

Matthias Akiya Yoshida, BSc.

**Analyse des Systemverhaltens anhand des maschinellen
und konventionellen Vortriebs im höher metamorphen
Anteil des Innsbrucker Quarzphyllits am Beispiel des
Brenner Basistunnels**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Master of Science
Masterstudium Erdwissenschaften

eingereicht an der
Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dr. Qian Liu

Technische Universität Graz Institut für angewandte Geowissenschaften

DI Sebastian Grüllich, STRABAG – Bauleiter TBM

DI Maria Honisch, geo.zt – Geologin

Graz, Oktober 2018

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

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.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Graz, am

(Unterschrift)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir durch ihre Unterstützung bei der Verfassung dieser Masterarbeit geholfen haben.

Mein besonderer Dank gilt allen voran Ao.Univ.-Prof. Dr. Qian Liu als mein Mentor während dem Studium und für die Betreuung meiner Masterarbeit. Er hat sich stets für mich Zeit genommen und meine Terminvorschläge angenommen um meine Innsbruck – Graz Reisen zu erleichtern. Mit viel Geduld und konstruktivem Feedback hat er mir bei der Fertigstellung der Masterarbeit geholfen. Herzlichen Dank!

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Dipl. -Geol. Christian Deckert für die Möglichkeit, meine Masterarbeit über den Bau des Brenner Basistunnels zu schreiben, bedanken. Danke schön!

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Herr DI Sebastian Grüllich für die Betreuung meines Praktikums im Zuge meiner Masterarbeit. Ein großes Dankeschön geht an Frau DI Maria Honisch für Ihre Beratungsgespräche und das Korrekturlesen meiner Arbeit. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn DI Chris Reinhold bedanken für die Unterstützung meiner Berechnungen.

Weiterhin möchte ich mich bei der ARGE Tulfes Pfons und bei der BBT SE für die Bereitstellung der Daten bedanken. Ein weiteres Danke geht an das Institut für Felsmechanik und Tunnelbau TU Graz, welches mir die Software RocScience Phase² zur Verfügung gestellt hat.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, für die seelische und finanzielle Unterstützung während meines Studiums. Insbesondere bedanke ich mich bei meiner Freundin, die mich immer wieder ermutigt und mir neue Energie gegeben hat.

Zu guter Letzt, danke ich meinen Studienkollegen, Angelika und Robert für die schöne gemeinsame Zeit.

Kurzfassung

Die folgende Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Systemverhalten des Gebirges des Brenner Basistunnels. Es wird die Wechselwirkung zwischen den Haupttunnelröhren und dem Erkundungsstollen analysiert. Primärer Anstoß zu den Untersuchungen sind die Schäden an der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens. Es entstanden während dem Vortrieb der Haupttunnelröhren Risse und Abplatzungen.

Die Analyse erfolgt durch eine Auswertung der gemessenen Horizontal- und Vertikalverschiebungen mittels bodengestütztem LiDAR, in Form von Einflusslinien und Zeitverformungsgrafiken. Des Weiteren wird mittels der „Finite Elemente Methode“ an drei Querschnitten ein 2D – Modell konstruiert, aus dem die Wechselwirkungen und Verformungen des Tunnelröhren ermittelt werden.

Die Auswertungen zeigen, dass die Zusatzverformungen und Schäden im Erkundungsstollen durch die räumliche Anordnung der Haupttunnelröhren und insbesondere der räumlichen Lage der Querschläge verursacht werden. Die geologischen Strukturen konnten nur als lokal bedingte Ursache für Verformungen an den Tunnelprofilen festgestellt werden.

Abstract

The following thesis examines the system behavior of the rock mass of the Brenner Base Tunnel. For this, the interactions between the main tunnels and the exploration tunnel will be analyzed. The reason for this research is the damages to the shotcrete of the exploration tunnel. While excavating the main tunnels, cracks and spallings developed in the exploration tunnel.

The analysis will be carried out through the evaluation of the horizontal and vertical displacements surveyed using ground-based LiDAR, in the form of lines of influence and time – deformation graphics. Furthermore, the finite element method is applied at three cross-sections to analyze the interactions and the deformation of the exploration tunnel.

The evaluations show that the additional deformations and damages in the in the exploratory tunnel are caused by the spatial arrangement of the main tunnels and in particular the spatial position of the transverse tunnels. The geological structures could only be identified as a local cause of deformation in the ranges of the tunnel intrados.

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung.....	8
2	Einleitung	9
3	Hintergrundinformationen	10
3.1	Die Geschichte des Brenner Basistunnels	10
3.2	Allgemeine Beschreibung des Bauprojektes.....	11
3.3	Geltungsbereich des Untersuchungsabschnitts	13
3.4	Baulos Tulfes – Pfons	14
3.5	Geologischer Überblick.....	15
3.5.1	Lithologische Beschreibung der Innsbrucker Quarzphyllitzone.....	15
3.6	Baugeologischer Längsschnitt.....	16
3.7	Erkundungsstollen	18
3.7.1	Maschineller Vortrieb.....	18
3.7.2	Offene Gripper Tunnelbohrmaschine	19
3.7.3	Stützmittel	21
3.7.4	Vortriebsstand	22
3.8	Haupttunnelröhren.....	22
3.8.1	Querschläge	23
3.8.2	Konventioneller Vortrieb	23
3.8.3	Stützmittel	24
3.8.4	Vortriebsstand	26
4	Maschinenparameter	27
4.1	Spezifische rotatorische Energie.....	27
4.2	Gebirgsklassifizierung.....	27
4.3	Einteilung des Untersuchungsabschnittes zwischen Proj. km 6+963 und 7+395 nach geologisch bedingten Schwächezonen	29
5	Verformungsparameter	31
5.1	Einflussparameter auf die Beanspruchung des Tunnels.....	31
5.1.1	Primärspannungszustand.....	31
5.1.2	Projektspezifische Gebirgsklassifizierung des Untersuchungsabschnittes zwischen Proj. km 6+963 und 7+395	34
5.1.3	Hohlraumdimensionen	36
6	Methodik.....	38
6.1	Finite Elemente Methode.....	38
6.2	Beschreibung der Methodik am MQ 1, PGK 1 (Proj. km 6+982)	38

6.2.1	Eingabe der Parameter:.....	39
6.2.2	Gliederung der geologischen Trennflächen.....	40
6.2.3	Modellierung der Vortriebe	46
6.2.4	Fertigstellung der Berechnung MQ 1	53
6.3	MQ 2, PGK 2a (Proj. km 7+7075)	55
6.4	MQ 3, PGK 2a (Proj. km 7+393)	60
7	Ergebnisse – Verformungen der Tunnelröhren.....	66
7.1	Einflusslinien des Untersuchungsabschnitts	66
7.2	Gegenüberstellung der Verformungen von MQ1 (PGK 1, EKS)	73
7.2.1	Gemessene Verformungen MQ 1	73
7.2.2	Errechnete Verformungen MQ 1	74
7.3	Gegenüberstellung der Verformungen von MQ 2.....	74
7.3.1	Gemessene Verformungen MQ 2	75
7.3.2	Errechnete Verformungen MQ 2	76
7.4	Gegenüberstellung der Verformungen von MQ 3.....	76
7.4.1	Gemessene Verformungen MQ 3	76
7.4.2	Errechnete Verformungen MQ 3	78
8	Auswertung.....	80
8.1	Analyse des Einflusses der Geologie	80
8.2	Analyse des Einflusses der QS	81
8.3	Analyse der Einflüsse der HT auf den EKS.....	83
9	Diskussion.....	86
10	Schlussfolgerung	87
11	Literaturverzeichnis	89
I.	Abkürzungsverzeichnis.....	92
II.	Abbildungsverzeichnis	93
III.	Tabellenverzeichnis.....	95
12	Anhang	96

1 Zielsetzung

Der Grund für die Untersuchungen in dieser Masterarbeit ist die Reaktivierung der Verformungen des Erkundungsstollen im Brenner Basistunnel Baulos Tulfes – Pfons, die mit Beginn des Vortriebs der Haupttunnelröhren erneute Bewegungen zeigten. Die Arbeit behandelt folgende Forschungsfrage: “Welche Faktoren beeinflussen die Verformung des Erkundungsstollens, die durch die Vortriebe der Haupttunnelröhren beim Brenner Basistunnel entstehen?” Ziel der Masterarbeit ist somit die Analyse des Systemverhaltens des Gebirges und des Tunnelsystems um die Ursachen und Einflussfaktoren der Verformung zu erforschen. Mit Hilfe der Finiten Elemente Methode werden die Verformungen berechnet und schlussendlich den tatsächlich bestehenden Verformungen gegenübergestellt.

2 Einleitung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit den Verformungen, die im Erkundungsstollen des Brenner Basistunnels auftreten. Durch die Wechselwirkung der Haupttunnelröhren mit dem Erkundungsstollen entstehen während dem Vortrieb der Haupttunnelröhren Risse und Abplatzungen.

Der Erkundungsstollen ist ein weltweit einzigartiges Bauwerk in dem 64 km langen geplanten Eisenbahntunnel von Innsbruck nach Franzensfeste. Dieser dient in der Bauphase sowohl als Vorauserkundungswerkzeug, als auch als Wartungstunnel nach der Inbetriebnahme des Brenner Basistunnels.

Im empirischen Teil der Arbeit werden die Auswirkungen des konventionellen Vortriebs der Haupttunnelröhren auf das Verhalten des bereits mittels Gripper Tunnelbohrmaschine aufgefahrenen Erkundungsstollen im gleichen Gebirge untersucht. Der Untersuchungsabschnitt für diese Masterarbeit ist Teil des Bauloses Tulfes – Pfons und befindet sich mit etwa 1000 m Überlagerung unterhalb der Patscher Alm, zwischen der Ortschaft Patsch und dem Gipfel des Patscherkofel in Tirol. Der Abschnitt erstreckt sich von Projektkilometer 6+963 bis 7+395. Die Länge des Abschnitts beträgt 432 m und befindet sich zur Gänze im höher metamorphen Anteil des Innsbrucker Quarzphyllits.

Die Analyse des Systemverhaltens erfolgt durch die Auswertung der gemessenen Horizontal- und Vertikalverschiebungen in Form von Einflusslinien und Zeitverformungsgrafiken. Des Weiteren wird eine rechnerische Erfassung der absoluten Verformungen durchgeführt. Die Modelle werden für drei Querschnitte bei Projektkilometern 6+982, 7+075 und 7+393 erstellt. Für die Berechnung wird die Software „RocScience Phase²“, basierend auf der Finite Elemente Methode verwendet, womit die Verformungen der Querschnitte als 2D-Modell ermittelt werden. Um möglichst realitätsnahe Resultate zu erhalten, werden bei den Berechnungen die geologischen Gegebenheiten, Gebirgsspannungen, Geometrie der Tunnelprofile, Ausbruchreihenfolge sowie die eingesetzten Stützmittel berücksichtigt.

3 Hintergrundinformationen

Im Folgenden wird ein Überblick über das Bauprojekt des Brenner Basistunnels (im weiteren als BBT bezeichnet) gegeben. Zu Beginn folgt eine geschichtliche Einleitung, allgemeine Beschreibung des BBT, eine Erläuterung des Baugesetzes – Pfons und ein geologischer Überblick über die Region. Danach wird der in dieser Masterarbeit behandelte Untersuchungsabschnitt sowie die maschinelle und konventionelle Vortriebsmethode beschrieben.

3.1 Die Geschichte des Brenner Basistunnels

Im Jahr 1847, bereits 160 Jahre vor dem eigentlichen Baubeginn des heutigen BBT, gab es die Idee einer Unterquerung des Brennerpasses. Der Gedanke stammt von einem italienischen Ingenieur namens Giovanni Qualizza. Er wurde von dem venezianischen Bankier Giacomo Levi beauftragt eine Eisenbahn zwischen Hall und Verona zu planen. Dieses Konzept konnte allerdings nie realisiert werden.

Im Jahr 1971 bekam die Idee der Brenner Unterquerung jedoch neuen Aufwind. Es wurden Machbarkeitsstudien für die Ausführung des Projekts vom Internationalen Eisenbahnverband beauftragt. Drei Studien wurden bis 1989 erstellt, die dann einen Grundbaustein für die darauffolgenden Planungen des BBT bildeten.

Mit zunehmendem Güterverkehr in Europa entschloss sich die EU, den Korridor Berlin – Neapel, in dem der BBT das Herzstück bildet, als prioritäres Vorhaben in die Liste der vorrangigen Projekte mit aufzunehmen. Dies führte am 30. April 2004 zur Unterzeichnung des Staatsvertrags zwischen Österreich und Italien, der den Bau des BBT zur Folge hatte. Noch im selben Jahr am 16. Dezember wurde die Aktiengesellschaft Brenner Basis Tunnel Societas Europaea gegründet (Im Weiteren als BBT SE bezeichnet). Diese ist verantwortlich für die Planung und den Bau des Tunnels. Die BBT SE ist ursprünglich zu 50 % von der Rete Ferroviaria und zu je 25 % von Österreich bzw. dem Bundesland Tirol gehalten worden. Heute setzt sie sich zu 50 % aus der Österreichischen Bundesbahn Infrastruktur AG und zu 50 % aus der italienischen Tunnel Ferroviario del Brennero zusammen. Das Projekt wird von der Europäischen Union (EU) teilfinanziert, sie übernimmt 40 % der Gesamtkosten. Die übrigen 60 % werden gleichermaßen zwischen Österreich und Italien aufgeteilt.

Nach langjähriger Planung, begann im August 2007 der Vortrieb des Zufahrtstunnels Mauts in Italien (Bergmeister, 2011).

3.2 Allgemeine Beschreibung des Bauprojektes

Der BBT wird für die Unterquerung des Brennerpasses erbaut. Es handelt sich um einen flachverlaufenden Eisenbahntunnel von Innsbruck nach Franzensfeste (siehe Abbildung 1) mit einer Länge von 55 km. Wie in Abbildung 1 ersichtlich, schließt der Tunnel an die bereits bestehende Eisenbahnumfahrung bei Innsbruck an und erreicht damit eine Gesamtlänge von 64 km. Somit wird der BBT, nach der Fertigstellung der längste Eisenbahntunnel der Welt sein.

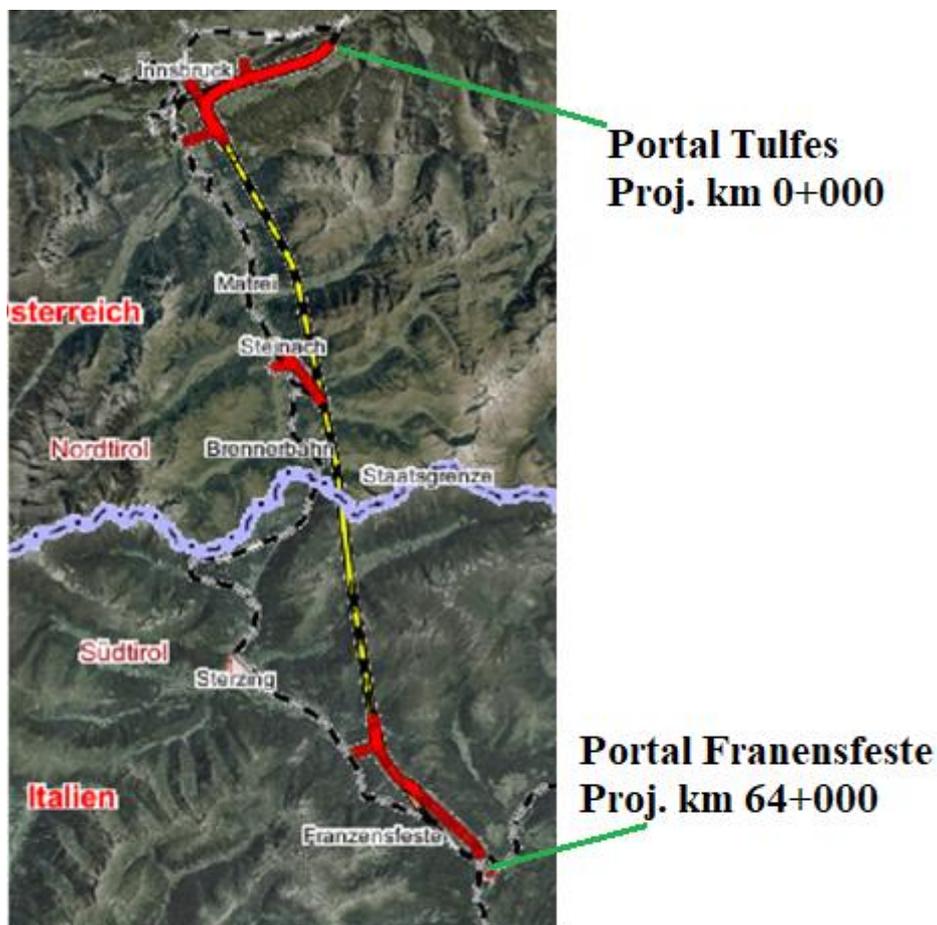


Abbildung 1: Karte des BBT (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, n.d.-a) (Nachbearbeitet)

Das Jahrhundertbauwerk ist Teil des Transeuropäischen Netzes und bildet das zentrale Verbindungsstück auf der 2200 km langen Strecke von Berlin nach Neapel.

Der Tunnel verkürzt die existierende Strecke um knapp 20 km und reduziert die Fahrtzeit von 80 auf 25 Minuten. Auf der Nordseite beträgt die Längsneigung 6,7 ‰, auf der Südseite 4,0 ‰. Der Scheitelpunkt befindet sich genau auf der Staatsgrenze zwischen Österreich und Italien. Dieser liegt 790 m über dem Meeresspiegel und somit 580 m unter dem Brennerpass. Die Zuglast des Tunnels soll sich von 1000 t der bestehenden Brennerbahnstrecke auf eine maximale Zuglast von 3000 t im BBT erhöhen (Bergmeister, 2011).

Die Hauptbauwerke des BBT, die in Abbildung 2 dargestellt sind, setzen sich aus den zwei Haupttunnelröhren (im Weiteren als HT bezeichnet), dem Erkundungsstollen (im Weiteren als EKS bezeichnet), den Verbindungstunneln, der Eisenbahnumfahrung Innsbruck, den Nothaltestellen, den Rettungsstollen und vier Zufahrtstunneln: Ampass, Ahrental, Wolf und Mauls zusammen. Das Projekt wird in folgende Hauptbaulose aufgeteilt:

- Tulfes – Pfnos
- Pfnos – Brenner
- Wolf
- Mauls
- Eisackunterquerung

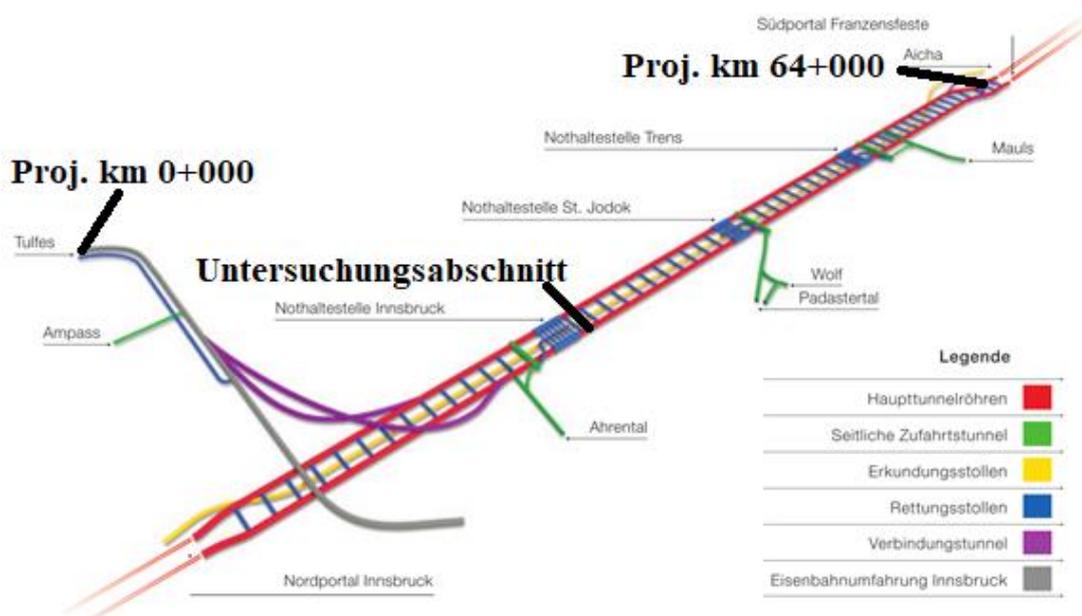


Abbildung 2: BBT Übersichtsplan ("Der Brenner Basistunnel - ein neuer Verbindungsweg durch die Alpen," 2012) (nachbearbeitet)

Das gesamte Projekt umfasst somit rund 230 Tunnelkilometer, von denen bereits 79 km ausgebrochen wurden. Die vorgetriebenen Kilometer setzen sich zusammen aus 22 km HT, 29 km EKS und 28 km sonstigen Tunnelbauwerken (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, n.d.-b). Die Vortriebsmethode für die jeweiligen Bauwerke ist abhängig von den geologischen Gegebenheiten und der Länge der einzelnen Tunnel. Der BBT wird zu 30 % bergmännisch mittels Sprengvortrieb und zu 70 % maschinell mit Tunnelbohrmaschinen (im Weiteren als TBM bezeichnet) vorgetrieben (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, n.d.-b). Unabhängig von der Vortriebsmethode wird das Ausbruchsmaterial aus dem Tunnel transportiert und auf Deponien gelagert. Es stehen insgesamt sieben Deponien zu Verfügung: Ampass (ca. 0,77 Mio. m³), Ahrental (2,7 Mio. m³), Padastertal (7,7 Mio. m³), Genauen (0,15 Mio. m³), Flaggerbach Rio Vallaga (0,3 Mio. m³) und Hinterrigger (4,6 Mio. m³).

Das Projekt soll bis Mitte 2025 fertiggestellt werden. Die geplante Inbetriebnahme des BBT ist für 2026 anberaumt (Bergmeister, 2011).

3.3 Geltungsbereich des Untersuchungsabschnitts

Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit der Wechselwirkung zwischen der HT und dem EKS. Die Länge des Untersuchungsabschnittes beträgt 432 m und befindet sich auf der österreichischen Seite des Tunnels. Die Vortriebsrichtung in diesem Bereich beträgt 153°. Die durchschnittliche Überlagerung des Gebietes beträgt 986 m und befindet sich unterhalb der Patscher Alm zwischen der Ortschaft Patsch und dem Gipfel des Patscherkofels. Für eine präzise Angabe der Örtlichkeit wird die Gesamttunnelkilometrierung des Projekts herangezogen. Projektkilometer (im Weiteren als Proj. km bezeichnet) 0+000 befindet sich am Portal Tulfes und verläuft bis Proj. km 64+000 zu dem Südportal in Franzensfeste. In Abbildung 3 ist der Untersuchungsabschnitt mit einer roten Box gekennzeichnet, dieser erstreckt sich von Proj. km 6+963 bis 7+395.

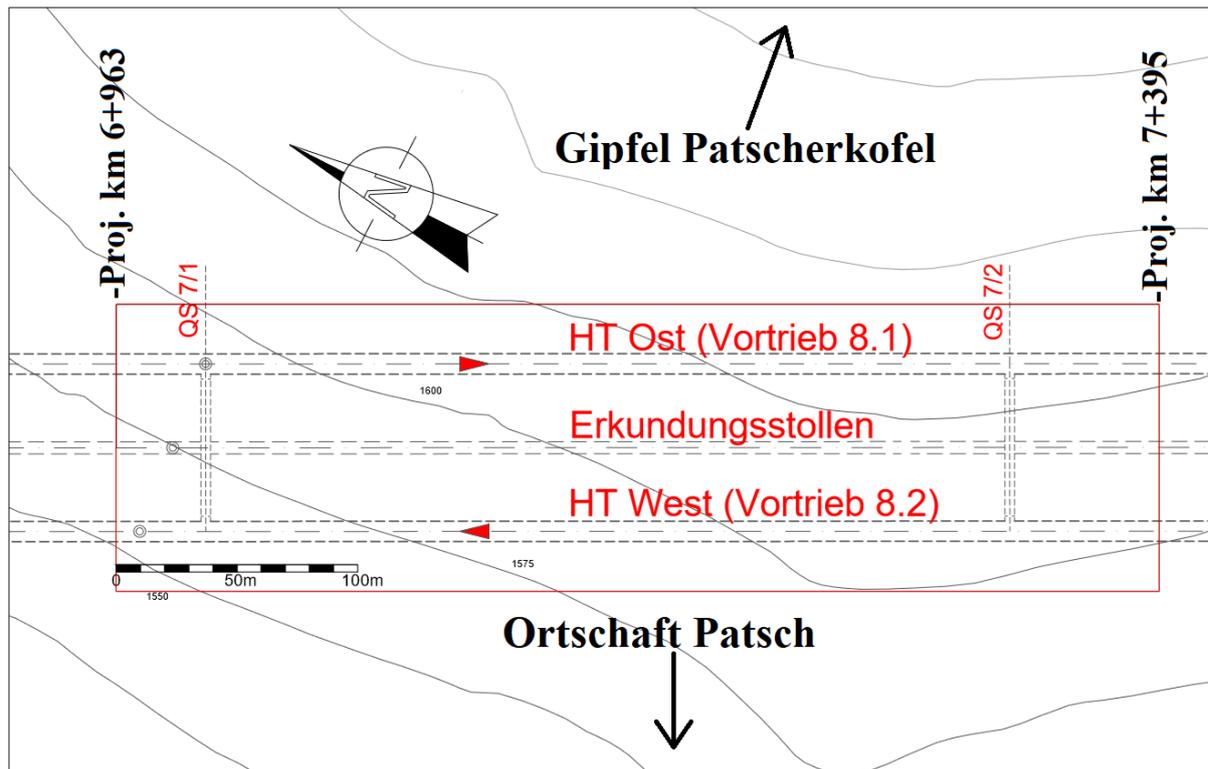


Abbildung 3: Lageplan des Untersuchungsabschnitts (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2013d) (Nachbearbeitet)

3.4 Baulos Tulfes – Pfons

Die Vergabe des Bauloses Tulfes – Pfons in dem die Untersuchung durchgeführt wird, fand im Sommer 2014 statt und ging an die Bietergemeinschaft Strabag/Salini – Impregilo. Bereits im September desselben Jahres begannen die ersten Vortriebsarbeiten. Bis zur geplanten Fertigstellung des Bauloses im Frühjahr 2019, sollen in etwa 38 Tunnelkilometer ausgebrochen werden, welche sich aus folgenden Bauwerken zusammensetzen (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, n.d.-b):

- EKS (Erkundungsstollen) Ahrental – Pfons
- HT (Haupttunnelröhren)
- QS Querschlag (im Weiteren als QS bezeichnet)
- Rettungsstollen
- Nothaltestellen
- Verbindungstunneln

Im Dezember 2017 kam es zu einer Baulosverlängerung, an dem die HT Ost (im Weiteren als Vortrieb 8.1 bezeichnet) von Proj. km 6+800 bis 13+486 sowie die HT

West (im Weiteren als Vortrieb 8.2 bezeichnet) von Proj. km 6+827 bis 15+564 verlängert wurden (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017f).

3.5 Geologischer Überblick

Der BBT verläuft durch den zentralen Bereich der Ostalpen. Im geologischen Kontext befindet sich der Tunnel somit im geologischen Fenster der europäischen und adriatischen Plattenkollisionszone.

Von Norden nach Süden verlaufend werden folgende tektonische Einheiten durchörtert (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2013b; Brandner, Reiter, & Töchterle, 2008):

- Innsbrucker Quarzphyllitzone
- Tarntaler Zone
- Glockner Deckenkomplex (Penninikum)
- Venediger Deckenkomplex (Subpenninikum)
- Oberostalpin
- Südalpin

Der Untersuchungsbereich der Masterarbeit befindet sich in der Innsbrucker Quarzphyllitzone und ist somit Teil des Ostalpins.

3.5.1 Lithologische Beschreibung der Innsbrucker Quarzphyllitzone

Die Innsbrucker Quarzphyllitzone wird in drei Serien unterteilt: vom Liegende ins Hangende verlaufend befindet sich die Schwarzschiefer-Karbonat-Serie aus dem Devon, die Karbonat-Serizitphyllit-Serie aus dem Silur und die Quarzphyllit-Grünschiefer-Serie aus dem Ordovizium (Mostler, Heissel & Gasser, 1982). Der Innsbrucker Quarzphyllit (im Weiteren als IQP bezeichnet) setzt sich Großteils aus altpaläozoischen, quarzreichen Metapeliten zusammen. Es treten überwiegend Quarzphyllite, Quarzitschiefer und Glimmerschiefer sowie Quarzite, Gneise, Helle-/Dolomitmarmore, Grünschiefer, Chloritschiefer, Schwarzschiefer und Porphyroide auf (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2013b).

Der Untersuchungsabschnitt befindet sich zum Teil in der Hangendserie der IQP und zum Teil im höher metamorphen Teil der IQP. Der Untersuchungsabschnitt zwischen Proj. km 6+923 bis 7+185 befindet sich in der Hangendserie des IQP und baut sich aus Quarzphyllit mit Einlagerungen von Kalk- und Dolomitmarmoren, Grünschiefern und eventuell Porphyroiden auf (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2013b).

Der Untersuchungsabschnitt, welcher sich im höher metamorphen Anteil der IPQ befindet, liegt zwischen Proj. km 7+185 bis 8+850. Die Lithologie wie folgt beschrieben: *„Dieser Teil besteht aus diaphthoritischen Glimmerschiefern und Granatglimmerschiefern des höher metamorphen Anteiles der Innsbrucker Quarzphyllitzone. Diese Gesteine sind im Allgemeinen sehr monoton. Es können geringmächtige Amphibolitlagen, quarzitische Lagen und möglicherweise auch granitische Intrusiva vorkommen.“* (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2013b, S. 44).

3.6 Baugeologischer Längsschnitt

Abbildung 4 zeigt einen baugeologischen Längsschnitt im Bereich des Untersuchungsabschnitts und dem umliegenden Gebirge. Die Vortriebsrichtung des dargestellten Bereichs beträgt 153°. Das Gebirge ist in einem Längsschnitt entlang des EKS sowie in einem Horizontalschnitt auf dem Haupttunnelniveau dargestellt. Sowohl im Längsschnitt, als auch im Horizontalschnitt ist der Untersuchungsabschnitt dieser Maserarbeit, mit einer hellblauen Markierung eingezeichnet. Die Grafik beinhaltet eine Beschreibung der Lithologie, Hauptorientierung der geologischen Strukturen und relevante geotechnische Kennwerte, die für diese Masterarbeit von Relevanz sind.

Anhand der Horizontansicht ist ersichtlich, dass der EKS entlang des Vortriebs im Untersuchungsabschnitt den höhermetamorphen Anteil des IQP durchörtert, wobei dieser bei Proj. km 7+004 bis 7+020 und 7+229 bis 7+315 auf Störungszonen stößt.

Die Grafik wurde anhand eines Längsschnitts, einem technischen Bericht von der Baulosverlängerung (2017), sowie den Maschinendaten der ersten 2000 m vom EKS des Bauloses Tulfes – Pfons erstellt.

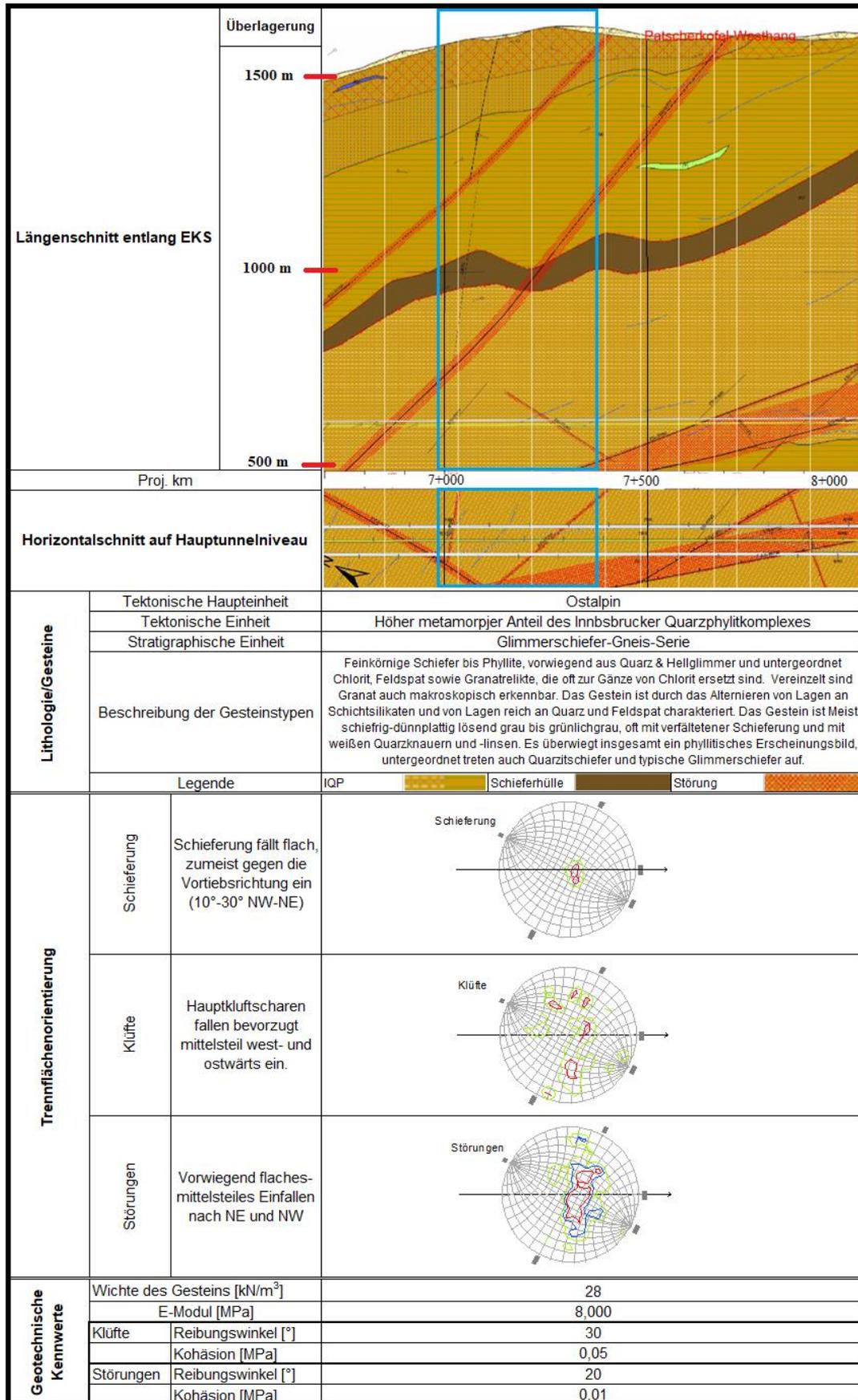


Abbildung 4: Baugeologischer Längsschnitt (nachbearbeitet BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017c, 2017d)

3.7 Erkundungsstollen

Der EKS des Bauloses Tulfes – Pfons beginnt bei Proj. km 6+923 und durchörtert Nord-Süd verlaufend das Viggartal, Arzatal und Navistal. Das Ende des Stollens schließt bei Proj. km 22+000 mit dem südlichsten Rand des Bauloses ab (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2013c). Die Länge beträgt knapp über 15 km und wird im Baulos Tulfes – Pfons maschinell vorgetrieben (Kapitel 3.7.1). Die Überlagerungshöhe erreicht ihren Maximalwert von etwa 1300 m in der Gegend des Schröflkogel bei Proj. km 20+000. Die niedrigste Überlagerung befindet sich im Bereich des Navistal bei Proj. km 17+500 mit ca. 420 m (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2013b).

In der Bauphase dient der EKS als Vorauserkundungstunnel und soll Informationen über die Beschaffenheit des Gebirges liefern. Anhand der Informationen aus dem EKS lässt sich der Vortrieb der Haupttunnel sicherer und effizienter gestalten. Ein wichtiger Fortschritt während der Bauphase war die Korrelation zwischen maschinentechnischen Parametern und geologischen Gegebenheiten. Durch diese Informationen kann der Ausbau der Haupttunnel deutlich präziser gestaltet und auf die tatsächlichen Gebirgsverhältnisse angepasst werden. Das Ziel ist die Reduktion der Baukosten und -zeiten (Bergmeister & Reinhold, 2017).

Nach der Inbetriebnahme des BBT soll der EKS zur Entwässerung der HT dienen. In der Sohle befindet sich ein Gerinne durch, das das Dränagewasser abgeleitet wird. Diverse Wartungs-, Reinigungs-, und Instandhaltungsarbeiten können ebenfalls ohne Behinderung des Bahnbetriebes durch den EKS durchgeführt werden (Bergmeister & Reinhold, 2017).

3.7.1 Maschineller Vortrieb

Im Folgenden wird die Vortriebsmethode, nämlich der maschinelle Vortrieb, des EKS vom Baulos Tulfes – Pfons beschrieben. Beim maschinellen Vortrieb erfolgt der Abbau des Gebirges in der Tunnelröhre mittels einer Tunnelvortriebsmaschine (im Weiteren als TVM bezeichnet). Die diversen Arbeitsschritte des Lösens, Ladens und der Verbauung der Stützmittel werden zeitgleich durchgeführt, daher wird diese Methode auch als kontinuierlicher Vortrieb bezeichnet.

Die Einteilung der TVM erfolgt nach RVS 9.251 und wird in der nachfolgenden Tabelle erläutert:

Tabelle 1: Einteilung der TVM (ÖNORM B 2203-2:2005, S. 5-39)

TVM
Tunnelbohrmaschinen TBM
Offene bzw. Gripper – Tunnelbohrmaschine TBM-O
Tunnelbohrmaschine mit Aufweitungsbohrkopf TBM-A
Tunnelbohrmaschine mit Einzelschild TBM-S
Tunnelbohrmaschine mit Doppelschild TBM-DS
Schildmaschine SM

TBM kommen vorzugsweise beim Abbau von Festgesteinen mit einem Vollquerschnitt zum Einsatz. Je nach Maschinentyp ist der Bohrkopf mit oder ohne Schild ausgestattet, welches eine Schutzfunktion erfüllt. Im Gegensatz zur TBM dienen SM primär zum Vortrieb in Lockergesteinen und sind immer mit einem Schild ausgerüstet, welches als Schutz und gegeben falls als zusätzliches Stützmittel der Laibung dient.

Der Vorgang des Materialabbaus erfolgt durch hubweises Vorschieben des Bohrkopfes oder Schneidrades. Durch eine rotierende Bewegung des Bohrkopfes, welcher mit Disken und Meißeln ausgestattet ist, wird das Gestein an der Ortsbrust im Vollschnitt bzw. teilflächig gelöst. Das Ausbruchsmaterial, auch als Chips bezeichnet, bricht aus und fällt in den Sohlenbereich des Tunnels. Dort werden die Chips von Räumern durch die Rotation des Bohrkopfes aufgenommen und zu einem Förderband für den Transport aus dem Tunnel weiter gereicht (ÖNORM B 2203-2:2005, S. 5-39; Prinz & Strauß, 2011).

3.7.2 Offene Gripper Tunnelbohrmaschine

Für den Vortrieb des 15 km langen EKS des Bauloses Tulfes – Pfons wird eine Offene Gripper Tunnelbohrmaschinen (im Weiteren auch als TBM-O bezeichnet) des Herstellers HERRENKNECHT eingesetzt. Die TBM-O ist nur mit einem kurzen Bohrkopfschild ausgestattet, dies verschafft eine gute Zugänglichkeit des Gebirges unmittelbar hinter dem Bohrkopf. Der Bereich eignet sich optimal für die Verbauung der benötigten Stützmittel und zur geologischen Kartierung. Als Sicherungsmaßnahmen kommen Tübbinge, Spritzbeton, Anker, Stahlbögen und

Bewehrungsmatten zum Einsatz. Aufgrund des offenen Bereiches wird eine TBM-O nur in einigermaßen standfestem Gebirge verwendet. Die Anpresskraft des Bohrkopfes auf die Ortsbrust wird durch die Verspannplatten, auch als Gripper bezeichnet, produziert. Die Gripper pressen sich an die Laibung und drücken die TBM vorwärts. Für eine vollfunktionsfähige Vorwärtsbewegung wird eine Gesteinsfestigkeit von $>100 \text{ MN/m}^2$ benötigt (Prinz & Strauß, 2011).

Abbildung 5 zeigt einen Längsschnitt einer TBM-O und deren strukturelle Gliederung. Die Maschine setzt sich aus dem TBM-O Bereich und der Nachläufereinrichtung zusammen. Der vordere Teil der Maschine wird aufgeteilt in den A0 und A1 Bereich. Im A0 befindet sich der Bohrkopf, der Bohrkopfträger und das Firstschild. Der A1 Bereich wird für den Einbau der Sicherungsmittel genutzt. Der hintere Teil besteht zur Gänze aus der Nachläufereinrichtung. Diese wird in die Bereiche A2 und A3 unterteilt, wobei sich der A3-Bereich bereits hinter der Nachläufereinrichtung befindet (ÖNORM B 2203-2:2005, S. 5-39).

Sämtliche Daten des Vortriebes werden mittels „IRIS TUNNEL“ Software langfristig ausgewertet. Diese Software verfügt über diverse Funktionen, unter anderem: TBM-Schichtdatenverwaltung, Maschinendatenauswertung, Visualisierungsmöglichkeit der Messwerte, Projektarchiv und digitales Bautagebuch für Tiefbauprojekte (itc engineering, n.d.).

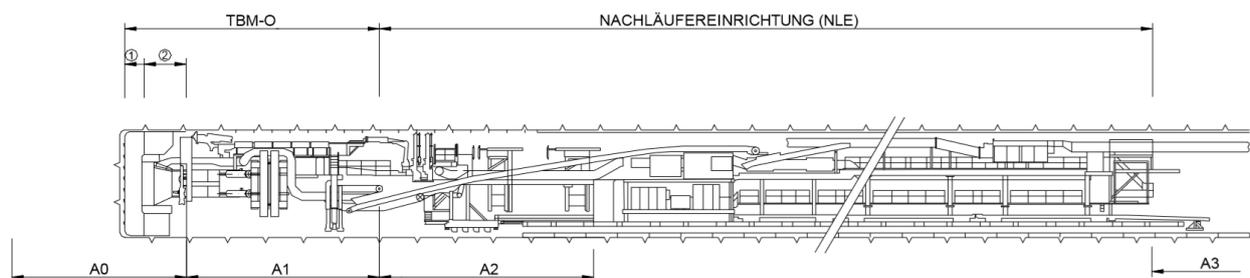


Abbildung 5: Längsschnitt TBM-O (ÖNORM B 2203-2:2005, S. 5-39)

In der folgenden Tabelle 2 befinden sich die gerätespezifischen Betriebsdaten der im EKS eingesetzten O-TBM:

Tabelle 2: Technische Daten der TBM-O des EKS (Herrenknecht Tunnelvortriebstechnik, 2015)

Technische Daten	
TBM-O	
Installierte Leistung	5500 [kW]
Länge TBM-O inkl. NLE	200 [m]
Gewicht TBM-O inkl. NLE	1800 [t]
Schild	
∅ Bohrkopfschild	7910 [mm]
Verspannung	
Anzahl Gripperzylinder	2 [-]
Hub	1000 [mm]
Anpresskraft	54978 [kN bei 350 bar]

3.7.3 Stützmittel

Tabelle 3 beinhaltet die Summe der Stützmittel, die entlang des Untersuchungsabschnitts im EKS verbaut wurden. Die folgenden Daten stammen aus dem Stützmittelprotokoll der IRIS TUNNEL Software:

Tabelle 3: Summe der Stützmittel des EKS im Untersuchungsabschnitts

Stützmittel des Untersuchungsabschnitts		
Stützmittel	Einheit	Summe
A1 Bereich		
Swellex 100kN L=3m	[Stk.]	3762
IBO 250kN L=6m	[Stk.]	41
Bewehrung AQ 60- Eingabe in m; Abrechnung in ton	[ton]	35,3
Bögen		
TH 29	[m]	24,2
U 140	[m]	7169,3
A2 Bereich		
IBO 250kN L=6m	[Stk.]	22
Spritzbeton- Eingabe in cm (Dicke)		
Laibung	[m ²]	5613,6
Mehrausbruch	[m ³]	196,2
Sohlelement	[Stk.]	462

3.7.4 Vortriebsstand

Tabelle 4 zeigt den zeitlichen Verlauf des Vortriebs des EKS, den aktuellen Vortriebsstand, die durchschnittliche Tagesleistung und die maximale Tagesleistung. Der maschinelle Vortrieb des EKS beginnt erst bei Proj. km 6+963. Zwischen Proj. km 6+923 und 6+963 befindet sich der TBM Anfahrtsstollen sowie die TBM Montagekaverne (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2013c). Die nachfolgenden Daten (Tabelle 4) stammen aus der „IRIS TUNNEL“ Software:

Tabelle 4: Vortriebsstand des EKS

Datum	Proj. km
02.10.2015	(Beginn) 6+963
24.03.2016	7+923
09.07.2016	8+923
01.11.2016	9+923
23.02.2017	10+923
02.04.2017	11+923
17.05.2017	12+923
23.06.2017	13+923
20.09.2017	14+923
07.12.2017	15+923
28.03.2018	16+923
Aktueller Vortriebsstand	
40.04.2018	17+026
Durchschnitt	
10.94 [m/Tag(KT)]	
Maximale Tagesleistung	
14.05.2017	61,04 m

3.8 Haupttunnelröhren

Die HT verlaufen, inklusive der Baulosverlängerung im Baulos Tulfes – Pfnos im Vortrieb 8.1 zwischen Proj. km 5+980 und 13+486, im Vortrieb 8.2 bis Proj. km 15+564. Beide HT werden im Baulos Tulfes – Pfnos mittels konventionellen Vortriebes abgebaut. Der Untersuchungsabschnitt (Proj. km 6+964 bis 7+395) befindet sich in der Baulosverlängerung vom Dezember 2017.

Der geplante Eisenbahnverkehr wird in beiden HT verlaufen, wobei die Tunnelröhren jeweils eingleisig verwendet werden. Der Personenverkehr wird hier mit einer maximalen Geschwindigkeit von 250 km/h, der Güterverkehr mit max. 100 km/h durchfahren. Beide Röhren weisen einen Durchmesser von 8.1 m auf und verlaufen in einem Abstand von 70 m zueinander. Um den hohen Sicherheitsstandards gerecht zu werden, sind die Tunnelröhren alle 333 m mit einem QS verbunden, wie in Abbildung 6. In Notfallsituationen eignen sich diese auch als Fluchtweg (Bergmeister, 2011).

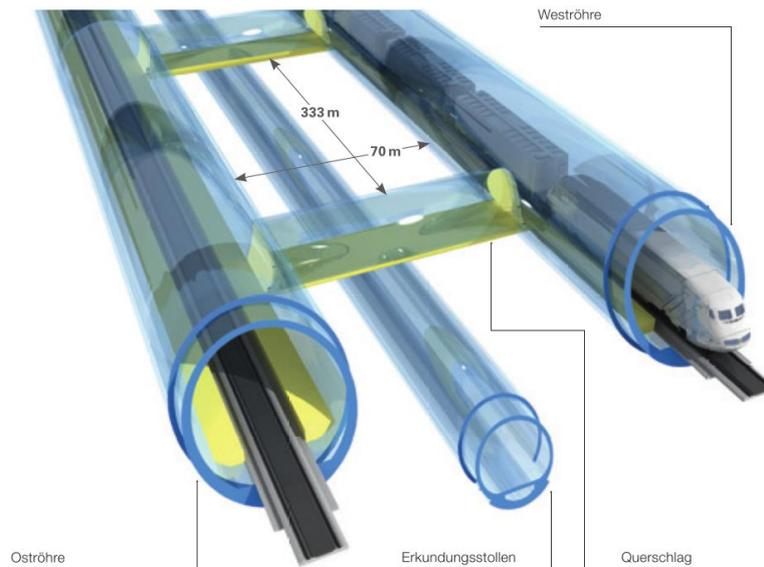


Abbildung 6: Graphische Darstellung HT und EKS (Bergmeister, 2011)

3.8.1 Querschläge

Auf der 432 m langen Strecke des Untersuchungsabschnitts befinden sich zwei QS, wobei sich der erste QS (im Weiteren als QS 7/1 bezeichnet) bei Proj. km 7+000 und der zweite QS (im Weiteren als QS 7/2 bezeichnet) bei Proj. km 7+333 befindet. Beide werden mittels konventionellen Vortriebes (Kapitel 3.8.2) abgebaut.

3.8.2 Konventioneller Vortrieb

Beim konventionellen bzw. zyklischen Vortrieb laufen die einzelnen Arbeitsvorgänge des Lösens, Ladens und dem Einbau der Stützmittel zeitlich gesehen nacheinander ab. Laut ÖNORM verläuft der Prozess des Lösens durch Sprengen, Bagger oder Teilschnittmaschinen ab (ÖNORM B 2203-1:2001, S. 1-35). Erforderlich für einen erfolgreichen Tunnelvortrieb ist eine realitätsnahe Prognose der Gebirgsbedingungen

und die Verbundwirkung der verwendeten Stützmittel mit dem Gebirge. Die Tunnelbaumethode basiert auf der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise, in der das Gebirge die Tragwirkung übernimmt und den Sicherungsmitteln nur eine unterstützende Rolle zugeteilt wird. Die Grundlage der Vortriebsmethode basiert auf praktischer Erfahrung und modernen geotechnischen Erkenntnissen.

Die Verbauung der Stützmittel an der Laibung erfolgt unverzüglich nach dem Schüttern und der geologischen Ortsbrustkartierung. Für die Sicherung wird ein schnell härtender Spritzbeton eingesetzt. Die Tragwirkung wird durch die Verbauung von Stahlbögen, Bewehrungsmatten und Ankern unterstützt. Die Festlegung der Stützmaßnahmen erfolgt anhand der Verformung des Gebirges, der Geologie und des Ausbruchsquerschnitts. Dennoch ist der konventionelle Vortrieb äußerst anpassungsfähig an etwaige geologische Unsicherheiten, wechselnde Gebirgsverhältnisse oder aber auch unterschiedliche Querschnittsformen.

Je nach Gebirgsverhältnissen und gerätespezifischen Gründen wird ein passender Ausbruchsquerschnitt gewählt. Bei Gebirgen mit hoher Standfestigkeit erfolgt der Vortrieb im Vollausbuch. Bei schlechten Gebirgsverhältnissen wird der Ausbruchsquerschnitt in Kalotte, Strosse und Sohle aufgeteilt. Bei Bedarf können eine geteilte Kalotte bzw. ein Ulmenstollenvortrieb eingesetzt werden (Prinz & Strauß, 2011).

3.8.3 Stützmittel

Die folgenden Tabellen (Tabelle 5, Tabelle 6 und Tabelle 7) zeigen die Stützmittel, die im konventionellen Vortrieb verwendet wurden. Der Vortrieb wurde aufgeteilt in Kalotte, Strosse und Sohle. Sämtliche Daten stammen aus den Stützmittelprotokollen der Vortriebe 8.1 und 8.2.

Tabelle 5: Stützmittel der Kalotte für Vortrieb 8.1 und 8.2

Kalotte			
Stützmittel	Einheit	Angabe Bauart	
Gitterträger	[m]	Ja	70/20/30
Baustahlgitter bergseitig	[kg]	Typ	AQ 50
Lage	[kg]	Typ	AQ 51
Baustahlgitter hohlraumseitig	[kg]	Typ	AQ 51
Systemanschlussbewehrung	[lfm]	Stk./Länge/Typ	2 x 1,30m
Spritzbeton, Laibung	[cm ²]	Dicke	25
Spritzbeton, Ortsbrust, Dicke in cm	[m ²]	D / % der Fläche	5 cm / 100%
Anker	[Stk.]	Länge/Typ/Anzahl	4m/SN250kn/13Stk
Verpr. / Injiz. Zementsuspension	[kg]	Gesamtgewicht	450kg
Ortsbrust-Ankerplatten nachsetzen	[Stk.]	Länge/Typ/Anzahl	am/VS/20Stk

Tabelle 6: Stützmittel der Strosse für Vortrieb 8.1 und 8.2

8.1 Strosse			
Stützmittel	Einheit	Angabe Bauart	
Gitterträger	[m]	Ja	70/20/30
Baustahlgitter bergseitig	[kg]	Typ	AQ 50
Baustahlgitter hohlraumseitig	[kg]	Typ	AQ 51
Systemanschlussbewehrung	[lfm]	Stk./Länge/Typ	2 x 2,60m
Spritzbeton, Laibung	[cm ²]	Dicke	25
Spritzbeton, Ortsbrust, Dicke in cm	[m ²]	D / % der Fläche	5 cm / 100%
Anker	[Stk.]	Länge/Typ/Anzahl	4m/SN250kn/4Stk
Verpr. / Injiz. Zementsuspension	[kg]	Gesamtgewicht	100kg

Tabelle 7: Stützmittel der Sohle für Vortrieb 8.1 und 8.2

8.1 Sohle			
Stützmittel	Einheit	Angabe Bauart	
Baustahlgitter bergseitig	[kg]	Typ	AQ 50
Baustahlgitter hohlraumseitig	[kg]	Typ	AQ 51
Spritzbeton, Laibung	[cm ²]	Dicke	25

3.8.4 Vortriebsstand

Die folgende Tabelle zeigt den Vortriebsstand der Kalotte und Strosse der Vortriebe 8.1 und 8.2. bis zum 04.06.2018. Sämtliche Daten der Vortriebsstände stammen aus den Ortsbrustdokumentationen der jeweiligen Vortriebe.

Tabelle 8: Vortriebsstand HT (Stand 04.06.2018)

Vortrieb 8.1			
Kalotte		Strosse	
Datum	Proj. km	Datum	Proj. km
22.12.2017	6+800	20.01.2018	6+800
27.01.2018	6+900	20.02.2018	6+900
08.02.2018	7+000	26.02.2018	7+000
05.03.2018	7+100	06.04.2018	7+100
20.03.2018	7+200	10.04.2018	7+200
04.04.2018	7+300	28.04.2018	7+300
05.05.2018	7+400	29.05.2018	7+400
19.05.2018	7+500	03.06.2018	7+500
28.05.2018	7+579	04.06.2018	7+536

Vortrieb 8.2			
Kalotte		Strosse	
Datum	Proj. km	Datum	Proj. km
12.12.2018	6+800	08.01.2018	6+800
14.01.2018	6+900	26.01.2018	6+900
05.02.2018	7+000	22.02.2018	7+000
18.02.2018	7+100	08.03.2018	7+100
21.03.2018	7+200	28.04.2018	7+200
07.04.2018	7+300	03.05.2018	7+300
21.04.2018	7+400	06.05.2018	7+400
30.05.2018	7+500	07.05.2018	7+516
04.06.2018	7+543	-	-

4 Maschinenparameter

Im folgenden Kapitel wird die Einteilungsmethode der Vortriebsstrecke in geologisch gesehen homogenen Bereichen beschrieben. Diese Unterteilung wird für die Analyse des Untersuchungsabschnitts dieser Masterarbeit verwendet.

4.1 Spezifische rotatorische Energie

Bei der Auffahrung des EKS wird der Bohrkopf der TBM-O als Erkundungswerkzeug eingesetzt. Die Betriebsdaten des Bohrkopfes werden während des Vortriebes aufgezeichnet. Für die Klassifizierung der geologischen/geotechnischen Homogenbereiche werden die aufgezeichneten Maschinenparameter ausgewertet. Für die Einteilung wird die spezifische Energie [MJ/m³] herangezogen. Das ist jene Energie, die benötigt wird um einen Kubikmeter Material von der Ortsbrust abzubauen (Teale, 1965). Eine Auswertung der Parameter hat ergeben, dass das Drehmoment und der abgeleitete Parameter spezifische rotatorische Energie ideal für die Identifikation von geologischer Schwächezonen sind. Neben dem Drehmoment M [MNm], sind die Penetration p [mm/rot] und der Ausbruchsdurchmesser [d^2] maßgeblich für ihre Größe verantwortlich. Die spezifische Energie wird wie folgt berechnet:

$$E_{spez,rot} = 8.000 * \frac{M}{d^2 * p} \quad (1)$$

An der Ortsbrust auftretende Schwächezonen verursachen Vorausbrüche oder blockige Ausbrüche. Dies führt zu einer nicht vollständig vorhandenen Ortsbrust, welche direkt die spezifische Energie beeinflusst. Das Drehmoment nimmt durch die verkleinerte Ortsbrust ab, was ebenfalls eine Abnahme der spezifischen Energie zur Folge hat (Reinhold, Schwarz, & Bergmeister, 2017).

4.2 Gebirgsklassifizierung

Die neue projektspezifische Gebirgsklassifizierung basiert auf den Erfahrungen des bereits vorgetriebenen EKS. Die spezifische Energie wird verwendet, um geologische Indikatoren für geologische Schwächezonen zu erstellen. Für eine leichtere Einstufung wurden die Gebirgsklassen möglichst simpel definiert. Das Einteilungssystem besteht

aus vier Hauptklassen. Klasse 2 lässt sich je nach Größe des Störungseinflusses nochmals in Klasse 2a und 2b unterteilen. Abbildung 7 zeigt die Aufteilung der Gebirgsklassen und beschreibt die jeweiligen dazugehörigen Gebirgseigenschaften (Reinhold et al., 2017).

	GVT	Kurzbeschreibung	Profilmaßhaltigkeit	Verformungen	Sicherungsaufwand
1 grün	1/2	Gutes Gebirge mit untergeordnetem Trennfächeneinfluß	sehr gut, nur vereinzelte kleinvolumige, gefügebedingte Ausbrüche	gering	gering Swellex 3m / U-Profile (80° / 120°)
2a gelb	2/3	gutes Gebirge ohne Störungseinfluss aber mit ungünstigen Trennfächenverschnitten, nicht druckhaft	gut gefügebedingte schwerkräftinduzierte Ausbrüche	gering	erhöhter Sicherungsaufwand zu 1, lokale Zusatzankerungen, Längere U-Profile (180°)
2b gelb	2/3	Gebirge mit untergeordnetem Störungseinfluss kompetentes Gestein	mäßig, gefügebedingte schwerkräftinduzierte Ausbrüche auch großvolumig, kein Gebirgsdruck	gering	erhöhter Sicherungsaufwand zu 1, lokale Zusatzankerungen, evtl. SPc im L1
3 orange	3 4-1	druckhaftes Gebirge, hoher Zerlegungsgrad, (schieferungsparallel) entfestigtes Gestein	mäßig, gefügebedingte Ausbrüche auch großvolumig, deutliche Überschiebungen an Trennfächen durch Gebirgsdruck	Groß, Verschlebung TH-Bögen, Sohlhebungen (Schrämen erforderlich)	TH-Bögen erforderlich, IBO im L1 SPc im L1 teilweise erforderlich
4 rot	4-2 7 11	Gebirge in geotechnisch stark relevanten Störungszonen	schlecht massive großvolumige Überbrüche	sehr groß	außergewöhnlicher Sicherungsaufwand (Mann an Mann Bögen / Injektionen usw.)

Abbildung 7: Projektspezifische Gebirgsklassifizierung (Reinhold, 2017)

In Abbildung 8 wird eine schematische Identifizierung der Störungzone anhand der durch die Auffahrung des EKS gesammelten Maschinenparameter gezeigt. Durch die Annäherung des Bohrkopfes an eine Störungzone nimmt die spezifische Energie konstant ab. Der Nahbereich einer Störungzone ist geprägt durch eine ansteigende schieferungsparallele Zerschierung und einer zunehmenden Trennfächendichte, sowie vermehrten Anteilen an Störungsmaterial, sodass die spezifische Energie auf 25 MJ/m³ runterfällt. Sobald der Bohrkopf in die Core Zone der Störungzone eintrifft,

sinkt die spezifische Energie weiter ab und erreicht ihren Minimumwert bei etwa 5 MJ/m³. Wenn der Bohrkopf die Störungszone verlässt, steigt die spezifische Energie wieder an (Reinhold et al., 2017).

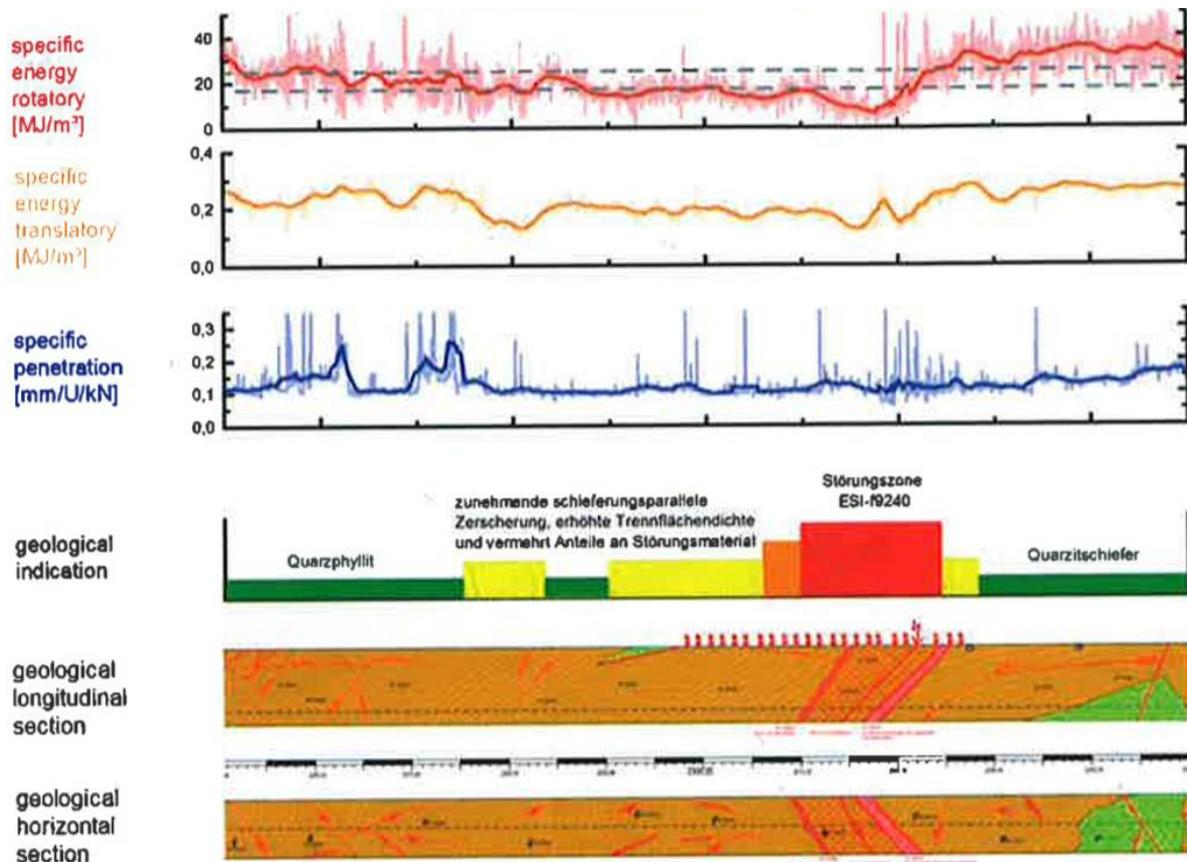


Abbildung 8: Spezifische Energie für die Ermittlung der Störungszone ESI-f9240 (Reinhold et al., 2017)

4.3 Einteilung des Untersuchungsabschnittes zwischen Proj. km 6+963 und 7+395 nach geologisch bedingten Schwächezonen

Der Untersuchungsabschnitt wurde nach der Auffahrung des EKS anhand der im Kapitel 3.2 angeführten Gebirgsklassifizierung in die projektspezifische Gebirgsklassen (im Weiteren als PGK bezeichnet) eingeteilt. Abbildung 9 zeigt die spezifische Energie und die daraus durch den Auftraggeber bereits eingeteilte PGK des Untersuchungsabschnittes (Reinhold, 2017).

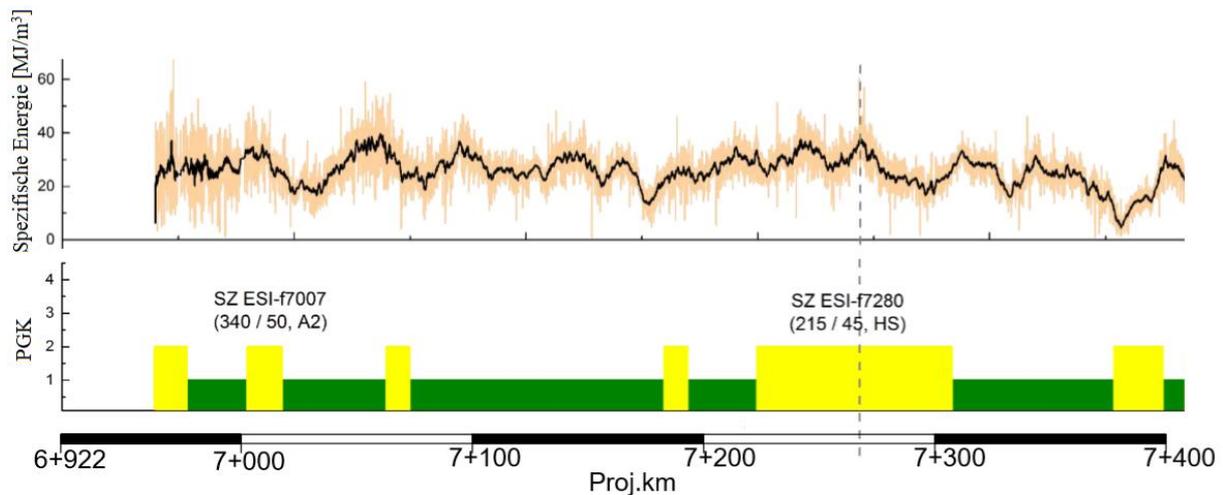


Abbildung 9: Einteilung der homogenen Bereiche – X-Achse: die Proj. km – Y-Achse: PGK (Reinhold, 2017) (nachbearbeitet)

In Tabelle 9 sind die PGK des Untersuchungsabschnittes mit ihren jeweiligen Mächtigkeiten aus Abbildung 9 aufgelistet. Des Weiteren beinhaltet die Tabelle die Modellierungsquerschnitte (im Weiteren als MQ bezeichnet) und zeigt in welcher PGK sich jeder MQ für die in Kapitel 6 angeführten Verformungsmodellierungen befindet.

Tabelle 9: Projektspezifische Gebirgsklassifizierung

Einteilung der homogenen Bereiche			Position der MQ	
PGK	Länge [m]	Proj. km	MQ	Proj. km
2a	15	6+963 bis 6+978		
1	26	6+978 bis 7+004	MQ 1	6+982
2b	16	7+004 bis 7+020		
1	45	7+020 bis 7+065		
2a	11	7+065 bis 7+076	MQ 2	7+075
1	112	7+076 bis 7+188		
2a	11	7+188 bis 7+199		
1	30	7+199 bis 7+229		
2b	87	7+229 bis 7+315		
1	71	7+315 bis 7+386		
2a	10	7+385 bis 7+395	MQ 3	7+393

5 Verformungsparameter

Im Folgenden werden die Parameter, welche die Verformung der Tunnelröhren beeinflussen beschrieben. Des Weiteren werden die Gebirgseigenschaften der bereits unterteilten geologischen Homogenbereiche zusammengefasst.

5.1 Einflussparameter auf die Beanspruchung des Tunnels

Erforderlich für eine sichere Fertigstellung des BBT ist eine Garantie der Stabilität während der Erkundungs-, Ausführungs- und Betriebsphase des Projekts. Der wichtigste Parameter für die Beanspruchung des Tunnels ist der Gebirgsdruck. Das Ausmaß des Gebirgsdrucks wird von den folgenden Faktoren beeinflusst (Braun & Reinhold, 2017; Prinz & Strauß, 2011):

- Primärspannungszustand (Kapitel 5.1.1)
- Gebirgseigenschaften (Kapitel 5.1.2)
- Hohlraumdimensionen (Kapitel 5.1.3)
- Bauweise (Kapitel 3.7.1 und 3.8.2)
- Stützmittel (Kapitel 3.7.3 und 3.8.3)

5.1.1 Primärspannungszustand

Der Spannungszustand eines Untergrundes, vor dem Beginn eines großen Eingriffes wird als Primärspannungszustand bezeichnet. Er ist maßgeblich mitentscheidend für die Festigkeit und das Verformungsverhalten des Gebirges.

Unter der Betrachtung eines einfachen Modells bzw. eines homogenen Materials mit einer horizontalen Oberfläche und keinem Einfluss durch tektonische Spannungen ist die größte Hauptnormalspannung (im Weiteren als σ_v bezeichnet) vertikal orientiert (siehe Abbildung 10). Die σ_v setzt sich aus der Wichte des Materials (γ) und der Überlagerungshöhe (h) zusammen und wird wie folgt zum Ausdruck gebracht:

$$\sigma_v = \gamma * h \text{ [MPa]} \quad (2)$$

Die Horizontalspannung ergibt sich durch das Überlagerungsgewicht und setzt sich zusammen aus σ_v und dem Seitendruckbeiwert [-] (K_0). Sie wird in Bezug auf die Orientierung zur Tunnelsachse aufgeteilt und zwar in Horizontalspannung parallel σ_h .

par. und Horizontalspannung quer $\sigma_{h\text{-quer}}$ zur Tunnelachse. Der K_0 für $\sigma_{h\text{-par.}}$ beträgt 0,5 und für $\sigma_{h\text{-quer}}$ 0,7 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017c). Die Formel für $\sigma_{h\text{-}(par.,quer)}$ lautet:

$$\sigma_{h\text{-}(par.,quer)} = \sigma_v * K_0 \text{ [MPa]} \quad (3)$$

Abbildung 10 zeigt den Spannungszustand der Hauptnormalspannungen in einem elastisch isotropen Halbraum.

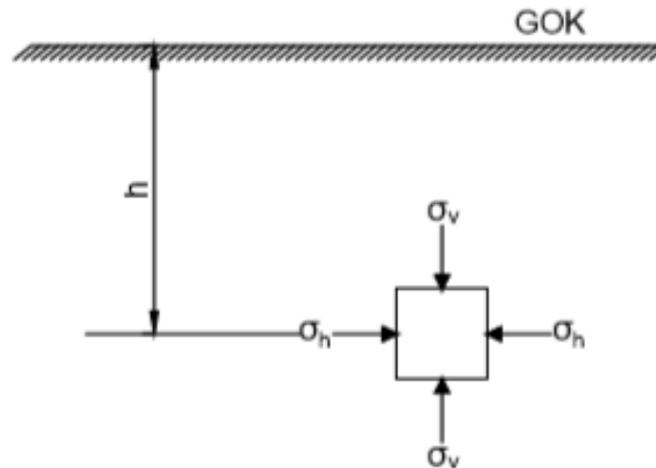


Abbildung 10: Primärspannungszustand der Hauptnormalspannungen (GOK – Geländeoberkante) (nach Lang & Huder, 1994)

In Abbildung 11 ist die σ_v , die $\sigma_{h\text{-}(par.,quer)}$ und die Überlagerungshöhe des Untersuchungsabschnitts grafisch dargestellt. Für die Berechnung der Primärspannung wird für γ ein Wert von 28 [kN/m³] verwendet. Die geotechnischen Kennwerte für die Berechnung, nämlich die Seitendruckbeiwerte, sowie die Wichte stammen aus Laborversuchen die für die Bauloseverlängerung (2017) durchgeführt wurden. Des Weiteren können sie Werte aus dem baugelologischen Längsschnitt in Kapitel 3.6 abgelesen werden. Die Überlagerungshöhen stammen aus einem Längsschnitt der Ausschreibungsphase (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017a).

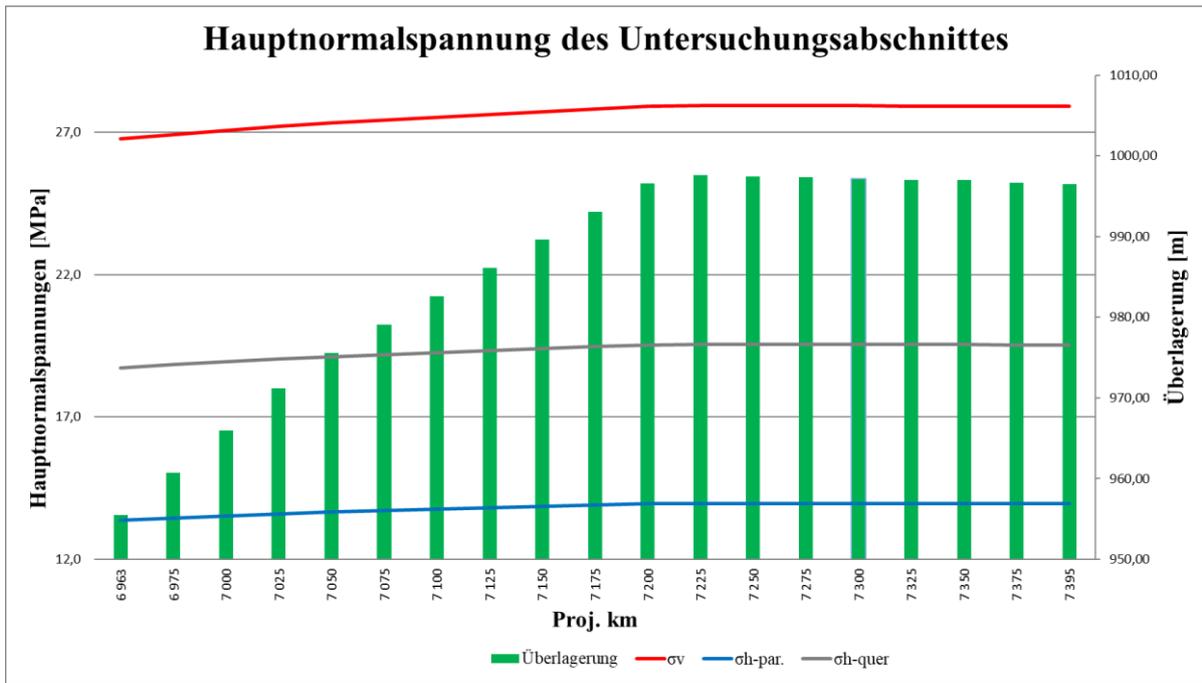


Abbildung 11: Hauptnormalspannung des Untersuchungsabschnitts

Zusätzlich zur Überlagerungshöhe wird die Richtung und die Größe der Primärspannungen von weiteren Faktoren beeinflusst. Dazu gehört die Topografie, Anisotropie des Materials, tektonische Strukturen und geologische Vorbelastung. Im oberflächennahen Bereich hat die Topografie einen großen Einfluss auf die Primärspannung. Anhand des Beispiels in Abbildung 12 zeigt sich, dass die größten Spannungstrajektorien parallel zur Geländeoberkante bzw. Hanglage verlaufen. Je tiefer im Untergrund desto höher wird das Eigengewicht des Materials und die Hauptnormalspannungen nehmen wieder ihren normalen Verlauf ein.

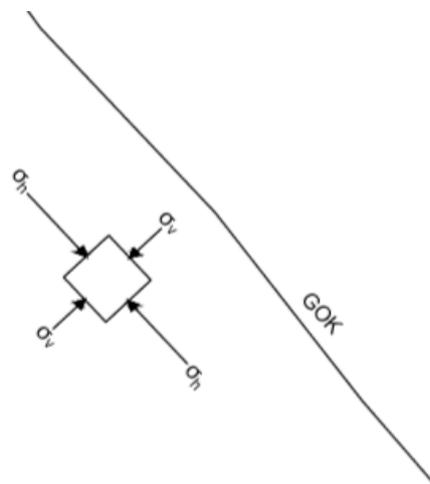


Abbildung 12: Hauptnormalspannungen in Hanglage (GOK – Geländeoberkante) (nach Prinz & Strauß, 2011)

5.1.2 Projektspezifische Gebirgsklassifizierung des Untersuchungsabschnittes zwischen Proj. km 6+963 und 7+395

Im Folgenden (Kapitel 5.1.2.1, 5.1.2.2 und 5.1.2.3) werden die geologischen/geotechnischen Homogenbereiche (PGK), die im Untersuchungsabschnitt vorkommen beschrieben. Alle Informationen stammen aus der Dokumentation der BBT SE des EKS.

5.1.2.1 PGK Bereich 1

Das Gebirge besteht überwiegend aus phyllitischem Glimmerschiefer mit weißen Quarzmobilisaten, vereinzelt graphitischen Lagen. Das Gestein ist schieferig-dünnpförmig lösend, weitständig geklüftet und bergfeucht. In vereinzelt Bereichen kommt es zu Tropfwasserzutritten.

Abbildung 13 zeigt ein Beispiel einer geologischen Kartierung (Dokumentation der BBT SE) von Proj. km 6+981 bis 6+988. Das Gebirge weist eine flach gegen die Vortriebsrichtung einfallende Schieferung auf. Vereinzelt treten wellige Verfaltungen und schieferungsparallele Ablösungen auf. Sporadisch treten Störungen auf. Ebenfalls zu bemerken ist, dass wenig bis keine Klüfte in dem Bereich auftreten. Das Vorkommen von geologisch Überprofilen ist rar.

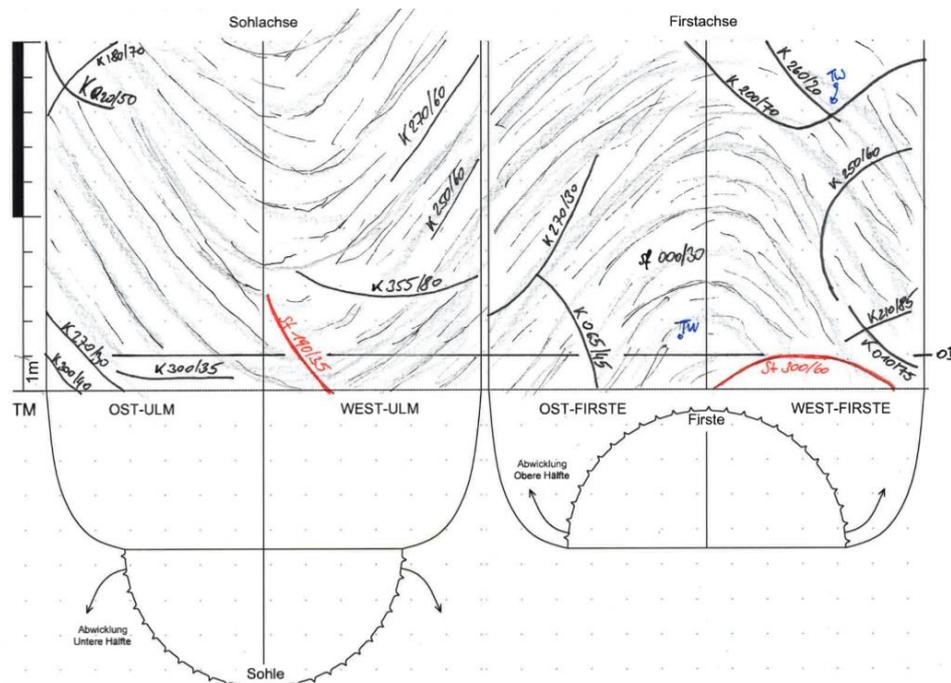


Abbildung 13: Beispiel einer Kartierung des PGK 1 bei Proj. km 7+053 bis 7+063 (Dokumentation BBT SE)

5.1.2.2 PGK Bereich 2a

Das Gestein ist aus phyllitischem Glimmerschiefer mit vereinzelt Quarzitschieferlinsen aufgebaut.

Abbildung 14 zeigt ein Beispiel einer geologischen Kartierung (Dokumentation BBT SE) von Proj. km 7+388 bis 7+498 aus einem Bereich der PGK 2a. Es treten vermehrt Störungen und Harnische auf, welche eine Mächtigkeit von bis zu 10 cm aufweisen. Ein Großteil der Störungen ist mit Fault Gouge gefüllt. Des Weiteren werden, wie in der Abbildung ersichtlich geologisch bedingte Überprofile dokumentiert.

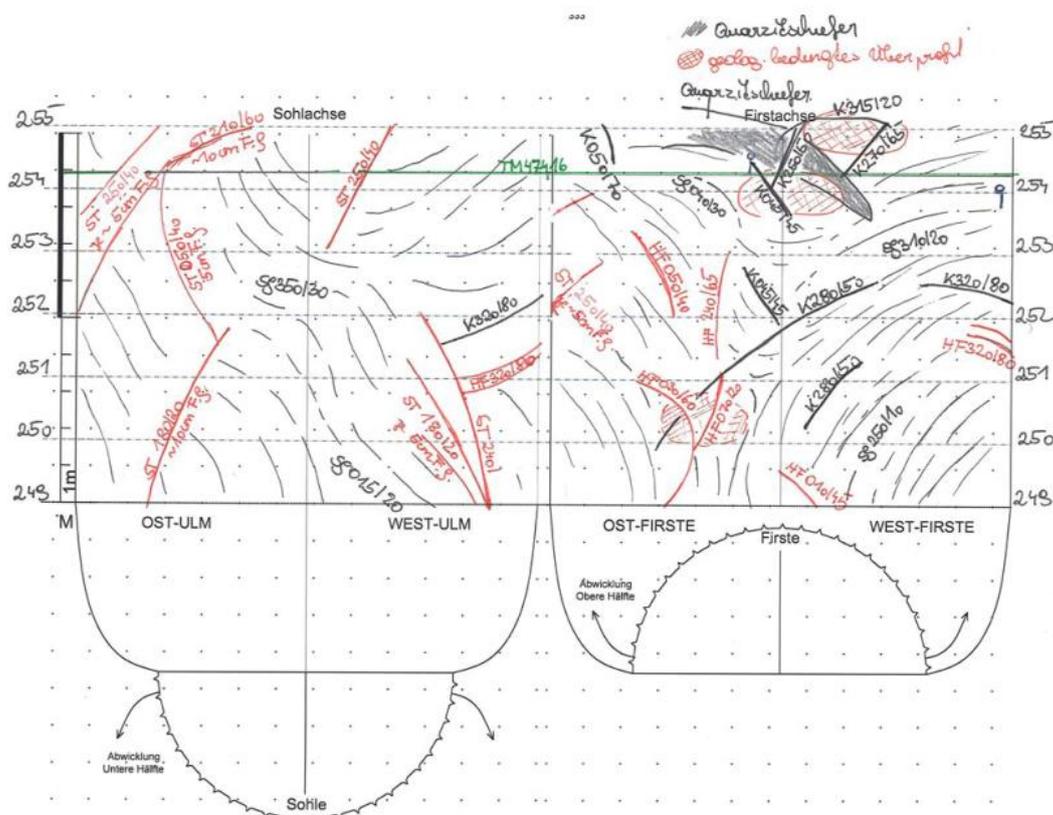


Abbildung 14 Beispiel einer Kartierung des PGK 2a bei Proj. km 7+388 bis 7+498 (Dokumentation BBT SE)

5.1.2.3 PGK Bereich 2b

Das Gebirge ist aus phyllitischem Glimmerschiefer aufgebaut, der schiefzig-dünnplattig lösend und weitständig geklüftet vorliegt. Zusätzlich werden tropfende Bergwasserzutritte dokumentiert.

Abbildung 15 zeigt ein Beispiel einer geologischen Kartierung (Dokumentation BBT SE) der PGK 2b von Proj. km 7+266 bis 7+276. Die Häufigkeit von dokumentierten

Harnischen nimmt zu. Es treten großvolumige geologisch bedingte Überprofile in der Firste und Kämpfer auf, welche eine Tiefe von bis zu 1 m aufweisen (siehe Abbildung 15).

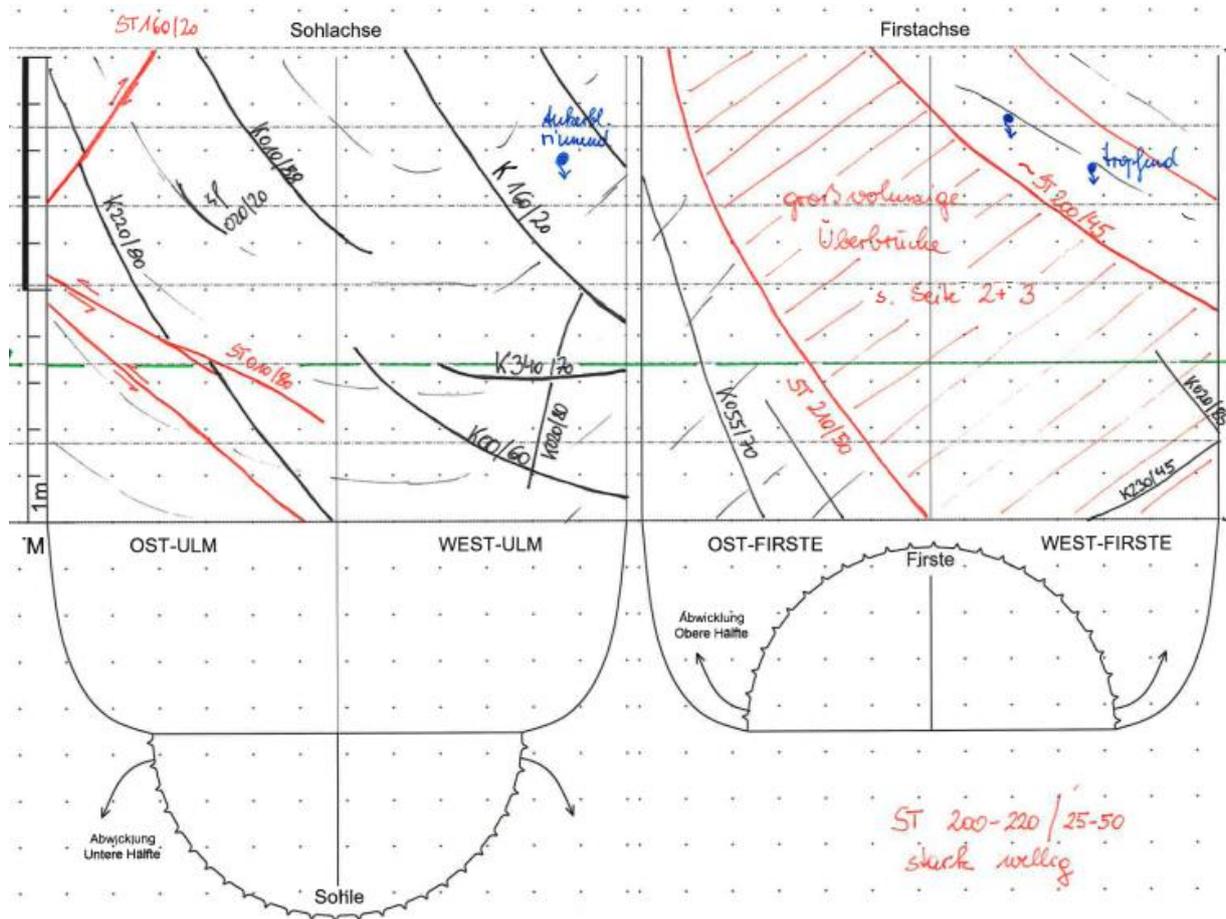


Abbildung 15: Beispiel einer Kartierung des PGK 2b bei Proj. km 7+266 bis 7+276 (Dokumentation BBT SE)

5.1.3 Hohlraumdimensionen

EKS:

Abbildung 16 zeigt das Regelprofil des EKS.

- Der Durchmesser des Ausbruchquerschnitts beträgt 7,9 m
- Die Fläche des Ausbruchquerschnitts beträgt 49 m²

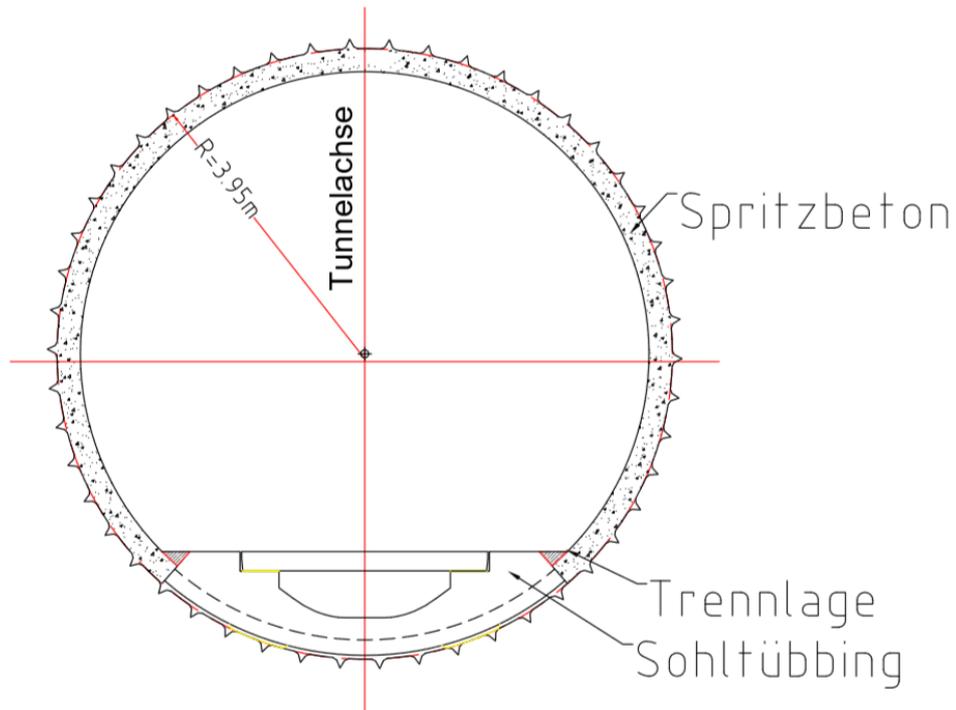


Abbildung 16: Regelprofil des EKS (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2013a) (nachbearbeitet)

Haupttunnel:

In Abbildung 17 aus Kapitel 3.8.2 befindet sich das Regelprofil für die HT.

- Die Fläche des Ausbruchsquerschnitts ohne Sohlgewölbe beträgt $58,4 \text{ m}^2$
- Die Fläche des Ausbruchsquerschnitts mit Sohlgewölbe beträgt $62,6 \text{ m}^2$

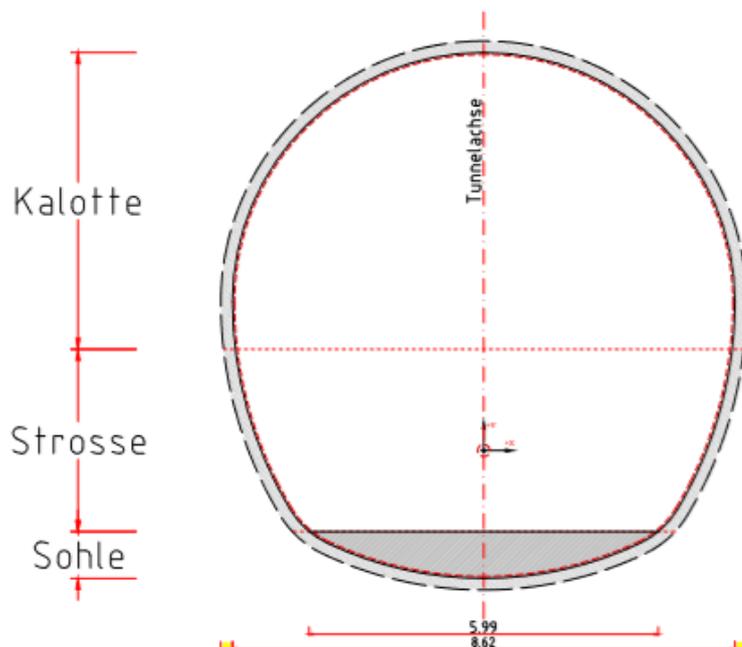


Abbildung 17: Regelprofil des Vortrieb 8.1 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017e) (nachbearbeitet)

6 Methodik

Im Folgenden wird die Auswirkung der Vortriebe 8.1 und 8.2 auf den EKS modelliert und rechnerisch erfasst. Mittels der Finite Elemente Methode wird die absolute Verformung der Tunnelröhren (siehe Kapitel 6.1) über 2D MQ berechnet. Für die Modellierung wurden drei MQ bei den Proj. km 6+982, 7+075 und 7+393 ausgewählt. Alle MQ wurden normal zur Vortriebsrichtung (153°) dargestellt. Für die Berechnung wird die Software „RocScience Phase²“ eingesetzt.

6.1 Finite Elemente Methode

Für die numerische Berechnung des Stabilitätszustandes und der Vorformung der Tunnelröhren wird die Finite Elemente Methode angewendet. Das Ziel dieser Berechnungsmethode ist eine Untersuchung der Standsicherheit des Tunnels durch die Ermittlung der Verformung der Spritzbetonschale.

Das Fundament der Rechentechnik ist die Aufteilung der Berechnungsfläche in kleine, endliche Elemente, sogenannte finite Elemente. Jedes Element ist mit einem Knotenpunkt an das benachbarte Element verknüpft. Die Finite Elemente Methode berechnet die Verschiebung der Knotenpunkte, die durch Belastung auf das Model verursacht wird (Prinz & Strauß, 2011).

Für die Berechnung werden die Eigenschaften des Gebirges, Störungen, Hauptnormalspannungen, Hohlraumdimension, Reihenfolge der Ausbruchsschritte, Vorentlastung der Tunnelröhre und Verbauung der Stützmittel berücksichtigt.

6.2 Beschreibung der Methodik am MQ 1, PGK 1 (Proj. km 6+982)

Der erste MQ befindet sich bei Proj. km 6+982 und hat eine Profilrichtung von 63° bzw. 243°. Im Folgenden wird die Methodik der Modellierung der Verformungsberechnung am Beispiel des EKS am MQ 1 beschrieben.

6.2.1 Eingabe der Parameter:

Die Hauptspannungen für den MQ sind nach der Formel aus dem Kapitel 5.1.1 berechnet. Die ermittelten Werte können aus Abbildung 11 abgelesen werden, diese betragen $\sigma_v = 27 \text{ MPa}$, $\sigma_{h\text{-par.}} = 13,5 \text{ MPa}$ und $\sigma_{h\text{-quer}} = 18,9 \text{ MPa}$.

Für die Eigenschaften des Gebirges wird das Elastizitätsmodul [MPa] (im Weiteren als E-Modul bezeichnet) verwendet. Im Bereich des MQ 1, wird dieser mit 8000 MPa definiert. Der Wert stammt von einaxialen und triaxialen Druckversuchen, welche im Zuge der Baulosverlängerung (2017) von der BBT SE durchgeführt wurden. Das E-Modul berücksichtigt den Zerlegungsgrad des Materials welcher durch die Schieferung verursacht wird (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017c).

Im Querschnitt auftretende Klüfte, Harnischflächen und Störungen werden über das Mohr-Coulomb Bruchkriterium modelliert. Die Kennwerte der geologischen Trennflächen basieren auf Laborversuchen, welche durch die BBT SE durchgeführt wurden. Die Kohäsion der Klüfte wurde dabei mit 0.05 MPa und einem Reibungswinkel von 30° bestimmt. Für Harnischflächen und Störungen wurde in diesem Laborversuch eine Kohäsion von 0.02 MPa und ein Reibungswinkel von 20° bestimmt. Alle eingesetzten Werte stammen aus den Ausschreibungsunterlagen der Baulosverlängerung im Dezember 2017 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017c). Des Weiteren können die geotechnischen Kennwerte ebenfalls aus dem baueologischen Längsschnitt in Kapitel 3.6 abgelesen werden.

Abbildung 18 ist eine schematische Darstellung der geologischen Gegebenheiten des MQ, welche sich auf die geologische Dokumentation der BBT SE stützt. Eingezeichnet sind die geologischen Strukturen und die dazugehörigen Orientierungen, die an der Ortsbrust zum Zeitpunkt der Kartierung ersichtlich waren. Dies bildet die Basis für die Gliederung der Trennflächen im nächsten Schritt der Modellierung. Wie in der untenstehenden Abbildung ersichtlich sind die Klufflächen in Blau, die Störungen und Harnische in Rot eingezeichnet.

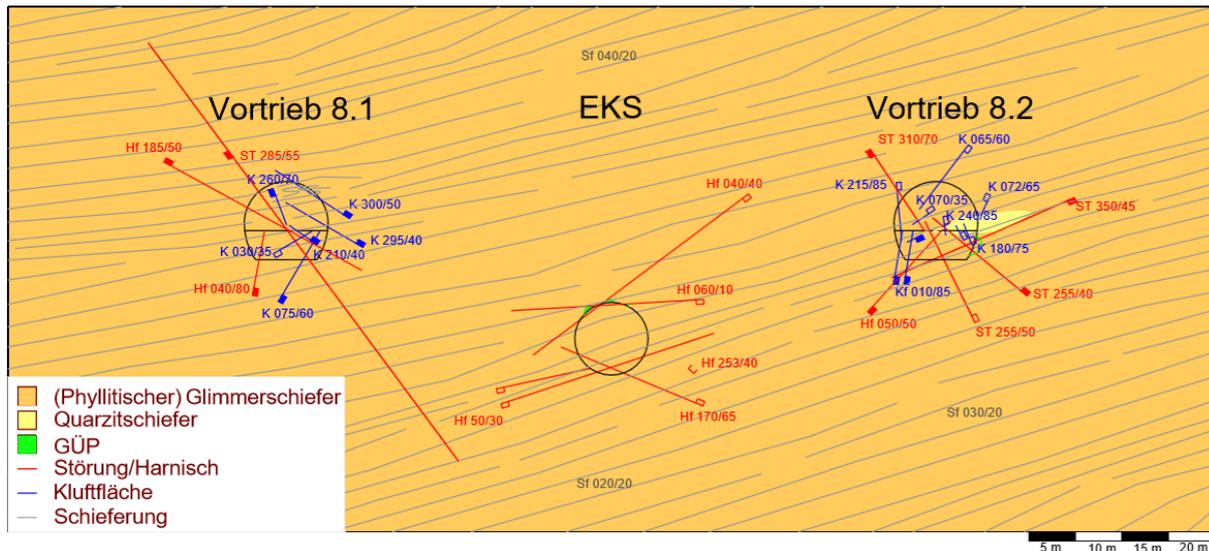


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Geologie vom MQ 1 Proj. km 6+982 (nach Dokumentation BBT SE)

6.2.2 Gliederung der geologischen Trennflächen

Für die Modellierung der in Abbildung 18 dargestellten geologischen Trennflächen ist eine Aufteilung in Trennflächensysteme erforderlich, da die Eingabe in die Software über stochastisch generierte Systeme verläuft. Es werden jene Trennflächenorientierungen verwendet die von den Geologen der BBT SE zum Zeitpunkt der Ortsbrustdokumentation der jeweiligen Vortriebe aufgezeichnet wurden. Die Klüfte (blau) werden in Klufscharen eingeteilt wohingegen Störungen (rot) und Harnische (rot) in Störungssysteme eingeteilt werden. Für die Aufteilung wird die im Untersuchungsabschnitt gültige Gliederung der BBT SE verwendet (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017c). In Abbildung 19 ist die Einteilung der Trennflächenorientierung sowie die dazu gehörigen Trennflächenabstände und die Trennflächenlängen ersichtlich.

Die Berechnung erfolgt mit der folgenden Formel (Liu, 2017):

$$\varphi' = \arctan(\cos|\alpha_F - \alpha_P| * \tan\varphi) \quad (4)$$

$\varnothing \varphi'$...Scheinbares Einfallen

α_F ...Fallrichtung der Schichtfläche

φ ...Einfallrichtung der Schichtfläche

α_P ...Profilrichtung

Aus den berechneten scheinbaren Einfallswinkeln wird mit folgender Formel der arithmetische Mittelwert für jedes Trennflächensystem berechnet (nach Reinboth, 2016). Über diesen Wert werden die geologischen Strukturen in der Software dargestellt.

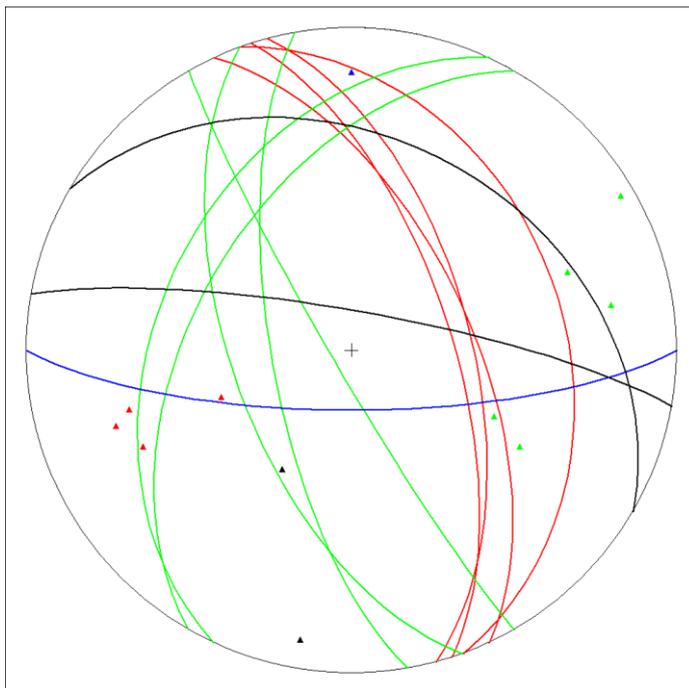
$$\varnothing \varphi' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varphi' i \quad (5)$$

Tabelle 10 zeigt die Gliederung der Trennflächensysteme im MQ 1, die dazugehörigen $\varnothing \varphi'$ sowie die Trennflächenabstände und -längen.

Tabelle 10: Einteilung Klufscharen und Störungssysteme MQ 1 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017b)

Klufscharen					
Bereich (45-90/25-85)					
Klufschar	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand[m]	Länge[m]
K1	065/60	60			
K2	072/65	65	55	3	4
K3	075/60	60			
K4	070/35	35			
Bereich (220-300/10-85)					
Klufschar	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand[m]	Länge[m]
K1	300/50	-33			
K2	295/40	-27			
K3	260/70	-70	-55	3	4
K4	250/60	-60			
K5	240/85	-85			
Bereich (140-200/10-70)					
Klufschar	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand[m]	Länge[m]
K1	180/75	-60	-20	3	3.5
Bereich (0-40/20-90)					
Klufschar	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand[m]	Länge[m]
K1	30/35	30	52	3	4.5
K2	010/80	74			
Störungssystem					
Bereich (40-90/5-85)					
Störungssystem	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand[m]	Länge[m]
Hf2	50/30	30			
Hf4	60/10	10	30	2	15
Hf5	50/50	50			
Bereich (300-359/5-60)					
Störungssystem	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand[m]	Länge[m]
ST1	350/45	16	16	4	15
Bereich (0-40/20-90)					
Störungssystem	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand[m]	Länge[m]
Hf1	20/30	23			
Hf2	40/40	38	47	4	15
Hf3	40/80	80			

In Abbildung 21 sind die Klüfte des MQ 1 in Form von Großkreisen und der dazu gehörigen Polpunkte in einer Lagenkugelprojektion dargestellt. Für die Projektion der geologischen Strukturen in dieser Masterarbeit wurde die Software „Tectonic Data Analyzer“ verwendet. Aus Grund der Übersichtlichkeit befindet sich in dieser Arbeit rechts neben jeder Lagenkugelprojektion eine Legende mit der Orientierung der Trennflächensystem. Anhand der Abbildung wird ersichtlich, dass es sich bei diesem Datensatz um ein konjugiertes Kluftsystem handelt, bei dem die intermediäre Hauptnormalspannung σ_2 sich im Schnittbereich der Grünen und Roten Kluftscharen im nordwestlichen Teil der Lagenkugelprojektion befindet. Daraus resultiert, dass sich die maximale σ_1 und die minimale σ_3 auf einer Ebene normal zu σ_2 entlang der Ostwestachse befindet. Die blauen und schwarzen Klüfte liegen somit in der σ_1 und σ_3 ebene.



Legende:

Bereich (45-90/25-85)...Rot

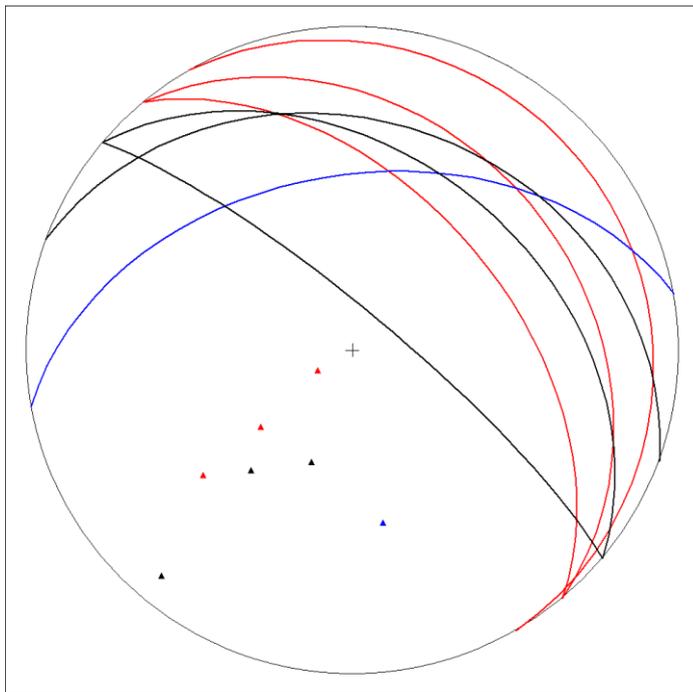
Bereich (220-300/10-85)...Grün

Bereich (140-200/10-70)...Blau

Bereich ((0-40/35-90)...Schwarz

Abbildung 21: Kluftscharen in Lagenkugelprojektion (MQ 1)

Die Großkreise und Polpunkte der Störungen und Harnischflächen des MQ 1 sind in Abbildung 22 in einer Lagenkugelprojektion dargestellt. In diesem MQ sind lediglich Störungen dokumentiert worden, die Richtung NNO einfallen.



Legende:

Bereich (40-90/5-85) ...Rot

Bereich (300-359/5-60) ...Blau

Bereich (0-40/20-90) ...Schwarz

Abbildung 22: Störungssysteme in Lagenkugelprojektion (MQ 1)

Abbildung 23 zeigt das Resultat nach Eingabe der geotechnischen Parameter und die Projektion der geologischen Strukturen auf die Berechnungsfläche. In der Modelansicht ist die extrapolierte Geologie des MQ 1 zusehen, wobei die geologischen Strukturen parallel statistisch generiert wurden. Des Weiteren wurden die geplanten Ausbrüche des EKS sowie der Vortriebe 8.1 und 8.2 eingezeichnet.

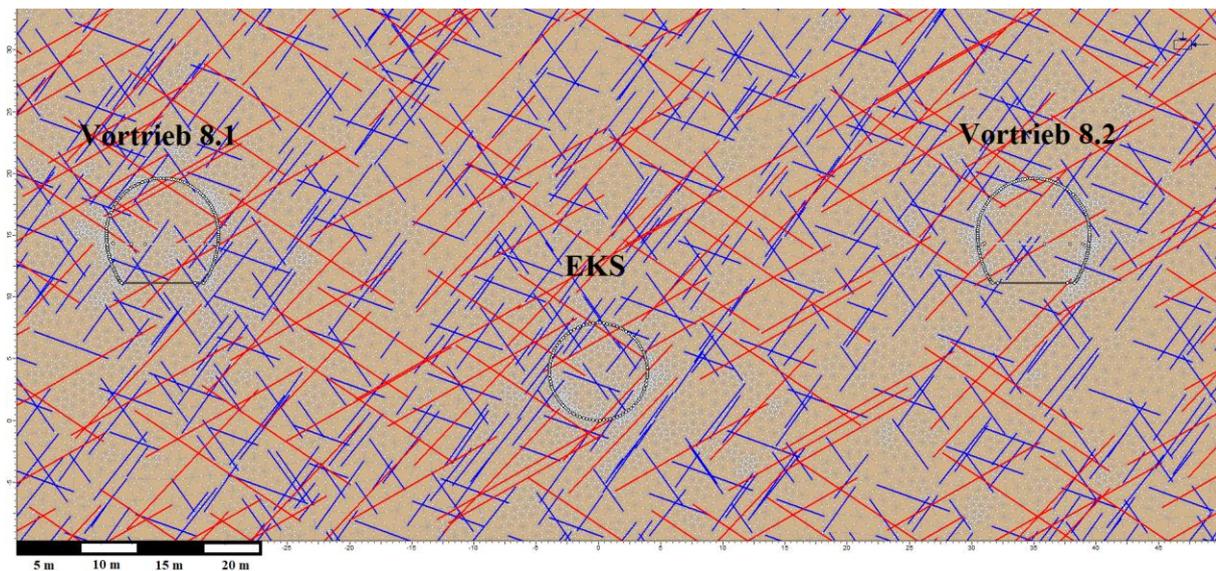


Abbildung 23: MQ 1 Proj. km 6+982 mit extrapolierte Geologie und geplanten Ausbrüchen (Modelansicht – Berechnung der Verformungen)

6.2.3 Modellierung der Vortriebe

Für eine realitätsnahe Berechnung wird das Model in diverse Modellierungsphasen bzw. in die tatsächlichen Vortriebsreihenfolgen unterteilt. Der nachfolgende Bereich beschreibt die unterschiedlichen Ausbruchphasen. Die einzelnen Vortriebe passierten den MQ 1 wie folgt:

- 1) EKS
- 2) Kalotte Vortrieb 8.1
- 3) Kalotte Vortrieb 8.2
- 4) Strosse Vortrieb 8.1
- 5) Strosse Vortrieb 8.2

Als Erstes wurde der EKS mit einem Vollausbuchquerschnitt vorgetrieben. Am Beispiel des EKS im MQ 1 wird die Modellierungsmethode eines Tunnelvortriebs und die Verbauung der Stützmittel beschrieben. Als Verfahren wird die Vlachopoulos und Diederichs Methode (Vlachopoulos & Diederichs, 2009) eingesetzt. Der Modellierungsvorgang eines Tunnels erfolgt über vier Schritte:

- 1) Ausbruch und Installation der Stützkraft
- 2) Reduktion der Stützkraft
- 3) Verbauung der Stützmittel
- 4) Streichung der Stützkraft

6.2.3.1 Ausbruch und Installation der Stützkraft

Im ersten Schritt wird der Tunnel ausgebrochen und eine Stützkraft mit dem Faktor 1 (100%) installiert. Abbildung 24 zeigt den vollausgebrochenen EKS, wobei die roten Pfeile, die im Inneren radial auf das Profil zeigen, die aufgetragene Stützkraft darstellen ("Tunnel Lining Design 1.0 Introduction," n.d.).

Die Stützkraft mit dem Faktor 1 verkörpert das bereits ausgebrochene Gestein, daher kann hier noch keine Verformung auftreten. Wird die Stützkraft verringert, kann sich das Gestein in das Innere des Tunnels entspannen und Verformungen treten auf.

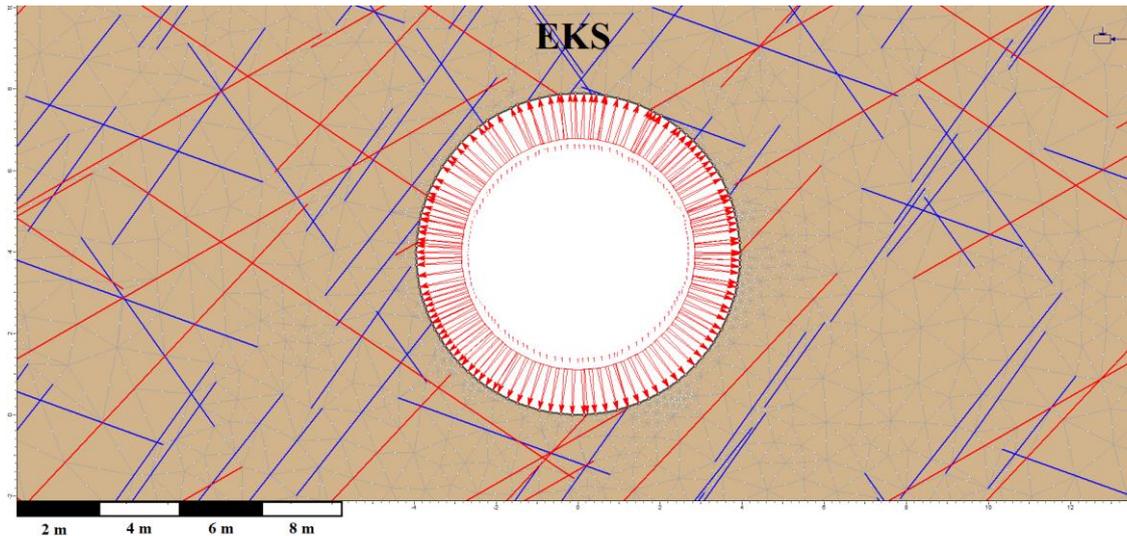


Abbildung 24: MQ 1 Proj. km 6+982 EKS - Ausbruch und Installation der Stützkraft (Faktor 1) (Modelansicht – Berechnung der Verformungen)

6.2.3.2 Reduktion der Stützkraft

Im zweiten Schritt wird die Tunnelentspannung mit Hilfe der Stützkraftreduktion simuliert. Das Ziel ist die Berechnung der Verformung des Tunnels vor der Verbauung der Stützmittel. Ermittelt wird hierbei die Reduktion des Stützkraftfaktors bis zu dem Zeitpunkt des Einbaus der Stützmittel. Da die Verformungen am Profil variieren ist es wichtig die Berechnung für einen spezifischen Punkt am Tunnel durchzuführen. Die angewandte Methodik bezieht sich dabei auf den höchsten Punkt an der Firste.

Als erstes muss über 10 Phasen die Stützkraft wie in Abbildung 25 dargestellt reduziert werden. In Phase 1 beträgt der Faktor 0, da das Gestein noch nicht ausgebrochen wurde.

Stage	Factor
1	0
2	1
3	0.8
4	0.4
5	0.2
6	0.1
7	0.08
8	0.04
9	0.02
10	0.01
11	0

Abbildung 25: Faktorreduktion der Stützkraft

Um feststellen zu können in welcher Phase die Stützmittel eingebaut werden, wird der plastische Verformungsradius (R_P), Distanz zwischen Ortsbrust und Verbauung der Stützmittel (X) und der Radius des Tunnels (R_T) herangezogen.

Der plastische Verformungsradius kann aus der Interpretationsansicht der Software „RocScience Phase²“ bestimmt werden. Abbildung 26 zeigt die Verformung des Erkundungstollen in der letzten Phase mit einer Stützkraft mit Faktor 0. Die roten „x“ außerhalb des Tunnelprofils repräsentieren jene Elemente in der Finiten Elemente Methode, die dem Ausbruch des EKS nicht standgehalten haben. Der Bereich um den Tunnel mit den besagten nicht standgehaltenen Elementen ist die plastische Verformungszone. Mit dem Messwerkzeug der Software kann, vom Mittelpunkt des Tunnels aus, die Länge des plastischen Verformungsradius gemessen werden („Tunnel Lining Design 1.0 Introduction,“ n.d.). Wie in Abbildung 26 ersichtlich, beträgt der plastische Verformungsradius (R_P) an Hand des Beispiels des EKS 7 m.

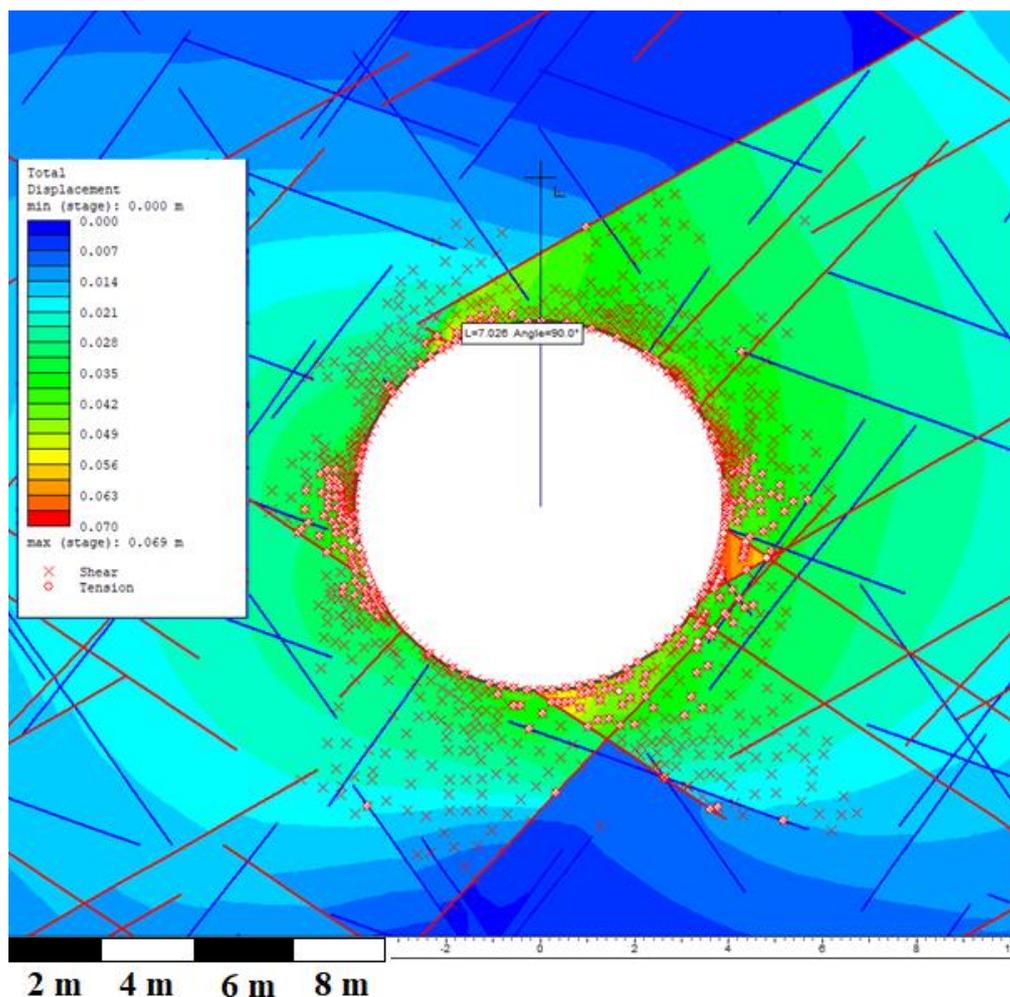


Abbildung 26: Ermittlung des plastischen Verformungsradius EKS (MQ 1)

Die Distanz zwischen der Ortsbrust und der Verbauung der Stützmittel (X), in diesem Fall Anker, beträgt 5,5 m. Der R_T des EKS beträgt 3,95 m (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2013a).

Für die Berechnung der Stützkraftreduktion wird das Längsversatz Profil der Vlachopoulos & Diederichs Methode herangezogen. Mit Hilfe des Profils kann die Radialverschiebung/Maximalverschiebung (U/U_{\max}) abgelesen werden. Dafür werden folgende Verhältnisse benötigt:

$$\frac{R_P}{R_T} \quad (6)$$

$$\frac{X}{R_T} \quad (7)$$

Abbildung 27 zeigt das Längsversatz Profil der Vlachopoulos & Diederichs Methode und wie aus dem Profil am Beispiel der Werte des EKS von MQ 1 der Wert U/U_{\max} abgelesen werden kann ("Tunnel Lining Design 1.0 Introduction," n.d.).

$$R_P/R_T = 7 \text{ m} / 3,95 \text{ m} = 1,8$$

$$X/R_T = 5,5 \text{ m} / 3,95 \text{ m} = 1,4$$

Dadurch ergibt sich: $U/U_{\max} = 0,76$ (76%)

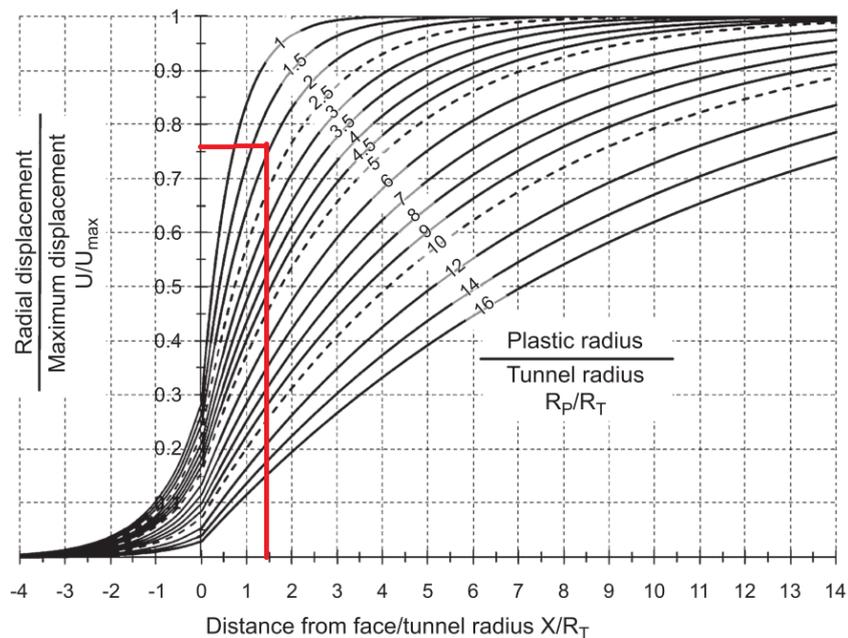


Abbildung 27: Längsversatz Profil (nach Vlachopoulos & Diederichs, 2009)

U/U_{\max} ergibt den prozentuellen Wert der maximalen Verformungen, die in der Firste des Tunnels auftreten bevor die Stützmittel verbaut werden. Daraus ergibt sich folgende Formel:

$$\left(\frac{U}{U_{\max}}\right) * (\text{Gesamt Verformung Firstpunkt}) \quad (8)$$

Abbildung 28 zeigt eine Zeitverformungsgrafik des Firstpunktes des EKS am MQ 1 mit der Absolut Verformung auf der Vertikalachse. Die erstellten Phasen der Stützkraft Faktoren aus Abbildung 25 werden in Abbildung 28 auf der Horizontalachse dargestellt.

Die Gesamtverformung am Firstpunkt zu jenem Zeitpunkt, an dem der Stützkraft Faktor 0 beträgt, kann aus der Grafik abgelesen werden und beträgt dabei 0,04 m. Anhand von Formel (8), kann die Verformung vor der Verbauung der Stützmittel berechnet werden. Daraus ergibt sich eine Verformung des Gebirges am Firstpunkt um $(0,76) * (0,04 \text{ m}) = 0,03 \text{ m}$.

Die horizontale (strichlierte) Linie der Zeitverformungsgrafik zeigt die Stelle an dem die Verformung 0,03 m beträgt. Die vertikale (strichlierte) Linie zeigt die Phase der Stützkraftfaktoren. An dem Punkt an welchem die Verformung 0,03 m erreicht, befindet sich das Model in Phase 7. Wie in Abbildung 25 ersichtlich, beträgt in Phase 7 die Reduktion der Stützkraft 0,08 ("Tunnel Lining Design 1.0 Introduction," n.d.).

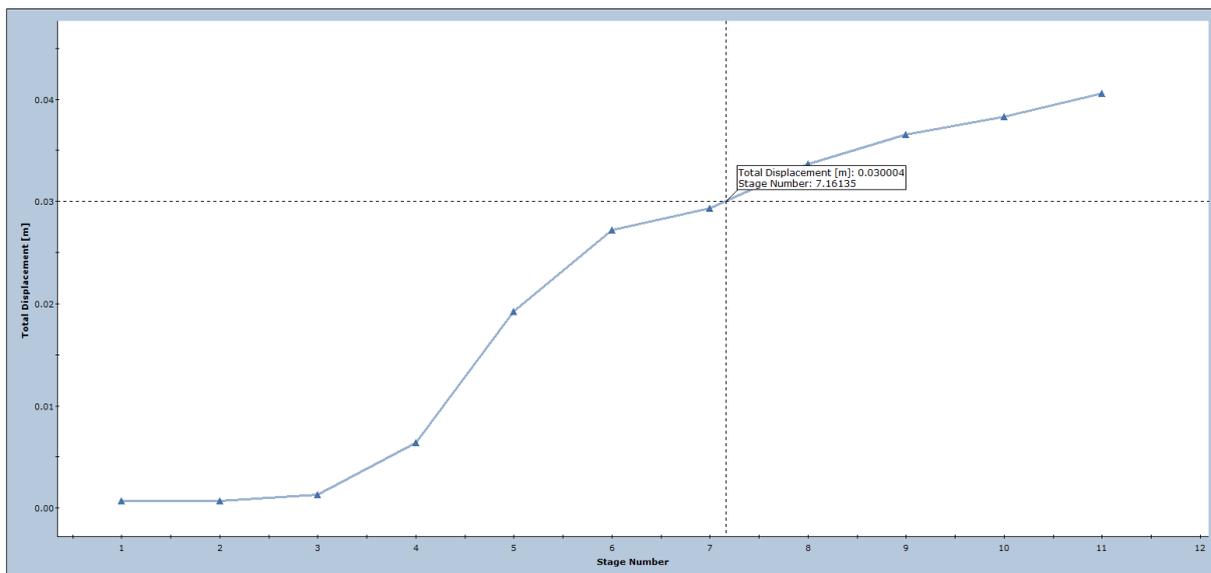


Abbildung 28: Zeitverformungsgrafik EKS für Berechnung der Stützkraftreduktion

Abbildung 29 veranschaulicht wie die Stützkraft auf den Faktor 0,08 reduziert wird, wobei die roten Pfeile im Inneren des Tunnelprofils hierbei für die Stützkraft stehen.

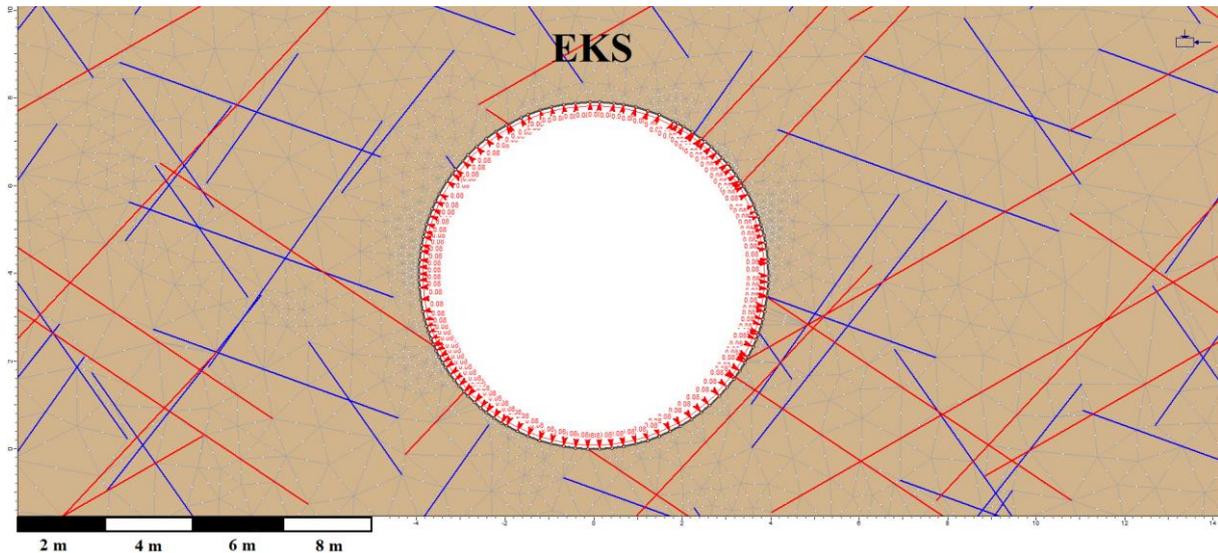


Abbildung 29: MQ 1 6+982 EKS - Reduktion der Stützkraft (Faktor 0.08) (Modelansicht – Berechnung der Verformungen)

6.2.3.3 Verbauung der Stützmittel

Im nächsten Schritt werden die Stützmittel verbaut. Im Falle des EKS im MQ 1 wurden 7 Mal Reibrohranker 100 KN mit einer Länge von 3 m und eine Spritzbetonschale von 10 cm verbaut. Die Anker wurden 5,5 m und der Spritzbeton 30 m hinter der Ortsbrust verbaut. Da die zwei Stützmittel zu unterschiedlichen Zeitpunkten verbaut wurden, muss die Modellierung in unterschiedliche Berechnungsphasen aufgeteilt werden. Sämtliche Informationen der Orientierung der Anker und Dicke der Spritzbetonschale stammen aus der Ausbaufestlegung des EKS. Die Verbauung der Stützmittel als nächster Schritt der Tunnelmodellierung wird in Abbildung 30 dargestellt. Hierbei werden die tatsächlich verbauten Anker, in der Abbildung in Türkis dargestellt, des EKS installiert und an der Außenseite des Tunnelprofils angebracht. Die errechnete Stützkraft bleibt weiterhin aktiv und die Last wird auf die installierten Anker übertragen.

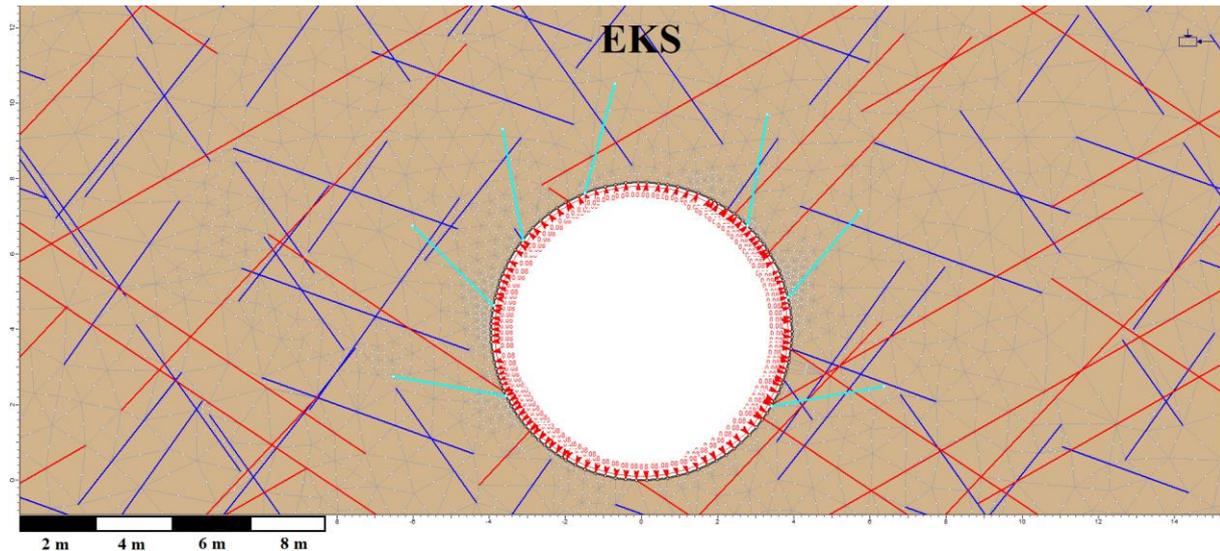


Abbildung 30: MQ 1 Proj. km 6+982 Installation der Anker (Modelansicht – Berechnung der Verformungen)

6.2.3.4 Entfernung der Stützkraft

Im letzten Schritt wird die Stützkraft auf den Faktor 0 reduziert, somit wirkt die gesamte Last auf das Tunnelprofil und die Anker. Abbildung 31 zeigt den vollständig modellierten EKS mit den verbauten Stützmitteln. Aufgrund der zeitlichen Differenz zwischen dem Einbau der Anker und der Spritzbetonschale, muss der Berechnungsvorgang für die Installation der Spritzbetonschale erneut durchgeführt werden (“Tunnel Lining Design 1.0 Introduction,” n.d.).

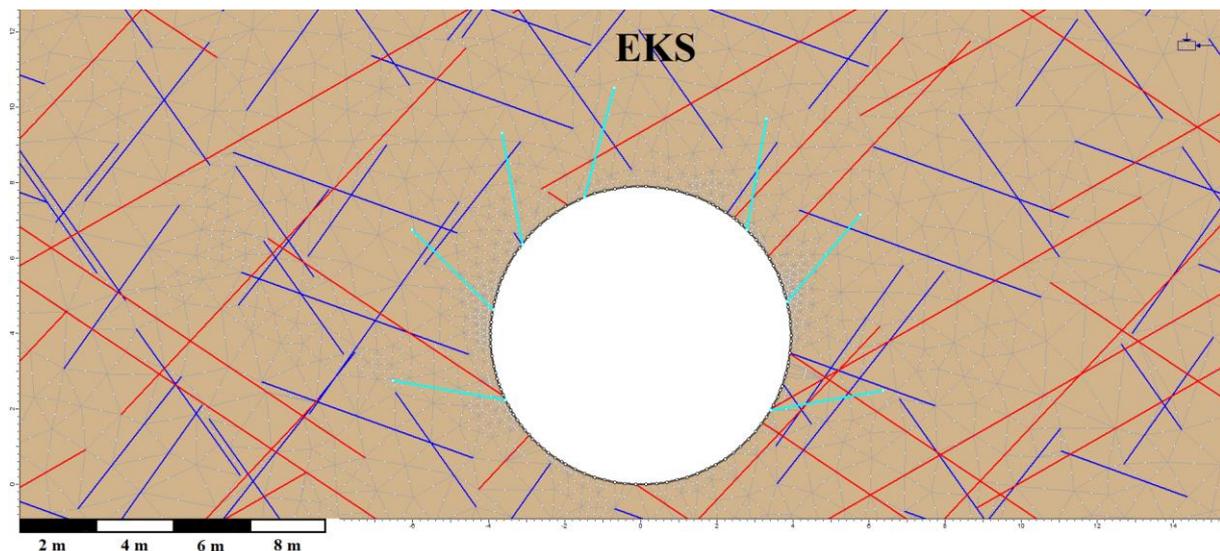


Abbildung 31: MQ 1 Proj. km 6+982 Resultat eines Modellierungsvorganges am Beispiel EKS (Modelansicht – Berechnung der Verformungen)

6.2.4 Fertigstellung der Berechnung MQ 1

Bei den Vortrieben 8.1 und 8.2 müssen aufgrund des konventionellen Vortriebes die Ausbrüche in Kalotte und Strosse ggf. auch in Sohle differenziert werden. Für ein realitätsnahes Resultat muss die Vortriebsreihenfolge der Teilausbrüche, jener der Modellierungsphasen entsprechen.

Wie in den oben beschriebenen Modellierungsschritten werden nun auch die verbleibenden Teilausbrüche in folgender Reihenfolge modelliert:

- Ausbruch und Installation der Stützkraft Spritzbeton EKS
- Reduktion der Stützkraft Spritzbeton EKS
- Verbauung der Stützmittel Spritzbeton EKS
- Streichung der Stützkraft Spritzbeton EKS

- Ausbruch und Installation der Stützkraft Kalotte Vortrieb 8.2
- Reduktion der Stützkraft Kalotte Vortrieb 8.2
- Verbauung der Stützmittel Kalotte Vortrieb 8.2
- Streichung der Stützkraft Kalotte Vortrieb 8.2

- Ausbruch und Installation der Stützkraft Kalotte Vortrieb 8.1
- Reduktion der Stützkraft Kalotte Vortrieb 8.1
- Verbauung der Stützmittel Kalotte Vortrieb 8.1
- Streichung der Stützkraft Kalotte Vortrieb 8.1

- Ausbruch und Installation der Stützkraft Strosse Vortrieb 8.2
- Reduktion der Stützkraft Strosse Vortrieb 8.2
- Verbauung der Stützmittel Strosse Vortrieb 8.2
- Streichung der Stützkraft Strosse Vortrieb 8.2

- Ausbruch und Installation der Stützkraft Strosse Vortrieb 8.1
- Reduktion der Stützkraft Strosse Vortrieb 8.1
- Verbauung der Stützmittel Strosse Vortrieb 8.1
- Streichung der Stützkraft Strosse Vortrieb 8.1

Die Berechnungen der angeführten Methodik der Stützkraftreduktion befinden sich im Anhang, wobei die Werte der Strossen Vortriebe ein geschätzter Wert laut Industriestandard sind. Die Berechnung der Stützkraftreduktion der Strossen ist mit der Vlachopoulos und Diederichs Methode nicht möglich, da die jeweiligen Bezugspunkte des Rechenverfahrens, nämlich der höchste Firstpunkt, bereits in den Kalottenvortrieben abgebaut wurden und nicht mehr vorhanden sind. Die Stützkraft der Strossen wurde mit der Hälfte des Faktors der Kalotten angenommen.

Insgesamt folgende Stützmittel auf Höhe des MQ 1 verbaut:

EKS:

7 Mal Reibrohranker 100 KN, L = 3m

10 cm Spritzbetonschale

Vortrieb 8.1:

Kalotte: 9 Mal SN 250KN, L = 4 m

Strosse: 4 Mal SN 250KN, L = 4 m

25 cm Spritzbetonschale

Vortrieb 8.2

Kalotte: 9 Mal SN 250KN, L = 4 m

Strosse: 4 Mal SN 250KN, L = 4m

25 cm Spritzbetonschale

Abbildung 32 veranschaulicht die letzte Phase des modellierten Querschnitts, in welcher bereits alle Tunnelbereiche ausgebrochen und alle Stützmittel installiert wurden. Auf der Ausseiten aller Vortriebe sind in Abbildung 32 die Anker in Türkis, sowie die Spritzbetonschalen auf der Innenseite der Vortriebe in Dunkelgrün eingezeichnet.

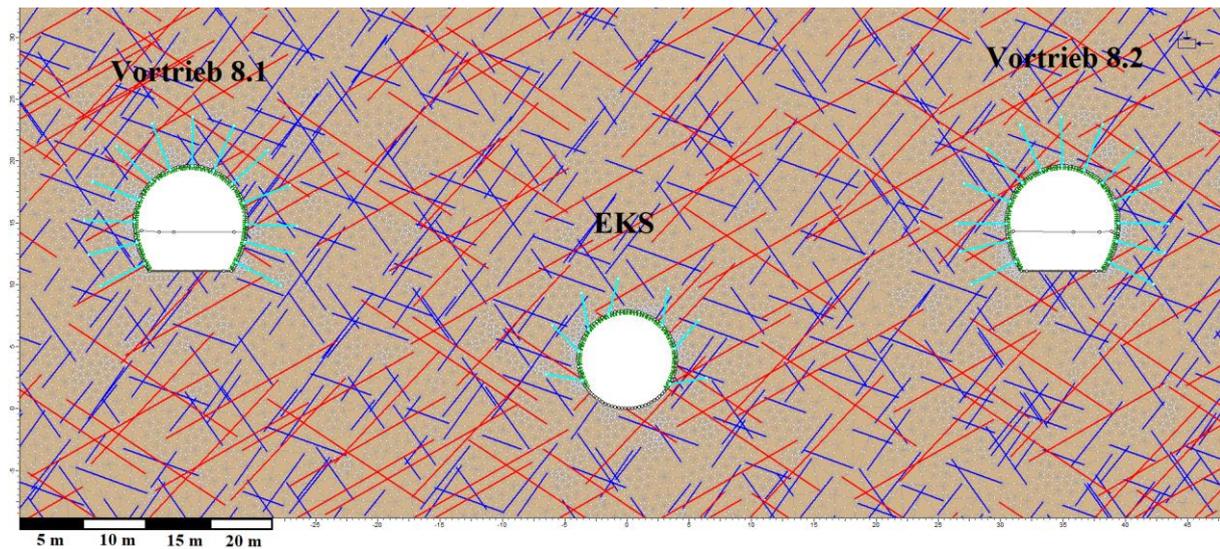


Abbildung 32: MQ 1 Proj. km 6+982 vollständig modellierter MQ 1 (Modelansicht – Berechnung der Verformungen)

6.3 MQ 2, PGK 2a (Proj. km 7+7075)

Die Berechnung des MQ basiert auf der in Kapitel 6.2 beschriebenen Modellierungsmethodik, wobei sich die dabei ermittelten Stützkräfte im Anhang befinden. MQ 2 befindet sich bei Proj. km 7+7075 und hat eine Profilrichtung von 63° bzw. 243° .

Die Hauptnormalspannungen des Querschnitts werden nach den Formeln aus Kapitel 5.1.1, mit einer $\sigma_v = 27,5$ MPa, $\sigma_{h-par.} = 13,8$ MPa und $\sigma_{h-quer} = 19,3$ MPa berechnet. Das E-Modul in diesen Bereich beträgt basierend auf den Laborversuchen der BBT SE 8000 MPa. Die Kohäsion der Klüfte wurde dabei mit 0.05 MPa und einem Reibungswinkel von 30° bestimmt. Für Harnischflächen und Störungen wurde in diesem Laborversuch eine Kohäsion von 0.02 MPa und ein Reibungswinkel von 20° bestimmt. Die oben angeführten Kennwerte des Gesteins und der geologischen Strukturen, welche für die Berechnung dieses MQ herangezogen wurden stammen aus den Ausschreibungsunterlagen der Baulosverlängerung im Dezember 2017 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017c). Die geotechnischen Daten sind ebenfalls im baugelologischen Längsschnitt aus Kapitel 3.6 ersichtlich.

Abbildung 33 zeigt eine schematische Darstellung der geologischen Gegebenheiten, basierend auf den Ortsbrustdokumentationen der BBT SE. Wie in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich, wurde im Vortrieb 8.2 eine Sohle eingebaut.

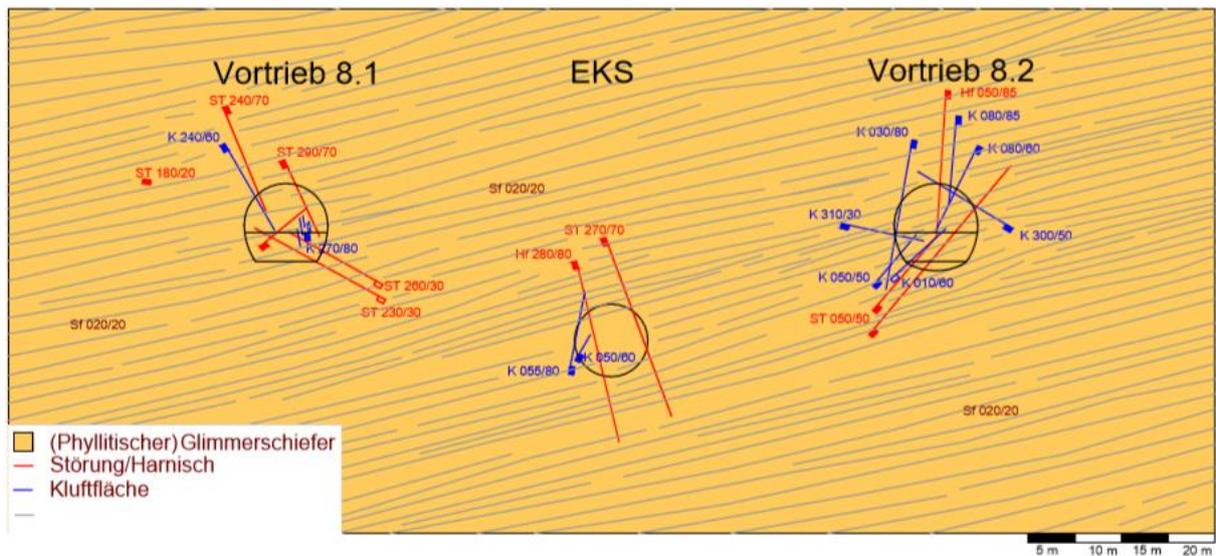


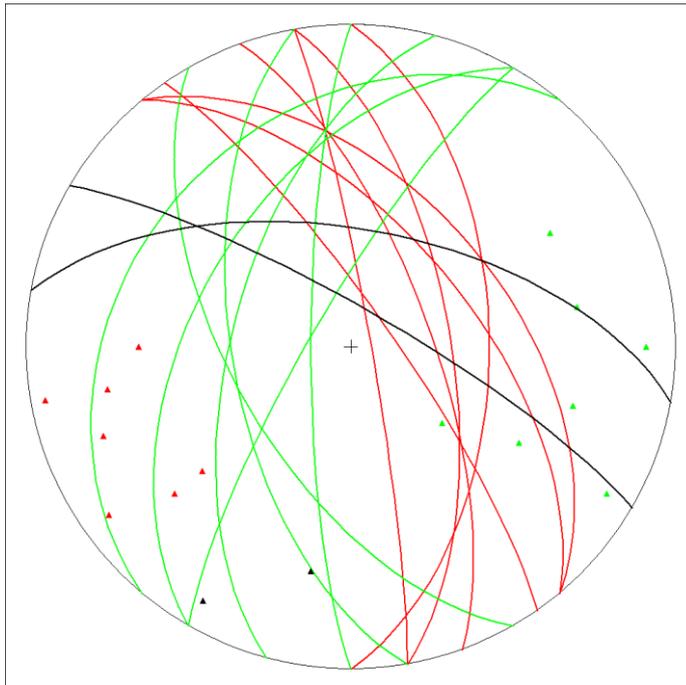
Abbildung 33: Schematische Darstellung der Geologie vom MQ 2 Proj. km 7+077

Die geologischen Strukturen wurden anhand der im Untersuchungsabschnitt gültigen Gliederung der Trennflächensysteme von Abbildung 19 in drei Kluftscharen und zwei Störungssysteme aufgeteilt. Die Gliederung der Trennflächen, das scheinbare Einfallen (φ'), sowie die jeweiligen Trennflächenabstände und -längen, sind in Tabelle 11 ersichtlich.

Tabelle 11: Einteilung Klufscharen und Störungssysteme MQ 2 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017b)

Klufscharen					
Bereich (45-90/25-85)					
Klufschar 1	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand [m]	Länge [m]
K1	050/60	60			
K2	050/50	50			
K3	090/55	47			
K4	055/80	80	65	3	4
K5	080/65	65			
K6	070/70	70			
K7	080/85	85			
Bereich (220-300/10-85)					
Klufschar 2	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand [m]	Länge [m]
K1	310/30	-12			
K2	300/50	-32			
K3	270/80	-78			
K4	300/80	-72	-52	3	4
K5	285/60	-52			
K6	240/60	-60			
K7	260/60	-59			
Bereich (0-40/35-90)					
Klufschar 3	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand [m]	Länge [m]
K1	010/60	46	62	3	4.5
K2	030/80	78			
Störungssysteme					
Bereich (40-90/5-85)					
Störungssystem	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand [m]	Länge [m]
ST1(x2)	050/50	49			
ST2	050/85	57	49	2	15
ST3	60/40	40			
Bereich (230-300/10-80)					
Störungssystem	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand [m]	Länge [m]
ST1	270/70	-68			
Hf1	280/80	-78			
ST2	240/70	-70	-56	2	15
ST3	290/70	-62			
ST4	260/30	-29			
ST5	230/30	-29			

Abbildung 34 zeigt die Klüfte des MQ 2 in Form von Großkreisen und der dazu gehörigen Polpunkte in einer Lagenkugelprojektion. Für die Projektion der geologischen Strukturen dieser Masterarbeit wurde die Software „Tectonic Data Analyzer“ verwendet. Der Datensatz zeigt ein ähnliches Verhalten wie die des MQ1 in Abbildung 21. Die intermediäre σ_2 befindet sich im Schnittbereich des grünen und roten Klufscharen. Die schwarzen Klüfte entlang der Ostwestachse, erstrecken sich in die gleiche Richtung wie die maximale σ_1 und die minimale σ_3 .



Legende:

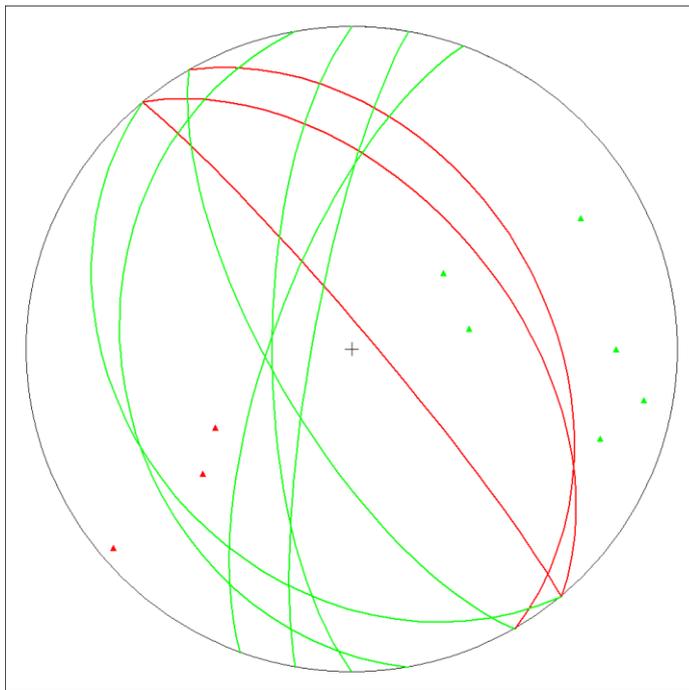
Bereich (45-90/25-85)...Rot

Bereich (220-300/10-85)...Grün

Bereich (040-40/35-90)...Schwarz

Abbildung 34: Klufscharen in Lagenkugelprojektion (MQ2)

Die Großkreise und Polpunkte der Störungen sowie der Harnischflächen des MQ 2 sind in Abbildung 35 in einer Lagenkugelprojektion dargestellt. Die Störungssysteme des MQ, zeigen ein schematisch ähnliches Verhalten wie das der Klufscharen, mit einer intermediären σ_2 im nordwestlichen Bereich der Lagenkugel an dem Schnittbereich der grünen und roten Störungssysteme. Die Positionen von der maximalen σ_1 und der minimalen σ_3 befindet sich entlang der geplotteten Polpunkte, kann jedoch anhand der Darstellung nicht klar definiert werden.



Legende:

Bereich (40-90/5-85) ...Rot

Bereich (230-300/10-80) ...Grün

Abbildung 35: Störungssysteme in Lagenkugelprojektion (MQ2)

Das Modellierungsverfahren basiert auf der in Kapitel 6.2.3 erläuterten Methodik nach Vlachopoulos und Diedrichs, wobei die Modellierungsreihenfolge dem der tatsächlichen Ausbruchsreihenfolge der Tunnelquerschnitte auf Höhe des MQ 2 entspricht.

- 1) EKS
- 2) Kalotte Vortrieb 8.2
- 3) Kalotte Vortrieb 8.1
- 4) Strosse Vortrieb 8.1
- 5) Strosse Vortrieb 8.2
- 6) Sohle Vortrieb 8.2

Die Berechnungen der Stützkraftreduktion der jeweiligen Vortriebe befinden sich im Anhang. In Abbildung 36 wird der vollständig vorgetriebene MQ 2 mit sämtlichen verbauten Stützmittel gezeigt. Hierbei sind die Anker, in Türkis, auf der Außenseite und die Spritzbetonschalen, in Dunkelgrün, auf der Innenseite der Tunnelprofile angebracht. Die nachfolgende Liste beinhaltet die eingesetzten Stützmittel des Querschnitts.

EKS:

7 Mal Reibrohranker 100KN, L = 3m

10 cm Spritzbetonschale

Vortrieb 8.1

Kalotte: 13 Mal SN 250KN, L = 4 m

Strosse: 4 Mal SN 250KN, L = 4 m

25 cm Spritzbetonschale

Vortrieb 8.2

Kalotte: 13 Mal SN 250KN, L = 6 m

Strosse: 4 Mal SN 250KN, L = 6m

25 cm Spritzbetonschale

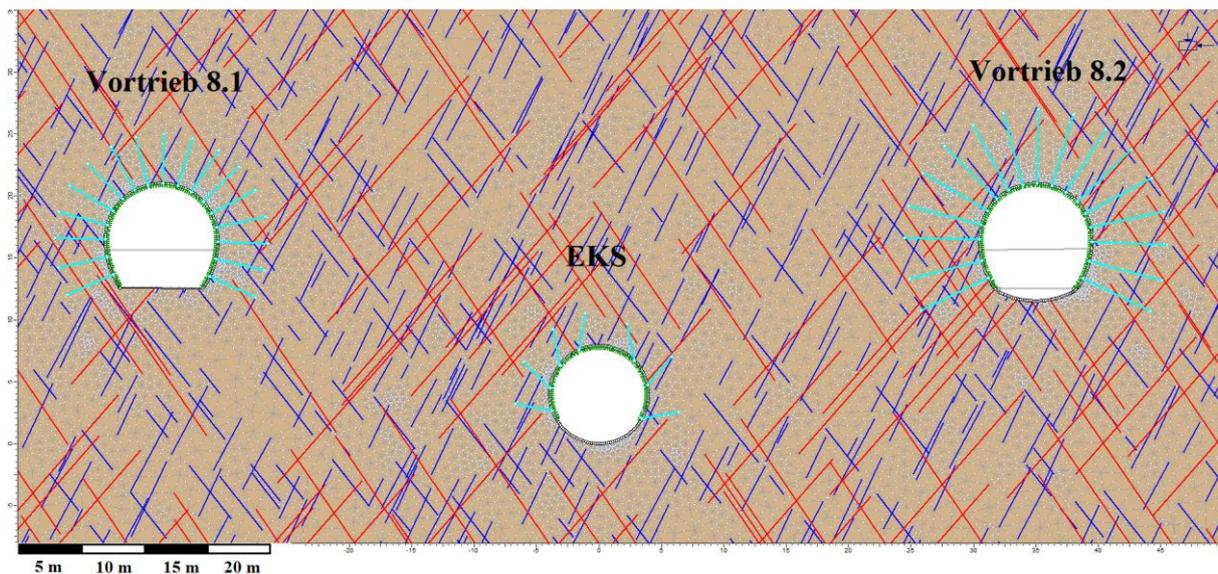


Abbildung 36: MQ 2 Proj. km 7+077 vollständig modellierter MQ 2 (Modelansicht – Berechnung der Verformungen)

6.4 MQ 3, PGK 2a (Proj. km 7+393)

Der MQ 3 befindet sich am südlichen Rand des Untersuchungsabschnitts bei Proj. km 7+393 mit einer Profilrichtung des Querschnitts von 63° bzw. 243°. In den Vortrieben 8.1 und 8.2 wurde keine Sohle verbaut.

Die Hauptspannungen des Bereichs, sind nach den Formeln aus Kapitel 5.1.1, mit einer $\sigma_v = 28 \text{ MPa}$, $\sigma_{h\text{-par.}} = 14 \text{ MPa}$ und $\sigma_{h\text{-quer}} = 19,6 \text{ MPa}$ berechnet. Das E-Modul in diesem MQ wurde aufgrund von Laborversuchen der BBT SE auf 8000 MPa bestimmt. Im Zuge der Baulosverlängerung (2017) wurden weitere Untersuchungen für die Bestimmung von Kennwerten der geologischen Strukturen unternommen. Eine Kohäsion von $0,05 \text{ MPa}$ und ein Reibungswinkel von 30° wurden für die Klüfte ermittelt, während die Kohäsion von $0,02 \text{ MPa}$ und ein Reibungswinkel von 20° für die Harnische sowie Störungen erprobt wurde (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017c).

Abbildung 37 zeigt eine schematische Darstellung der geologischen Gegebenheiten basierend auf den Ortsbrustdokumentationen der BBT SE. Diese beinhaltet die von den Geologen kartierten geologischen Strukturen und die dazugehörigen Trennflächenorientierungen.

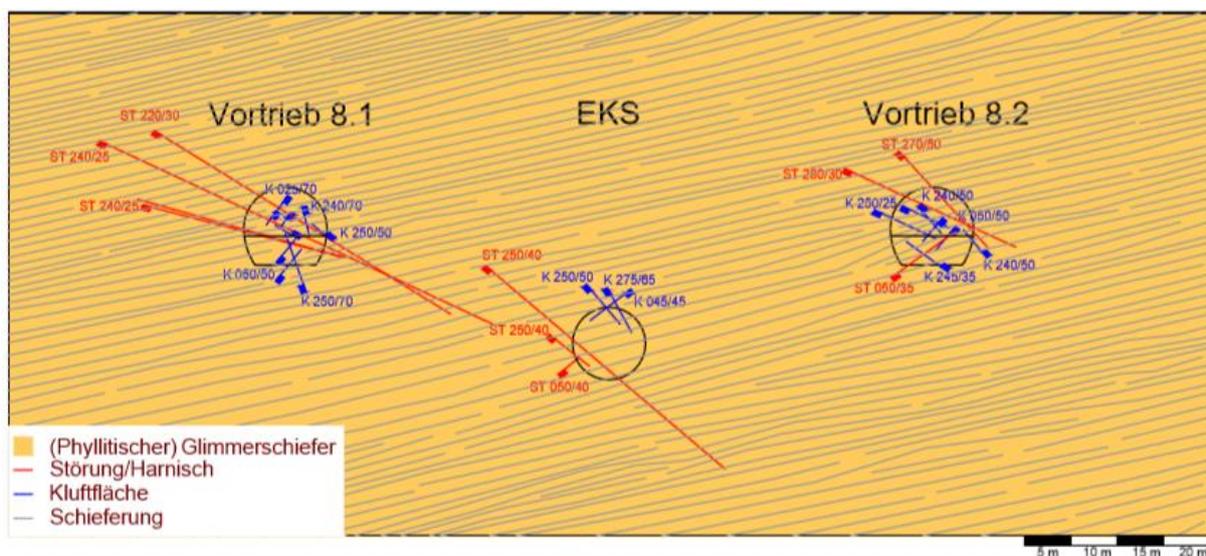


Abbildung 37: Schematische Darstellung der Geologie vom MQ 3 Proj. km 7+393

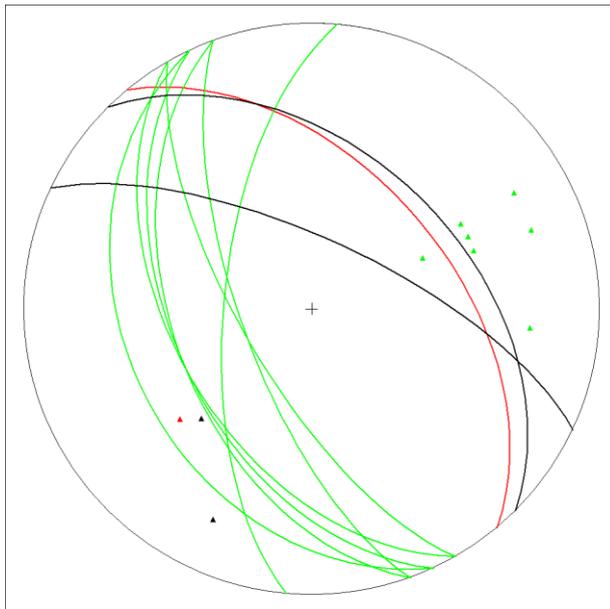
Tabelle 12 zeigt die Aufteilung der Trennflächen anhand der Orientierung der geologischen Strukturen, wie auch in der schematischen Darstellung von Abbildung 37 ersichtlich. Die Gliederung bezieht sich auf die in Kapitel 6.2.2 beschriebene Aufteilung der Trennflächen in Systeme, anhand der im Untersuchungsabschnitt gültigen Strukturierung der BBT SE (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017c). In diesem MQ wurden drei Klufscharen und zwei Störungssysteme ermittelt. Des Weiteren beinhaltet die Tabelle die dazugehörigen Trennflächenabstände sowie Längen laut Abbildung 19.

Tabelle 12: Einteilung Klufscharen und Störungssysteme MQ 3 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017b)

Klufscharen					
Bereich (45-90/25-85)					
Klufschar 1	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand [m]	Länge [m]
K1 (x4)	50/50	49	49	2	5
Bereich (220-300/10-85)					
Klufschar 1	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand [m]	Länge [m]
K1	250/50	-50			
K2	275/65	-61			
K3	240/70	-70			
K4	250/70	-70			
K5	250/50	-50	-51	1	7
K6	240/50	-50			
K7	245/50	-50			
K8	245/35	-35			
K9	250/25	-24			
Bereich (0-40-35-90)					
Klufschar 1	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand [m]	Länge [m]
K1(x3)	025/70	65	61	4	4,0
K2	45/45	44			
Störungssysteme					
Bereich (40-90/5-85)					
Klufschar 1	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand [m]	Länge [m]
ST1	050/40	39	35	3,5	10
ST2	050/30	30			
Bereich (230-300/10-80)					
Klufschar 1	Orientierung	φ'	$\varnothing \varphi'$	Abstand [m]	Länge [m]
ST1	250/40	-39			
ST2	270/50	-46			
ST3	280/30	-25			
ST4	220/30	-28	-33	3,5	25
ST5(x2mal)	240/25	-25			
ST6	240/25	-25			

Die modellierten geologischen Trennflächen sind in Abbildung 38 (Klufscharen) und Abbildung 39 (Störungssysteme) in Lagenkugelprojektionen dargestellt. Die Grafiken wurden mit Hilfe der Software „Tectonic Data Analyzer“ erstellt. Eine nähere Betrachtung der beiden Abbildungen zeigt, dass die Trennflächensysteme im MQ 3

dasselbe Verhalten aufweisen. Anhand der Datensätze wird ersichtlich, dass es sich um ein konjugierendes Scherflächensystem handelt, mit einem σ_2 , im nordwestlichem Schnittbereich von den grünen und roten, bzw. schwarzen Trennflächen. σ_1 und σ_3 befinden sich entlang der Südost-Nordwestachse, entlang der projizierten Polpunkte und normal auf die Flächen. Deren Position ist anhand der Abbildungen jedoch nicht ersichtlich.



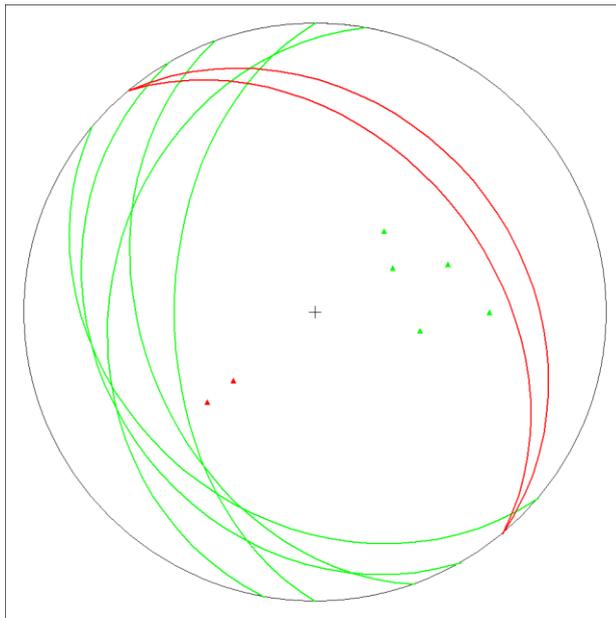
Legende:

Bereich (45-90/25-85)...Rot

Bereich (220-300/10-85)...Grün

Bereich (0-40/35-90)...Schwarz

Abbildung 38: Klufscharen in Lagenkugelprojektion (MQ3)



Legende:

Bereich (40-90/5-85) ...Rot

Bereich (230-300/10-80) ...Grün

Abbildung 39: Störungssysteme in Lagenkugelprojektion (MQ 3)

Im Folgenden befinden sich die Modellierungsphasen der tatsächlichen Ausbruchsreihenfolge des Querschnitts. Die angewandte Methodik entspricht dem selben Vorgang wie der bereits in Kapitel 6.2.3 erläuterten Modellierungstechnik ("Tunnel Lining Design 1.0 Introduction," n.d.; Vlachopoulos & Diederichs, 2009).

- 1) EKS
- 2) Kalotte Vortrieb 8.2
- 3) Kalotte Vortrieb 8.1
- 4) Strosse Vortrieb 8.1
- 5) Strosse Vortrieb 8.2

Die Berechnungen der Stützkräfte der jeweiligen Vortriebe erfolgt nach der Vlachopoulos und Diederichs Methode (Vlachopoulos & Diederichs, 2009) und befinden sich im Anhang. Abbildung 40 veranschaulicht die letzte Phase des MQ 3. Zu diesem Zeitpunkt sind alle Tunnelprofile ausgebrochen und die entsprechenden Stützmittel verbaut, wobei die Anker in Türkis und die Spritzbetonschale in Dunkelgrün eingezeichnet wurden. Insgesamt wurden bei MQ 3 folgende Sicherungsmittel eingebaut:

EKS:

7 Mal Reibrohranker 100KN, L = 3m

10 cm Spritzbetonschale

Vortrieb 8.1

Kalotte: 13 Mal SN 250KN, L = 6 m

Strosse: 4 Mal SN 250KN, L = 4 m

25 cm Spritzbetonschale

Vortrieb 8.2

Kalotte: 9 Mal SN 250KN, L = 4 m

Strosse: 4 Mal SN 250KN, L = 4m

25 cm Spritzbetonschale

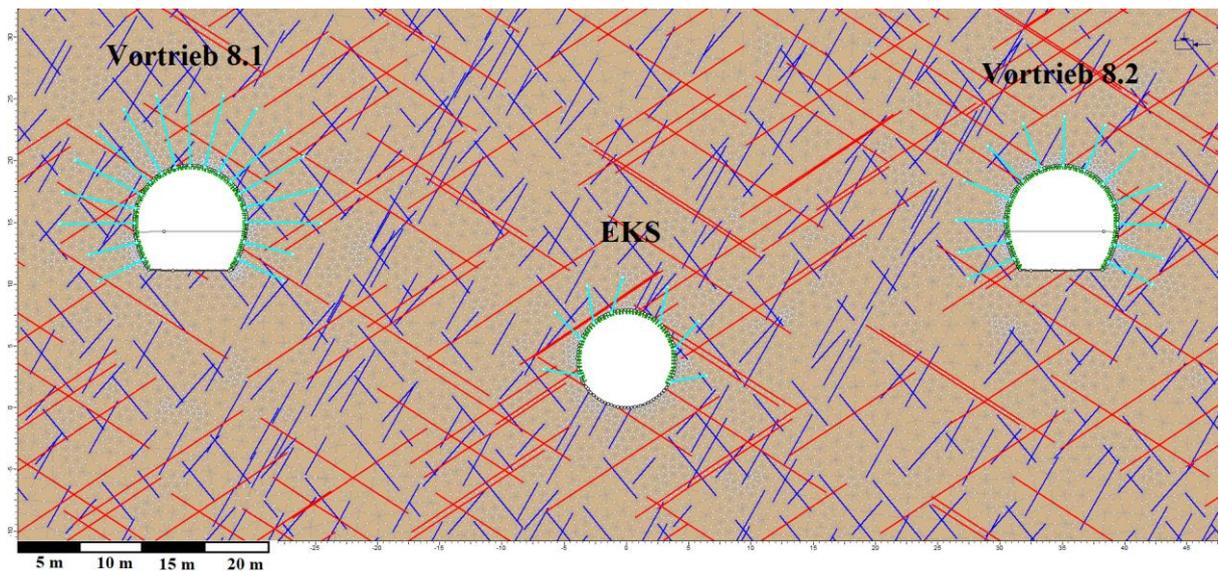


Abbildung 40: Model 3 Proj. km 7+393 – vollständig modellierter MQ 3 (Modelansicht – Berechnung der Verformungen)

7 Ergebnisse – Verformungen der Tunnelröhren

Das folgende Kapitel behandelt zunächst, die tatsächlich gemessenen Verformungen des EKS welche mittels Laserscanner aufgezeichnet werden. Erfasst werden hierbei die Bewegung der Reflexzielmarken, die auf der Außenseite der Spritzbetonschale angebracht wurden. Die Daten werden mit der Software „GSL V 5.2.1.7d“ als Einflusslinien entlang des Untersuchungsabschnitts dargestellt. Des Weiteren folgt eine Gegenüberstellung der gemessenen Zeitverformungsgrafiken des EKS sowie der Auswertung der berechneten Verformungen der MQ, aus Kapitel 6.2, 6.3 und 6.4, bei Proj. km 6+982, 7+7075 und 7+393.

7.1 Einflusslinien des Untersuchungsabschnitts

Abbildung 41 zeigt die Position der vier Messpunkte für die Aufnahmen der Verformung am Profil des EKS. Punkt 1 wird nicht dargestellt, da dieser aufgrund der Lutte, die sich ebenfalls in der Firste befindet, nur in Ausnahmefällen vom Laserscanner erfasst werden kann.

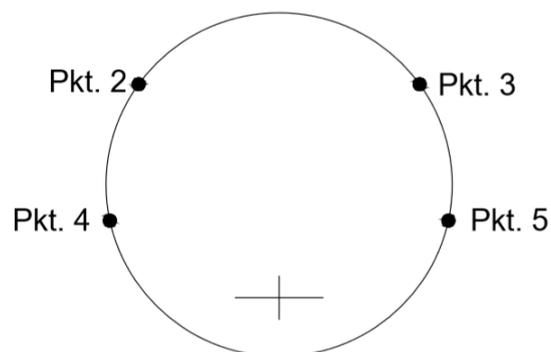


Abbildung 41 Messpunkte für Verformungen am Profil des EKS

Abbildung 42 zeigt die Epochenlegende der Einflusslinien welche für Abbildung 43, Abbildung 44, Abbildung 45 und Abbildung 46 von Kapitel 7.1 gültig sind. Alle Abbildungen der Einflusslinien beinhalten die drei MQ sowie die QS 7/1 und 7/2. Die Einflusslinien zeigen die Verformungen im Zeitraum von 15.05.2018 bis 02.06.2018 entlang des Untersuchungsabschnitts. Dies entspricht den Zeitraum, an dem die HT und die QS im Untersuchungsabschnitt vorgetrieben wurden.

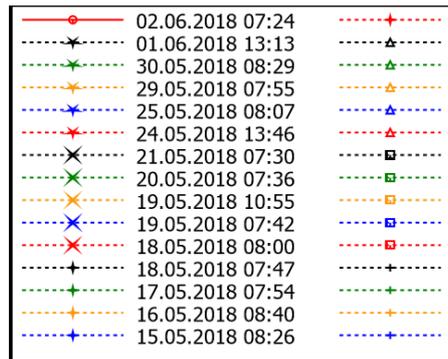


Abbildung 42: Epochenlegende für Verformungsgrafiken Abbildung 43, Abbildung 44, Abbildung 45 und Abbildung 46 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018d)

Messpunkte 2 und 3:

Abbildung 43 zeigt die vertikale Verschiebung von Messpunkt 2 und Abbildung 44 zeigt die vertikale Verschiebung von Messpunkt 3. Positive Werte stellen eine Hebung und negative Werte eine Setzung der Messpunkte dar. Die Verschiebungen in beiden Punkten zeigen ein ähnliches, symmetrisches Verhalten. Die vertikale Verschiebung der Punkte 2 und 3 zeigen im Bereich Proj. km 7+000 bis 7+060 eine Setzung von bis zu (-)60 mm. Auffällig ist, dass der Peak im Bereich des QS 7/1 (Proj. km 7+000) auftritt, dieser ist auch in den Abbildungen eingezeichnet. Des Weiteren wird an dieser Stelle an den baugelologischen Längsschnitt (Kapitel 3.6) und den PGK (Kapitel 4.3) verwiesen, die beide miteinander übereinstimmen und zeigen dass zwischen Proj. km 7+004 und 7+020 eine Störungszone existiert, das heißt genau in dem Bereich des Verformungspeaks.

Von Proj. km 7+060 bis 7+300 verhalten sich beide Punkte stabil, trotzdem dass der Bereich basierend auf dem baugelologischen Längsschnitt (Kapitel 3.6) und den PGK (Kapitel 4.3) sich zwischen Proj. km 7+229 bis 7+315 in einer Störungszone befindet. Der zweite Verformungspeak tritt zwischen Proj. km 7+300 und 7+360 mit einer Setzung von (-)130 mm auf. Die Peaks treten ebenfalls im Bereich eines QS auf, nämlich QS 7/2 bei Proj. km 7+333.

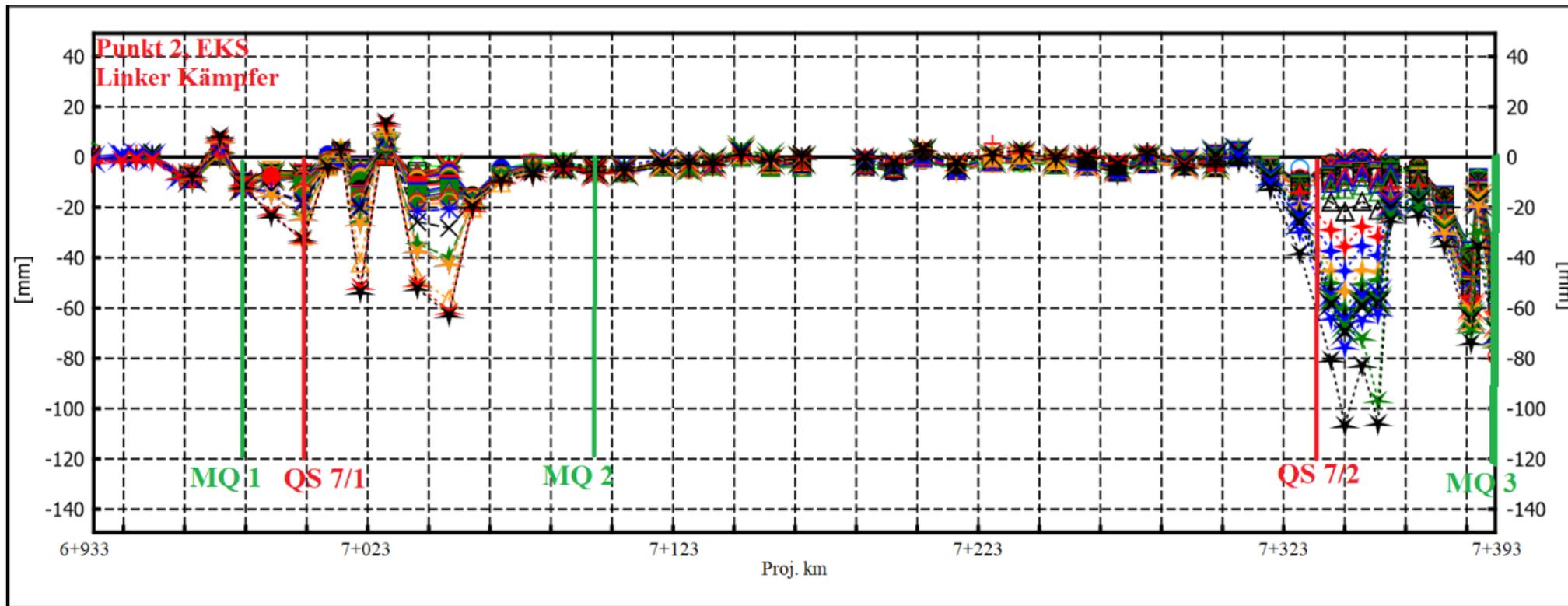


Abbildung 43: Einflusslinien von Messpunkt 2 (Proj.km 6+933 bis 7+400) (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018d) (nachbearbeitet)

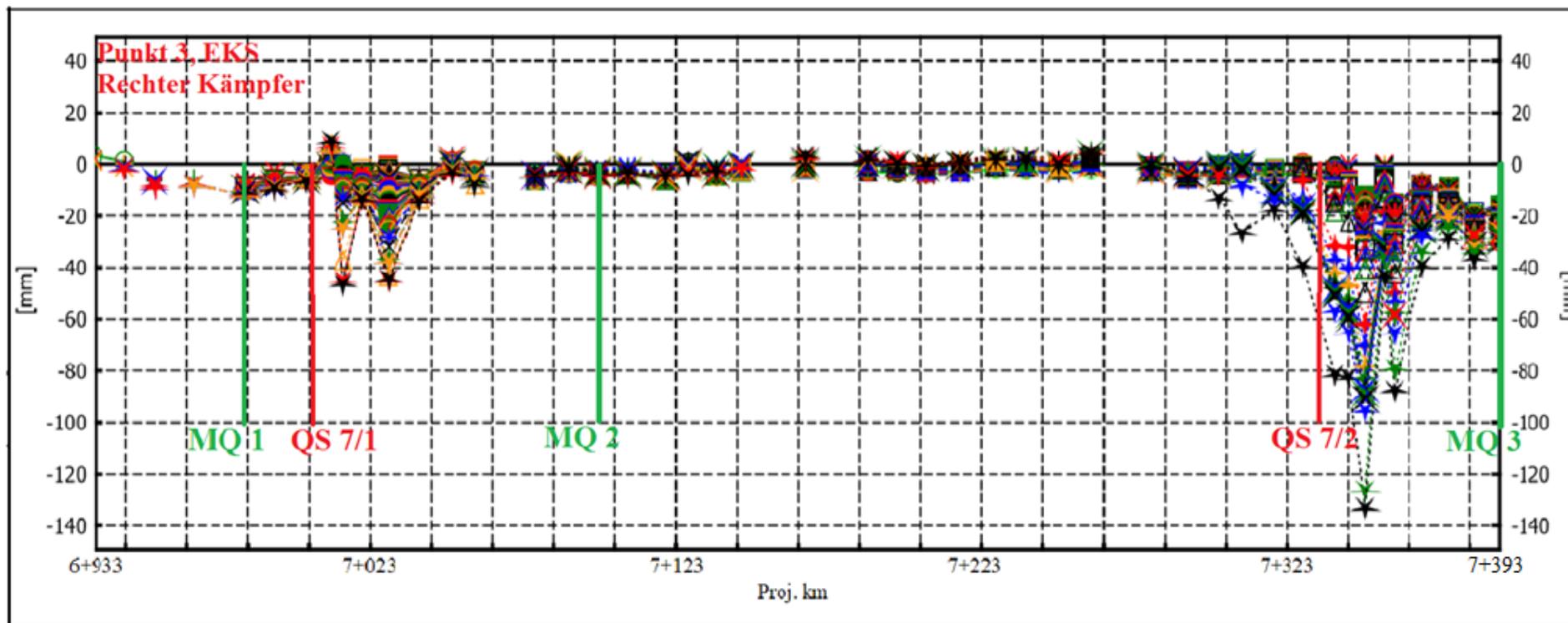


Abbildung 44: Einflusslinien von Messpunkt 3 (Proj.km 6+933 bis 7+400) (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018e) (nachbearbeitet)

Messpunkte 4 und 5:

Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen die Querverschiebung der Messpunkte 4 und 5. Positive Werte verkörpern eine Verschiebung nach rechts und negative Werte eine Verschiebung nach links. Punkt 4 verschiebt sich tendenziell eher nach rechts wie in Abbildung 45 ersichtlich, im Gegensatz dazu orientiert sich Punkt 5, wie in Abbildung 46 dargestellt, eher links.

Zwischen Proj. km 6+940 und 7+140 treten schwankende Verformungen auf, wobei ein Peak von (+)80 mm bei Punkt 4 bei Proj. km 7+020 besonders hervorzuheben ist. Dieser befindet sich genau im Bereich des QS 7/1 bei Proj. km 7+000, und der aus dem baugelologischen Längsschnitt (Kapitel 3.6) und den PGK (Kapitel 4.3) ermittelten Störungszone zwischen Proj. km 7+004 und 7+020. Die Verschiebungen von Punkt 5 verhalten sich etwas stabiler und zeigen bei Proj. km 7+070 einen Peak von (-)50 mm.

Die Verformungen beider Punkte verhalten sich zwischen Proj. 7+140 und 7+290 stabil und zeigen keinen Zuwachs. Basierend auf dem baugelologischen Längsschnitt (Kapitel 3.6) und den PGK (Kapitel 4.3) beginnt bei Proj. km 6+229 bereits ein Störungsbereich, welcher sich bis Proj. km 7+315 erstreckt. Auffällig ist, dass sich beide Messpunkte in der Störungszone unauffällig und stabil verhalten. Ab Proj. km 7+300 beginnen erneute Verformungen, welche bis Proj. km 7+393 ansteigen und in Punkt 4 eine maximale Verformung von (+)240 mm bei Proj. km 7+393 erreichen. Die Verformungspeaks treten ebenfalls in der Nähe des QS bei Proj. km 7+333 auf. Eine mögliche Ursache für diese ungewöhnlichen Werte ist das durch die Verformung verursachte Ablösen der Spritzbetonschale vom Gebirge. Die Verschiebung von Punkt 5 erreicht bei Proj. km 7+343 einen Höhepunkt von (-)140 mm

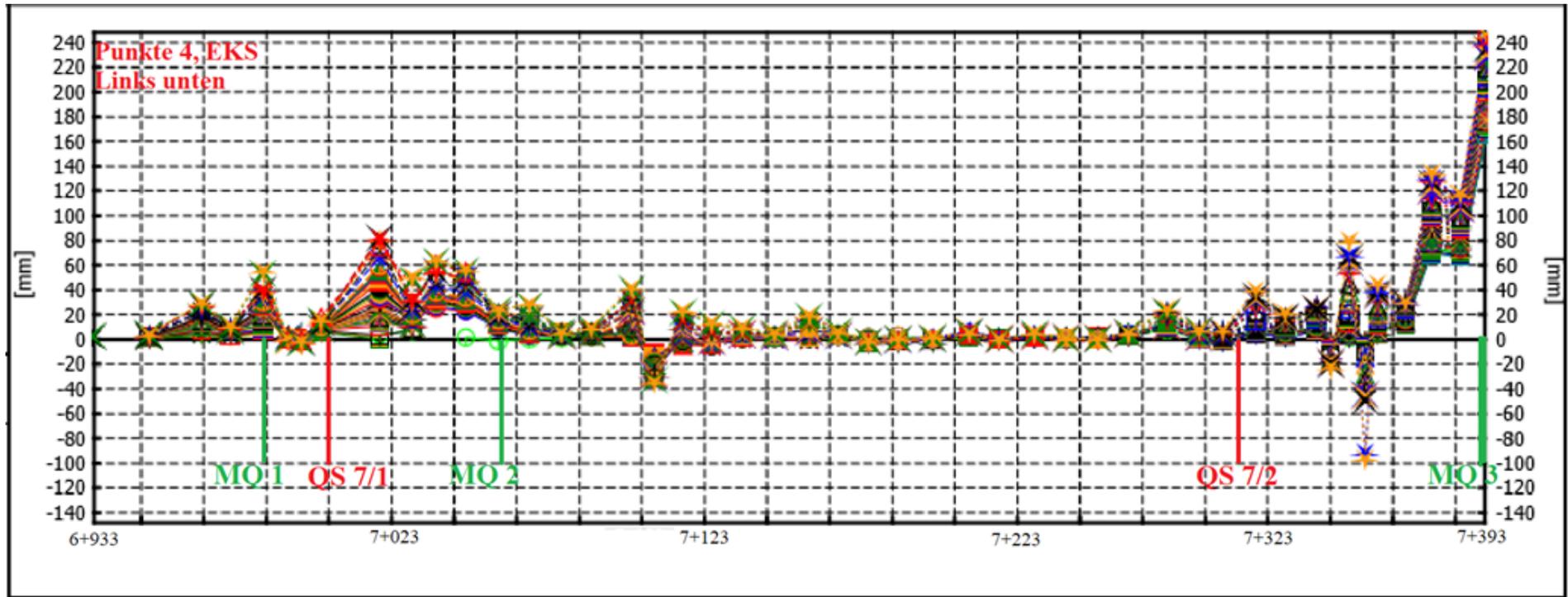


Abbildung 45: Einflusslinie von Messpunkt 4 (Proj.km 6+933 bis 7+400) (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018f) (nachbearbeitet)

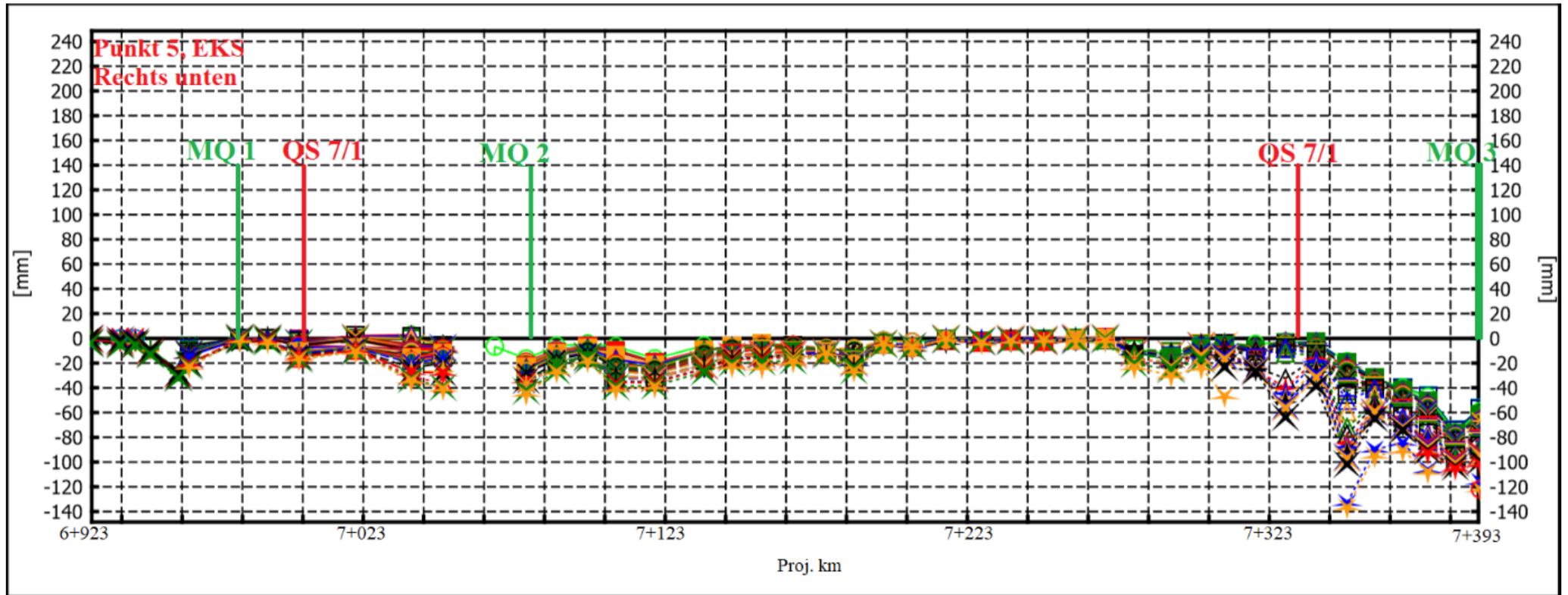


Abbildung 46: Einflusslinien von Messpunkt 5 (Proj. km 6+933 bis 7+400) (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018g) (nachbearbeitet)

7.2 Gegenüberstellung der Verformungen von MQ1 (PGK 1, EKS)

Im Folgenden werden die gemessenen Verformungen den errechneten Verformungen des MQ 1 gegenübergestellt.

7.2.1 Gemessene Verformungen MQ 1

Die gemessenen Verformungen des MQ 1 befinden sich in Abbildung 47, dargestellt werden diese im Zeitraum von 21.01.2017 bis 20.03.2018. Der obere Teil der Grafik zeigt die Vertikal- und der untere Teil die Horizontalverschiebung. In den Diagrammen sind entlang der Vertikalachse (Verschiebung [mm]) auch die Zeitpunkte festgehalten, wann die Vortriebe der HT sich auf der Achse des MQ befinden. Die rote Markierung stellt den Zeitraum des Vortriebs QS 7/1 dar, welcher sich 18 m nach dem MQ 1 befindet.

Der MQ 1 zeigt eine geringe Erstverschiebung zwischen 0 und 10 mm. Durch die Kalotte von Vortrieb 8.1, in Abbildung 47 in Orange, werden die Verschiebungen der Messpunkte im EKS wieder aktiviert, stabilisieren sich jedoch nach wenigen Tagen auf 10 bis 20 mm.

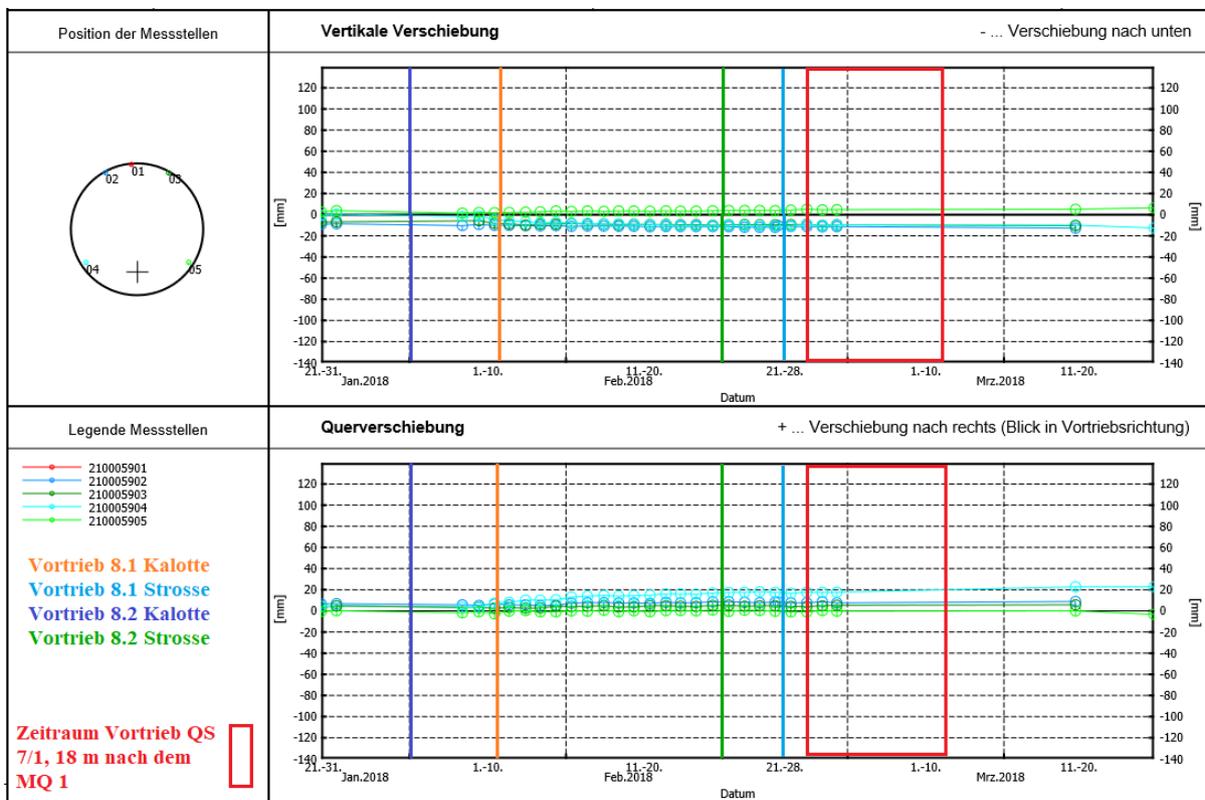


Abbildung 47: Zeitverformungsgrafik MQ 1 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018a) (nachbearbeitet)

7.2.2 Errechnete Verformungen MQ 1

Die mit Hilfe der Modellierung errechnete Verformung des EKS von MQ 1 aus Kapitel 6.2 ist in Abbildung 48 dargestellt. Sie zeigt die letzte Phase der Berechnung, zu dem Zeitpunkt an dem alle Tunnelröhren bereits ausgebrochen und mit Stützmitteln versehen sind. Aufgrund der 2D Modellierung konnte der QS 7/1, welcher sich 18 m entfernt vom MQ 1 befindet, nicht im Model berücksichtigt werden. Somit ist der Einfluss des naheliegenden QS in der Grafik nicht ersichtlich. In der Abbildung sind die Verformungen in einer Größenordnung von 30 – 70 mm um das Profil des EKS ersichtlich. Die Verformungen sind auf der linken Ulme minimal stärker ausgeprägt. Die roten Pfeile im Tunnelprofil zeigen die Orientierung der Verformungen in den Hohlraum an. Stärkere Ausprägungen dieser Verformungsrichtung werden durch ungünstige Verschneidungen von geologischen Strukturen mit dem Tunnelprofil ausgelöst.

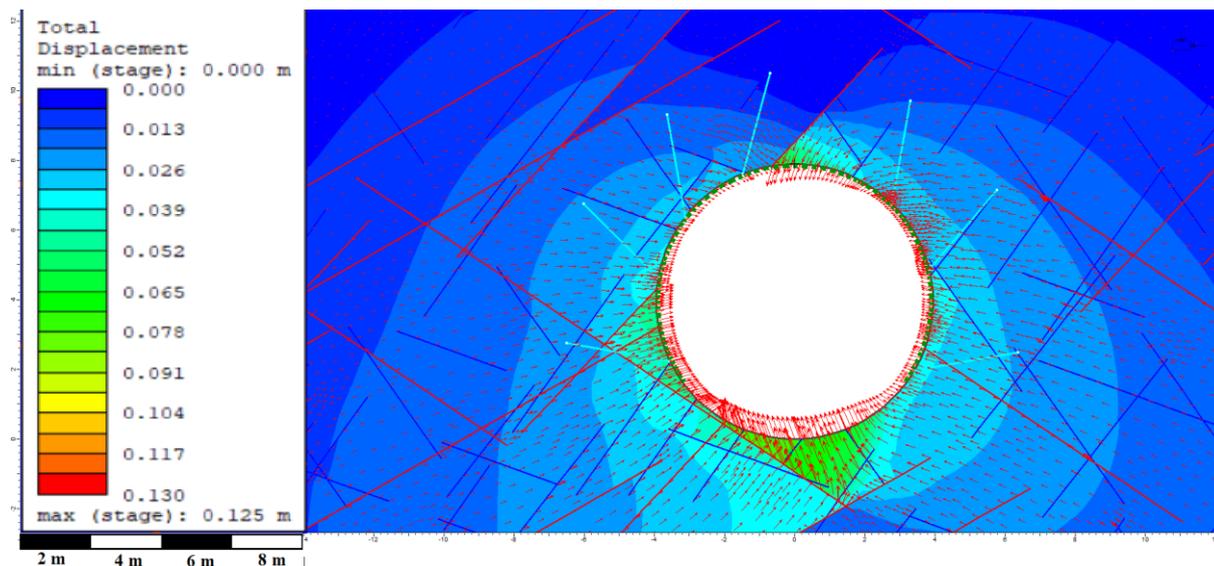


Abbildung 48: Errechnete Verformungen des EKS MQ 1 (Interpretationsansicht)

7.3 Gegenüberstellung der Verformungen von MQ 2

Die gemessenen Verformungen werden im Folgenden den errechneten Verformungen des MQ 2 gegenübergestellt.

7.3.1 Gemessene Verformungen MQ 2

Abbildung 49 zeigt eine Zeitverformungsgrafik der gemessenen Daten des MQ 2 von 21.01.2018 bis 31.05.2018. Entlang der Vertikalachse (Verschiebung [mm]) ist jener Zeitpunkt, an dem die Vortriebe der HT die Achse des MQ schneiden eingetragen. Die rote Markierung zeigt den Zeitraum des Vortriebs vom QS 7/1, welcher sich 77 m vor dem MQ 2 befindet.

Die Messpunkte im EKS zeigen vor dem Vortrieb der beiden HT nahezu keine Verformungen, lediglich Punkt 5 zeigt eine Querverschiebung von (-)19 mm. Mit dem Beginn des QS 7/1 beginnt ein kriechendes Verhalten von Punkt 4 und 5. Aufgrund der geringen zeitlichen Abstände der Vortriebe über dem EKS kann auf den Verformungsgrafiken kein einzelner Vortrieb als Aktivierungsursache bestimmt werden. Zudem ist es wahrscheinlich, dass mehrere Vortriebe gleichzeitig die Verformungen beeinflussen. Nach etwa einem Monat haben sich die Verschiebungen auf 15 bis 40 mm stabilisiert. An den Punkten 2 und 3 ist kein Zuwachs an Verformungen, weder vertikal noch horizontal erkennbar.

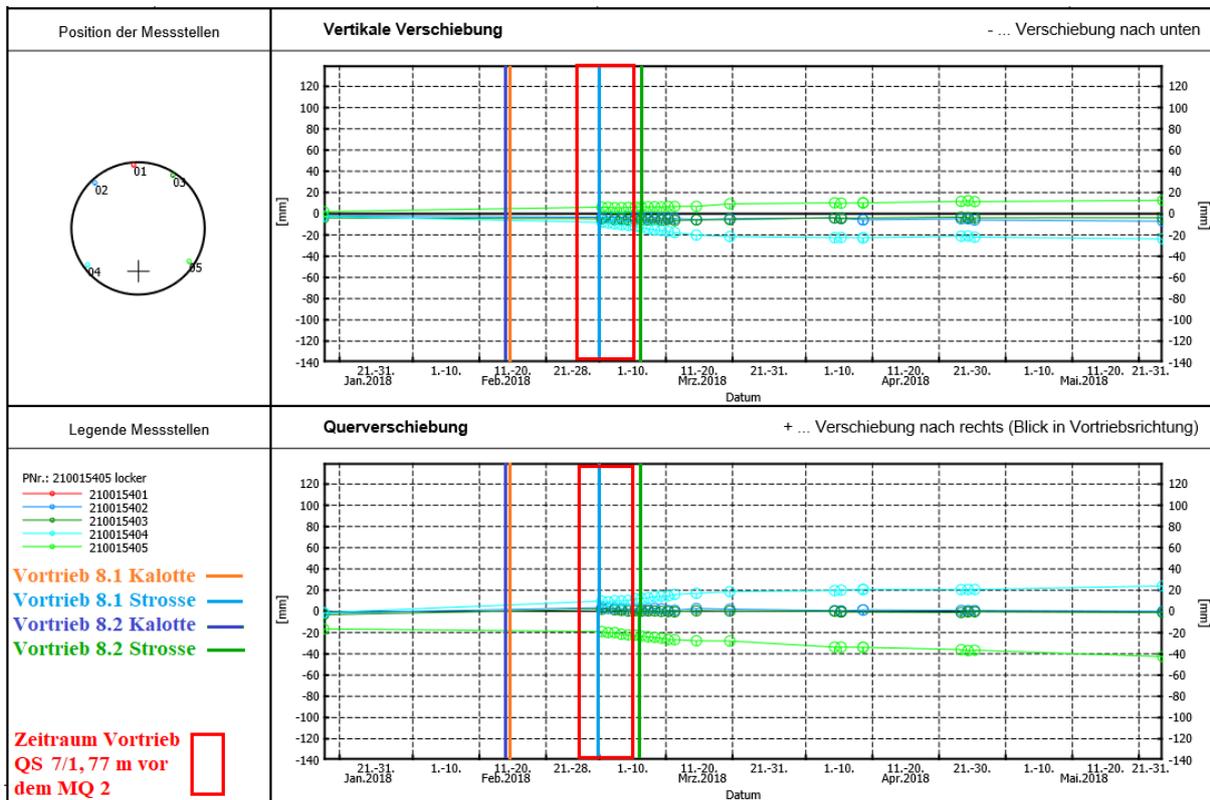


Abbildung 49: Zeitverformungsgrafik MQ 2 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018b) (nachbearbeitet)

7.3.2 Errechnete Verformungen MQ 2

Abbildung 50 veranschaulicht die rechnerisch erfassten Verformungen des MQ 2 aus Kapitel 6.3. Sie zeigt den EKS zu jenem Zeitpunkt an dem alle Tunnelröhren des Querschnitts ausgebrochen und mit Stützmittel verbaut sind. Durch die roten Pfeile im Tunnelprofil sind die Orientierungen der Verformungen erkennbar. Der QS 7/1 befindet sich 77 m vom MQ 2 entfernt und kann aufgrund der 2D Modellierung nicht in der Berechnung berücksichtigt werden. Die Abbildung zeigt somit keine durch den QS verursachten Verformungen. Die errechneten Verformungen des EKS am MQ 2 befinden sich zwischen 20 – 45 mm, und zeigen eine symmetrische Verformung.

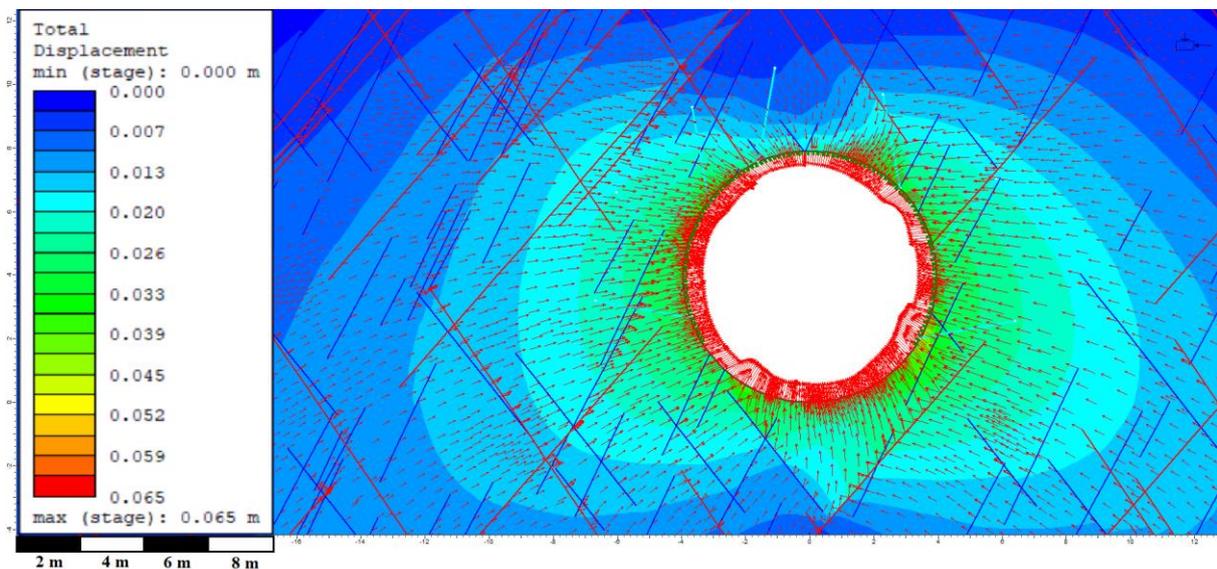


Abbildung 50: Errechnete Verformungen des EKS MQ 2 (Interpretationsansicht)

7.4 Gegenüberstellung der Verformungen von MQ 3

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Gegenüberstellung der gemessenen Verformungen und der errechneten Verformungen des MQ 3.

7.4.1 Gemessene Verformungen MQ 3

Die gemessenen Vertikal- und Querverschiebungen des MQ 3 im Zeitraum von 11.03.2018 bis 30.06.2018 sind in Abbildung 52 dargestellt. Entlang der Vertikalachse sind die Zeitpunkte festgehalten, zu denen die Vortriebe der HT sich auf der Achse des MQ befinden. Der Zeitraum des Vortriebs QS 7/2, welcher sich 60 m vor dem MQ 3 befindet, ist durch die rote Markierung ersichtlich.

Im MQ 3 treten bereits vor dem Vortrieb starke Erstverformungen auf. Die Punkte 2 und 3 zeigen eine Setzung von (-)50 mm. Die Querverschiebungen von Punkt 4 und 5 des MQ sind wesentlich stärker ausgeprägt. Punkt 4 zeigt eine Verschiebung von (+)170 mm nach rechts und Punkt 5 eine Verschiebung von (-)60 mm nach links. Eine mögliche Ursache für diese hohen Verformungswerten ist das Ablösen der Spritzbetonschale, welche den Wert maßgeblich verzerrt. Im Bereich der linken Ulme des MQ 3 ist das Mörtelbeet bereits so stark beschädigt, dass Sanierungsarbeiten, wie in Abbildung 51 ersichtlich, durchgeführt werden musste. Die Spritzbetonschale ist längs der Tunnelachse aufgeplatzt und bewegt sich mit der Reflexzielmarke (Punkt 4) in das Tunnelinnere. Die Reflexzielmarke ist in Abbildung 51 mit einem roten Kreis gekennzeichnet.



Abbildung 51: Aufgeplatzte Spritzbetonschale mit saniertem Mörtelbeet - MQ 3

Zeitlich gesehen, beginnt mit den Kalotten Vortrieben 8.2 und 8.1 ein kriechendes Verhalten der Messpunkte. Alle vier Punkte zeigen einen Zuwachs der Setzung von (-) 30 bis (-) 40 mm. Von der Querverschiebung werden allerdings nur die Punkte 4 und 5 beeinflusst, welche dadurch einen Zuwachs von jeweils 90 mm erfahren.

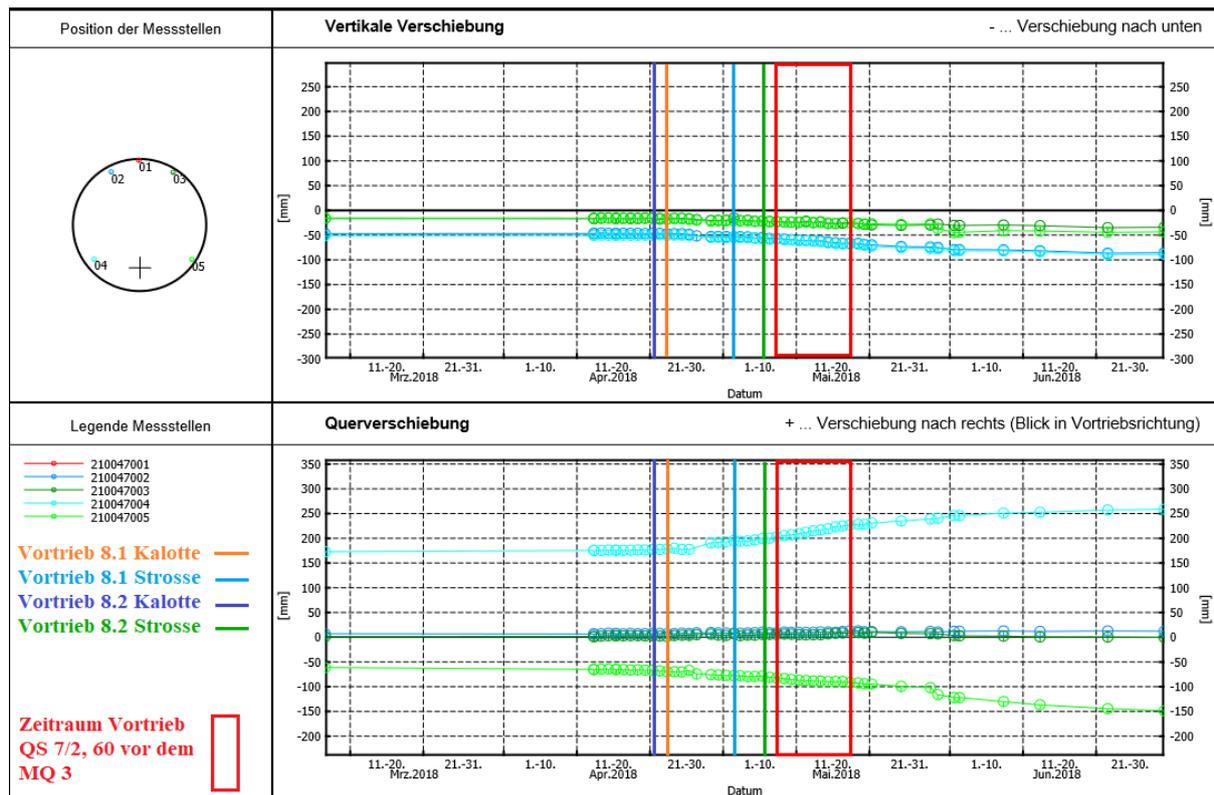


Abbildung 52: Zeitverformungsgrafik MQ 3 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018c) (nachbearbeitet)

7.4.2 Errechnete Verformungen MQ 3

Abbildung 53 veranschaulicht die in Kapitel 6.4 berechneten Verformungen des EKS zu jenem Zeitpunkt an dem sämtliche Tunnelröhren vollständig ausgebrochen und mit Stützmittel verbaut sind. Der MQ 3 befindet sich 60 m vom QS 7/2 entfernt. Aufgrund der 2D Modellierungsmethode konnte der QS nicht in der rechnerischen Erfassung berücksichtigt werden, was dazu führt, dass die Abbildung keine durch den QS ausgelösten Verformungen zeigt.

Die Verformungen des Profils liegen zwischen 3 – 9 cm, wobei die linke Ulme des EKS stärker beansprucht ist. Anhand der roten Pfeile ist die Orientierung der Verschiebungen ersichtlich.

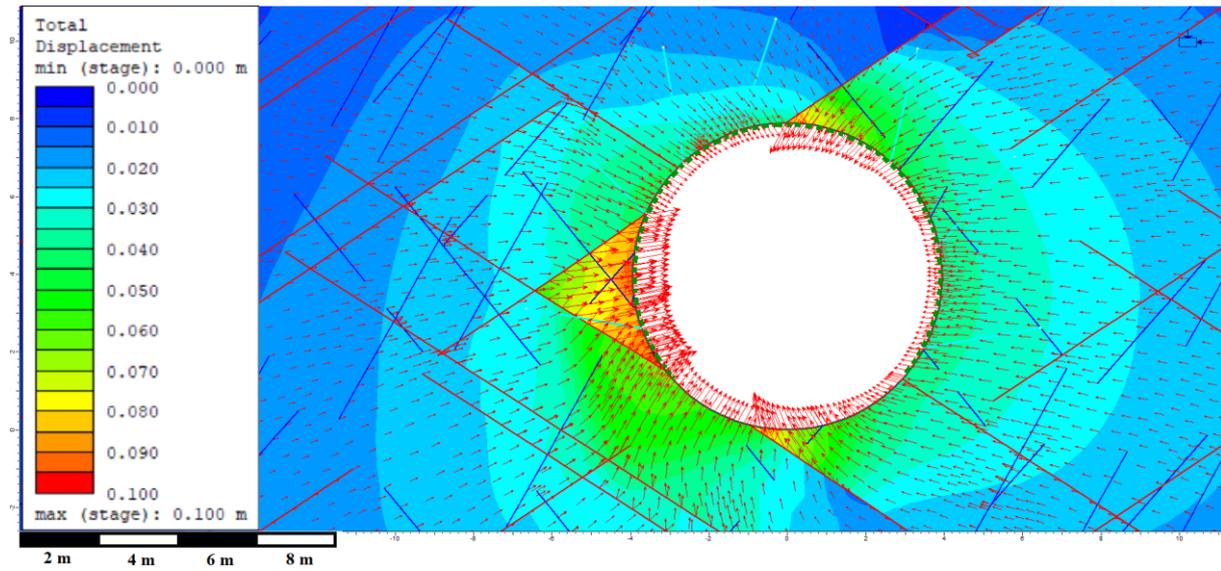


Abbildung 53: Errechnete Verformungen des EKS MQ 3 (Interpretationsansicht)

8 Auswertung

Im Folgenden wird die Auswertung der Verformungsdaten verwendet um mögliche Korrelationen mit den Untersuchungsparametern zu bestimmen.

8.1 Analyse des Einflusses der Geologie

Die gemessenen Verformungen, dargestellt in Form von Einflusslinien, des EKS durch den Vortrieb der HT und der QS aus Kapitel 7.1 zeigen keine direkte Korrelation mit der Gebirgsklassifizierung nach den PGK aus Kapitel 4.3, welche als geologische Indikatoren für Schwächezonen dienen.

Der erste Verformungspeak, tritt für all vier Messpunkte im Bereich des QS 7/1 und der Störungszone zwischen Proj km 7+004 bis 7+020. Zwischen Proj. km 7+229 und 7+315 befindet sich laut baueologischem Längsschnitt (Kapitel 3.6) und den PGK (Kapitel 4.3) eine Störungszone, dennoch verhalten sich die Verformungen im EKS über diese Strecke stabil. Stattdessen treten von Proj. km 7+315 bis 7+386, an dem es sich um einen Bereich ohne Störungseinfluss handelt, die größten Verformungen im EKS auf. Diese Verformungen befinden sich unmittelbar um den QS 7/2 bei Proj. km 7+333.

In geologisch zerlegteren Bereichen sollten die Verformungen im EKS stärker ausgeprägt und durch Peaks in den Einflusslinien erkenntlich sein. Derartige Peaks treten im Untersuchungsabschnitt allerdings nur im Bereich der ersten Störungszone zwischen Proj. km 7+004 und 7+020 auf und nicht in der zweiten Störungszone zwischen Proj. km 7+229 und 7+315. Eine direkte Korrelation zwischen der lokalen Geologie und Verformungen, welche durch den Vortrieb der darüberliegenden Tunnelröhren produziert wurden, ist somit aus den Daten nicht ableitbar. Basierend auf der Analyse der Einflusslinien sind die Ursachen für die Verformungspeaks die beiden QS 7/1 und QS 7/2.

Dennoch ist es wichtig festzuhalten, dass die geologischen Strukturen Einfluss auf lokal bedingte Verformungen haben. Wie in Abbildung 53 aus Kapitel 7.4.2 am Beispiel der linken Ulme des MQ 3 im EKS ersichtlich, kommt es hier zu einer ungünstigen Verschneidung von zwei unterschiedlichen Störungen des Tunnelprofils, sodass ein Block abgetrennt und möglicherweise in das Tunnelinnere hineingedrückt wird. Dieser

Block erleidet dadurch stärkere Verformungen als das umliegende Gebirge. Des Weiteren sind die absoluten Verformungen im Inneren des Tunnels, welche durch rote Pfeile dargestellt sind, in Bereichen an denen Verschneidungen mit Störungen auftreten deutlich stärker ausgeprägt, als in Bereichen ohne Störeinfluss. Im Gegensatz dazu, verhalten sich die absoluten Verformungen im rechten Kämpfer bzw. Ulme nahe zu unauffällig. Die Abbildung zeigt, dass in diesem Bereich keine ungünstigen Verschneidungen des Tunnelprofils mit Störungsflächen vorhanden sind, und somit keine lokalen Verformungen ersichtlich sind (Liu, 2017).

8.2 Analyse des Einflusses der QS

Wie bereits in Kapitel 8.1 erläutert, zeigt eine Betrachtung der Einflusslinien im EKS aus Kapitel 7.1, dass die beiden QS (QS 7/1 und 7/2) den größten Einfluss auf die Verformungen im EKS ausüben. Die Bewegungen der Messpunkte in den einzelnen Messquerschnitten des EKS beginnen wenige Meter vor der Achse der QS und erstrecken sich über einige Zehnermeter bis sie sich wieder stabilisieren. In Bereichen in denen nur die HT (ohne QS) vorgetrieben wurden, verhalten sich die Messpunkte der Messquerschnitte im EKS vergleichsweise stabil.

Für die Analyse der Auswirkungen der QS und HT, werden sowohl für die gemessenen als auch für die berechneten Verformungen im EKS, nur die Zusatzverschiebungen durch den Vortrieb der HT und QS (ohne Erstverschiebung des EKS) in Betracht gezogen.

Da bei den berechneten Verformungen (Modellierungen) der Einfluss der QS im 2D-Model nicht berücksichtigt werden konnten, wird durch den Vergleich der gemessenen und errechneten Verformungen, der Einfluss der QS auf den EKS ersichtlich. Um die errechneten absoluten Verformungen mit den gemessenen Vertikal- und Horizontalverschiebungen vergleichen zu können, werden diese zuerst in die resultierenden Verformungen umgerechnet (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Gemessene und berechnete Verformungen der MQ (n.e. - nicht erfassbar)

Verformungen [mm] MQ 1				
	Gemessen			Berechnet
	Vertikal	Horizontal	Resultierend	Absolut
Punkt 2	-5	6	8	-3
Punkt 3	-3	2	3	-2
Punkt 4	-17	22	28	1
Punkt 5	5	-2	5	1

Verformungen [mm] MQ 2				
	Gemessen			Berechnet
	Vertikal	Horizontal	Resultierend	Absolut
Punkt 2	-2	n.e.	2	3
Punkt 3	-5	n.e.	5	-3
Punkt 4	-22	22	31	1
Punkt 5	15	-24	28	3

Verformungen [mm] MQ 3				
	Gemessen			Berechnet
	Vertikal	Horizontal	Resultierend	Absolut
Punkt 2	-40	10	41	-1
Punkt 3	-20	-5	21	0
Punkt 4	-40	90	99	10
Punkt 5	-30	-90	95	1

Die berechneten absoluten Werte der Verformungen allein geben keinen Aufschluss über die Auswirkung der QS auf den EKS, da diese bei der Modellierung nicht berücksichtigt werden konnten. Jedoch bietet der Vergleich zwischen den gemessenen resultierenden und den berechneten absoluten Werten (Tabelle 13) einen Anhaltspunkt über die Stärke des Einflusses der QS.

Der MQ 1, welcher sich 18 m vor dem QS 7/1 befindet, zeigt keine bis geringe Beeinflussung durch den QS. Die resultierenden und absoluten Verschiebungen liegen etwa in der gleichen Größenordnung, von 0 bis 1 cm, lediglich Punkt 4 zeigt bei den gemessenen resultierenden Verformungen eine größere Verschiebung von 28 mm.

Bei MQ 2, welcher sich 77 m nach dem QS 7/1 befindet, ist eine leichte Beeinflussung des QS erkennbar. Die Punkte 2 und 3 zeigen keinen Unterschied zwischen den resultierenden und absoluten Verformungen, was darauf hindeutet, dass keine

Beeinflussung besteht. An den Punkten 4 und 5 ist jedoch ein deutlicher Unterschied erfassbar. Die gemessenen Verformungen des Einflusses des QS betragen in etwa 30 mm, während die berechneten Absolutwerte nur etwa 5 mm erreichen. Dies deutet auf eine Beeinträchtigung der zwei Messpunkte hin. Die Einflusslinien der beiden Punkte (siehe Abbildung 45 und Abbildung 46) zeigen zwar, dass durch die Wechselwirkungen keine großen Verschiebungsspeaks entstehen, aber dennoch fast 180 m entlang der Vortriebsrichtung benötigen um sich nach dem QS wieder auf Normalwerte zu stabilisieren.

Die größte Beeinflussung tritt bei MQ 3, welcher sich 60 m nach dem QS 7/2 befindet, auf. Mögliche Ursache für die starke Beeinflussung um den QS ist die bereits in Kapitel 7.4 beschriebene beschädigte Spritzbetonschale. Laut den Berechnungen sollten sich die Verformungen in einer Größenordnung von etwa 0 bis 10 mm bewegen. Die tatsächlich gemessenen Werte betragen jedoch für die Punkte 2 und 3 um die 20 bis 40 mm und für die Punkte 4 und 5 um die 90 bis 100 mm. Daraus wird ersichtlich, dass der QS 7/2 bei MQ 3 einen starken Zuwachs an Verformung verursacht.

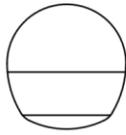
Die Distanz der Beeinflussung des QS 7/2 entlang des Vortriebs ist nicht eingrenzbar, da diese über den Untersuchungsabschnitt hinaus geht.

8.3 Analyse der Einflüsse der HT auf den EKS

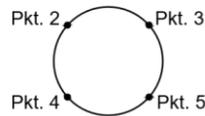
Eine Betrachtung der modellierten Werte zeigt, dass sich durch den Vortrieb der HT die gemessenen Verformungen des EKS im cm Bereich bewegen sollten, ähnlich wie jene die in Bereichen ohne QS Einfluss tatsächlich gemessen wurden.

Der geringe Einfluss der HT auf den EKS kann durch die Betrachtung der zwei modellierten Zeitverformungsgrafiken erklärt werden (siehe Abbildung 55). Am Beispiel der Messpunkte 2 (links oben) und 3 (rechts oben) des MQ 2 wird der Einfluss der HT auf den EKS erläutert. Abbildung 54 zeigt zur besseren Verständlichkeit erneut die räumliche Anordnung der Tunnelröhren sowie die Positionen der Messpunkte des EKS.

Vortrieb 8.1



EKS



Vortrieb 8.2

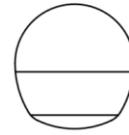


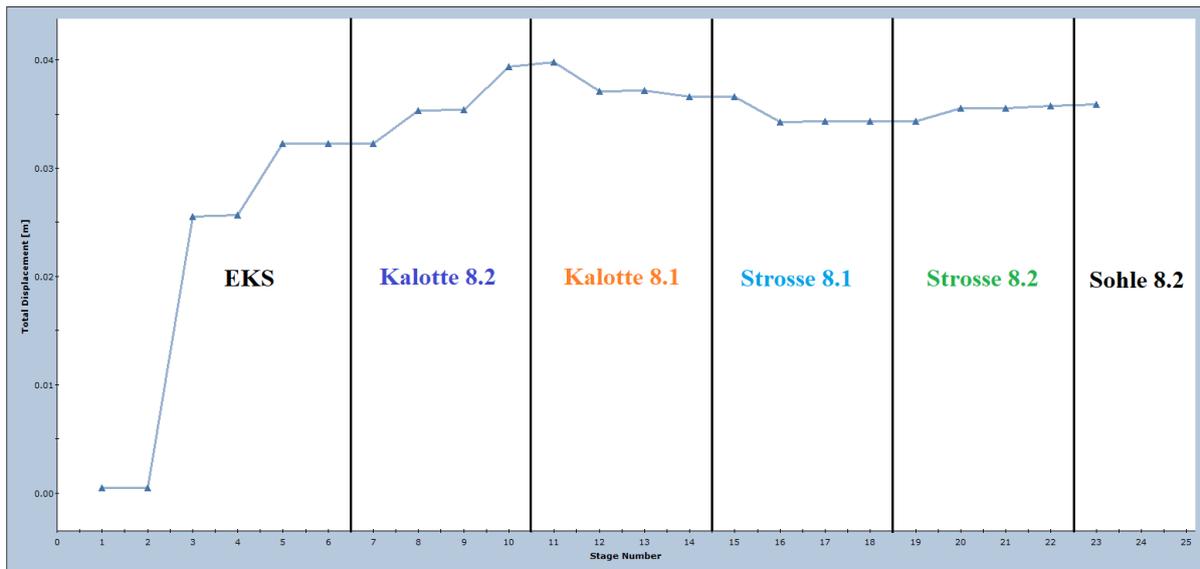
Abbildung 54: Räumliche Anordnung MQ und Messpunkte des EKS (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017e); (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2013a)

Im EKS erfährt Punkt 2 (linker Messpunkt, MQ 2, EKS) durch den Kalotten Vortrieb 8.2 (rechte HT) einen Zuwachs an Verformungen (Anstieg der Kurve). Durch den Kalotten Vortrieb 8.1 (linke HT) entsteht dagegen ein Rückgang der Verformungen im EKS. Dieser Rückgang entsteht durch den neugeschaffenen Hohlraum auf Seite des Messpunktes 2, welcher durch die Gebirgsentspannung dazu führt, dass der Messpunkt sich wieder in Richtung des Hohlraums des Vortriebs 8.1 bewegt (siehe Abbildung 55).

Punkt 3 (rechter Messpunkt, MQ 2, EKS) zeigt, spiegelverkehrt das schematisch gleiche Verhalten wie Punkt 2 (siehe Abbildung 55). Daraus resultiert, dass sich die Verformungszuwächse im EKS aufgrund des symmetrischen Auffahrens der HT rückbilden. Aufgrund dieser Wechselwirkung der sich gegenüberliegenden HT sind bei der Berechnung mögliche negative Werte für den Endzustand der Verformungen möglich (siehe berechnete absolut Verformungen Tabelle 13).

Die Strossen und Sohlen Vortriebe haben, wie aus Abbildung 55 ersichtlich, keine gravierenden Auswirkungen auf das Verformungsverhalten des EKS.

Zeitverformungsgrafik Punkt 2 (MQ 2)



Zeitverformungsgrafik Punkt 3 (MQ 3)

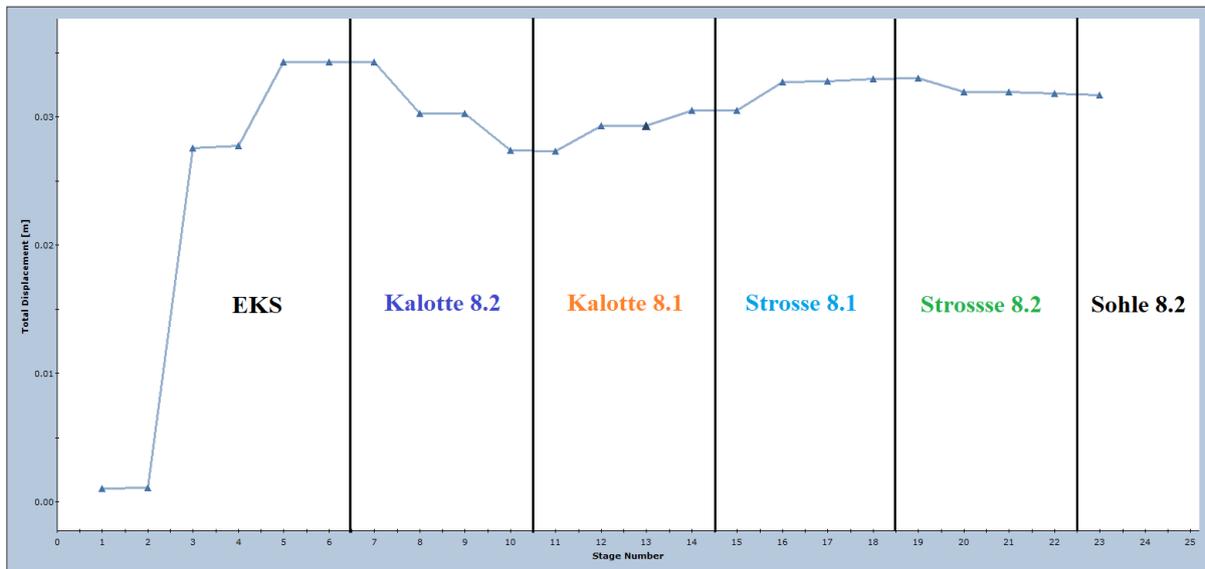


Abbildung 55: Berechnete Zeitverformungsgrafik Punkt 2 & 3 des EKS (MQ 3)

9 Diskussion

Rückblickend auf die Forschungsfrage dieser Masterarbeit (“Welche Faktoren beeinflussen die Verformungen des Erkundungsstollens, die durch die Vortriebe der Haupttunnelröhren beim Brenner Basistunnel entstehen?”), konnten unterschiedliche Einflussfaktoren identifiziert werden. Den größten Einfluss auf die Verformungen durch die Wechselwirkung der Tunnelröhren haben die beiden QS im beschriebenen Untersuchungsabschnitt. Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit haben die beiden HT nur einen geringen Einfluss, da sich die Verschiebungen aufgrund der symmetrischen Anordnung der HT gegenseitig aufheben. Anhand der Analyse der Einflusslinien zeigt sich, dass die Geologie im Untersuchungsabschnitt in Bezug auf die durch den Vortrieb der HT entstandenen Verformungen nur einen geringen Einfluss hat. Die geologischen Strukturen konnten allerdings als lokal bedingte Ursache für Verformungen an den Tunnelprofilen festgestellt werden.

In einer weiterführenden Betrachtung könnten die analysierten Daten verwendet werden um noch spezifischer auf den Einfluss der QS einzugehen. Dies wäre durch den Einsatz einer Software, die über eine 3D Berechnungstechnik verfügt möglich und würde die Möglichkeit bieten die auf den EKS sowie HT normalstehenden QS in der Berechnung zu erfassen. Des Weiteren könnte durch einen ausgeweiteten Untersuchungsabschnitt der Einfluss der Geologie in tektonisch schwächeren Bereichen in größerem Detail analysiert werden. Dies würde zeigen, dass im Bereich der QS eine erweiterte räumliche Aufteilung und mehr Maßnahmen der Stützmittelsicherung im EKS notwendig wäre.

10 Schlussfolgerung

Die Auswertung der gemessenen Verformungsdaten verglichen mit den berechneten Verformungsdaten zeigt, dass der größte Verformungsanteil im EKS durch den Vortrieb der QS entsteht. Des Weiteren wird aus den Modellierungen im Zuge dieser Masterarbeit ersichtlich, dass der Zuwachs an Verformungen im EKS durch den Vortrieb der HT rechnerisch gering ist. Dies hat sich durch die Analyse der gemessenen Daten in Form von Einflusslinien bewiesen, da sich die Verschiebung der HT Vortriebe 8.1 und 8.2 aufgrund der Symmetrie gegenseitig aufheben.

Der größte Zuwachs an den gemessenen Verformungen im EKS wurde im Untersuchungsabschnitt durch den Vortrieb der beiden QS ausgelöst. Die Verformungen im EKS beginnen bereits 40 bis 60 m vor den QS.

Die Punkte 2 und 3 (Kämpfer, EKS) wurden einer geringeren Beeinflussung ausgesetzt und stabilisierten sich beim QS 7/1 40 bis 60 m nach der Achse des QS. Die Stabilisierung der Punkte 2 und 3 (Kämpfer, EKS) ist beim QS 7/2 nicht ersichtlich, da der Einfluss des QS hier über den Untersuchungsabschnitt hinaus reicht.

Die Punkte 4 und 5 (rechts und links unten, EKS) sind einer stärkeren Beeinflussung durch die QS ausgesetzt. Beim QS 7/1 wird bis 180 m nach dem QS entlang der Vortriebsrichtung eine Verformungszunahme im EKS aufgezeichnet. Am südlichen Rand des Untersuchungsabschnitts kann der Einfluss des QS 7/2 nicht eingegrenzt werden, da sich die Messpunkte erst außerhalb des Untersuchungsabschnitts stabilisieren.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Masterarbeit kann zusammenfassend gesagt werden, dass, die Zusatzverformungen und Schäden im EKS durch die räumliche Anordnung der HT und insbesondere der räumlichen Lage der QS verursacht werden. Zwischen der Sohle des QS und der Firste des EKS befinden sich lediglich 4,23 m Gebirge, wie in Abbildung 56 ersichtlich. Das Volumen des generierten Hohlraums ist im Bereich der QS in Relation zu dem Gebirge zu groß um ohne gegenseitige Beeinflussung erbaut zu werden.

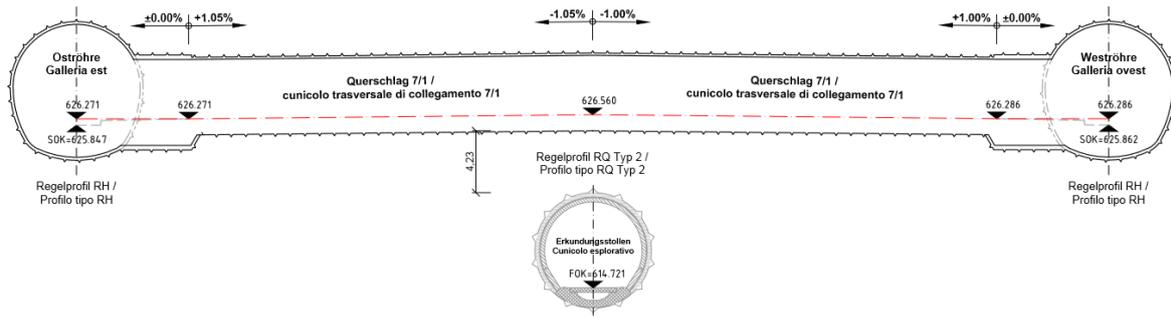


Abbildung 56: Querschnitt Proj. km 7+000 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017b)

11 Literaturverzeichnis

- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (n.d.-a). No Title. Retrieved May 3, 2018, from www.bbt-se.com/bbtpublic/?project=bbtcentral&view=bbt_public&lang=de_blank
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (n.d.-b). No Title. Retrieved from www.bbt-se.com
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2013a). Brenner Basistunnel, Ausführungsplanung, Tunnel, Regelprofil, EKS Ahrental ohne Rinschluss.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2013b). Brenner Basistunnel Ausschreibungsphase, Baulos AP 164 Tulfes Pfons: Geologisch-hydrogeologische Planung, Technischer Bericht, Geologisch - hydrogeologische Prognose Erkundungsstollen Ahrental, 64.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2013c). Brenner Basistunnel Ausschreibungsphase, Baulos AP 164 Tulfes Pfons: Teil D Baulosbeschreibung.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2013d). Brenner Basistunnel Regelplanung, Streckenplanung, Übergreifende Dokumente, Lageplan, Lageplan Blatt 3/27.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2017a). Brenner Basistunnel, Ausführungsplanung, H33, Baulos Tulfes Pfons, Tunnel, Längenschnitt, Haupttunnel Ost - Gleis 1 Losverlängerung Baulos H33.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2017b). Brenner Basistunnel, Ausführungsplanung, H33, Baulos Tulfespfons, Querschlag, Längenschnitt, Querschlag 7/1 Losverlängerung Baulos H33, Projektkilometer 07+333,000 bis 7+360,312, 1, 50022.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2017c). Brenner Basistunnel, Ausschreibungsplanung, AP233 Baulos Sillschlucht-Pfons (H41), Geotechnische Planung, Technischer Bericht, Haupttunnel Ahrental Pfons Gebirgsarten, HTO-km 6+800 bis HTO-km 14+48860.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2017d). Brenner Basistunnel, Ausschreibungsunterlagen, AP233 Baulos Sillschlucht-Pfons(H41), Getotechnische Planung, Haupttunnel Ahrental - Pfons Geotechnischer Längenschnitt.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2017e). Brenner Basistunnel Ausführungsplanung, Tunnel, Ausbruchplan, Regelquerschnitt (RH) ohne/mit Sohlgewölbe.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2017f). Brenner Basistunnel Ausschreibungsplanung, Baulos AP 233 Baulos Sillschlucht-Pfons: Geotechnische Planung, Technischer Bericht, Haupttunnel Ahrental-Pfons Gebirgsarten, 164.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2018a). GTM-Tulfes-Pfons, Vortrieb TBM, 21-EKS, MQ 00059, Tunnelmeter 59.17 m, 2018.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2018b). GTM-Tulfes-Pfons, Vortrieb TBM, 21-EKS, MQ 00154, Tunnelmeter 153.92 m, 2018.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2018c). GTM-Tulfes-Pfons, Vortrieb TBM, 21-EKS, MQ 00470, Tunnelmeter 470.02 m, 2018.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2018d). GTM-Tulfes-Pfons, Vortrieb TBM, 21-EKS, Punkt: 02, Tunnelmeter: 956-4BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2018). GTM-Tulfes-Pfons, Vortrieb TBM, 21-EKS, Punkt: 02, Tunnelmeter: 956-477.73 m.77.73 m.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2018e). GTM-Tulfes-Pfons, Vortrieb TBM, 21-EKS, Punkt: 03, Tunnelmeter: 956-477.73 m.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2018f). GTM-Tulfes-Pfons, Vortrieb TBM, 21-EKS,

- Punkt: 04, Tunnelmeter: 956-477.73 m.
- BBT Brenner Basistunnel BBT SE. (2018g). GTM-Tulfes-Pfons, Vortrieb TBM, 21-EKS, Punkt: 05, Tunnelmeter: 956-477.73 m.
- Bergmeister, K. (2011). *Brenner Basistunnel - Der Tunnel kommt*. Lana: Tappeinerverlag.
- Bergmeister, K., & Reinhold, C. (2017). Learning and optimization from the exploratory tunnel - Brenner Base Tunnel/Lernen und Optimieren vom Erkundungsstollen - Brenner Basistunnel. *Geomechanics and Tunnelling*, 467–476. <https://doi.org/10.1002/geot.201700039>
- Brandner, R., Reiter, F., & Töchterle, A. (2008). ÜBERBLICK ZU DEN ERGEBNISSEN DER GEOLOGISCHEN VORERKUNDUNG FÜR DEN BRENNER - BASISTUNNEL. *Geo.Alp*, 5, 165–174.
- Braun, R., & Reinhold, C. (2017). Ermittlung von 3D-Gebirgsspannungszuständen für den Brenner Basistunnel. *Geotechnik*, 40(4), 250–264. <https://doi.org/10.1002/gete.201600025>
- Der Brenner Basistunnel - ein neuer Verbindungsweg durch die Alpen. (2012). Retrieved from www.bbt-se.com
- Herrenknecht Tunnelvortriebstechnik. (2015). TECHNISCHE DATEN S-932 Brenner Basistunnel Tulfes-Pfons, 1–16.
- itc engineering. (n.d.). IRIS: Übersicht.
- Lang, H.-J., & Huder, J. (1994). *Bodenmechanik und Grundbau - Verhalten von Böden und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte* (Aufl. 5). Springer.
- Liu, Q. (2017). Modelling in Engineering Geology - Chapter 2 BLOCK THEORY AND ITS APPLICATION TO ENGINEERING GEOLOGY. *Institute of Applied Geosciences*, 1–103.
- Mostler, H., Heissel, G., & Gasser, G. (1982). Untersuchung von Erzlagerstätten im Innsbrucker Quarzphyllit und auf der Alpeiner Scharte, *Band 1*, 77–83.
- ÖNORM des Austrian Standard (ehem. Österreichisches Normierungsinstitut): ÖNORM B 2203-1:2001 01 01 (Untertagebauarbeiten - Werkvertragsnorm Teil 2: Zyklischer Vortrieb) (2001).
- ÖNORM des Austrian Standards Institute (ehem. Österreichisches Normungsinstitut): ÖNORM B 2203-2:2005 01 01 (Untertagebauarbeiten - Werkvertragsnorm Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb). (2005).
- Prinz, H., & Strauß, R. (2011). *Ingenieurgeologie* (5. Auflage). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Reinboth, C. (2016). Grundlagen der Statistik: Statistische Lage-Maße - Das Arithmetisch Mittel. Retrieved November 15, 2018, from <https://wissenschafts-thurm.de/grundlagen-der-statistik-statistische-lagemasse-das-arithmetische-mittel/>
- Reinhold, C. (2017). Brenner Basistunnel Bestandsplanung, Baulos H33 Tulfes Pfons: Projekteinheit Geotechnik TBM, Längenschnitt/Tunnelband, VT2.1 TM 0 - 3.000 Maschinendaten-Geotechnik.
- Reinhold, C., Schwarz, C., & Bergmeister, K. (2017). Development of holistic prognosis models using exploration techniques and seismic prediction/Die Entwicklung holistischer Prognosemodelle mit Vorauserkundung und seismischen Messungen. *Geomechanics and Tunnelling*, 767–778. <https://doi.org/10.1002/geot.201700058>

- Teale, R. (1965). The concept of specific energy in rock drilling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, 2(1), 57–73. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(65\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(65)90022-7)
- Tunnel Lining Design 1.0 Introduction. (n.d.). Retrieved November 1, 2018, from https://www.rocscience.com/help/rs2/#t=tutorials%2FRS2__Tunnel_Lining_Design.htm
- Vlachopoulos, N., & Diederichs, M. S. (2009). Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42(2), 131–146. <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0176-4>

I. Abkürzungsverzeichnis

BBT	<i>Brenner Basistunnel</i>
BBT SE	<i>Brenner Basistunnel Societas Europaea</i>
EKS	<i>Erkundungsstollen</i>
HT	<i>Haupttunnelröhre</i>
MQ	<i>Modellierungsquerschnitt</i>
PGK	<i>projektspezifische Gebirgsklassifizierung</i>
Proj. km	<i>Projektkilometer</i>
QS	<i>Querschlag</i>
QS 7/1	<i>QS bei Proj. km 7,000</i>
QS 7/2	<i>QS bei Proj. km 7,333</i>
TBM	<i>Tunnelbohrmaschine</i>
TBM-O	<i>Offene Gripper TBM</i>
TVM	<i>Tunnelvortriebsmaschine</i>
Vortrieb 8.1	<i>Haupttunnelröhre Ost</i>
Vortrieb 8.2	<i>Haupttunnelröhre West</i>
σ_{h-par}	<i>Horizontalspannung parallel zur Tunnelachse</i>
σ_{h-quer}	<i>Horizontalspannung quer zur Tunnelachse</i>
σ_v	<i>Hauptnormalspannung</i>

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Karte des BBT (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, n.d.-a) (Nachbearbeitet)..	11
Abbildung 2: BBT Übersichtsplan ("Der Brenner Basistunnel - ein neuer Verbindungsweg durch die Alpen," 2012) (nachbearbeitet)	12
Abbildung 3: Lageplan des Untersuchungsabschnitts (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2013d) (Nachbearbeitet).....	14
Abbildung 4: Baugeologischer Längsschnitt (nachbearbeitet BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017c, 2017d).....	17
Abbildung 5: Längsschnitt TBM-O (ÖNORM B 2203-2:2005, S. 5-39).....	20
Abbildung 6: Graphische Darstellung HT und EKS (Bergmeister, 2011)	23
Abbildung 7: Projektspezifische Gebirgsklassifizierung (Reinhold, 2017).....	28
Abbildung 8: Spezifische Energie für die Ermittlung der Störungszone ESI-f9240 (Reinhold et al., 2017)	29
Abbildung 9: Einteilung der homogenen Bereiche – X -Achse: die Proj. km – Y-Achse: PGK (Reinhold, 2017) (nachbearbeitet)	30
Abbildung 10: Primärspannungszustand der Hauptnormalspannungen (GOK – Geländeoberkante) (nach Lang & Huder, 1994).....	32
Abbildung 11: Hauptnormalspannung des Untersuchungsabschnitts.....	33
Abbildung 12: Hauptnormalspannungen in Hanglage (GOK – Geländeoberkante) (nach Prinz & Strauß, 2011).....	33
Abbildung 13: Beispiel einer Kartierung des PGK 1 bei Proj. km 7+053 bis 7+063 (Dokumentation BBT SE)	34
Abbildung 14 Beispiel einer Kartierung des PGK 2a bei Proj. km 7+388 bis 7+498 (Dokumentation BBT SE)	35
Abbildung 15: Beispiel einer Kartierung des PGK 2b bei Proj. km 7+266 bis 7+276 (Dokumentation BBT SE)	36
Abbildung 16: Regelprofil des EKS (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2013a) (nachbearbeitet).....	37
Abbildung 17: Regelprofil des Vortrieb 8.1 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017e) (nachbearbeitet).....	37
Abbildung 18: Schematische Darstellung der Geologie vom MQ 1 Proj. km 6+982 (nach Dokumentation BBT SE)	40
Abbildung 19: Einteilung der geologischen Trennflächen (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017c).....	41
Abbildung 20: Grafische Darstellung - scheinbares Einfallen (Liu, 2017)	41
Abbildung 21: Klufscharen in Lagenkugelprojektion (MQ 1)	44
Abbildung 22: Störungssysteme in Lagenkugelprojektion (MQ 1).....	45
Abbildung 23: MQ 1 Proj. km 6+982 mit extrapolierte Geologie und geplanten Ausbrüchen (Modelansicht – Berechnung der Verformungen).....	45
Abbildung 24: MQ 1 Proj. km 6+982 EKS - Ausbruch und Installation der Stützkraft (Faktor 1) (Modelansicht – Berechnung der Verformungen).....	47
Abbildung 25: Faktorreduktion der Stützkraft.....	47
Abbildung 26: Ermittlung des plastischen Verformungsradius EKS (MQ 1)	48
Abbildung 27: Längsversatz Profil (nach Vlachopoulos & Diederichs, 2009)	49
Abbildung 28: Zeitverformungsgrafik EKS für Berechnung der Stützkraftreduktion	50
Abbildung 29: MQ 1 6+982 EKS - Reduktion der Stützkraft (Faktor 0.08) (Modelansicht – Berechnung der Verformungen).....	51

Abbildung 30: MQ 1 Proj. km 6+982 Installation der Anker (Modelansicht – Berechnung der Verformungen)	52
Abbildung 31: MQ 1 Proj. km 6+982 Resultat eines Modellierungsvorganges am Beispiel EKS (Modelansicht – Berechnung der Verformungen)	52
Abbildung 32: MQ 1 Proj. km 6+982 vollständig modellierter MQ 1 (Modelansicht – Berechnung der Verformungen).....	55
Abbildung 33: Schematische Darstellung der Geologie vom MQ 2 Proj. km 7+077.....	56
Abbildung 34: Klufscharen in Lagenkugelprojektion (MQ2).....	58
Abbildung 35: Störungssysteme in Lagenkugelprojektion (MQ2).....	59
Abbildung 36: MQ 2 Proj. km 7+077 vollständig modellierter MQ 2 (Modelansicht – Berechnung der Verformungen).....	60
Abbildung 37: Schematische Darstellung der Geologie vom MQ 3 Proj. km 7+393.....	61
Abbildung 38: Klufscharen in Lagenkugelprojektion (MQ3).....	63
Abbildung 39: Störungssysteme in Lagenkugelprojektion (MQ 3).....	64
Abbildung 40: Model 3 Proj. km 7+393 – vollständig modellierter MQ 3 (Modelansicht – Berechnung der Verformungen).....	65
Abbildung 41 Messpunkte für Verformungen am Profil des EKS	66
Abbildung 42: Epochenlegende für Verformungsgrafiken Abbildung 43, Abbildung 44, Abbildung 45 und Abbildung 46 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018d)	67
Abbildung 43: Einflusslinien von Messpunkt 2 (Proj.km 6+933 bis 7+400) (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018d) (nachbearbeitet)	68
Abbildung 44: Einflusslinien von Messpunkt 3 (Proj.km 6+933 bis 7+400) (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018e) (nachbearbeitet)	69
Abbildung 45: Einflusslinie von Messpunkt 4 (Proj.km 6+933 bis 7+400) (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018f) (nachbearbeitet)	71
Abbildung 46: Einflusslinien von Messpunkt 5 (Proj. km 6+933 bis 7+400) (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018g) (nachbearbeitet)	72
Abbildung 47: Zeitverformungsgrafik MQ 1 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018a) (nachbearbeitet).....	73
Abbildung 48: Errechnete Verformungen des EKS MQ 1 (Interpretationsansicht)	74
Abbildung 49: Zeitverformungsgrafik MQ 2 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018b) (nachbearbeitet).....	75
Abbildung 50: Errechnete Verformungen des EKS MQ 2 (Interpretationsansicht)	76
Abbildung 51: Aufgeplatzte Spritzbetonschale mit saniertem Mörtelbeet - MQ 3	77
Abbildung 52: Zeitverformungsgrafik MQ 3 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2018c) (nachbearbeitet).....	78
Abbildung 53: Errechnete Verformungen des EKS MQ 3 (Interpretationsansicht)	79
Abbildung 54: Räumliche Anordnung MQ und Messpunkte des EKS (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017e); (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2013a)	84
Abbildung 55: Berechnete Zeitverformungsgrafik Punkt 2 & 3 des EKS (MQ 3).....	85
Abbildung 56: Querschnitt Proj. km 7+000 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017b).....	88

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der TVM (ÖNORM B 2203-2:2005, S. 5-39)	19
Tabelle 2: Technische Daten der TBM-O des EKS (Herrenknecht Tunnelvortriebstechnik, 2015).....	21
Tabelle 3: Summe der Stützmittel des EKS im Untersuchungsabschnitts	21
Tabelle 4: Vortriebsstand des EKS	22
Tabelle 5: Stützmittel der Kalotte für Vortrieb 8.1 und 8.2	25
Tabelle 6: Stützmittel der Strosse für Vortrieb 8.1 und 8.2	25
Tabelle 7: Stützmittel der Sohle für Vortrieb 8.1 und 8.2.....	26
Tabelle 8: Vortriebsstand HT (Stand 04.06.2018)	26
Tabelle 9: Projektspezifische Gebirgsklassifizierung	30
Tabelle 10: Einteilung Klufscharen und Störungssysteme MQ 1 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017b)	43
Tabelle 11: Einteilung Klufscharen und Störungssysteme MQ 2 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017b)	57
Tabelle 12: Einteilung Klufscharen und Störungssysteme MQ 3 (BBT Brenner Basistunnel BBT SE, 2017b)	62
Tabelle 13: Gemessene und berechnete Verformungen der MQ (n.e. - nicht erfassbar).....	82

12 Anhang

Vlachopoulos und Diederichs Methode ("Tunnel Lining Design 1.0 Introduction," n.d.; Vlachopoulos & Diederichs, 2009)

MQ 1

EKS Anker:

Gesamt Verformung: 0,04 m

Plastischer Verformungsradius (R_P): 7 m

Distanz zwischen Ortsbrust und Verbauung der Stützmittel (X): 5.5 m

Tunnelradius (R_T): 3.95 m

Berechnung:

$$(X) / (R_T) = 1.4$$

$$(R_P) / (R_T) = 1.8$$

$$U/U_{\max} = 0,76$$

$$\text{Reduktion der Stützkraft bei Verformung} = 0,4 * 0.76 = 0,03 \text{ m}$$

Phase 7 => Stützkraft Faktor 0,08 (8%)

EKS Spritzbeton:

Gesamt Verformung: 0,04 m

Plastischer Verformungsradius (R_P): 7 m

Distanz zwischen Ortsbrust und Verbauung der Stützmittel (X): 30 m

Tunnelradius (R_T): 3.95 m

Berechnung:

$$(X) / (R_T) = 7.6$$

$$(R_P) / (R_T) = 1.8$$

$$U/U_{\max} = 0,98$$

$$\text{Reduktion der Stützkraft bei Verformung} = 0.4 * 0,9 = 0,039 \text{ m}$$

Phase 10 => 0 Stützkraft

Kalotte 8.2

Gesamt Verformung: 0,059 m

Plastischer Verformungsradius (R_P): 9.5 m

Distanz zwischen Ortsbrust und Verbauung der Stützmittel (X): 1.3 m

Tunnelradius (R_T): 4.31 m

Berechnung:

$$(X) / (R_T) = 0.032$$

$$(R_P) / (R_T) = 2.2$$

$$U/U_{\max} = 0,58$$

$$\text{Reduktion der Stützkraft bei Verformung} = 0.58 * 0.059 = 0,032 \text{ m}$$

Phase 8 => Stützkraft Faktor 0.08 (8%)

Kalotte 8.1

Gesamt Verformung: 0,058 m

Plastischer Verformungsradius (R_P): 8.5 m

Distanz zwischen Ortsbrust und Verbauung der Stützmittel (X): 1.3 m

Tunnelradius (R_T): 4.31 m

Berechnung:

$$(X) / (R_T) = 0.3$$

$$(R_P) / (R_T) = 1.97$$

$$U/U_{\max} = 0,55$$

$$\text{Reduktion der Stützkraft bei Verformung} = 0.058 * 0,55 = 0,032 \text{ m}$$

Phase 8 => Stützkraft Faktor 0.08 (8%)

Strosse 8.1 & 8.2 => 50% von Stützkraft Kalotte = Faktor 0,04 (4%)

MQ 2**EKS Anker:**

Gesamt Verformung: 0.022 m

Plastischer Verformungsradius (R_P): 9 m

Distanz zwischen Ortsbrust und Verbauung der Stützmittel (X): 5.5 m

Tunnelradius (R_T): 3.95 m

Berechnung:

$$(X) / (R_T) = 1.39$$

$$(R_P) / (R_T) = 1.64$$

$$U/U_{\max} = 0.5$$

$$\text{Reduktion der Stützkraft bei Verformung} = 0.022 * 0.5 = 0,011 \text{ m}$$

Phase 8=> Faktor 0,04 Stützkraft (4%)

EKS Spritzbeton

Gesamt Verformung: 0.032 m

Plastischer Verformungsradius (R_P): 6.5 m

Distanz zwischen Ortsbrust und Verbauung der Stützmittel (X): 30 m

Tunnelradius (R_T): 3.95 m

Berechnung:

$$(X) / (R_T) = 7.6$$

$$(R_P) / (R_T) = 1.54$$

$$U/U_{\max} = 0,96$$

$$\text{Reduktion der Stützkraft bei Verformung} = 0,96 * 0.032 = 0.0202 \text{ m}$$

Phase 10 => 0 Stützkraft

Kalotte 8.2

Gesamt Verformung: 0.038 m

Plastischer Verformungsradius (R_P): 11 m

Distanz zwischen Ortsbrust und Verbauung der Stützmittel (X): 1.3 m

Tunnelradius (R_T): 4.31 m

Berechnung:

$$(X) / (R_T) = 0.3$$

$$(R_P) / (R_T) = 2.55$$

$$U/U_{\max} = 0.5$$

$$\text{Reduktion der Stützkraft bei Verformung} = 0.5 * 0.04 = 0.019 \text{ m}$$

Phase 7 => 0.08 Stützkraft

Kalotte 8.1

Gesamt Verformung: 0,05 m

Plastischer Verformungsradius (R_P): 8.5 m

Distanz zwischen Ortsbrust und Verbauung der Stützmittel (X): 1.3 m

Tunnelradius (R_T): 4.31 m

Berechnung:

$$(X) / (R_T) = 0.3$$

$$(R_P) / (R_T) = 1.97$$

$$U/U_{\max} = 0.5$$

Reduktion der Stützkraft bei Verformung = $0.5 * 0,05 = 0,025$ m

Phase 7 => Stützkraft Faktor 0.08 (8%)

Strosse 8.1 & 8.2 => 50% von Stützkraft Kalotte = 0.04 (4%)

MQ 3

EKS Anker:

Gesamt Verformung: 0,036 m

Plastischer Verformungsradius (R_P): 10.5 m

Distanz zwischen Ortsbrust und Verbauung der Stützmittel (X): 5.5 m

Tunnelradius (R_T): 3.95 m

Berechnung:

$$(X) / (R_T) = 1.39$$

$$(R_P) / (R_T) = 2.65$$

$$U/U_{\max} = 0.7$$

Reduktion der Stützkraft bei Verformung = $0.7 * 0.036 = 0.0252$ m

Phase 8 => Stützkraft Faktor 0,04 (4%)

EKS Spritzbeton

Gesamt Verformung: 0.021 m

Plastischer Verformungsradius (R_P): 6.5 m

Distanz zwischen Ortsbrust und Verbauung der Stützmittel (X): 30 m

Tunnelradius (R_T): 3.95 m

Berechnung:

$$(X) / (R_T) = 7.6$$

$$(R_P) / (R_T) = 1.54$$

$$U/U_{\max} = 0,96$$

Reduktion der Stützkraft bei Verformung = $0.021 * 0.96 = 0.02$ m

Phase 10 => 0 Stützkraft

Kalotte 8.2

Gesamt Verformung: 0.026 m

Plastischer Verformungsradius (R_P): 8.5 m
Distanz zwischen Ortsbrust und Verbauung der Stützmittel (X): 1.3 m
Tunnelradius (R_T): 4.31 m

Berechnung:

$$(X) / (R_T) = 0.3$$

$$(R_P) / (R_T) = 1.97$$

$$U/U_{\max} = 0.6$$

$$\text{Reduktion der Stützkraft bei Verformung} = 0.6 * 0.026 = 0.043 \text{ m}$$

Phase 7 => 0.08 Stützkraft

Kalotte 8.1

Gesamt Verformung: 0.061 m

Plastischer Verformungsradius (R_P): 12 m

Distanz zwischen Ortsbrust und Verbauung der Stützmittel (X): 1.3 m

Tunnelradius (R_T): 4.31 m

Berechnung:

$$(X) / (R_T) = 0.3$$

$$(R_P) / (R_T) = 12$$

$$U/U_{\max} = 0.5$$

$$\text{Reduktion der Stützkraft bei Verformung} = 0.5 * 0.061 = 0.03 \text{ m}$$

Phase 6 => Stützkraft Faktor 0.1 (10%)

Strosse 8.1=> 50% von Stützkraft Kalotte = 0.05 (5%)

Strosse 8.2 => 50% von Stützkraft Kalotte = 0.04 (4%)
