsart das jeweilige Gebirgsverhalten und ein Ausbaukonzept definiert. Die dabei festgelegten Stützmittel beeinflussen das Systemverhalten. (ÖGG, 2008)

Die Wahl des Ausbaukonzeptes ist somit eine der Hauptaufgaben bei der geotechnischen Planung. Die dabei eingebauten Stützmittel sind in Qualität und Quantität auf das jeweilige Gebirgsverhalten anzupassen.

Das Gebirge, welches in dieser Arbeit untersucht wird, kann dem Gebirgsverhaltenstyp (GVT) Nummer 4 "*Tiefreichende Überbeanspruchung*" zugeordnet werden. Laut Geotechnischer Richtlinie werden die Eigenschaften dieses Typs als "*spannungsbedingte tiefreichende Entfestigung bzw. Plastifizierung im Gebirge mit großen Deformationen*" beschrieben. (ÖGG, 2008)

Bei steifem Ausbau besteht die Gefahr der Überbeanspruchung des Spritzbetons bei größeren Verschiebungen. Beim duktilen Ausbau ist der Widerstand durch Stauchelemente begrenzt, um eine Überbeanspruchung zu verhindern.

Um die großen Verformungen, wie in GVT 4 beschrieben, aufnehmen zu können, erfolgt der Ausbau in dieser Arbeit duktil. Dazu wird eine Spritzbetonschale, in der Stauchelemente platziert werden, modelliert.

### 3.6.1 Spritzbeton

Die Spritzbetonschale wird entlang der Laibung mit einer Dicke von 35 Zentimetern eingebaut. Der Einbau erfolgt in der Phase eines bereits reduzierten Innendrucks. Somit werden die Vorverschiebungen vor dem Einbau des Spritzbetons, berücksichtigt (vgl. 3.7 Bauablauf).

Die Festigkeits- und Steifigkeitsentwicklung des Spritzbetons ist komplex und unterliegt einem starken zeitlichen Einfluss. Beim Einbau wurde deshalb die Frühfestigkeit des Betons berücksichtigt. Die Steifigkeits- und Festigkeitsparameter wurden dazu reduziert, und im Endzustand jedes Teilquerschnittes (Reduktion des Innendrucks auf null Prozent) auf die Endfestigkeiten und -steifigkeiten erhöht. Eine Übersicht der verwendeten Festigkeits- und Steifigkeitsparameter ist in Tabelle 2 nachzulesen.

Tabelle 2: Steifigkeits- und Festigkeitsparameter des Spritzbetons

	<b>E</b> [MPa]	<b>Dicke</b> [m]	<b>f<sub>c</sub></b> [MPa]	<b>f<sub>c,res</sub></b> [MPa]	<b>f<sub>t</sub></b> [MPa]	<b>f<sub>t,res</sub></b> [MPa]
<b>Endfestigkeiten/ Endsteifigkeiten</b>	10000	0,35	35	20	5	2
<b>Frühfestigkeiten/ Frühsteifigkeiten</b>	5000	0,35	17,5	10	2,5	1

E... E-Modul

f<sub>c</sub>... Druckfestigkeit Spritzbeton

f<sub>c,res</sub>... Restdruckfestigkeit Spritzbeton

f<sub>t</sub>... Zugfestigkeit Spritzbeton

f<sub>t,res</sub>... Restzugfestigkeit Spritzbeton

### 3.6.2 Stauchelemente

Die Lage der Stauchelemente die in der Spritzbetonschale platziert wurden, kann unter 3.4 *Geometrie*, eingesehen werden. Ein Beispiel für bereits eingebaute Stauchelemente zeigt die Abbildung 14. Dabei besteht ein Element aus 4 Stauchrohren, von denen die zwei mittleren kürzer dimensioniert sind.



Abbildung 14: Stauchelemente im eingebauten Zustand, 4 Stauchrohre, mit zwei unterschiedlichen Längen (Foto: ÖBA SBT 2.1).

### 3.6.2.1 Funktionsweise

Die aus Stahl gefertigten Stauchelemente können Lasten übertragen und bringen so dem Spritzbeton durch den kraftschlüssigen Verbund einen Widerstand entgegen. Durch die Verformungen der Elemente wird die Beanspruchung in der Spritzbetonschale kontrolliert.

In dieser Simulation werden sogenannte "Lining Stress Controller (LSC)" Stauchelemente verwendet. Ein Schnitt durch ein bereits gebeultes Element ist in Abbildung 15 zu sehen. Die drei Zylinderrohre, die oben und unten durch eine Grundplatte beschränkt sind, werden axial beansprucht und der Effekt des rotationsymmetrischen Zylinderbeulens genutzt. Der Stauchweg variiert aufgrund der Länge der einzelnen Stauchrohre. (Moritz, 2011)



Abbildung 15: Schnitt durch ein gestauchtes LSC Element (Schubert, 2006).

#### 3.6.2.2 *Arbeitslinie*

Um eine optimale Wirkung zu erzeugen, wurden die Arbeitslinien von Stauchelementen auf die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons hin optimiert (Moritz, 2011).

Die gewählte Arbeitslinie liegt einer Labortestreihe, die am Instituts für Felsmechanik und Tunnelbau der TU Graz durchgeführt wurde, zugrunde. Es wurde unter anderem ein System mit zwei längeren- und zwei kürzeren Stauchrohren getestet. Dabei ergibt sich die in Abbildung 16 dargestellte Arbeitslinie. Bei einer Last von 2400 KN tritt eine Stauchung von ca. 80 mm auf. Nach Überschreiten dieser, schwankt die Lastkapazität zwischen 2100 und 2500 KN. (Schubert, 2006)

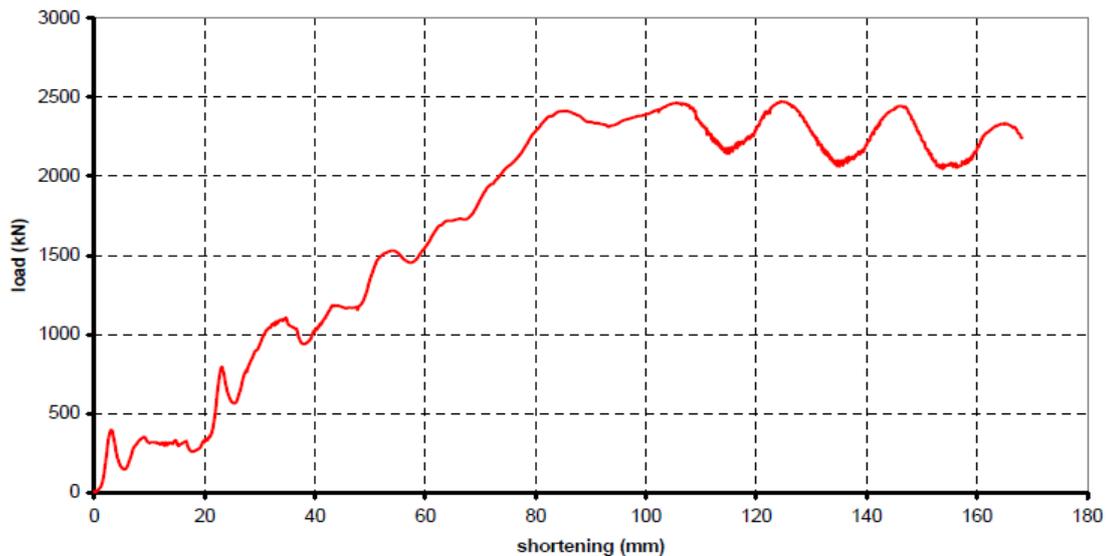


Abbildung 16: Arbeitslinie der getesteten LSC (Schubert, 2006).

### 3.6.2.3 Implementierung der Stauchelemente in RS<sup>2</sup>

Die Implementierung der Stauchelemente in RS<sup>2</sup> erfolgte anhand der einaxialen Druckfestigkeit und dem E-Modul. Diese Eingabeparameter wurden aus den Ergebnissen der oben erwähnten Laborversuche errechnet. Dazu wurde das Materialverhalten bis zum Erreichen der Bemessungslast linear-elastisch angenommen, nach deren Überschreitung das Niveau der Restdruckfestigkeit verwendet.

Die Grundplatte hat eine Breite von 0,35 m, eine Länge von 1 m und ein Stauchelement ist 0,43 m hoch. Die Bemessungslast liegt bei 2400 KN und tritt bei einer Stauchung von 0,08 m auf. Diese Spannung fällt dann auf bis zu 2100 KN ab. Die Berechnung erfolgt mit den Gleichungen (3.2) bis (3.6). Die daraus resultierende Druckfestigkeit betrug gerundet 7 MPa, die Restdruckfestigkeit 6 MPa und der E-Modul 37 MPa.

$$A = b * l \quad (3.2)$$

$$0,35 = 0,35 * 1$$

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

$$7 = \frac{2400}{0,35}$$

$$\sigma_{c,res} = \frac{F_{res}}{A} \quad (3.4)$$

$$6 = \frac{2100}{0,35}$$

$$\varepsilon = \frac{q_a}{h} \quad (3.5)$$

$$0,18 = \frac{0,08}{0,43}$$

$$E = \frac{\sigma_c}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

$$37 = \frac{7}{0,18}$$

mit:

- $l...$  Länge [m]
- $b...$  Breite [m]
- $A...$  Fläche der Grundplatte [m<sup>2</sup>]
- $F...$  Bemessungslast [kN]
- $F_{res...}$  Minimale Last beim Beulen [kN]
- $q_a...$  Axiale Stauchung [m]
- $h...$  Höhe Stauchrohr [m]
- $\varepsilon ...$  Stauchung [-]
- $\sigma_c...$  Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]
- $\sigma_{c,res...}$  Einaxiale Restdruckfestigkeit [MPa]
- $E...$  E-Modul [MPa]

Stachelemente sind kraftschlüssig mit dem Spritzbeton aber nicht mit dem Gebirge verbunden. Um diesen Fall in RS<sup>2</sup> nachzubilden, wurde zwischen dem Gebirge und den Stachelementen eine Trennfläche erzeugt, die keine Normal- und Scherfestigkeit besitzt. Über die Funktion des "*Composite Layer*" und der Auswahl "*Joint interface between rock/soil and first layer*" kann mit der Eingabe der entsprechenden Trennflächeneigenschaften dieser Fall nachgebildet werden.

### 3.6.3 Anker

Aktive Stützmittel, zu denen Anker zählen, sind im allgemeinen als gebirgsverbessernde Stützmittel bekannt. Um die Gebirgsverbesserung der Anker bei der Simulation zu berücksichtigen, wurde auf die Abminderung der Kohäsion und des Reibungswinkels verzichtet.

### 3.7 Bauablauf

Um einen Bauablauf, der ein dreidimensionales, komplexes System ist, in einer numerischen 2-D Simulation abzubilden, wird durch eine Näherung versucht zeitliche Einflüsse zu berücksichtigen. Bei dieser Arbeit wurde zu diesem Zweck die "load-reduction-method" angewendet. Bei dieser Methode wird der Innendruck stufenweise bis auf null abgemindert, also keine Stützung mehr gegeben ist. In diesem Zustand ist das System im Gleichgewicht, alle Spannungen sind umgelagert und alle Verformungen die durch den Ausbruch entstanden sind, sind abgeklungen. Stützmittel werden unmittelbar nach dem Ausbruch eingebaut. Die dabei entstehenden Verschiebungen und Verformungen werden durch einen Vorentlastungsfaktor berücksichtigt. Dieser bestimmt den Innendruck zum Zeitpunkt des Stützmitteleinbaus.

Es gibt verschiedene Ansätze um einen Vorentlastungsfaktor zu bestimmen. In dieser Arbeit wurde zuerst der plastische Radius mithilfe der Formeln nach Feder (siehe Feder & Arwanitakis, 1976) bestimmt. Danach wurde mit den Formeln von Pilgerstorfer eine Näherung getroffen (siehe Pilgerstorfer, 2008). Das Ergebnis dieser Berechnung ist im Anhang beigefügt und führt mit den gegebenen Parametern zu einem Faktor von 0,24. Diese Näherung ist für einen kreisrunden Vollausruch gültig und wurde durchgeführt um einen Ansatz mit den gegebenen Gebirgskennwerten zu erhalten. In der Simulation wird der Ausbruch in Kalotte, Strosse und Sohle unterteilt. Die Stützung zum Ausbruch der jeweiligen Fläche ist dadurch höher und der Faktor wird deshalb von 0,24 auf 0,40 erhöht. Es wird somit beim Einbau der Stützmittel in der Kalotte ein Innendruck ( $p_i$ ) aufgebracht, der 40 % des Primärspannungsniveaus annimmt. Im Folgenden werden alle Phasen der Simulation mit ihren charakteristischen Änderungen beschrieben und in Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 grafisch dargestellt. Als Erstes erfolgte die Berechnung des Primärspannungszustands. Danach wurde der Ausbruch der Kalotte mit einem Innendruck von 100% simuliert. Der Innendruck wurde danach auf 40% der Primärspannungen reduziert. Die ersten Verformungen und Verschiebungen entstehen. Im nächsten Schritt wurden der Spritzbeton - mit den Frühfestigkeitswerten - und die Stauchelemente eingebaut. In der Phase 5 wurde der Innendruck auf 0 % reduziert und die Spritzbetonparameter auf die Endfestigkeiten erhöht.

Beim Ausbruch der Strosse und Sohle wurde der Innendruck über die Funktion "*Induced Stress*" eingegeben. Somit erfolgt eine Berücksichtigung von Spannungsumlagerungen durch bereits aufgefahrene Teilquerschnitte. Es wird ein Innendruck ( $p_{i,abg}$ ) aufgebracht, der einem abgeminderten Primärspannungszustand entspricht. Dieser wird dann wie beim



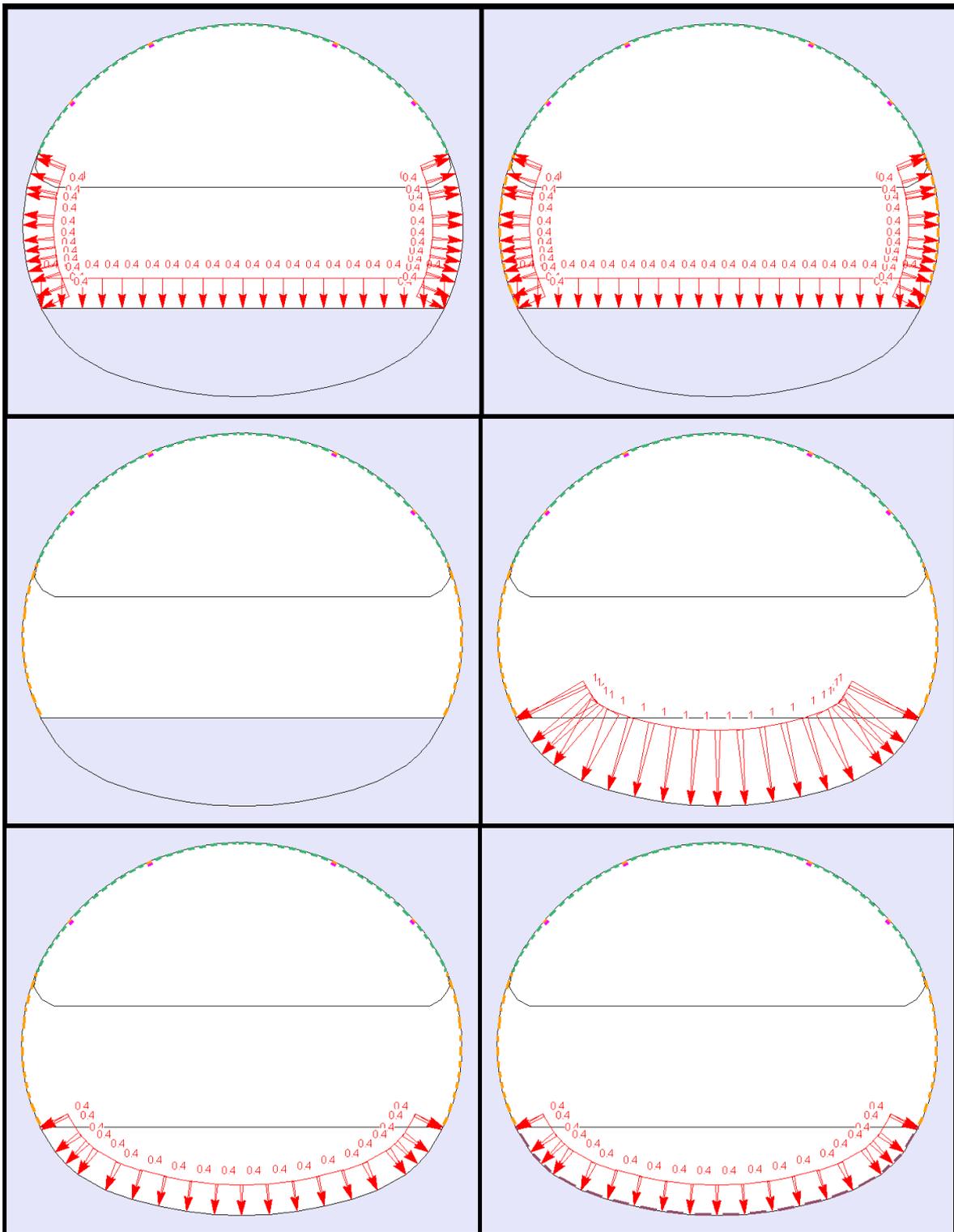


Abbildung 18: Ablauf der Simulation (2): links oben: Reduktion auf  $p_{i,abg} = 40\%$ , rechts oben: Einbau Spritzbeton (Frühfestigkeit), links in der Mitte: Reduktion auf  $p_{i,abg} = 0\%$ , Spritzbeton erreicht Endfestigkeit, rechts in der Mitte: Ausbruch der Sohle -  $p_{i,abg} = 100\%$ , links unten: Reduktion auf  $p_{i,abg} = 40\%$ , rechts unten: Einbau Spritzbeton (Frühfestigkeit).

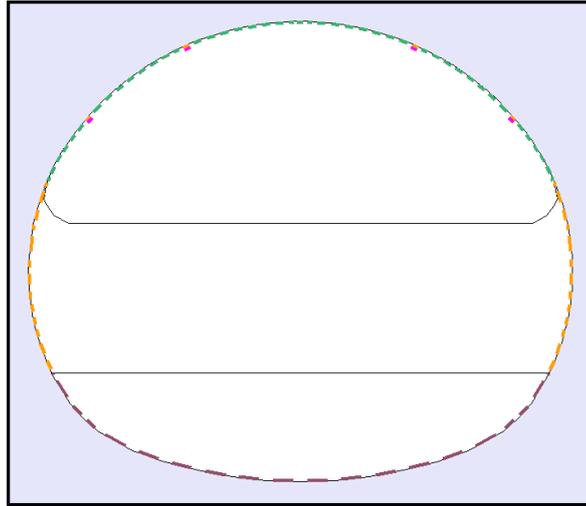


Abbildung 19: Modell im Endzustand: Reduktion auf  $p_{i,abg} = 0\%$ , Spritzbeton erreicht Endfestigkeit.

# 4 Numerik - Modelle, Ergebnisse, Interpretation

In diesem Kapitel wird auf die Untersuchungen, beginnend mit den Modellbeschreibungen, den Ergebnissen und der Interpretation, eingegangen. Die Untersuchungen gliedern sich in:

- Duktiler - steifer Ausbau
- Variation der Lage und Anzahl der Stauchelemente
- Änderung des Seitendruckbeiwerts

Um eine Abschätzung der numerischen Ergebnisse zu erhalten, wurde zu Beginn eine analytische Berechnung mithilfe der Formeln nach Feder (Feder & Arwanitakis, 1976) durchgeführt. Dabei ist festzuhalten, dass diese Formeln für einen kreisrunden Ausbruch gelten. Die Ergebnisse der analytischen Berechnung sind damit nur als grobe Verifikation der numerischen Ergebnisse zu verstehen.

Der elastische Teil der analytischen Berechnung ergibt an der Ulme eine maximale Tangentialspannung von 15,2 MPa in einer Distanz von 26,7 Metern (von der Tunnelmitte weg gerechnet). Die Eingabewerte und Ergebnisse der Berechnung nach Feder sind in Abbildung 20 dargestellt. Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen für ein Modell ohne Sicherungsmaßnahmen zeigen, an der Ulme in einer Distanz von 26 Metern (ebenfalls von der Tunnelmitte weg gerechnet), die höchste Spannung mit knapp 15 MPa. Der analytische Ansatz korreliert daher mit dem Numerischen und die Ergebnisse können als plausibel betrachtet werden.

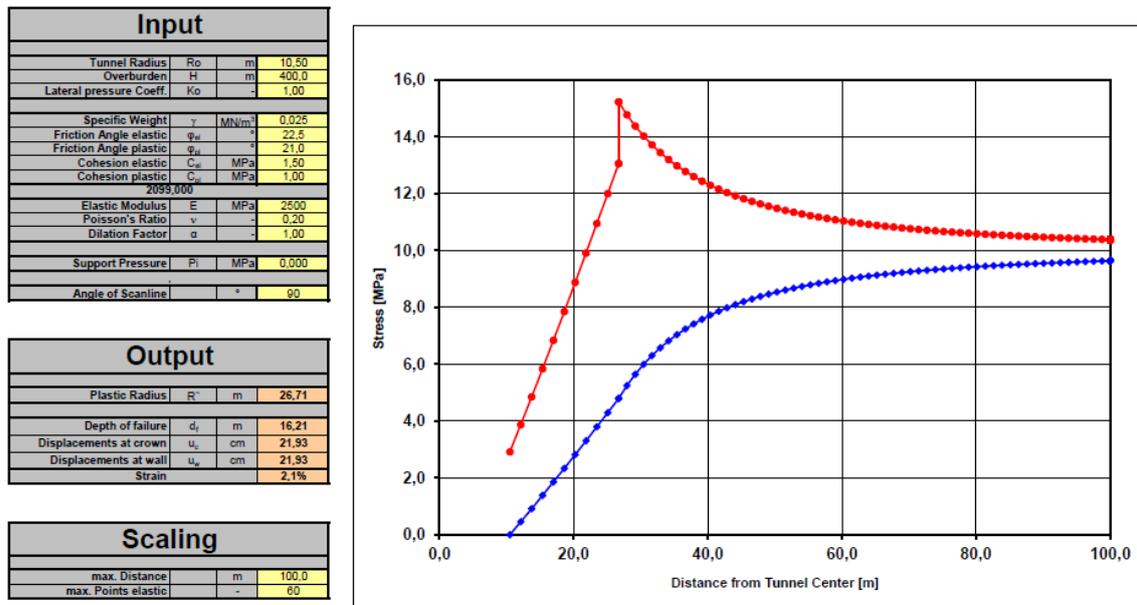


Abbildung 20: Eingabeparameter und Auswertung der Spannungen an der Ulme mithilfe der Formeln nach Feder, Radialspannung (blau), Tangentialspannung (rot).

## 4.1 Duktiler - steifer Ausbau

Bei dieser Untersuchung wird überprüft, ob bei der gegebenen Beanspruchung ein duktiler Ausbau nötig ist. Zu diesem Zweck wurde ein Modell mit steifem Ausbau konzipiert. In diesem Kapitel wird auch die Wirkungsweise der Stauchelemente in der Numerik beschrieben.

### 4.1.1 Modellbeschreibung

Beim "Msteif" handelt es sich um ein Modell ohne Stauchelemente, das in allen weiteren Parametern dem Basismodell S4K1 entspricht und mit diesem verglichen wurde.

### 4.1.2 Ergebnisse und Interpretation

Es wird bei der Auswertung dieser Untersuchung auf wesentliche Charakteristiken eingegangen. Die vertikalen Verschiebungen werden qualitativ mit den Messdaten des Bauwerks verglichen.

#### 4.1.2.1 Versagen der Spritzbetonschale

Beim duktilen Modell S4K1 tritt kein Versagen der Spritzbetonschale auf. Die Stauchelemente nehmen die großen Gebirgsverformungen auf, die durch die hohe Beanspruchung entstehen. Die Aufnahme der Verformungen durch die Stauchelemente reduziert die Normalkraft im Spritzbeton und ein Versagen wird verhindert.

Im Gegensatz dazu tritt bei der Simulation von Msteif ein Versagen der Spritzbetonschale bereits nach dem Vortrieb der Kalotte auf. Die Überbeanspruchung der Schale breitet sich durch den Strossen-/Sohlvortrieb weiter aus. Die in rot dargestellten Spritzbetonsegmente der Abbildung 21 zeigen die Überbeanspruchung nach dem Kalottenvortrieb und im Endzustand.

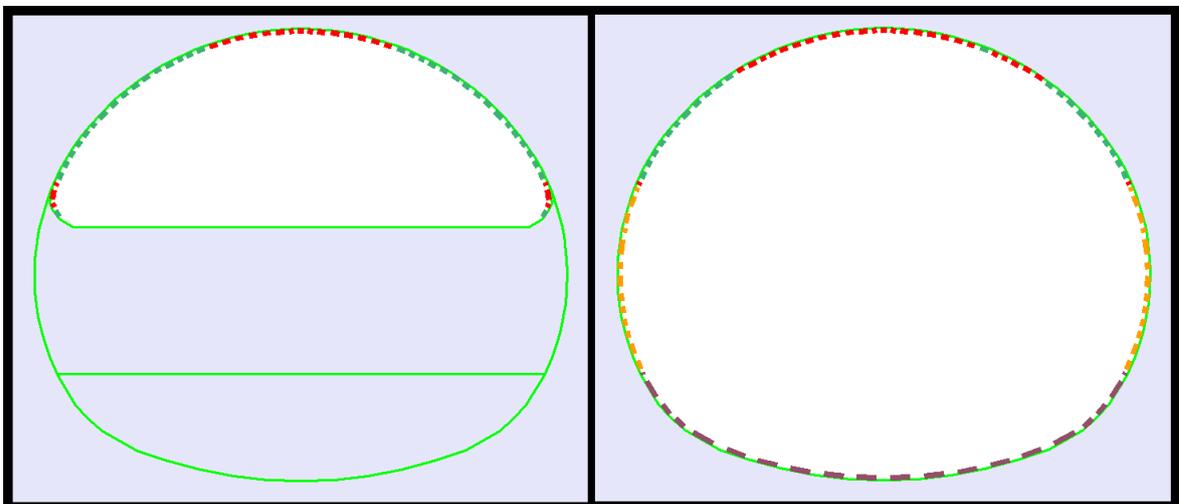


Abbildung 21: Versagen der Spritzbetonschale (in rot dargestellt) bei Msteif, links: nach dem Kalottenausbruch, rechts: im Endzustand

#### 4.1.2.2 Firstverschiebungen

Anhand der horizontalen und vertikalen Verschiebungsvektoren kann der Einfluss der Stauchelemente auf das Systemverhalten in der Numerik gezeigt werden. Abbildung 22 zeigt die horizontalen Verschiebungen von S4K1 im Vergleich zu Msteif. Die Verschiebungsvektoren zeigen bei S4K1 einen Sprung an den Stellen an, an denen die Stauchelemente positioniert sind.

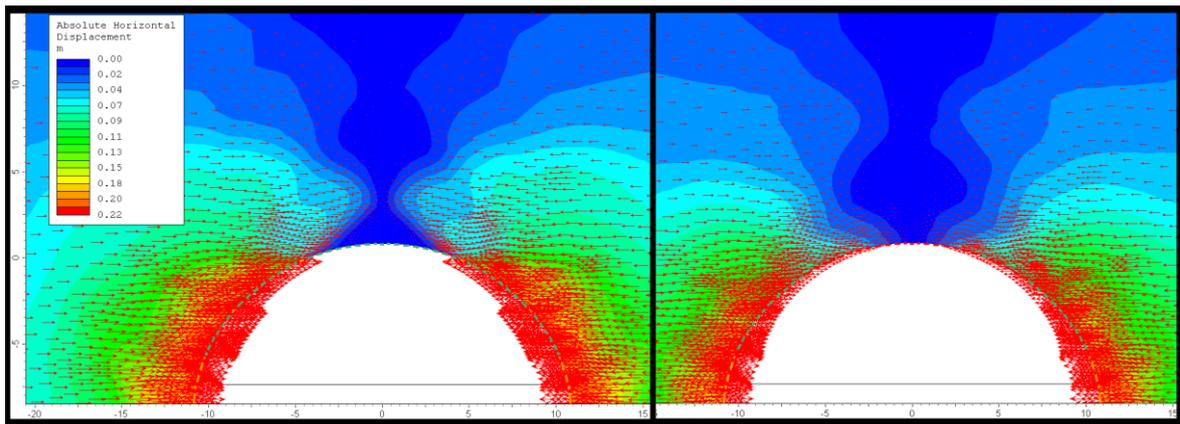


Abbildung 22: Horizontale Verschiebungen im Endzustand, links: S4K1, rechts: Msteif.

Die obere Reihe der Stauchelemente nimmt die kompletten Horizontalverschiebungen, die in der Firste stattfinden würden, auf, sodass ein kleiner Bereich über der Firste entsteht, der frei von horizontalen Verformungen ist (Abbildung 23). Im Firstbereich (bis zur oberen Reihe der Stauchelemente) nehmen die vertikalen Verschiebungen hohe Werte an, welche sich dann sprunghaft verringern. Dies steht im Gegensatz zu Msteif, welches in der Kalotte durchgehend gleich hohe Vertikalverschiebungen zeigt.

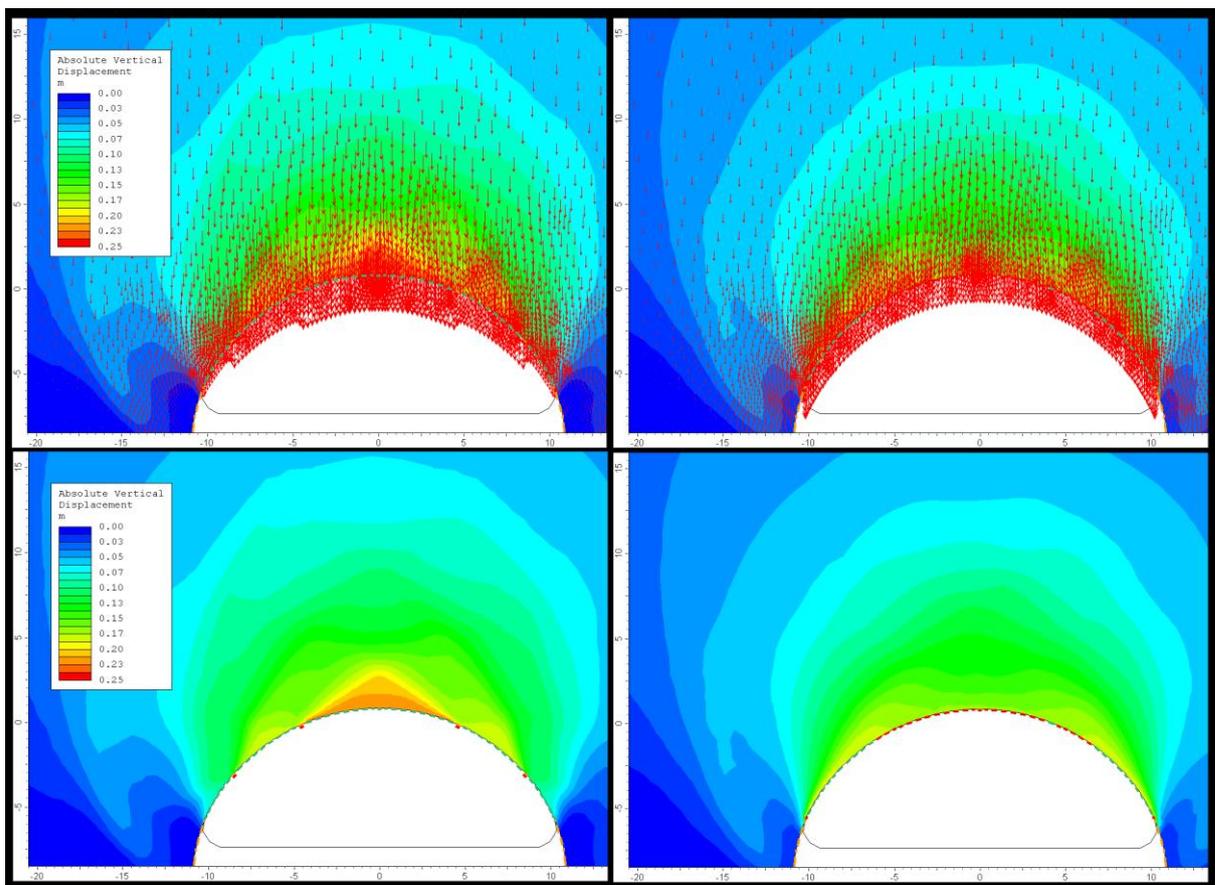


Abbildung 23: Vergleich S4K1 (links) und Msteif (rechts), oben: vertikale Verschiebungsvektoren, unten: vertikale Gebirgsverformung.

Hohe und langanhaltende Firstverschiebungen, die vor allem nach dem Kalottenausbruch auftreten, wurden am Bauwerk beobachtet. Die Auswertung der vertikalen Verschiebungen nach dem Ausbruch der Kalotte sind in Abbildung 21 dargestellt. Dabei wurden Verschiebungen, die nach drei Monaten noch immer leicht anstiegen, gemessen. In der Firste erreichen diese einen Wert von bis zu 30 cm.

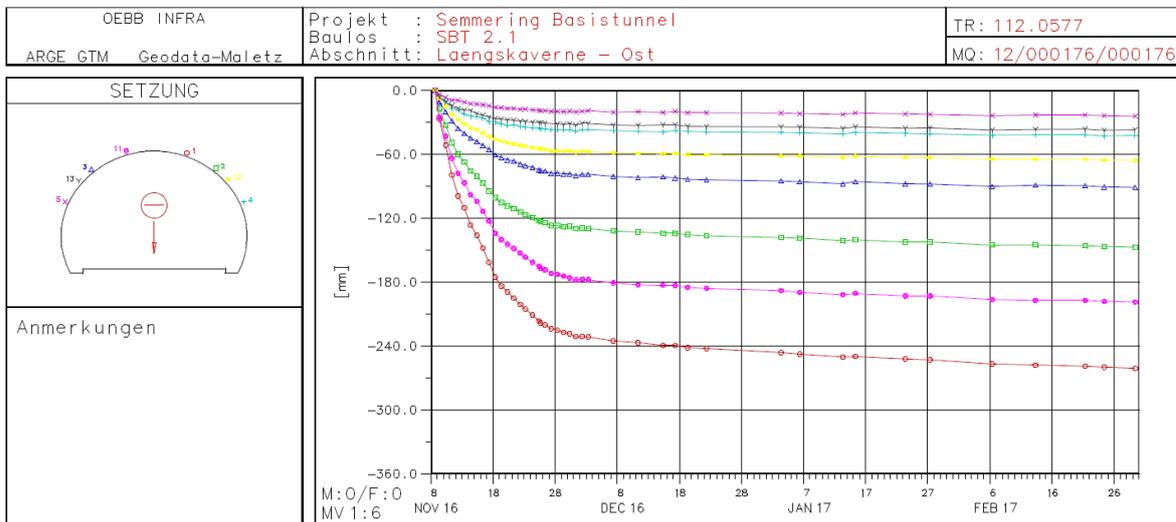


Abbildung 24: Gemessene vertikale Verschiebungen am Bauwerk zufolge des Kalottenvortriebs (ÖBB Infra, 2017).

#### 4.1.2.3 Plastische Zone

Der Vergleich der plastischen Zone zwischen Mstef und S4K1 in Abbildung 25 zeigt, dass sich beim duktilen Ausbau eine größere plastische Zone (25 m) in horizontaler Richtung einstellt. In der Vertikalen bleibt das Ausmaß dagegen annähernd gleich.

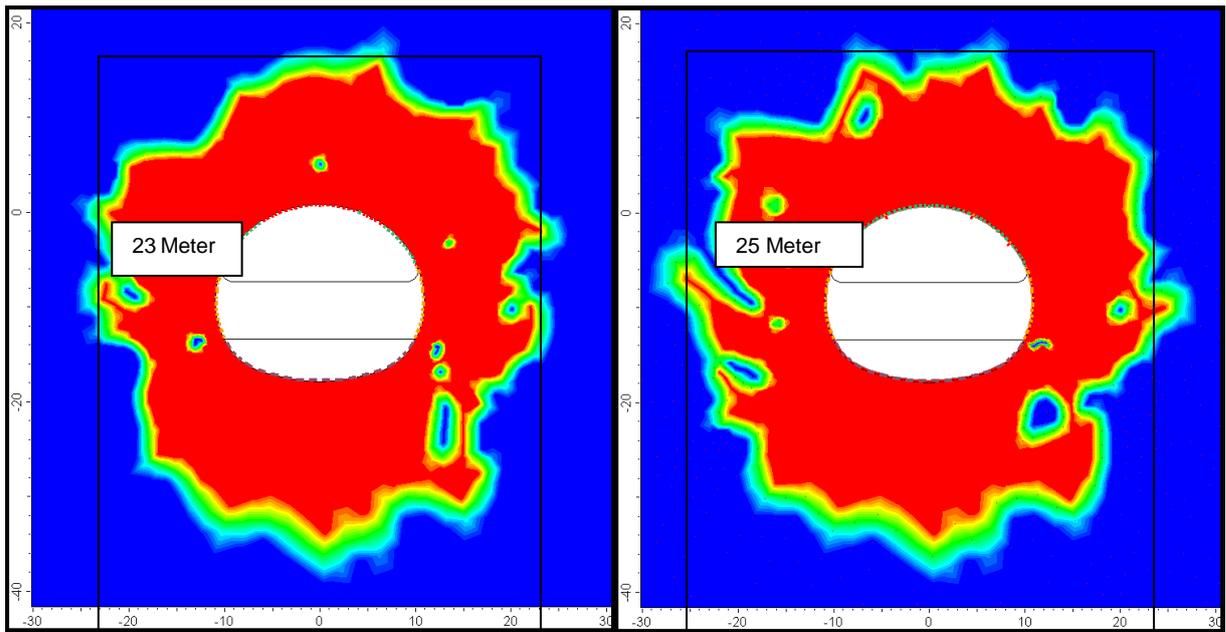


Abbildung 25: Plastische Zone (in rot dargestellt) mit Angabe der horizontalen Distanz vom Ausbruchsrund, links: Msteif, rechts: S4K1.

## 4.2 Variation der Lage und Anzahl der Stauchelemente

Bei dieser Analyse wird der mögliche Einfluss der Lage und der Anzahl der Stauchelemente auf das Systemverhalten diskutiert.

### 4.2.1 Modellbeschreibung

Eine Skizze der drei simulierten Modelle ist in Abbildung 26 dargestellt. Ausgehend vom Basismodell S4K1 wird für S5 ein zusätzliches Stauchelement in der Firste positioniert. Um S3 zu erhalten wird die obere Reihe von S4K1 entfernt und stattdessen ein Stauchelement in der Firste versetzt.

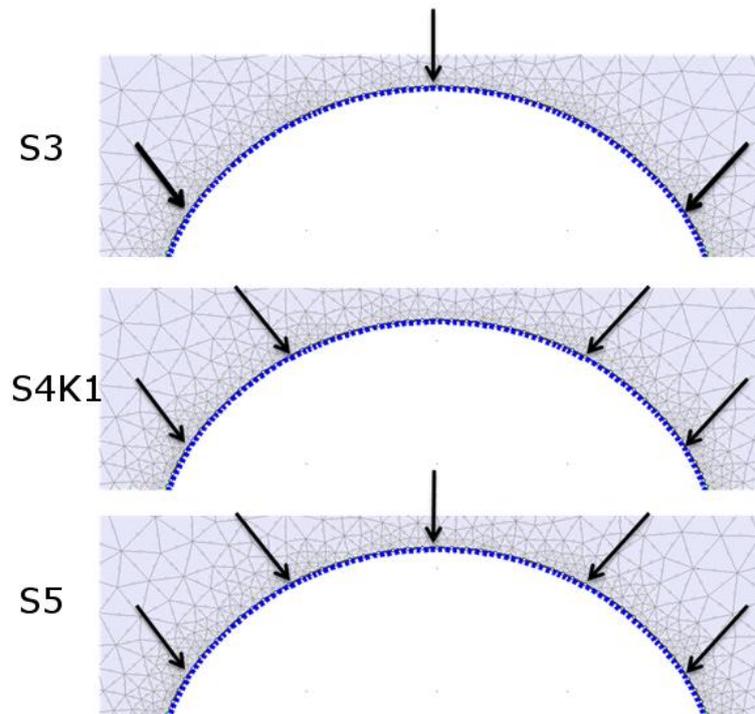


Abbildung 26: Variation der Lage und Anzahl der Stauchelemente der Modelle.

## 4.2.2 Ergebnisse und Interpretation

Unter diesem Punkt wird zuerst die Neigung der Verschiebungsvektoren im Zusammenhang mit den Stauchelementen erklärt, um danach die Verschiebungen auszuwerten. Zusätzlich wird auf die Gebirgsverformungen und Spannungen eingegangen.

### 4.2.2.1 Verschiebungsvektoren

Nach dem Hohlraumausbruch sind die Radialspannungen null bzw. entsprechen dem aufgebrachten Ausbauwiderstand. Unter der Annahme, dass dieser Ausbauwiderstand konstant über die Laibung verläuft, sind die Verschiebungsvektoren eines homogenen Gebirges radial zum Ausbruch gerichtet. Durch den Einbau der Stauchelemente entstehen Unstetigkeitsstellen, die zu einer Drehung der Verschiebungsvektoren in dessen Richtung führen. Das passiert weil die Stauchelemente duktiler als der steife Spritzbeton sind. Je mehr die Verschiebungsvektoren in Richtung der Stauchelemente geneigt sind, desto deutlicher werden die aufgenommenen Verformungen der Stauchelemente erkennbar.

In Abbildung 27 sind die radialen Verschiebungen im Endzustand anhand der Verschiebungsvektoren von S4K1 beispielhaft dargestellt. Bei S3 und S5 ist die Größe der Radialverschiebungen sehr ähnlich.

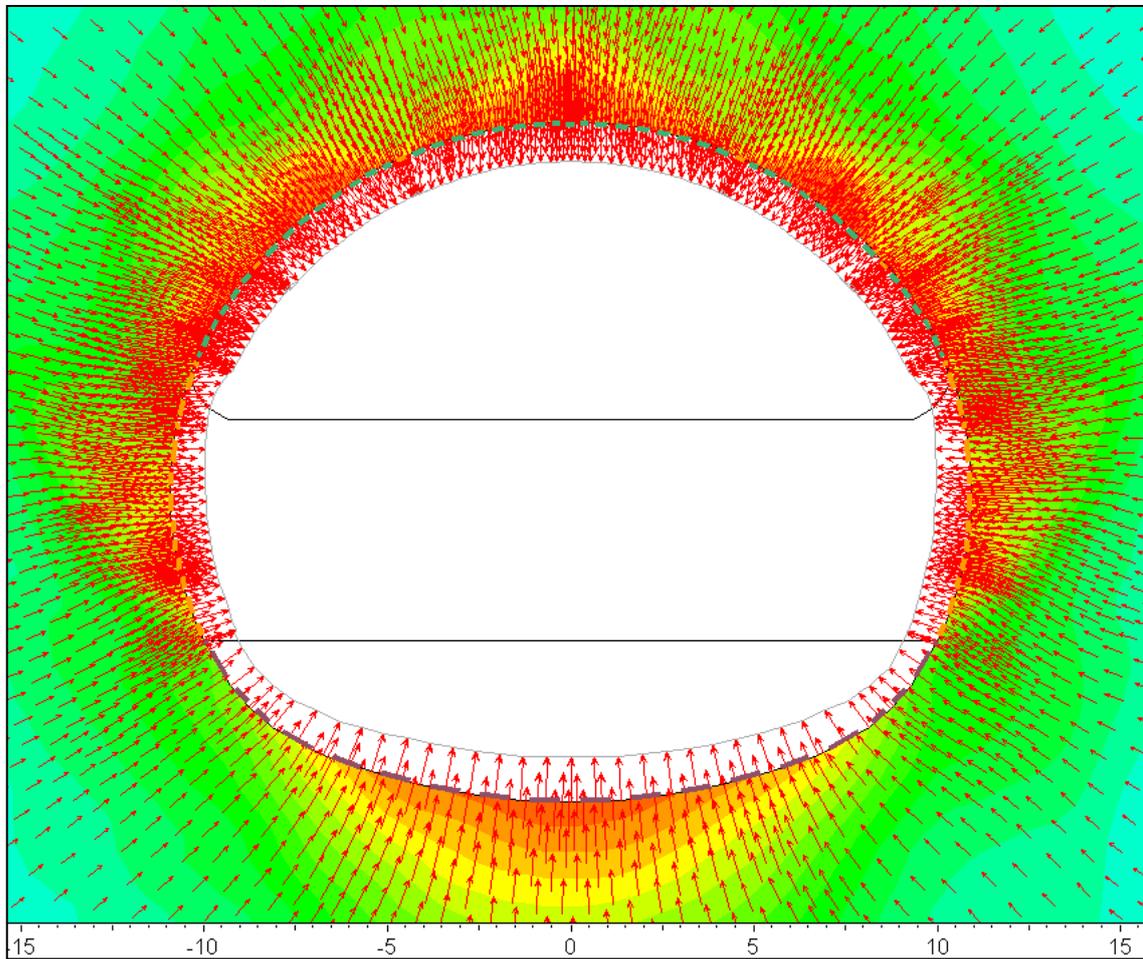


Abbildung 27: Verschiebungsvektoren bei S4K1 im Endzustand.

#### 4.2.2.2 Gesamt- und Radialverschiebungen

Durch die oben erwähnte Richtungsänderung der Verschiebungsvektoren wurden für die Darstellung der Gesamtverschiebungen die Werte direkt an den Stauchelementen interpoliert, um kein verfälschtes Bild des vermeintlichen Verschiebungsabfalls zu erzeugen. Die Gesamtverschiebungen der drei Modelle sind in Abbildung 28 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass bei S3 die Verschiebungen im Endzustand in der Nähe der Stauchelemente größer werden. Das liegt an der Neigung der Verschiebungsvektoren in Richtung der Stauchelemente. Bei S3 ist dieses Verhalten sehr stark ausgeprägt, weil jedes der Stauchelemente große Verformungen aufnehmen muss. Das System verhält sich am steifsten (im Vergleich zu S4K1 und S5).

Die Verschiebungen treten bei S5 sehr gleichmäßig auf, da sich das System als Ganzes duktil verhält, und somit die Gesamtverschiebungen als radiale Verschiebungen behandelt werden können, ebenso wie bei S4K1.

Die radialen Verschiebungen betragen im Bereich der Kalotte bei allen Modellen zwischen 22 und 23 cm. Diese sind bei S5 in der Firste im Vergleich zu S4K1 und S3 wegen der geringeren Steifigkeit des Ausbaus am höchsten.

Die nach dem Vortrieb der Kalotte entstandenen höheren Firstverschiebungen bei S4K1 werden durch den Einfluss des Strossen- und Sohlvortriebs, von jenen im Kämpferbereich überstiegen. Sie betragen zwischen 22 und 23 cm.

Der geringe Abstand zwischen den Stauchelementen sorgt bei S5 für einen fließenden Übergang zwischen Spritzbeton und Stauchelementen und lässt das System als Ganzes duktil agieren, deutet aber auch darauf hin, dass jedes Stauchelement schwach ausgelastet ist.

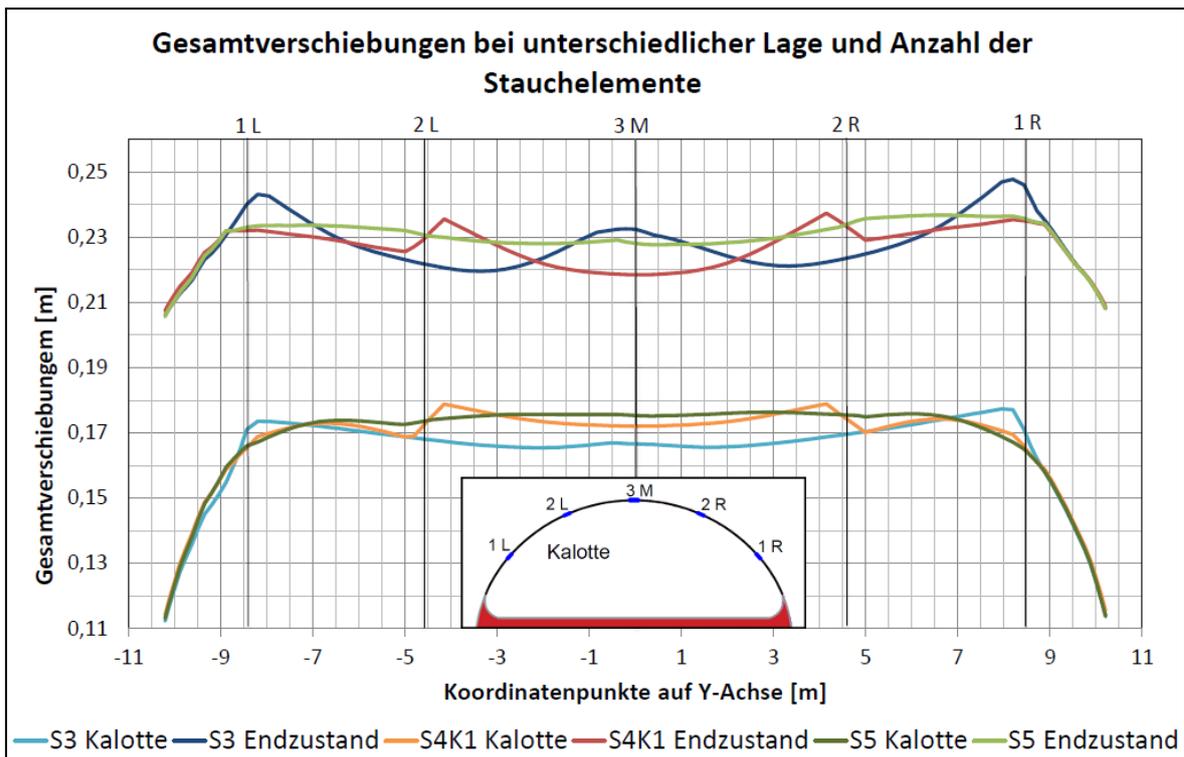


Abbildung 28: Gesamtverschiebungen von S3 (blaue Linien), S4K1 (orange-rote Linien) und S5 (grüne Linien) nach dem Kalottenausbruch und im Endzustand.

#### 4.2.2.3 Gebirgsverformungen in Ausbruchsnähe

Der Einfluss der Änderungen der Lage und Anzahl der Stauchelemente auf das Verformungsverhalten ist lokal auf die Nähe zum Hohlraumausbruch beschränkt. Die Gebirgsverformungen sind in Abbildung 29 für alle Modelle grafisch dargestellt.

Das in der Firste positionierte Stauchelement bei S3 sorgt für eine leichte Entlastung der Gebirgsbeanspruchung über der Firste, weil dieses Verschiebungen in der Firste ermöglicht. Somit sind die Verformungen in diesem Bereich kleiner als bei den anderen Modellen. Zum Kämpfer hin, besonders im Nahbereich der unteren Reihe Stauchelemente, werden die Verformungen größer.

Bei S5 ist die Gebirgsverformung lokal zwischen den Stauchelementen hoch, nimmt dann aber in kurzer Distanz zum Ausbruchsquerschnitt wieder ab. Das System bewirkt eine geringfügig größere Gebirgsverformung im Ulmbereich als bei den anderen Modellen.

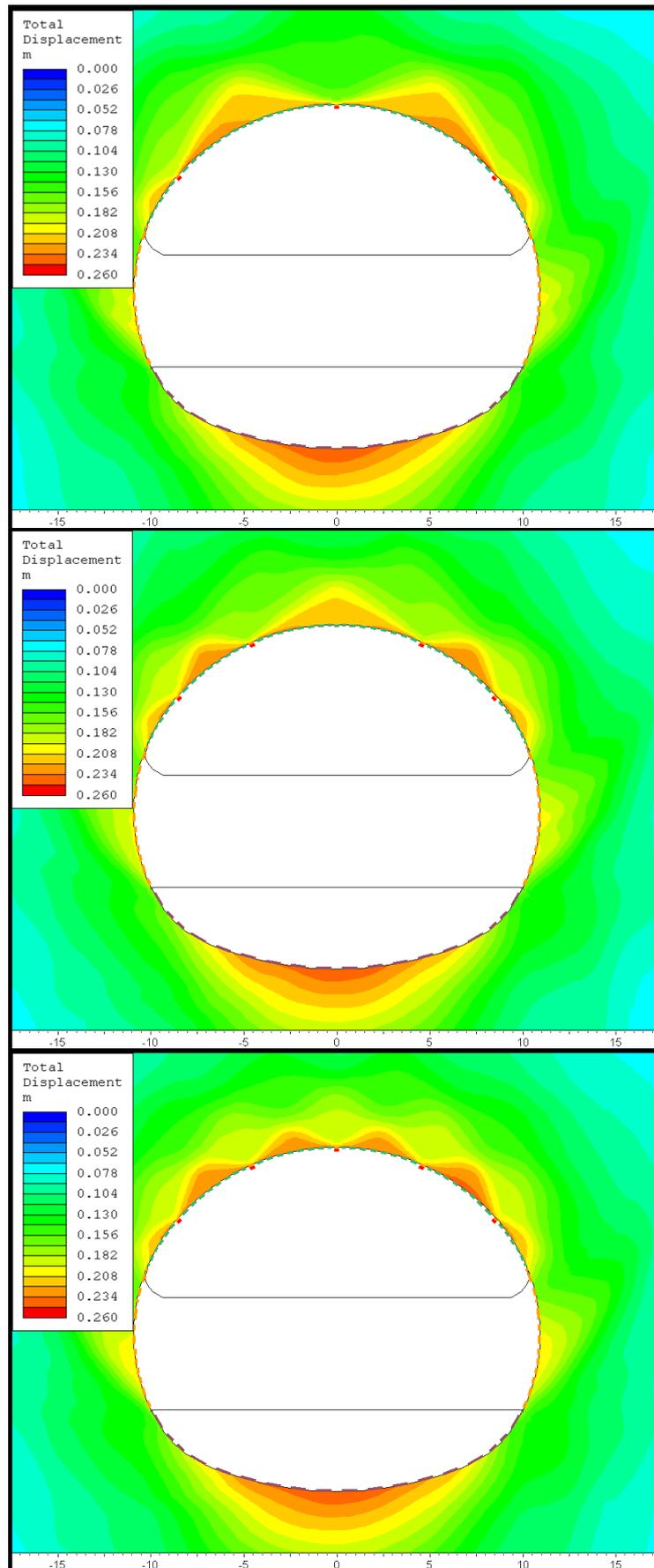


Abbildung 29: Gesamtverformungen des Gebirges in Ausbruchsnähe, oben: S3, Mitte: S4K1, unten: S5.

#### 4.2.2.4 Plastische Zonen

Die geringe Gebirgsqualität führt bei allen Modellen zur Ausbildung einer plastischen Zone mit einem Radius von rund 25 Metern.

#### 4.2.2.5 Gebirgsverformungsbild in großer Distanz zum Ausbruch

Da der plastische Radius rund 25 Meter groß ist, sinken die Verformungen bei allen Modellen erst in großem Abstand zum Ausbruch ab. In einem Abstand von 16 Metern zum Ausbruchsrund sind die Gebirgsverformungen bei allen Modellen größer als 5 cm.

Die horizontalen Verformungen der Modelle sind in Abbildung 30 dargestellt und zeigen ein gleichmäßiges Verformungsverhalten im Ulmbereich.

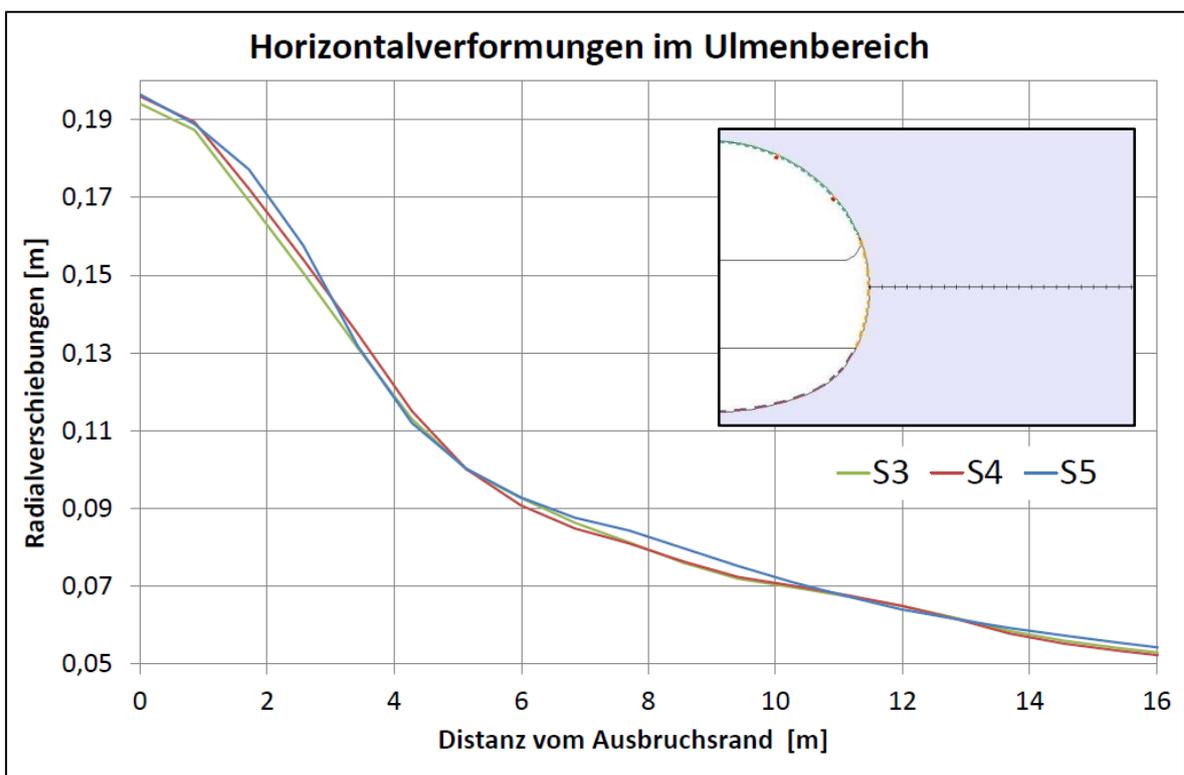


Abbildung 30: Darstellung der Horizontalverformungen von der Ulme weg.

#### 4.2.2.6 Spannungen ( $\sigma_1$ - Hauptnormalspannung)

Im Bereich, in dem sich eine plastische Zone ausbildet, fallen die Spannungen stark ab. Am Ausbruchsrund entsprechen die Tangentialspannungen der Restfestigkeit des Gebirges bzw. erhöhen sich durch den Ausbau. Die Radialspannungen am Ausbruchsrund entsprechen dem Ausbauwiderstand bzw. dem aufgetragenen Innendruck. Sollten diese Komponenten null sein, nehmen die Radialspannungen auch einen Wert von null an. Im Bereich hinter den Stauchelementen sind die Hauptnormalspannungen höher als hinter dem Spritzbeton. In Abbildung 31 sind die Hauptnormalspannungen im Nahbereich des Hohlraumausbruchs abgebildet.

Der Spannungsabfall bei S3 ist im Kämpferbereich am größten auf, dort wo die höchsten Verschiebungen vorhanden sind. Die Unterschiede zwischen Stauchelementen (höhere Spannungswerte) und Spritzbeton (starker Abfall) sind bei diesem Modell am stärksten zu sehen. Im Vergleich dazu merkt man bei S5, dass die geringsten Unterschiede der Spannungen in der Nähe zum Ausbruchsrund auftreten.

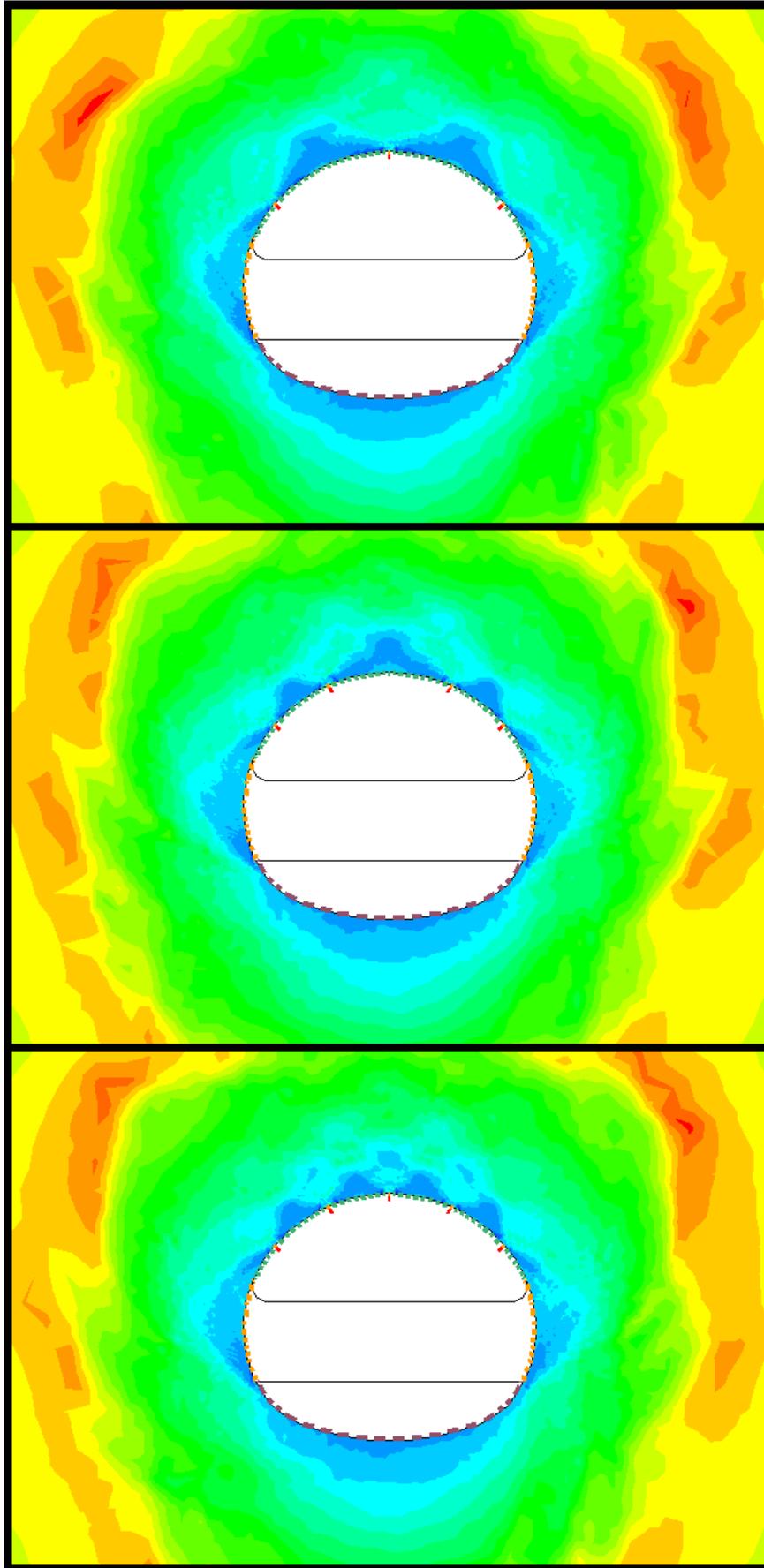


Abbildung 31: Darstellung der Hauptnormalspannungen (dunkelblau 0 MPa, rot 17 MPa),  
oben: S3, Mitte: S4K1, unten: S5.

## 4.3 Änderung des $K_0$ -Werts

Ziel dieser Untersuchung ist es, den Einfluss von unterschiedlichen Primärspannungen bei der Verwendung eines duktilen Ausbaus zu bestimmen. Dazu wurde der Seitendruckbeiwert der Modelle variiert.

### 4.3.1 Modellbeschreibung

Der Seitendruckbeiwert  $K_0$  gibt das Verhältnis zwischen horizontalen und vertikalen Spannungen an. Anhand der horizontalen und vertikalen Spannungen kann dieser wie in Gleichung (4.1) dargestellt berechnet werden.

$$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (4.1)$$

$K_0$ ... Seitendruckbeiwert [-]

$\sigma_h$ ... Horizontale Spannung [MPa]

$\sigma_v$ ... Vertikale Spannung [MPa]

Der Wert der horizontalen Spannungen wird dann bei bekanntem Seitendruckbeiwert mit Gleichung (4.2) bestimmt.

$$\sigma_h = \sigma_v * K_0 \quad (4.2)$$

In Tabelle 3 sind die Primärspannungswerte, die in dieser Untersuchung verwendet wurden, aufgelistet. Vom Basismodell ausgehend, dessen  $K_0$ -Wert eins entspricht, werden bei  $K_0,7$  die horizontalen Spannungen abgemindert. Beim Spannungs- und Verschiebungsniveau wurde versucht, den gleichen Wertebereich bei allen Modellen zu erhalten, um anhand der Vergleiche die Einflüsse des verhältnismäßig höheren Seitendrucks zu erfassen. Dazu wurden für die Eingabewerte von  $K_1,3$  die mit 10 MPa errechneten Primärspannungen (vgl. Kapitel 3.3) als die Horizontalen angenommen und durch das Umformen von Gleichung (4.2) die vertikalen Primärspannungen mit 7,7 MPa berechnet.

Tabelle 3: Errechnete Primärspannungen bei unterschiedlichen  $K_0$ -Werten

Modellname	Seitendruckbeiwert	Primärspannungen [MPa]			
		$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_v$	$\sigma_h$
K0,7	$K_0 = 0,7$	10	7	10	7
S4K1	$K_0 = 1,0$	10	10	10	10
K1,3	$K_0 = 1,3$	10	7,7	7,7	10

### 4.3.2 Ergebnisse und Interpretation

Neben der Auswertung der Verschiebungen, Verformungen, Spannungen und der plastischen Zonen wird ein Vorschlag zur Optimierung der Lage der Stauchelemente bei einem Modell mit einem  $K_0$ -Wert kleiner eins erläutert.

#### 4.3.2.1 Gesamt- und Radialverschiebungen

Die Neigungen der Verschiebungsvektoren werden in Abbildung 32 im gleichen Maßstab grafisch dargestellt. Bis auf kleine Ausschläge im Nahbereich der Stauchelemente sind diese radial gerichtet. Daher werden die Gesamtverschiebungen als Radialverschiebungen betrachtet. In Abbildung 33 werden die Gesamtverschiebungen in einem Diagramm verglichen und im Folgenden ausgewertet.

Die niedrigsten Gesamtverschiebungen treten bei K0,7 auf, sowohl beim Ausbruch der Kalotte als auch im Endzustand. Besonders markant sind die geringen Firstverschiebungen, die im Endzustand mit 12 cm deutlich kleiner sind als die Verschiebungen im Kämpferbereich, die einen Wert von 20 cm erreichen.

Bei B4K1, dem Basismodell, sind im Vergleich zu den anderen Modellen die größten Gesamtverschiebungen zu erkennen, sowohl in der Firse als auch im Kämpfer. Dieses Verhalten ist auf die höheren Primärspannungen zurückzuführen. Diese wurden bei den anderen Modellen jeweils in einer Richtung abgemindert.

Die Gesamtverschiebungen im Firstbereich sind bei K1,3 höher als im Kämpferbereich. Dieses Verhältnis tritt beim Ausbruch der Kalotte auf und bleibt durch den Strossen-/Sohlvortrieb unbeeinflusst. Die Verschiebungen erhöhen sich lediglich um rund 3 cm.

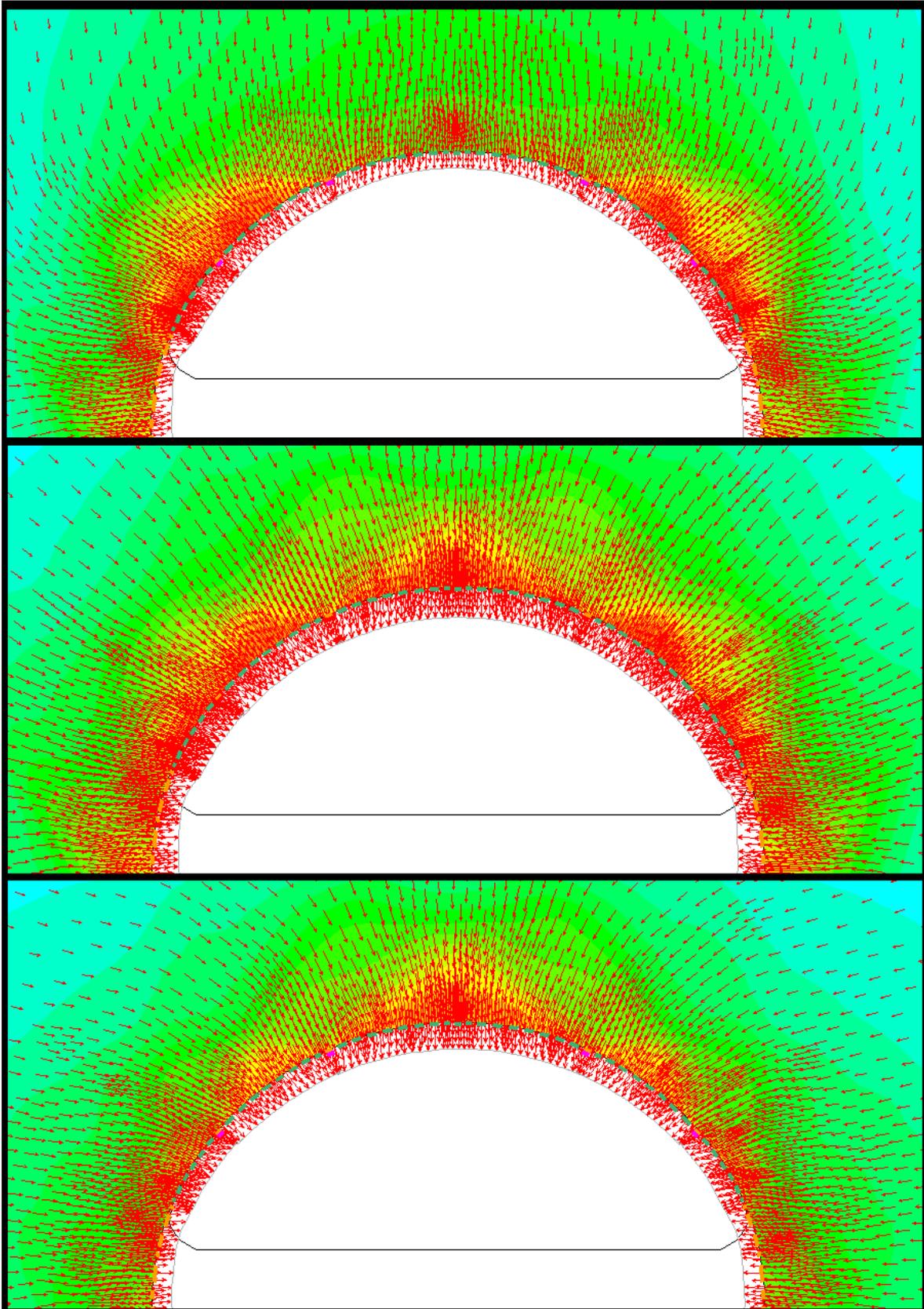


Abbildung 32: Verschiebungsvektoren im Endzustand, oben: K0,7, Mitte: S4K1, unten: K1,3.

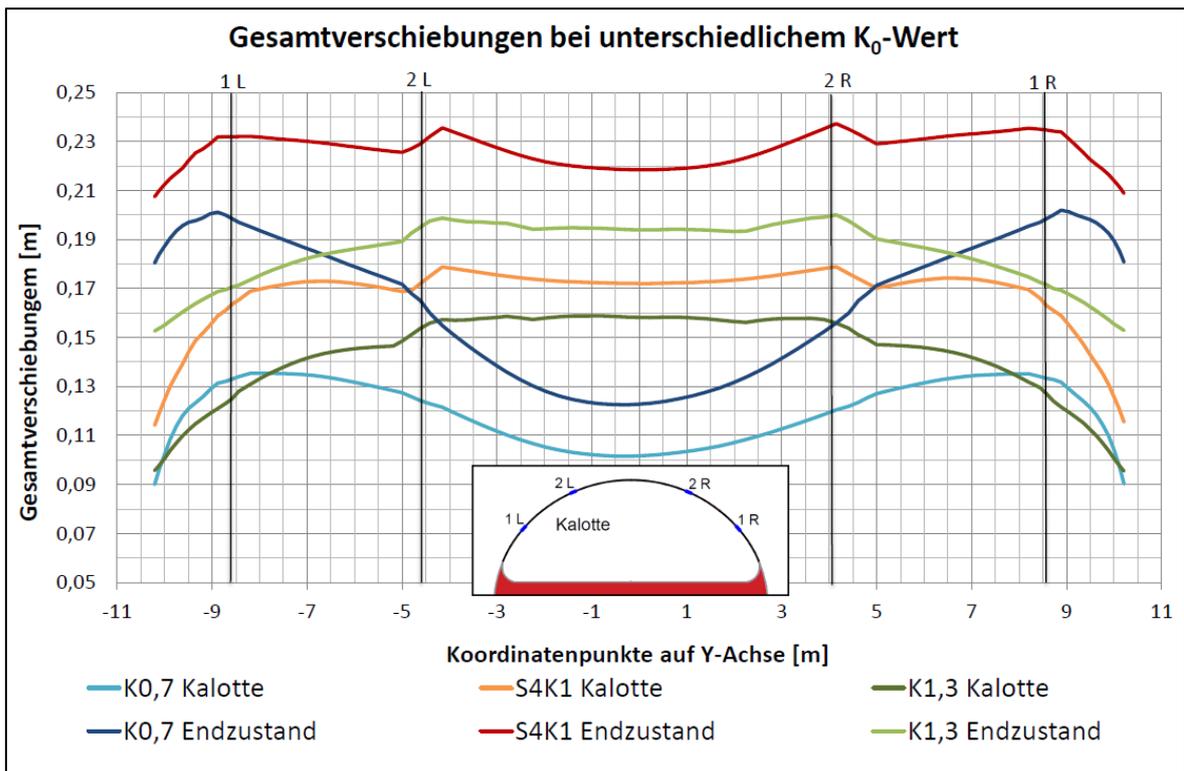


Abbildung 33: Gesamtverschiebungen von K0,7 (blaue Linien), S4K1 (orange-rote Linien) und K1,3 (grüne Linien) nach dem Ausbruch der Kalotte und im Endzustand.

#### 4.3.2.2 Gebirgsverformungen in Ausbruchsnähe

Die quantitativ höchsten Verformungen aller Modelle treten in S4K1 auf (Abbildung 34). Die verhältnismäßig größten Verformungen bei K0,7 liegen im Kämpferbereich und bei K1,3 in der Firste.

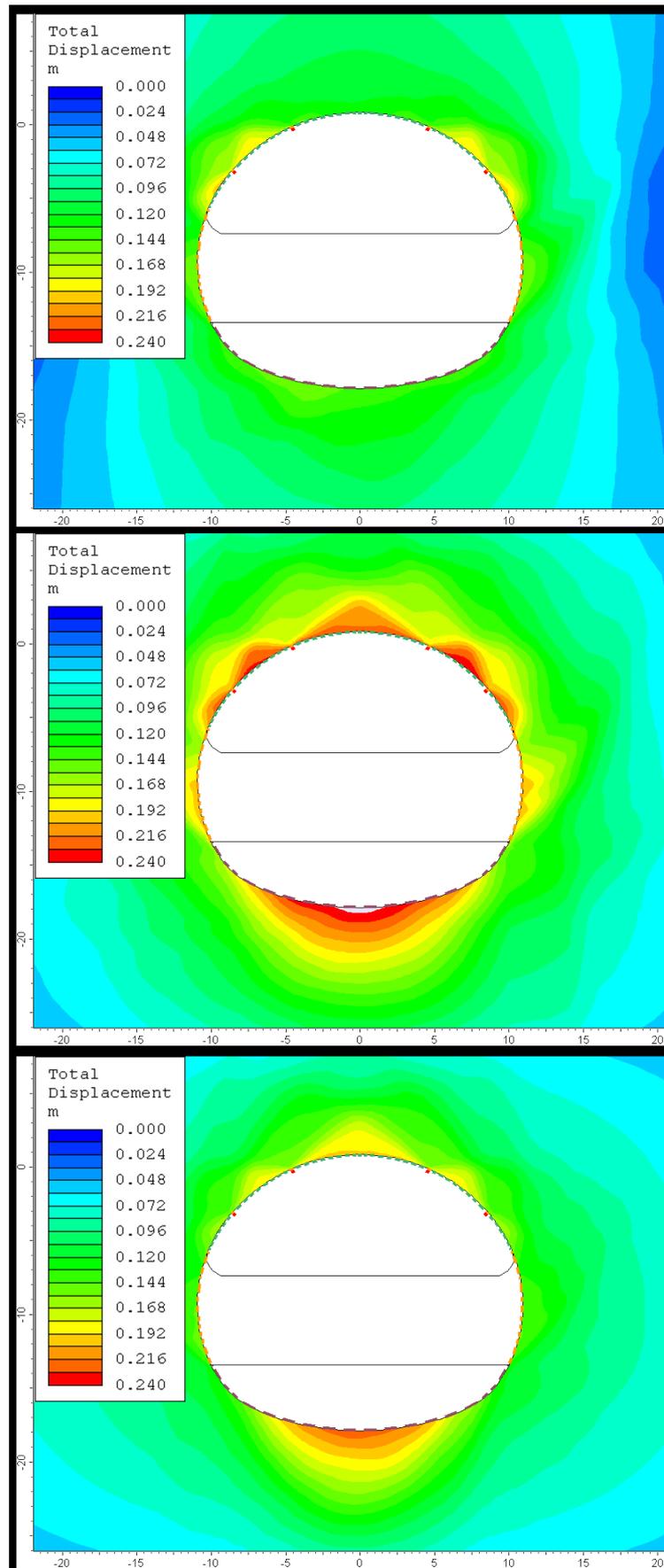


Abbildung 34: Darstellung der Gebirgsverformungen in Ausbruchsnähe, oben: K0,7, Mitte: S4K1, unten: K1,3.

#### 4.3.2.3 Horizontale Gebirgsverformung

Die in K0,7 auftretenden horizontalen Verformungen sind lokal auf Ulm- und Kämpferbereich beschränkt (Abbildung 35). Im Gebirgsbereich über der oberen Reihe der Stauchelemente treten keine horizontalen Verformungen mehr auf. Die Ausdehnung der horizontalen Verformungen in vertikale- und horizontale Richtung ist bei K1 und K1,3 größer.

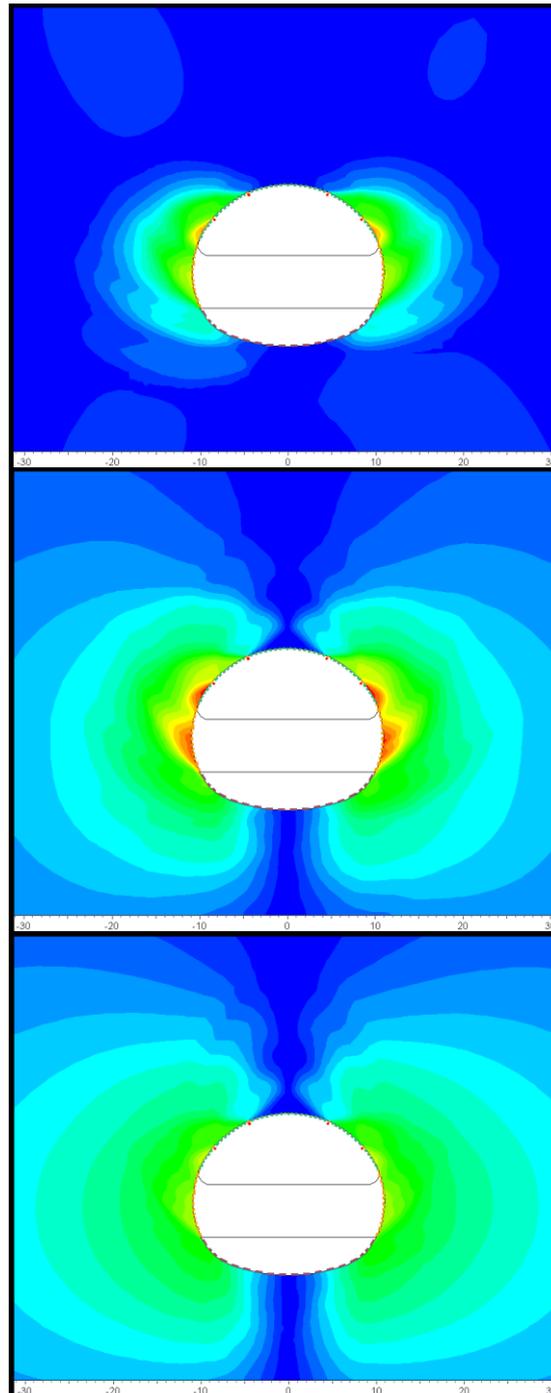


Abbildung 35: Darstellung der horizontalen Gebirgsverformungen, oben: K0,7, Mitte: S4K1, unten: K1,3.

#### 4.3.2.4 *Plastische Zonen*

Die hohen lokalen Verschiebungen und Verformungen entstehen durch die Plastifizierung des Gebirges. Die Form dieser Zonen wird durch den  $K_0$ -Wert stark beeinflusst und ist in Abbildung 36 dargestellt.

Über der Firste wird das Gebirge bei  $K_{0,7}$  nur in Hohlraumnähe überbeansprucht. Die Plastifizierung reicht nicht weiter in das Gebirge hinein. Die Verformungen und Verschiebungen in der Firste sind deshalb kleiner als im Kämpferbereich. In der Horizontalen nimmt die plastische Zone einen Wert von rund 25 Metern an, gerechnet von der Ausbruchsmitte weg.

Bei  $K_1$  bildet sich eine plastische Zone aus, die annähernd kreisrund ist. Dieses Verhalten stellt sich aufgrund der gleich großen vertikalen- und horizontalen Primärspannungen ein. Dementsprechend sind die Verschiebungen am gesamten Ausbruchsrund hoch.

Die plastische Zone bei  $K_{1,3}$  breitet sich in der Vertikalen stärker aus als in der Horizontalen. Mit knapp 20 Metern übersteigt diese in vertikaler Richtung die Ausdehnung des Falles mit  $K_1$ .

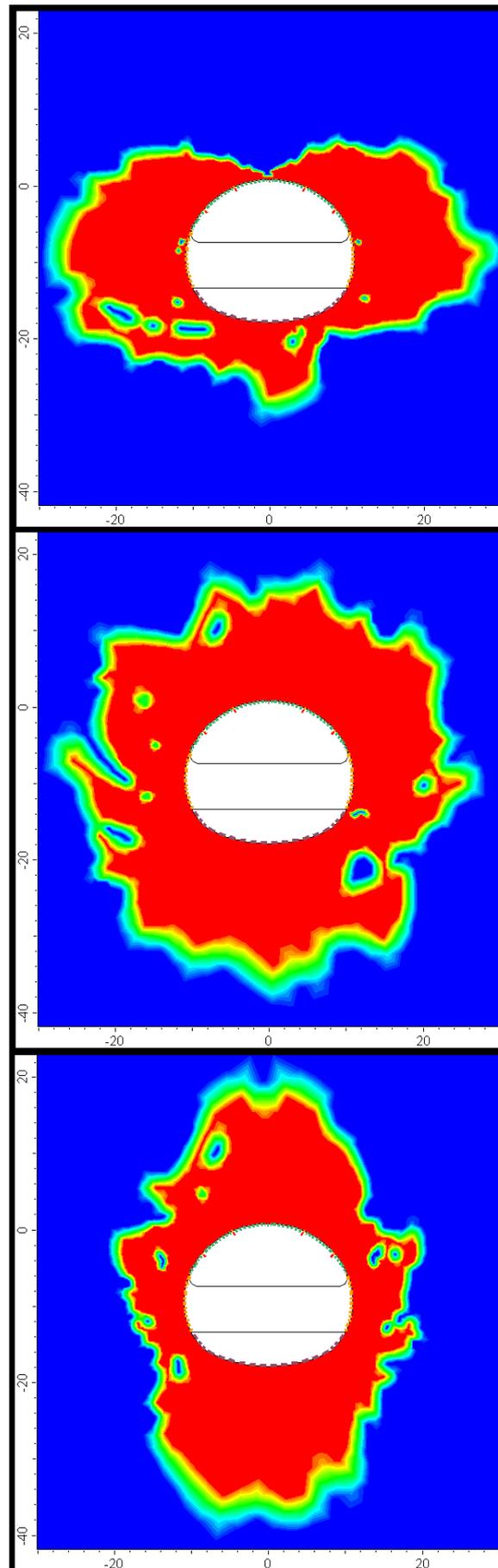


Abbildung 36: Ausbildung der plastischen Zonen, oben: K0,7, Mitte: S4K1, unten: K1,3.

Bei K1,3 tritt eine Plastifizierung über der Firste schon vor der "Ortsbrust" auf (Abbildung 37). Bei den anderen Modellen ist dieses Verhalten erst nach Einbau der Stützung der Fall.

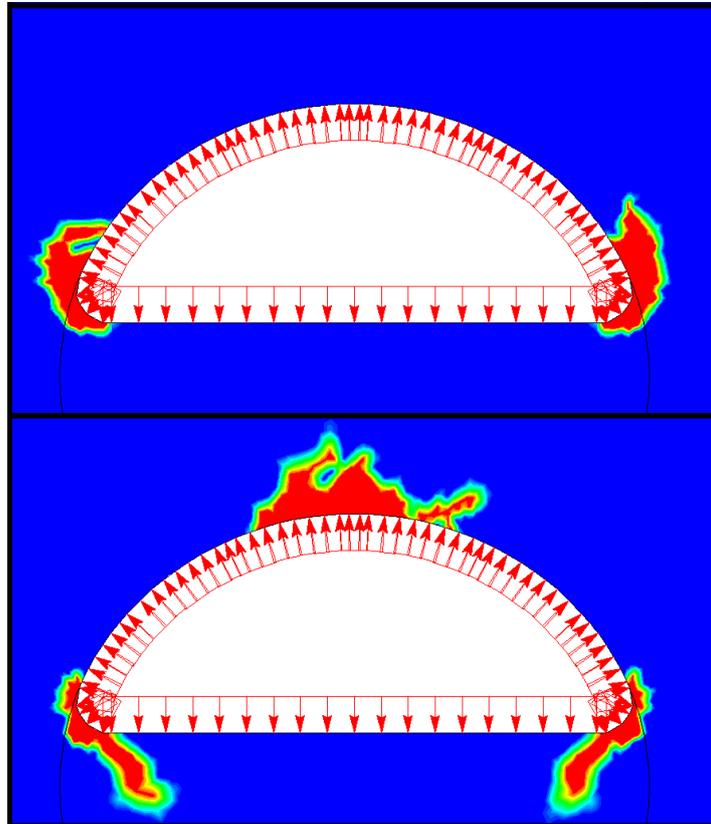


Abbildung 37: Ausbildung der plastischen Zone im gestützten Zustand ( $p_i=40\%$ ), oben: S4K1, unten: K1,3.

#### 4.3.2.5 Gebirgsverformungsbild in großer Distanz zum Ausbruch

Der Seitendruckbeiwert wirkt sich auf den Gebirgsverformungsverlauf aus. Bei analytischen Ansätzen, wie den Formeln nach Feder, treten die größten Verformungen in Richtung der größten Primärspannungen auf und klingen erst in großer Distanz zum Hohlraumausbruch ab. Bei der Simulation sind durch die Plastifizierung die Verschiebungen und Verformungen lokal (wo ist abhängig vom jeweiligen Modell) am Hohlraumausbruchsrund größer. Für jedes Modell werden die Gesamtverformungen gezeigt.

Abbildung 38 zeigt, dass die vertikalen Verformungen erst in großer Distanz zum Ausbruchsrund abklingen, die Überbeanspruchung aber zu größeren Verformungen im Kämpferbereich führt.

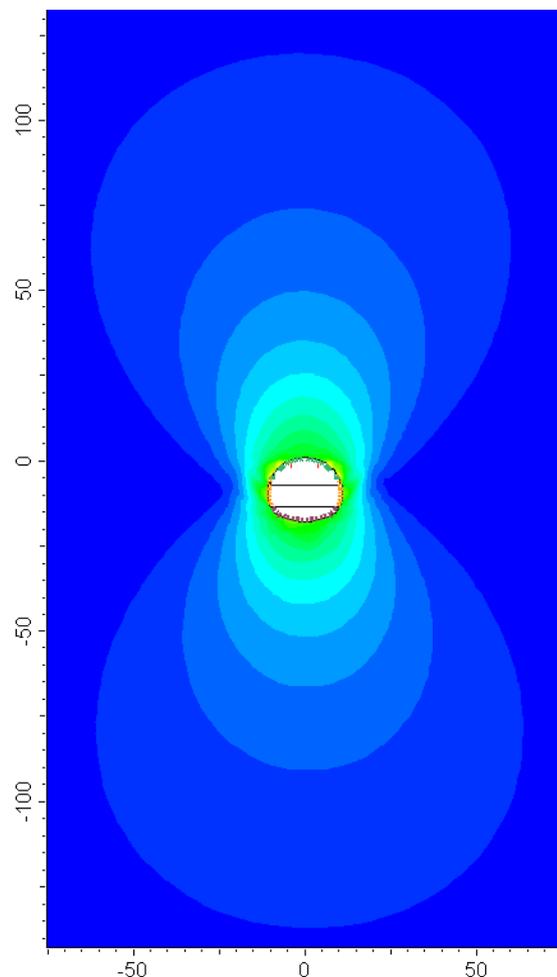


Abbildung 38: Gesamtverformungen im Gebirge bei K0,7.

Bei S4K1 klingen die Gebirgsverformungen in radialer Richtung quasi kreisrund um den Ausbruchsrund ab (Abbildung 39).

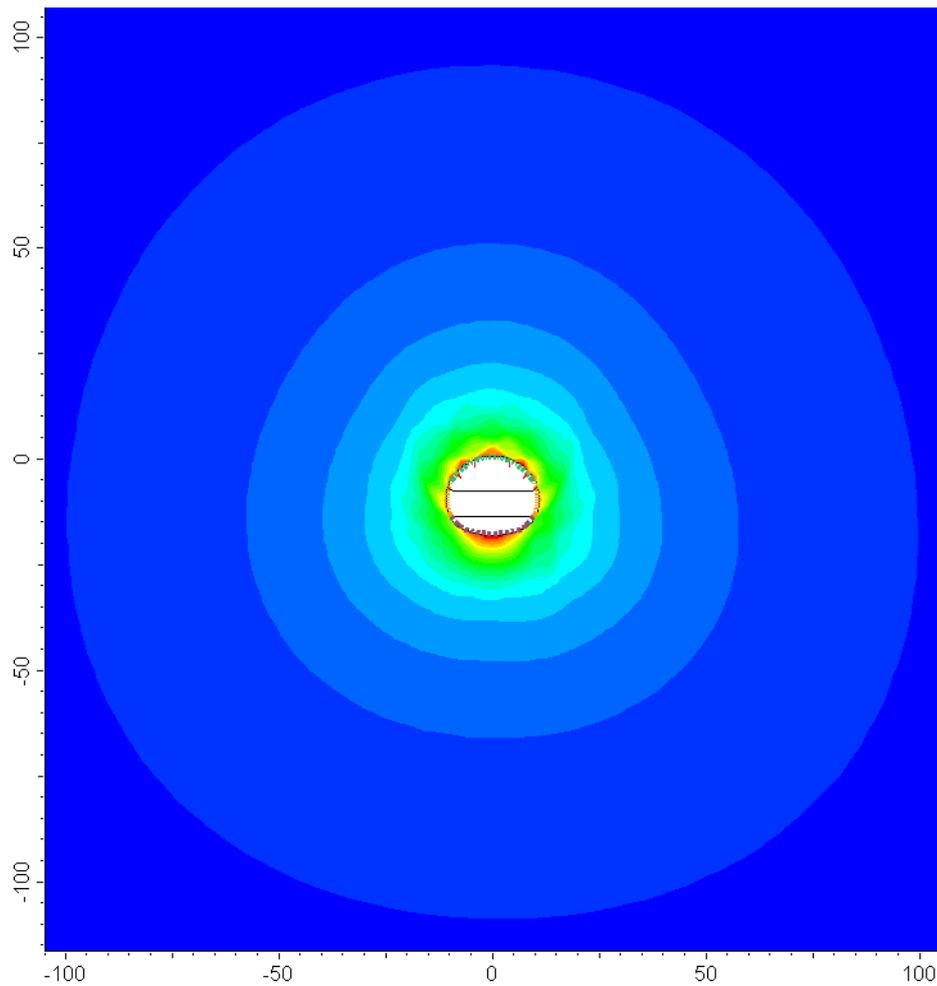


Abbildung 39: Gesamtverformungen im Gebirge bei S4K1.

Bei K1,3 verhält es sich wie bei K0,7, in Richtung der primären Hauptnormalspannungen (horizontal) klingen die Verformungen in großer Distanz zum Hohlraum ab, in der Firse sind diese nahe des Ausbruchsrandes hoch (Abbildung 40). Abbildung 41 zeigt die Verformungsentwicklung in einem Horizontal- und Vertikalschnitt.

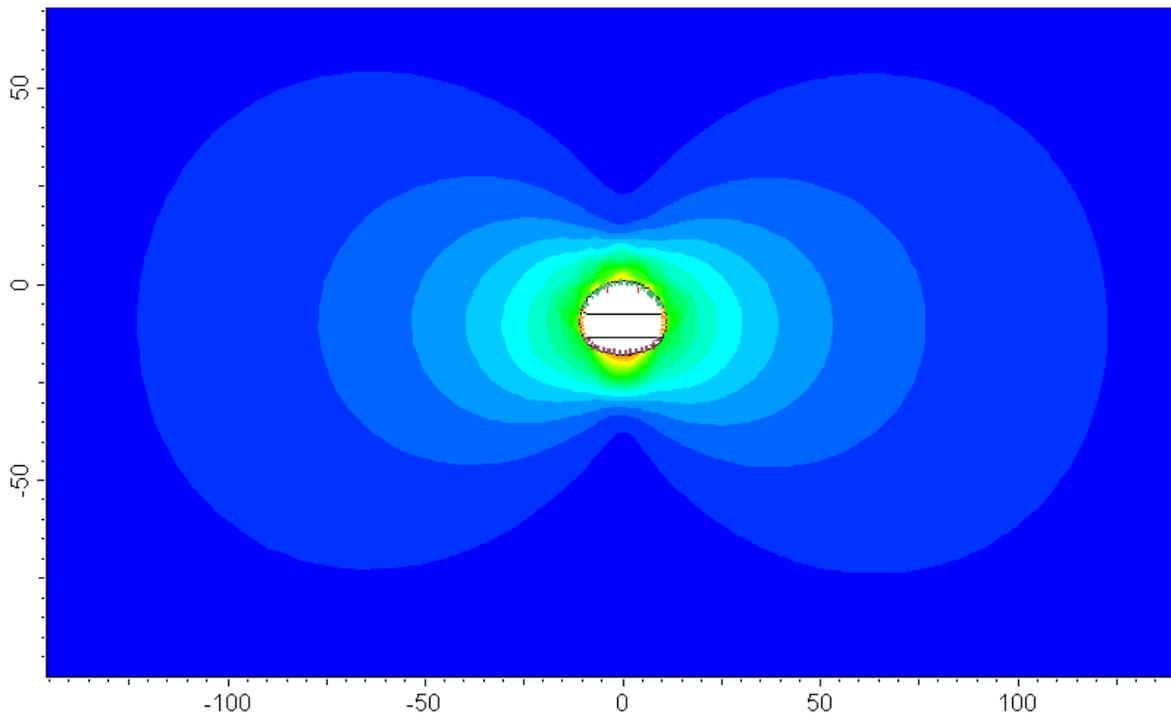


Abbildung 40: Gesamtverformungen im Gebirge bei K1,3.

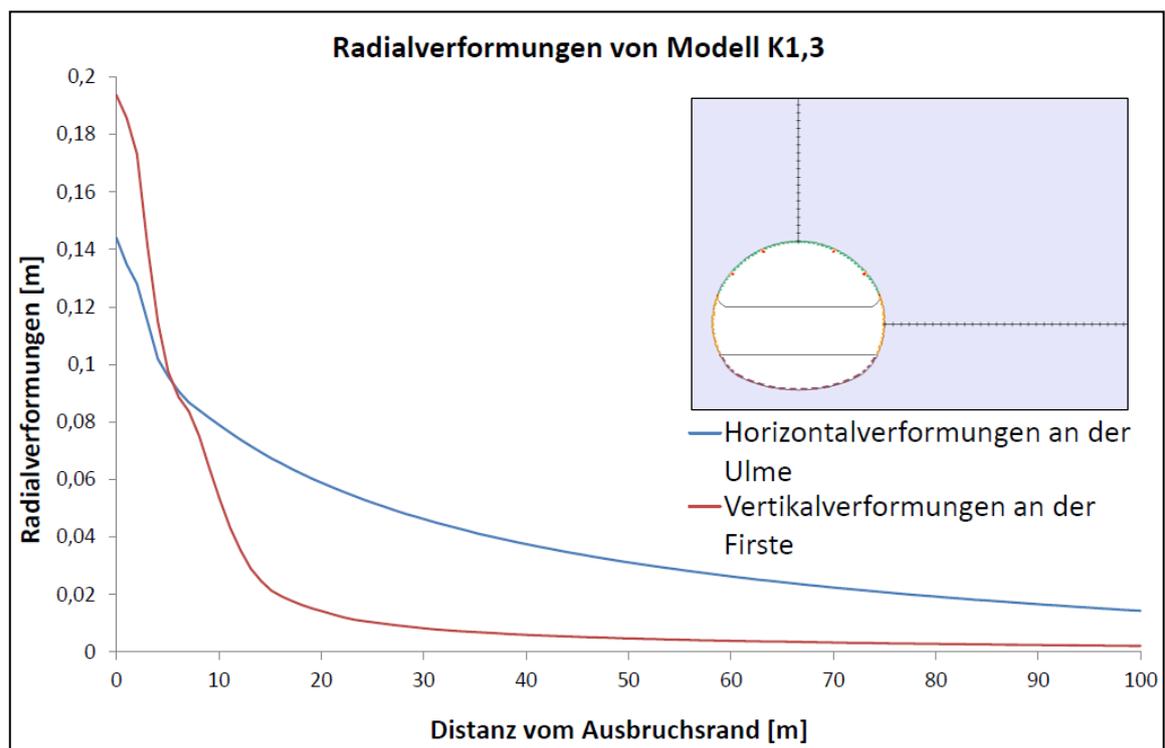


Abbildung 41: Verlauf der radialen Verformungen ausgehend von der Firste und Ulme bei Modell K1,3.

#### 4.3.2.6 Spannungen ( $\sigma_1$ - Hauptnormalspannung)

Am Übergang von plastischem zum elastischem Bereich treten die höchsten Spannungen auf. Die Darstellung der Hauptnormalspannungen der drei Modelle ist in Abbildung 42 zu sehen. Diese zeigt bei K0,7 den höchsten Wert im horizontalen Abstand von 15 Metern zum Hohlraumausbruch. Bei K1,3 stellen sich die höchsten Spannungen 17 Meter über der Firste ein und bei S4K1 treten diese ringförmig in einem Abstand von 15 bis 17 Metern zum Ausbruch auf.

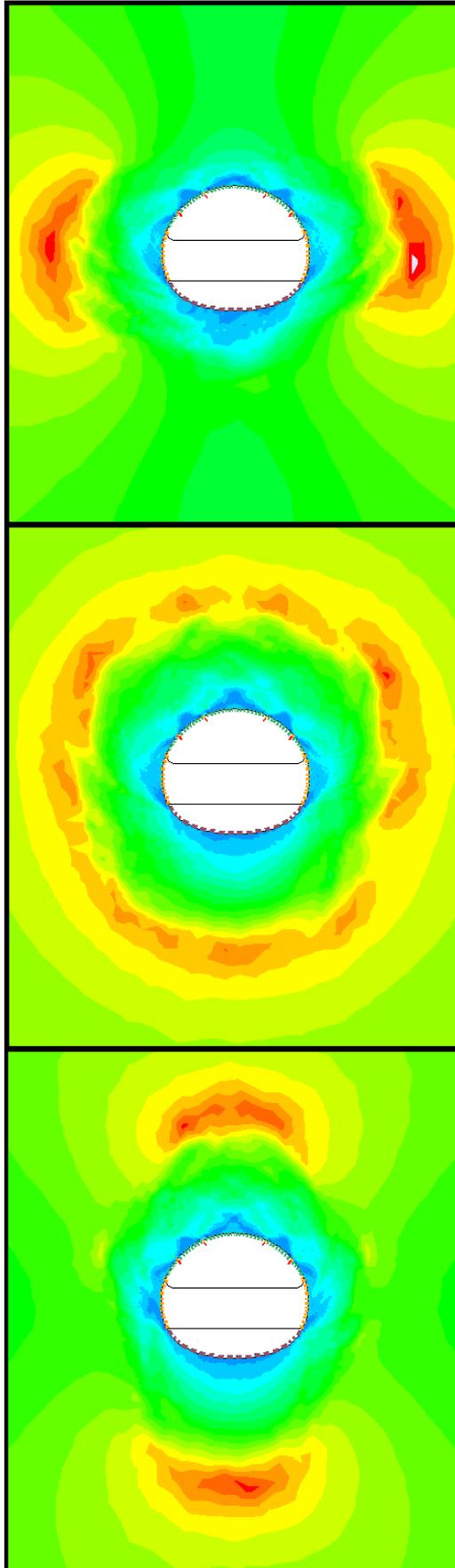


Abbildung 42: Darstellung der Hauptnormalspannungen (dunkelblau 0 MPa, rot 17 MPa),  
Oben: K0,7, Mitte: S4K1, Unten: K1,3.

#### 4.3.2.7 Änderung des Ausbaus bei K0,7

Die Ausbreitung der gesamten horizontalen Verschiebungen und Verformungen bis in die Firste wird bei Modell K0,7 von der oberen Reihe der Stauchelemente verhindert. Die Verschiebungen im gesamten Firstbereich sind daher gering und verlagern sich in den Kämpferbereich (Abbildung 43).

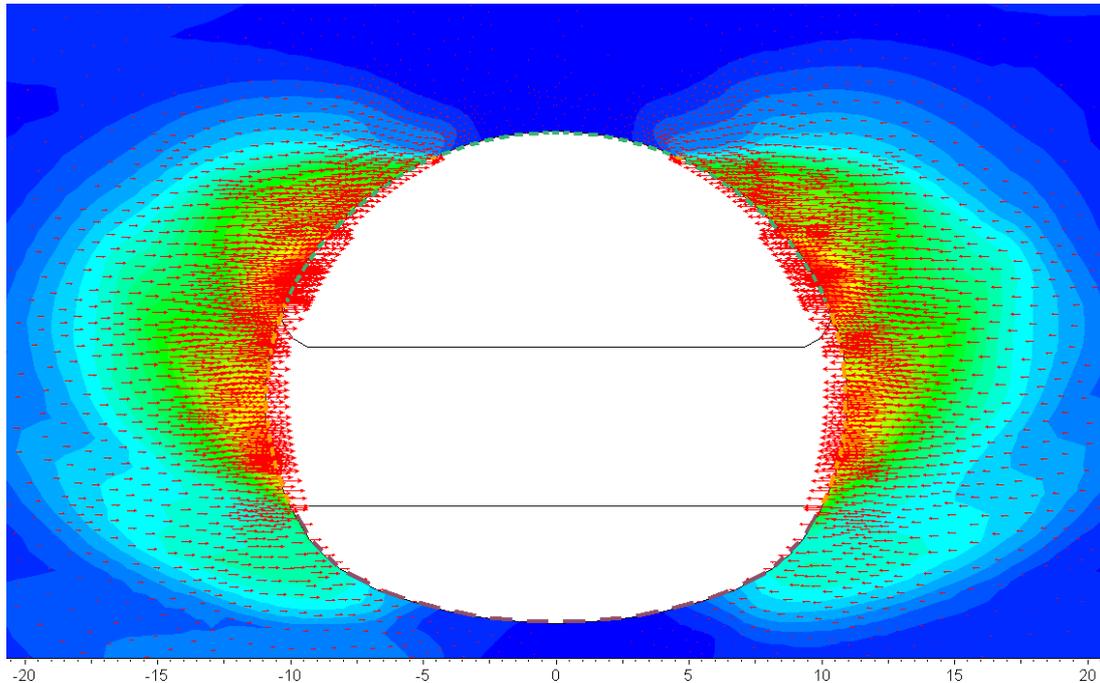


Abbildung 43: Horizontale Verschiebungen von K0,7 beim Modell mit 4 Stauchelementen.

Eine Änderung bei K0,7 auf ein System mit drei Stauchelementen, wobei die obere Reihe durch ein Element in der Firste ersetzt wird (Positionierung wie bei S3), führt dazu, dass im Firstbereich horizontale Verschiebungen auftreten (Abbildung 44). Dadurch wird die Deformation über den Umfang gleichmäßiger verteilt und die Beanspruchung der Spritzbetonschale in der Firstkappe reduziert.

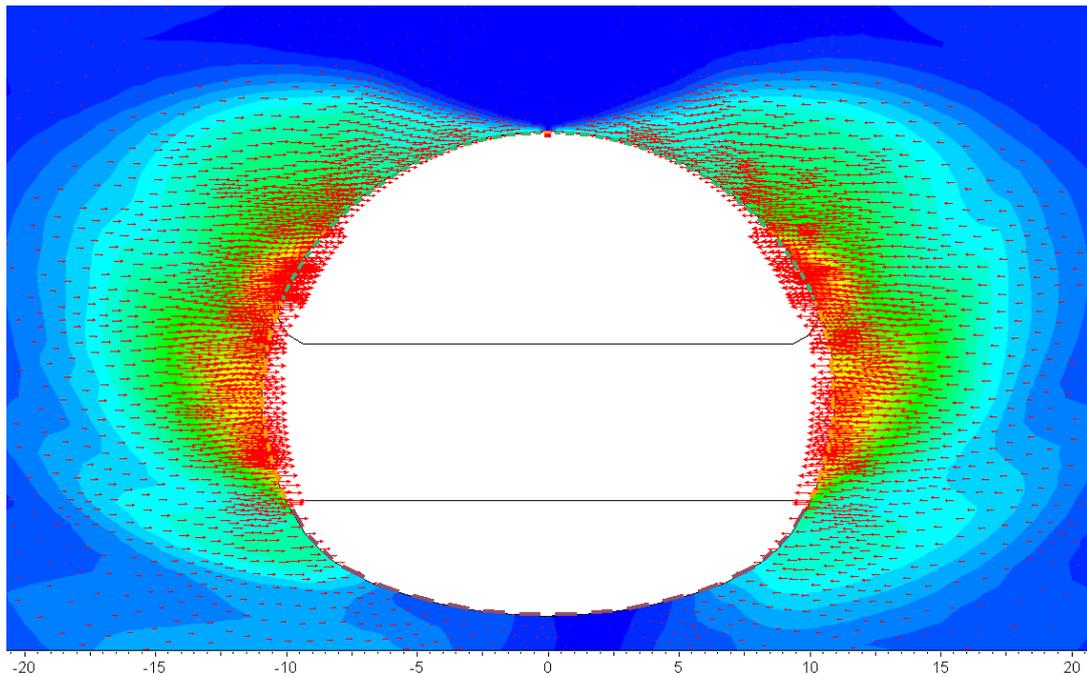


Abbildung 44: Horizontale Verschiebungen von K0,7 mit 3 Stauchelementen

Ein Vergleich der Gesamtverschiebungen (Abbildung 45) des ursprünglichen (K0,7) und des optimierten Modells (K0,7op) zeigt bei K0,7op höhere Verschiebungen in der Firste und eine leichte Reduktion dieser im Kämpferbereich. Dadurch ergibt sich ein günstigeres Verschiebungsbild.

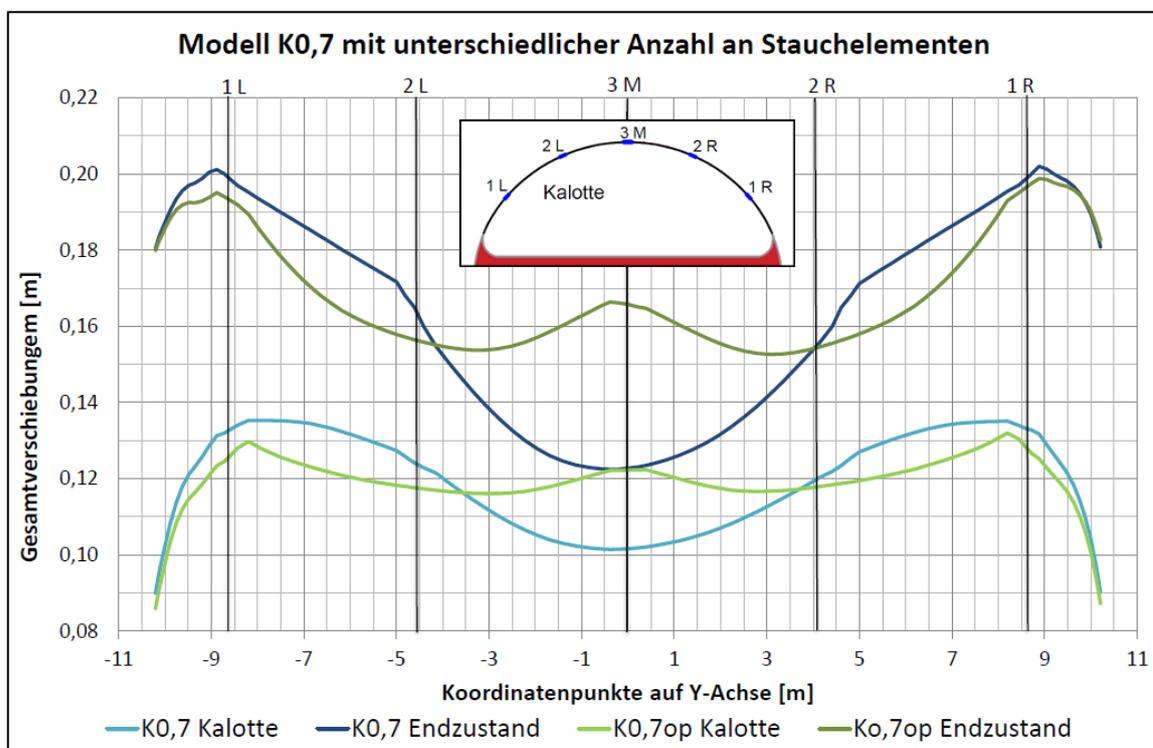


Abbildung 45: Gesamtverschiebungen von K0,7 bei 3 Stauchelementen (grüne Linien) und bei 4 Stauchelementen (blau).

## 5 Schlussfolgerungen

Der duktile Ausbau führt bei der Simulation der gegebenen Gebirgsverhältnisse, die einer großen Beanspruchung unterliegen, dazu, dass die Spannungen in der Spritzbetonschale reduziert werden. Durch diese Reduktion wird ein Versagen der Spritzbetonschale verhindert.

Bei einem Seitendruckbeiwert von eins ist die Lage der duktilen Stauchelemente eher von untergeordneter Bedeutung, betreffend des Verschiebungs- und Verformungsverhaltens. Das System verhält sich weicher, wenn eine höhere Anzahl von Stauchelementen verwendet wird. Deshalb sind bei drei Stauchelementen die aufzunehmenden Verformungen in jedem Stauchelement hoch und es verhält sich (im Vergleich zu den anderen Modellen) eher steif. Durch den Einbau von 5 Stauchelementen wird das Systemverhalten nicht markant verändert, würde aber die Kosten der Ausführung durch das zusätzliche Material und den größeren Zeitaufwand beim Einbau erhöhen. Das System mit vier Stauchelementen ist daher gut gewählt.

Bei dem simulierten Modell, bei dem der Seitendruckbeiwert kleiner als eins ist, sind die Radialverschiebungen im Firstbereich sehr gering, da das Gebirge nur in kurzer Distanz zum Hohlraumausbruch überbeansprucht wird. Die Radialverschiebungen sind im Kämpferbereich dafür um so höher. Um diesem Verhalten entgegen zu wirken kann die Positionierung von drei Stauchelementen (wie bei S3) bei diesem Primärspannungszustand gewählt werden. Durch das Stauchelement, das in der Firste positioniert wird, werden horizontale Verschiebungen bis zur Firste hin zugelassen und die Deformation verteilt sich gleichmäßiger über den Umfang.

Das Modell, bei dem der Seitendruckbeiwert größer als eins ist, zeigt, dass die Firstverschiebungen in jeder Phase höher sind als im Bereich des Kämpfers. Diese Verschiebungen sind auf die lokal höhere Beanspruchung (Bereich über Firste plastifiziert schon vor dem Kalottenausbruch) zurückzuführen. Diese Verformungen an der Firste klingen in geringer Distanz zum Hohlraumausbruch ab, im Gegensatz zu den horizontalen Gebirgsverformungen, die erst in großer Distanz abklingen.

# Literatur

**Radončić N. und Schubert W.** (2011). Neues Verfahren zur Vorbemessung eines duktilen Ausbaus, *Geomechanik und Tunnelbau* 4 (3), S. 291-297, Ernst & Sohn: Berlin.

**Plank V. und Poimer B.** (2017). Die europäische, nationale und regionale Bedeutung der Südstrecke - Die Stärkung des Korridors im Zielnetz 2025+ der ÖBB und darüber hinaus, *Geomechanik und Tunnelbau* 10 (6), S. 651-659, Ernst & Sohn: Berlin.

**Gobiet G., Nipitsch G., Wagner K.** (2017). Der Semmering Basistunnel - Besondere Herausforderungen beim Bau, *Geomechanik und Tunnelbau* 10 (3), S. 291-297, Ernst & Sohn: Berlin.

**Gobiet G.** (2017). Der Bahnhof Mürzzuschlag im Kontext mit dem Semmering-Basistunnel, *Geomechanik und Tunnelbau* 10 (6), S. 660, Ernst & Sohn: Berlin.

**Haas D., Schachinger T., Lechner G., Knopf R.** (2017). Das Baulos Gloggnitz nach Fertigstellung des Zugangstunnels Göstritz, *Geomechanik und Tunnelbau* 10 (6), S. 668-676, Ernst & Sohn: Berlin.

**Nipitsch G. & Pacher W.** (2017). Das Baulos Fröschnitzgraben - Herausforderungen beim Schachtabteufen, der Baugeschichte und der Deponie, *Geomechanik und Tunnelbau* 10 (6), S. 678-685, Ernst & Sohn: Berlin.

**Klais F., Wolf P., Lienhart W.** (2017) Das Baulos Grautschhof - Errichtung eines Zwischenangriffs unter komplexen Randbedingungen, *Geomechanik und Tunnelbau* 10 (6), S. 686-693, Ernst & Sohn: Berlin.

**ÖBB Infra-1** (2016). Nothaltestelle Längskavernen, Rettungsräume und Querverbindungen, Tunnelbautechnischer Rahmenplan, *Unveröffentlichtes Dokument*, Planungsgemeinschaft Semmering-Basistunnel.

**ÖBB Infra-2** (2016). Nothaltestelle Regelprofil Längskaverne Typ 2, Schnitt E-E, Schnitt E\*-E\*, SBT2.1-AF-0700TU-03-0302-F02, *Unveröffentlichtes Dokument*, PGST Semmering Basistunnel.

---

**ÖBB Infra** (2014). Geotechnischer Bericht, *Unveröffentlichtes Dokument*, S. 12 und S.165  
Planungsgemeinschaft Semmering-Basistunnel.

**Rocscience Inc.** Online: URL: <https://www.rocscience.com/rocscience/products/rs2>,  
Letzter Aufruf: 16.04.2018.

**ÖBB Infra** (2013). Technischer Bericht Rechenwerte, *Unveröffentlichtes Dokument*,  
Planungsgemeinschaft Semmering-Basistunnel.

**Pilgerstorfer, T.** (2008). Prediction of displacement development using closed form  
solution, *Diplomarbeit*, Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität  
Graz, Österreich.

**Feder, G. und Arwanitakis, M.** (1976). Zur Gebirgsmechanik ausbruchsnaher Bereiche  
tiefliegender Hohlrumbauten, *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, Springer Verlag  
Wien.

**Moritz, B.** (2011). Stauchelemente – Anforderungen, Überblick und Vergleich,  
*Geomechanics and Tunnelling 4 (3)*, S. 221-236, Ernst & Sohn: Berlin.

**Schubert, W.** (2006). Yielding steel elements type LSC II, *Test Report*, Institut für  
Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität Graz, Österreich.

**ÖBB Infra** (2017 und 2018). Messdatenauswertungen Längskaverne 2 Ost - MQ 176,  
*Unveröffentlichtes Dokument*, GTM SBT2.1.

**ÖGG.** (2008). *Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit  
zyklischem Vortrieb*, Österreichische Gesellschaft für Geomechanik.

# Anhang A - Pre-Relaxation Factor

Berechnung des "Depth of failure" mithilfe der Feder Formeln

Input			
Tunnel Radius	$R_o$	m	10,50
Overburden	H	m	400,0
Lateral pressure Coeff.	$K_o$	-	1,00
Specific Weight	$\gamma$	MN/m <sup>3</sup>	0,025
Friction Angle elastic	$\phi_{el}$	°	22,5
Friction Angle plastic	$\phi_{pl}$	°	21,0
Cohesion elastic	$C_{el}$	MPa	1,50
Cohesion plastic	$C_{pl}$	MPa	1,00
2099,000			
Elastic Modulus	E	MPa	2500
Poisson's Ratio	$\nu$	-	0,20
Dilation Factor	$\alpha$	-	1,00
Support Pressure	$P_i$	MPa	0,000
Angle of Scanline		°	90

Output			
Plastic Radius	$R^{\sim}$	m	26,71
Depth of failure	$d_f$	m	16,21
Displacements at crown	$u_c$	cm	21,93
Displacements at wall	$u_w$	cm	21,93
Strain			2,1%

Scaling			
max. Distance		m	100,0
max. Points elastic		-	60

<b>Näherung mit Formeln von Pilgerstorfer (Pilgerstorfer, 2008)</b>			
Nr.	Bezeichnung	Grundlage	Wert
			Spalte D
3	depth of failure	Berechnung Feder Sheet	16,21
4	Tunnel radius	Modell	10,50
5	phi	Modell	22,50
6	n	=D3/D4	1,544
7			
8	linf	=D4*(2,07*C6+6,4)	100,75
9			
10	a	=0,1314*TAN(D5*PI()/180)+0,0129	0,067
11	b	=-0,0259*TAN(D5*PI()/180)+2,6227	2,612
12	c	=0,011*TAN(D5*PI()/180)-0,6439	-0,639
13	d	=-0,1854*TAN(D5*PI()/180)-0,1593	-0,236
14	e	=-0,1396*TAN(D5*PI()/180)+0,8092	0,751
15			
16	lambdaface	=D10*COS(D11*D6+D12)+D13*D6+D14	0,322
17			
18	A	=0,023625	0,024
19	B	=0,4604*(TAN(D5*PI()/180))^2 +0,3749*TAN(D5*PI()/180)+5,5276	5,762
20	C	=-0,0397*(TAN(D5*PI()/180))^2 +0,015*TAN(D5*PI()/180)-1,0327	-1,033
21	D	=0,047395	0,047
22	E	=-0,0247*(TAN(D5*PI()/180))^2- 0,006*TAN(D5*PI()/180)+0,0039	-0,003
23			
24	Epsilon	=D18*COS(D19*WURZEL(D6)-D6+D20) +D21+D22*D6	0,040
25			
26	x	Abschlagslänge angenommen	1,000
27	lambda(x)		0,244