



Florian Nothdurfter BSc

**Untersuchung der gegenseitigen Beeinflussung von Tunnel und  
Stollen im Bereich der Nothaltestelle Innsbruck des  
Brenner Basistunnels**

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer:

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

Dipl.-Ing. Manuel Lagger

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität Graz

Graz, Januar 2018

# Eidesstattliche Erklärung

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

9. Januar 2018

---

Datum

*Florian Netholmayer*

---

Unterschrift

# Danksagung

Zunächst möchte ich Herrn O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Wulf Schubert für die verlässliche und hilfsbereite Betreuung meiner Masterarbeit danken.

Des Weiteren danke ich Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Tassilo Weifner und Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Chris Reinhold sowie dem gesamten Team der BBT SE für die Bereitstellung der Daten und der Betreuung in Innsbruck. Danken möchte ich auch der Örtlichen Bauaufsicht Pini & Partner des Brenner Basistunnels sowie Herrn Dipl.-Ing. Manuel Lagger für die externe Betreuung.

Auch meiner Freundin Hanna möchte ich für ihre geduldige Unterstützung danken. Ein besonderer Dank gilt zum Schluss noch meinen Eltern Ingrid und Christian. Ohne sie wäre die unvergessliche und spannende Zeit in Graz nicht möglich gewesen.

# Abstract

The construction of the emergency station Innsbruck in the Brenner Base Tunnel proves to be problematic. Due to the complex geometry of the emergency station and the small spacing between the tunnel tubes an interaction is observed. Because of other tunnel excavations the shotcrete lining of the exploratory tunnel cracked which resulted in an unexpected excavation-stop. In the present master's thesis this interaction of the tunnel tubes in the area of the emergency station is investigated. To specifically analyze the interaction of the tunnel tubes, a two-dimensional numerical simulation with the program RS2 from Rocscience was conducted. Thereby, several cross sections along the emergency station were created, depicting the two main tunnels, the center tunnel, and the exploratory tunnel. The actual building process was then simulated in accordance with the construction documentary. Thereby, the focus of the investigation was on the behavior of the exploratory tunnel, which is located under the center tunnel and between the two main tunnels. The pattern of results of the numerical simulation confirms the observed interaction: The shotcrete lining of the exploratory tunnel collapses due to the excavation of the center tunnel.



# Kurzfassung

Die Errichtung der Nothaltestelle Innsbruck des Brenner Basistunnels erweist sich in der Bauphase als problematisch. Durch die komplexe Geometrie der Nothaltestelle und die geringen Abstände zwischen den einzelnen Röhren kommt es zu einer Interaktion der Vortriebe. An der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens sind lokale Rissbildungen ersichtlich, die einen Vortriebsstillstand zur Folge haben. Aufgrund dieser Beobachtungen wird in der vorliegenden Masterarbeit die gegenseitige Beeinflussung von Tunnel und Stollen im Bereich der Nothaltestelle untersucht. Zur Analyse des Problems wird eine zweidimensionale numerische Simulation mit dem Programm RS2 von Rocscience durchgeführt. Hierfür werden mehrere Schnitte entlang der Nothaltestelle erstellt, welche jeweils die beiden Haupttunnel, einen Mittelstollen und einen Erkundungsstollen abbilden. Mit Hilfe der Baustellendokumentation wird dann der tatsächliche Bauablauf jedes Schnittes simuliert. Im Vordergrund der Untersuchung steht der Erkundungsstollen, welcher sich unter dem Mittelstollen und zwischen den beiden Haupttunneln befindet. Die Ergebnisse aus der numerischen Simulation bestätigen dabei die beobachtete Interaktion einzelner Tunnelvortriebe. Vor allem der Mittelstollen beeinflusst den Erkundungsstollen deutlich, sodass es zum Versagen der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens kommt.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Projektbeschreibung</b>	<b>3</b>
2.1	Brenner Basistunnel . . . . .	3
2.2	Nothaltestelle Innsbruck . . . . .	4
2.2.1	Bauwerke und Vortriebe . . . . .	4
2.2.2	Geometrie . . . . .	5
2.2.2.1	Übersichtsplan . . . . .	6
2.2.2.2	Trassierung und Regelprofile . . . . .	7
2.2.3	Geologie . . . . .	10
2.2.3.1	Gebirgsarten . . . . .	10
2.2.3.2	Störungszone . . . . .	11
2.2.3.3	Geomechanische Parameter . . . . .	13
2.2.4	Bauablauf . . . . .	15
2.3	Erläuterung der Problemstellung . . . . .	16
2.3.1	Bisherige Erkenntnisse . . . . .	16
2.3.2	Vorhersehbare Probleme an der Nothaltestelle Innsbruck . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Numerische Simulation</b>	<b>18</b>
3.1	Allgemein . . . . .	18
3.2	Programmeinstellungen . . . . .	19
3.2.1	Primärer Spannungszustand . . . . .	19
3.2.2	Randbedingungen . . . . .	20
3.2.3	Netzparameter . . . . .	21
3.2.4	Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb . . . . .	21
3.3	Parameteranpassung . . . . .	23
3.4	Vorentspannung nach Vlachopoulos . . . . .	24

---

3.5	Simulation des Bauablaufes . . . . .	28
3.5.1	Bestimmung der Vorverschiebung . . . . .	28
3.5.1.1	Auswertung der Vorverschiebung . . . . .	29
3.5.2	Stützmittel . . . . .	32
3.5.2.1	Anker . . . . .	33
3.5.2.2	Spritzbeton . . . . .	33
3.5.2.3	Ausbaubögen und Baustahlgitter . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>37</b>
4.1	Allgemein . . . . .	37
4.2	Exzentrische Lage des Mittelstollens . . . . .	38
4.2.1	Schnitt A-A . . . . .	38
4.2.1.1	In-situ Spannungszustand . . . . .	38
4.2.1.2	Stützmittel . . . . .	39
4.2.1.3	Plastifizierung des Gebirges . . . . .	39
4.2.1.4	Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens . . . . .	39
4.2.1.5	Spannungsentwicklung rund um den Erkundungsstollen . . . . .	40
4.2.1.6	Auslastung der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens . . . . .	41
4.3	Zentrische Lage des Mittelstollens . . . . .	44
4.3.1	Schnitt B-B . . . . .	44
4.3.1.1	In-situ Spannungszustand . . . . .	44
4.3.1.2	Stützmittel . . . . .	45
4.3.1.3	Plastifizierung des Gebirges . . . . .	45
4.3.1.4	Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens . . . . .	45
4.3.1.5	Spannungsentwicklung rund um den Erkundungsstollen . . . . .	46
4.3.1.6	Auslastung der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens . . . . .	47
4.3.2	Schnitt F-F . . . . .	49
4.3.2.1	In-situ Spannungszustand . . . . .	50
4.3.2.2	Stützmittel . . . . .	50
4.3.2.3	Plastifizierung des Gebirges . . . . .	50
4.3.2.4	Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens . . . . .	52
4.3.2.5	Spannungsentwicklung rund um den Erkundungsstollen . . . . .	53
4.3.2.6	Auslastung der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens . . . . .	54

---

4.3.3	Schnitt F-F - Ohne Berücksichtigung der Störungszone . . . . .	55
4.3.3.1	In-situ Spannungszustand . . . . .	56
4.3.3.2	Stützmittel . . . . .	56
4.3.3.3	Plastifizierung des Gebirges . . . . .	56
4.3.3.4	Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens . . . . .	57
4.3.3.5	Spannungsentwicklung rund um den Erkundungsstollen . .	58
4.3.3.6	Auslastung der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens .	58
4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Fazit</b>	<b>65</b>

---

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Lageplan einer Nothaltestelle. . . . .	1
2.1	Grafische Darstellung des Tunnelsystems. . . . .	4
2.2	Übersichtsplan der NHS-I. . . . .	6
2.3	Regelprofil RP-HT-RH der Haupttunnel. . . . .	7
2.4	Regelprofil RP-HT-AH der Haupttunnel. . . . .	8
2.5	Regelprofil RP-EKS-A des Erkundungsstollens. . . . .	8
2.6	Regelprofil RP-NH-RM des Mittelstollens. . . . .	9
2.7	Verteilung der Gebirgsarten. . . . .	11
2.8	Ortsbrustdokumentation der Störungszone ESI-f4158. . . . .	12
2.9	Lage der Störungszone ESI-f4158. . . . .	13
3.1	Bereich der NHS-I in der numerischen Simulation. . . . .	18
3.2	Schnitt F-F in RS2. . . . .	19
3.3	Modellgröße in RS2. . . . .	21
3.4	Normalspannungs-Schubspannungs-Diagramm. . . . .	22
3.5	Gebirgskennlinie eines Tunnels. . . . .	25
3.6	Radialverschiebungsverteilung nach Vlachopoulos. . . . .	27
3.7	Schnitt durch den Erkundungsstollen. . . . .	29
3.8	Auswertung der Radialverschiebungsverteilung. . . . .	31
3.9	Gebirgskennlinien zur Bestimmung des Ausbaustützdruckes. . . . .	32
4.1	Schnitt A-A - Mittelstollen exzentrisch. . . . .	38
4.2	Schnitt A-A - Entwicklung der plastischen Zone. . . . .	39
4.3	Schnitt A-A - Verschiebungsentwicklung. . . . .	40
4.4	Schnitt A-A - Spannungsentwicklung. . . . .	41
4.5	Schnitt A-A - Interaktion nach dem Ausbruch des Erkundungsstollens. . . . .	42
4.6	Schnitt A-A - Interaktion nach dem Ausbruch aller Vortriebe. . . . .	42

---

4.7	Schnitt A-A - Entwicklung der Normalkraft. . . . .	43
4.8	Schnitt B-B - Mittelstollen zentrisch. . . . .	44
4.9	Schnitt B-B - Entwicklung der plastischen Zone. . . . .	45
4.10	Schnitt B-B - Verschiebungsentwicklung. . . . .	46
4.11	Schnitt B-B - Spannungsentwicklung. . . . .	47
4.12	Schnitt B-B - Interaktion nach dem Ausbruch des Erkundungsstollens. . . . .	48
4.13	Schnitt B-B - Interaktion nach dem Ausbruch des Mittelstollens. . . . .	48
4.14	Schnitt B-B - Interaktion nach dem Ausbruch aller Bauwerke. . . . .	48
4.15	Schnitt B-B - Entwicklung der Normalkraft. . . . .	49
4.16	Schnitt F-F - Mittelstollen zentrisch. . . . .	50
4.17	Schnitt F-F - Entwicklung der plastischen Zone ohne Mittelstollen. . . . .	51
4.18	Schnitt F-F - Entwicklung der plastischen Zone mit Mittelstollen. . . . .	51
4.19	Schnitt F-F - Verschiebungsentwicklung. . . . .	52
4.20	Schnitt F-F - Spannungsentwicklung. . . . .	53
4.21	Schnitt F-F - Entwicklung der Normalkraft. . . . .	54
4.22	Schnitt F-F - Interaktion nach dem Ausbruch der Haupttunnel. . . . .	55
4.23	Schnitt F-F - Interaktion nach dem Ausbruch des Mittelstollens. . . . .	55
4.24	Schnitt F-F - Mittelstollen zentrisch ohne Störungszone. . . . .	56
4.25	Schnitt F-F - Entwicklung der plastischen Zone ohne Störungszone. . . . .	57
4.26	Schnitt F-F - Verschiebungsentwicklung ohne Störungszone. . . . .	57
4.27	Schnitt F-F - Spannungsentwicklung ohne Störungszone. . . . .	58
4.28	Schnitt F-F - Entwicklung der Normalkraft ohne Störungszone. . . . .	59
4.29	Abplatzungen der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens. . . . .	61
4.30	Gegenüberstellung der Verschiebungen bei MQ 6631. . . . .	62
4.31	MQ 6631 - Messpunkte des Erkundungsstollens. . . . .	62
4.32	MQ 6631 - Gemessene vertikale Verschiebungen. . . . .	63
4.33	Berechnete vertikale Verschiebungen. . . . .	63
4.34	MQ 6631 - Gemessene horizontale Verschiebungen. . . . .	64
4.35	Berechnete horizontale Verschiebungen. . . . .	64
5.1	LSC Elemente mit der zugehörigen Arbeitslinie. . . . .	66

---

## Tabellenverzeichnis

2.1	Bauwerke und Vortriebe der NHS-I. . . . .	5
2.2	Geltungsbereich der Bauwerke in der NHS-I. . . . .	5
2.3	Gebirgsarten im Bereich der NHS-I. . . . .	10
2.4	Prognostizierten Parameter der Gebirgsarten in der NHS-I. . . . .	14
2.5	Prognostizierten Parameter der Störungszone in der NHS-I. . . . .	14
2.6	Bauablauf der Haupttunnel und des Mittelstollens. . . . .	16
3.1	Parameteranpassung der Gebirgsart IQP-QP-1c. . . . .	24
3.2	Parameteranpassung der Störungszone ESI-f4158. . . . .	24
3.3	Äquivalente Tunnelradien. . . . .	29
3.4	Stützkraft und radiale Verschiebungen aus RS2. . . . .	30
3.5	Maximale plastische Radien aus RS2. . . . .	30
3.6	Ankereigenschaften. . . . .	33
3.7	Steifigkeits- und Festigkeitsparameter des Spritzbetons. . . . .	34

## Abkürzungen

AH	.....	Aufweitung Haupttunnel
AS	.....	Abluftquerstollen
BBT	.....	Brenner Basistunnel
EKS	.....	Erkundungsstollen
EKS-A	.....	Erkundungsstollen Ahrental
GA	.....	Gebirgsart
HT	.....	Haupttunnel
HT-O	.....	Haupttunnel-Ost
HT-W	.....	Haupttunnel-West
IQP	.....	Innsbrucker Quarzphyllit
Ka	.....	Kalotte
KZ	.....	Kernzone
MS	.....	Mittelstollen
MQ	.....	Messquerschnitt
NHS	.....	Nothhaltestelle
NHS-I	.....	Nothhaltestelle Innsbruck
RP	.....	Regelprofil
RH	.....	Regelprofil Haupttunnel
RM	.....	Regelprofil Mittelstollen
SZ	.....	Störungszone
St	.....	Strosse
So	.....	Sohle
TM	.....	Tunnelmeter
PK	.....	Projektkilometer



QP	.....	Quarzphyllit
QS	.....	Quarzitschiefer
VS	.....	Verbindungsstollen
VT	.....	Vortrieb
ZZ	.....	Zerrüttungszone

# Symbole

## Kleinbuchstaben

$c$	.....	Kohäsion [MPa]
$d$	.....	Durchmesser [mm]
$f_c$	.....	Druckfestigkeit [MPa]
$f_t$	.....	Zugfestigkeit [MPa]
$h_{\ddot{u}}$	.....	Überlagerungshöhe [m]
$k$	.....	Gebirgskonstante [–]
$p_0$	.....	In-situ Spannungen [MPa]
$p_i$	.....	Innerer Ausbaudruck [MPa]
$p_{kr}$	.....	Innerer kritischer Ausbaudruck [MPa]
$u_i$	.....	Radialverschiebung [m]
$u_{if}$	.....	Radialverschiebung an der Ortsbrust [m]
$u_{ip}$	.....	Plastische Radialverschiebung [m]
$u_{im}$	.....	Maximale Radialverschiebung [m]

## Großbuchstaben

$A$	.....	Querschnittsfläche [mm <sup>2</sup> ]
$D$	.....	Disturbance Faktor [–]
$E$	.....	Elastizitätsmodul [MPa]
$F$	.....	Normalkraft [kN]
$GSI$	.....	Geological Strength Index [–]
$K_0$	.....	Seitendruckbeiwert [–]
$L_{NHS}$	.....	Länge der Nothaltestelle [m]

---

$R_T$	.....	Tunnelradius [m]
$R_{T,\ddot{a}q}$	.....	Äquivalenter Tunnelradius [m]
$R_P$	.....	Plastischer Radius [m]
$R_{PM}$	.....	Maximaler plastischer Radius [m]
$X$	.....	Abstand zur Ortsbrust [m]

### Griechische Buchstaben

$\gamma$	.....	Wichte des Gesteins [kN/m <sup>3</sup> ]
$\varepsilon$	.....	Stauchung [-]
$\nu$	.....	Querdehnzahl [-]
$\sigma_v$	.....	Vertikale Primärspannung [MPa]
$\sigma_h$	.....	Horizontale Primärspannung [MPa]
$\sigma_n$	.....	Normalspannung [MPa]
$\sigma_1$	.....	Größte Hauptnormalspannung [MPa]
$\sigma_3$	.....	Kleinste Hauptnormalspannung [MPa]
$\sigma_c$	.....	Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]
$\tau_f$	.....	Scherfestigkeit [MPa]
$\varphi$	.....	Reibungswinkel [°]
$\psi$	.....	Dilatanzwinkel [°]

# 1 Einleitung

Zwischen Österreich und Italien entsteht die bisher längste unterirdische Eisenbahnverbindung der Welt - der Brenner Basistunnel. Eine Besonderheit des 64 km langen Tunnels stellen die drei Nothaltestellen (Innsbruck, St. Jodok und Trens) dar. Die sehr komplexen Bauwerke werden im Abstand von ca. 20 km errichtet und entsprechen höchsten Sicherheitsstandards. In Abbildung 1.1 ist der Lageplan einer Nothaltestelle dargestellt.

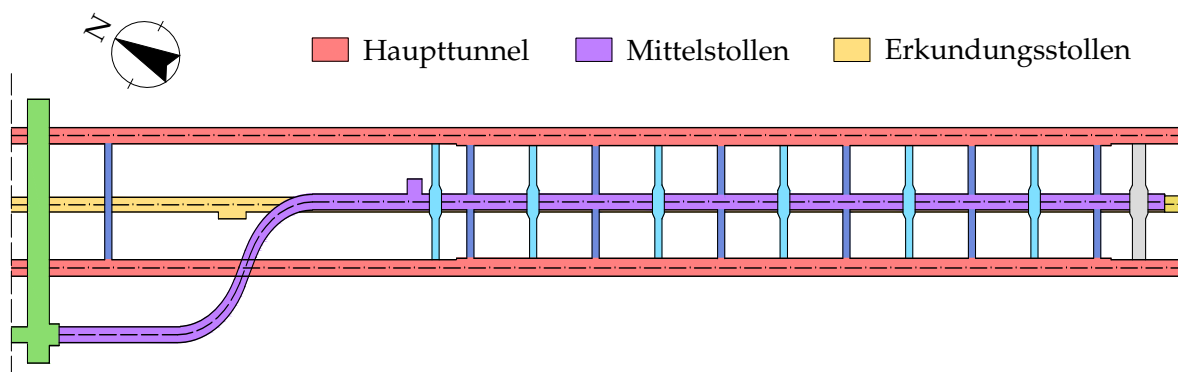


Abbildung 1.1: Lageplan einer Nothaltestelle.

Die Nothaltestellen des Brenner Basistunnels erfordern aufgrund ihrer sehr komplexen Bauweise eine ingenieurtechnische Hochleistung. Durch geringe Abstände zwischen den einzelnen Röhren kommt es zu einer gegenseitigen Beeinflussung. Insbesondere der Erkundungsstollen wird durch andere Tunnelvortriebe stark beansprucht. Aufgrund dieser Gegebenheiten ist es in der Bauphase der Nothaltestelle Innsbruck zu Schäden an der Spritzbetonschale gekommen. Lokale Rissbildungen sowie Abplatzungen im First- und Kämpferbereich des Erkundungsstollens sind dabei auf den Vortrieb des darüberliegenden Mittelstollens zurückzuführen.

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der Nothaltestelle Innsbruck. Aufgrund der zuvor genannten Problematik wird die gegenseitige Beeinflussung von Tunnel und Stollen genauer untersucht. Dafür wird eine zweidimensionale numerische Simulation mit dem Finite-Elemente-Programm RS2 von Rocscience<sup>1</sup> durchgeführt.

Zu Beginn wird allgemein auf die Nothaltestelle Innsbruck eingegangen. Neben den geometrischen Eigenschaften der einzelnen Bauwerke werden die geologischen, geotechnischen sowie bautechnischen Bedingungen der Nothaltestelle Innsbruck erläutert. Im Anschluss wird auf den Kern der Arbeit - die numerische Simulation - eingegangen. Dabei wird zunächst die Vorgehensweise der Simulation mit dem Programm RS2 beschrieben und im Anschluss werden die Ergebnisse dargestellt. Hierbei wird in erster Linie der Einfluss auf den Erkundungsstollen analysiert.

---

<sup>1</sup><https://www.rocscience.com/>

## 2 Projektbeschreibung

Das folgende Kapitel liefert einen kurzen Einblick in das Jahrhundertprojekt des Brenner Basistunnels. Auf das Kernstück der vorliegenden Arbeit, die Nothaltestelle Innsbruck, wird im Anschluss genauer eingegangen.

### 2.1 Brenner Basistunnel

Der Brenner Basistunnel (BBT) ist ein unterirdischer Eisenbahntunnel, welcher Österreich mit Italien verbinden soll. Die Verbindung der beiden Länder über dem Brennerpass stellt seit jeher eine der bedeutendsten Nord-Süd-Verkehrsrouten Europas dar. Der BBT, welcher sich derzeit in der Bauphase befindet, verläuft von Innsbruck (Österreich) bis nach Franzensfeste (Italien) und unterquert den Brennerpass. Zusammen mit der bereits bestehenden Eisenbahnumfahrung Innsbruck erreicht er eine Gesamtlänge von 64 km. Mit seiner Fertigstellung wird der BBT zur längsten unterirdischen Eisenbahnverbindung der Welt gehören (BBT-SE, 2016a).

In Abbildung 2.1 ist das Tunnelsystem des Brenner Basistunnels grafisch dargestellt. Es besteht aus einem Erkundungsstollen, zwei Haupttunneln, zwei Verbindungstunneln, drei Nothaltestellen, vier Zufahrtstunneln und der bereits bestehenden Eisenbahnumfahrung Innsbruck. Die beiden Haupttunnel werden aus Sicherheitsgründen ca. alle 330 m mit Querschlägen miteinander verbunden. Parallel und unter den Haupttunneln befindet sich der durchgehende Erkundungsstollen. Der Stollen dient dazu, Aufschluss über die geologischen Verhältnisse zu geben. Die neu gewonnenen Informationen werden genutzt, um zukünftige Baumaßnahmen effizienter zu gestalten und falls möglich, Zeit und Kosten einzusparen (BBT-SE, 2016a).

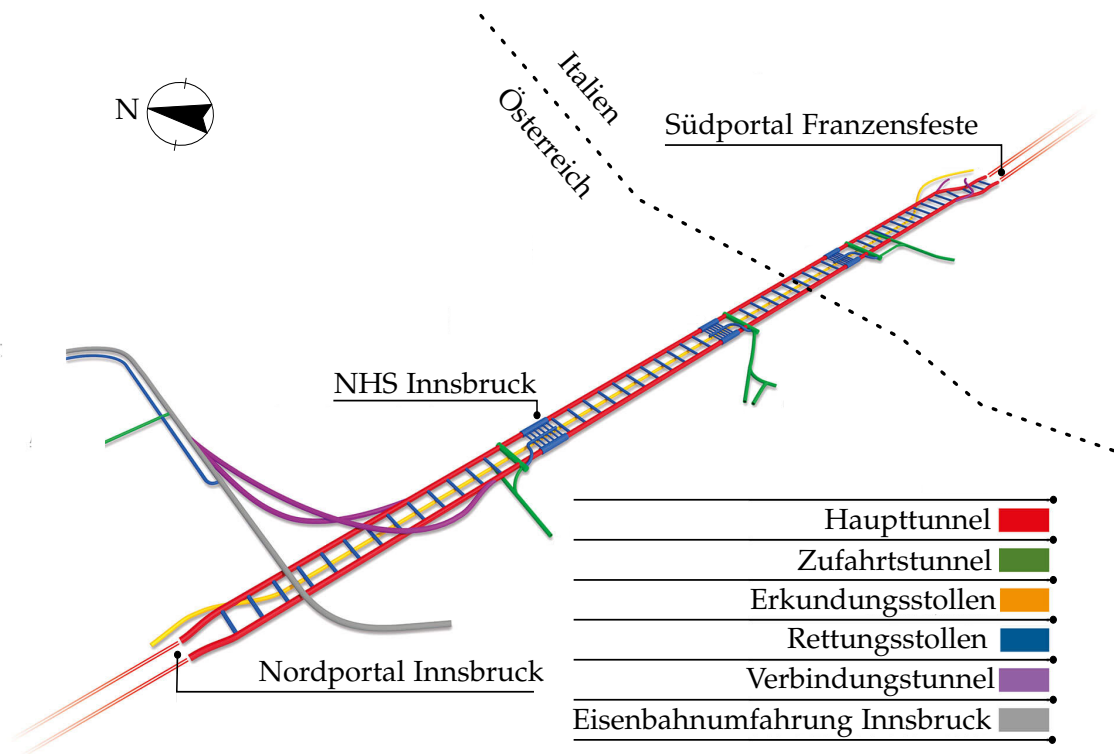


Abbildung 2.1: Grafische Darstellung des Tunnelsystems (Eckbauer et al., 2014).

## 2.2 Nothaltestelle Innsbruck

Im folgenden Kapitel wird die Nothaltestelle Innsbruck (NHS-I) genauer erläutert. Beschrieben werden die geometrischen Eigenschaften, die geologischen Verhältnisse und die Bauabläufe der NHS-I.

### 2.2.1 Bauwerke und Vortriebe

Der Bereich der NHS-I beginnt an der Querkaverne im Norden und reicht bis zum Ende des Mittelstollens im Süden. Um die Baustellendokumentation zu vereinfachen, wurde den einzelnen Bauwerken eine Vortriebsnummer zugeordnet. In Tabelle 2.1 sind alle Bauwerke mit den entsprechenden Vortriebsnummern der NHS-I aufgelistet. Im weiteren Verlauf der vorliegenden Masterarbeit werden beide Bezeichnungen verwendet.

Tabelle 2.1: Bauwerke und Vortriebe der NHS-I.

Bauwerk	Vortriebsnummer
Querkaverne	VT 3.2
Entlastungsstollen	VT 5.3
Haupttunnel-Ost	VT 5.4
Haupttunnel-West	VT 5.5
Mittelstollen	VT 5.1
Erkundungsstollen	VT 2.1
Verbindungsstollen	VT 5.7 VS1-VS6
Abluftquerstollen	VT 5.2 AS1-AS6

Um den Bereich der NHS-I einzugrenzen, sind in Tabelle 2.2 die Anfangs- und Endkoordinaten (Projektkilometer PK und Tunnelmeter TM) der beiden Haupttunnel, des Mittelstollens und des Erkundungsstollens aufgelistet. Auf die Kilometrierung der Verbindungsstollen, der Abluftquerstollen, der Querkaverne und des Entlastungsstollens wurde aufgrund der geringen Länge verzichtet.

Tabelle 2.2: Geltungsbereich der Bauwerke in der NHS-I.

Bauwerk	Vortrieb	Projektkilometer PK		Tunnelmeter TM		Länge [m]
		von	bis	von	bis	
Haupttunnel-Ost	VT 5.4	5+990,0	6+800,0	8,5	820	810
Haupttunnel-West	VT 5.5	6+17,0	6+827,0	8,5	820	810
Mittelstollen	VT 5.1	0+15,0	0+855,0	15	855	840
Erkundungsstollen	VT 2.1	5+972,0	6+782,0	3871	4681	810

### 2.2.2 Geometrie

Im nachfolgenden Kapitel wird die NHS-I graphisch dargestellt. Zusätzlich werden die Regelprofile und die Trassierung der relevanten Bauwerke beschrieben.



### 2.2.2.1 Übersichtsplan

Abbildung 2.2 zeigt einen Übersichtsplan der NHS-I mit allen zugehörigen Bauwerken inklusive Kilometrierung des Haupttunnels-Ost (HT-O), Haupttunnels-West (HT-W) und Mittelstollens (MS).

Der Bereich der NHS-I erstreckt sich über eine Länge von 810 m. Die NHS ( $L_{NHS}$ ), bezogen auf die beiden Haupttunnel, ist 470 m lang. In diesem Abschnitt werden die beiden Haupttunnel mit einem aufgeweiteten Querschnitt vorgetrieben, sowie abwechselnd - alle 45 m - mit Verbindungsstollen und Abluftquerstollen verbunden (BBT-SE, 2016b).

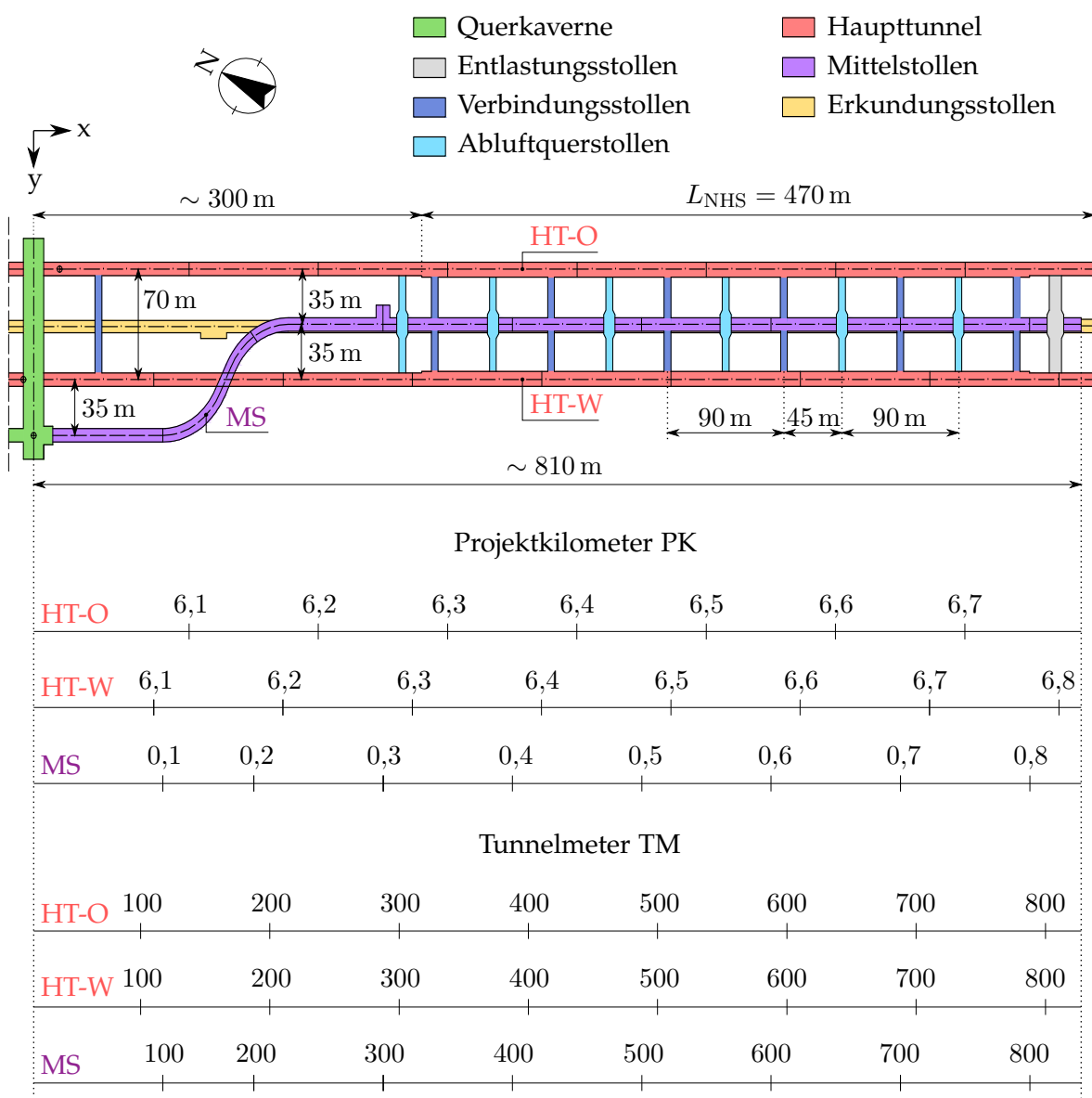


Abbildung 2.2: Übersichtsplan der NHS-I.

### 2.2.2.2 Trassierung und Regelprofile

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Regelprofile (RP) und die geometrischen Eigenschaften der beiden Haupttunnel, des Mittelstollens und des Erkundungsstollens (in x-Richtung vorgetrieben) der NHS-I erläutert. In der vorliegenden Arbeit werden die Verbindungsstollen, die Abluftquerstollen, die Querkaverne und der Entlastungsstollen (in y-Richtung vorgetrieben) nicht berücksichtigt.

#### *Haupttunnel-Ost und Haupttunnel-West:*

Der Haupttunnel-Ost startet von der Querkaverne geradlinig Richtung Süden mit einer konstanten Steigung von 0,67%. Nach 300 m mit dem kleineren Regelprofil RH, ändert sich der Querschnitt für 470 m ( $= L_{NHS}$ ) auf das größere Regelprofil AH, bevor wieder das Regelprofil RH aufgefahren wird.

Der Haupttunnel-West startet von der Querkaverne Richtung Süden mit einem konstanten Achsabstand von 70 m westlich von Haupttunnel-Ost. Die Steigung, sowie die Art und Änderung der Regelprofile sind mit dem des Haupttunnels-Ost ident.

In den Abbildungen 2.3 und 2.4 sind die Regelprofile RH und AH der beiden Haupttunnel dargestellt. Die Querschnitte sind in drei Ausbruchfolgen Kalotte, Strosse und Sohle unterteilt und werden auch dementsprechend aufgefahren.

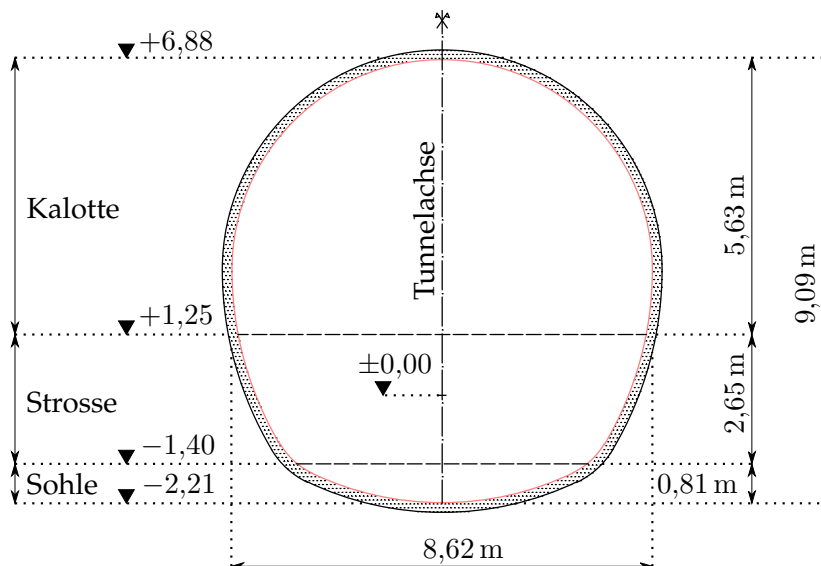


Abbildung 2.3: Regelprofil RP-HT-RH der Haupttunnel.

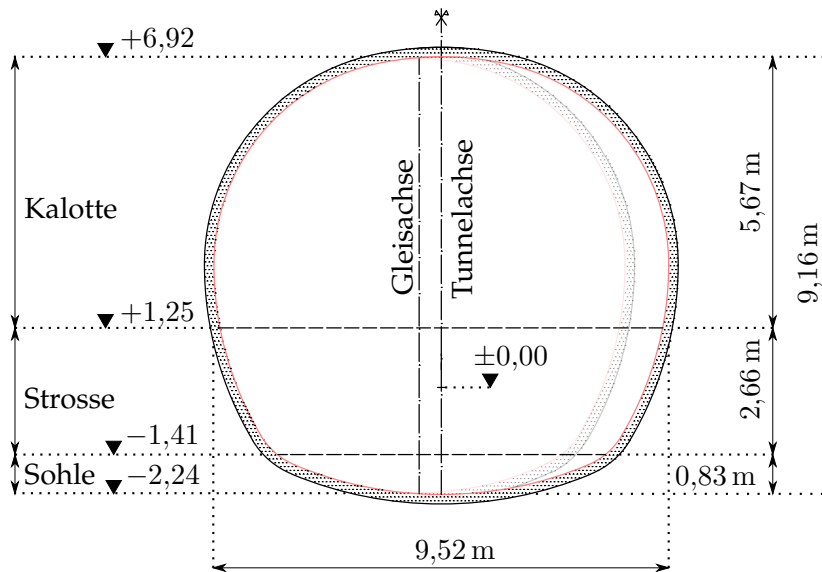


Abbildung 2.4: Regelprofil RP-HT-AH der Haupttunnel.

**Erkundungsstollen:**

Der von Innsbruck bis Franzensfeste durchgehende Erkundungsstollen wird - wie die beiden Haupttunnel - mit einer Steigung von 0,67 % Richtung Süden vorgetrieben und verläuft parallel zu den Haupttunneln. Mit einem konstanten Achsabstand von je 35 m bewegt er sich mittig und knapp 12 m unter den beiden Haupttunneln fort. In Abbildung 2.5 ist das Regelprofil RP-EKS-A des Erkundungsstollens dargestellt. Der etwas kleinere Querschnitt führt zu einem zeitgleichen Ausbruch von Kalotte und Strosse.

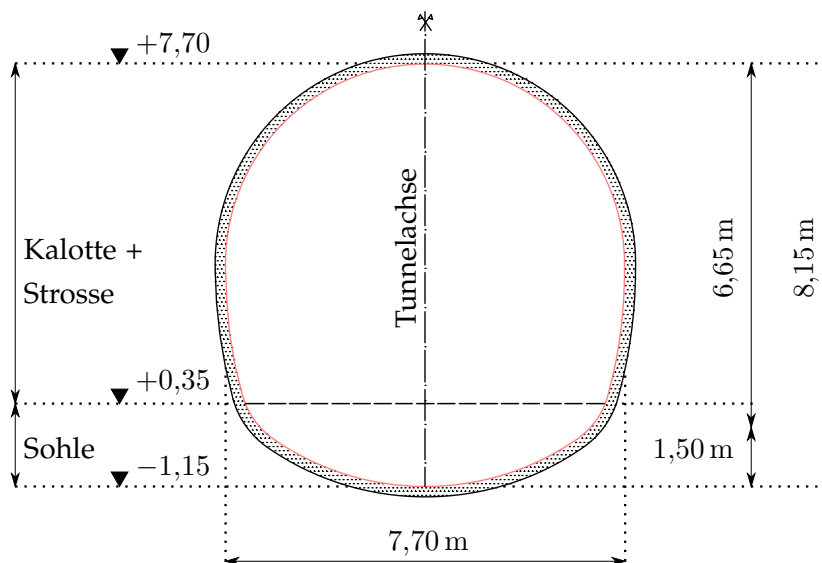


Abbildung 2.5: Regelprofil RP-EKS-A des Erkundungsstollens.

**Mittelstollen:**

Der Bau des Mittelstollens beginnt bei der Querkaverne mit einem Achsabstand von 35 m und parallel zum Haupttunnel-West. Der Mittelstollen verläuft dann Richtung Süden mit einer konstanten Steigung von 12,0% für 75 m. Es folgt eine Ostkurve mit einer Steigung von 4,56%. Nach weiteren 75 m befindet sich der Mittelstollen genau über dem Haupttunnel-West mit einer Bergfeste von 2,54 m. Nach der Überführung des Haupttunnels-West erreicht der Mittelstollen seinen Hochpunkt. Nach einer Südkurve, erneuten 75 m und einem Gefälle von 4,0%, befindet sich der Mittelstollen parallel und genau über dem Erkundungsstollen. Die Bergfeste an dieser Stelle beträgt 9,0 m. Von hier nähert sich der Mittelstollen dem Erkundungsstollen langsam an. Nach 50 m mit 11,9% und weiteren 40 m mit 3,5% Gefälle befindet sich der Mittelstollen mit der geringsten Bergfeste von 3,66 m über dem Erkundungsstollen. Die letzten 470 m verläuft der Mittelstollen mit gleicher Steigung - mit 0,67% - wie der Erkundungsstollen und die beiden Haupttunnel. Somit bleibt die geringe Bergfeste von 3,66 m über den letzten Streckenabschnitt erhalten. In Abbildung 2.6 ist das Regelprofil RP-NH-RM des Mittelstollens dargestellt. Auch beim Mittelstollen ist der Querschnitt, wie bei den Haupttunneln, in drei Abschnitte bzw. Ausbruchsfolgen (Kalotte, Strosse und Sohle) unterteilt.

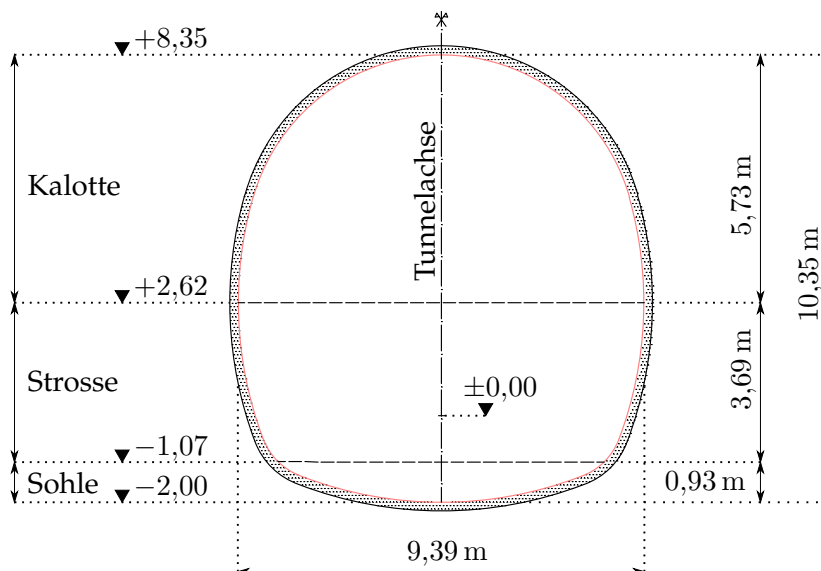


Abbildung 2.6: Regelprofil RP-NH-RM des Mittelstollens.

### 2.2.3 Geologie

Der BBT durchörtert auf seinem Weg von Innsbruck bis Franzensfeste alle tektonischen Großeinheiten der Alpen sowie zahlreiche Störungssysteme. Der für die vorliegende Masterarbeit zentrale Bereich der NHS-I liegt dabei zur Gänze in der tektonischen Einheit des Ostalpin, dem Innsbrucker Quarzphyllit (Brandner et al., 2008).

Im folgenden Kapitel werden die Gebirgsarten der NHS-I genauer erläutert. Daraufhin folgt die Beschreibung einer Störungszone, welche durch die NHS-I streicht. Die geomechanischen Parameter aller geologischen Einheiten, welche für die numerische Simulation benötigt werden, sind ebenfalls angegeben.

#### 2.2.3.1 Gebirgsarten

Lithologisch betrachtet besteht der Innsbrucker Quarzphyllit vorwiegend aus Quarzphylliten, Glimmerschiefern und Quarziten mit kleineren Anteilen von Orthogneisen, Marmor, Grünschiefern und Graphitphylliten (Reinhold & Töchterle, 2013). Der Bereich der NHS-I setzt sich dabei aus vier unterschiedlichen Gebirgsarten des Innsbrucker Quarzphyllites zusammen, welche in Tabelle 2.3 aufgelistet sind.

Tabelle 2.3: Gebirgsarten im Bereich der NHS-I (Reinhold, 2013).

Gebirgsart	Tektonik	Lithologie	Homogenbereich
IQP-QP-1c	Innsbrucker Quarzphyllit	Quarzphyllit	1c
IQP-QS-1c	Innsbrucker Quarzphyllit	Quarzit-schiefer	1c
IQP-QP-1d	Innsbrucker Quarzphyllit	Quarzphyllit	1d
IQP-QS-1d	Innsbrucker Quarzphyllit	Quarzit-schiefer	1d

Die Gebirgsarten IQP-QP-1c/1d werden durch ihre Lithologie Quarzphyllit (QP) charakterisiert. Quarzphyllit ist ein metamorphes Gestein mit den Hauptbestandteilen Quarz, Glimmer und Chlorid. Die Gebirgsarten IQP-QS-1c/1d werden durch ihre Lithologie Quarzitschiefer (QS) charakterisiert. Das ebenfalls metamorphe Gestein besteht hauptsächlich aus den Mineralien Quarz und Glimmer.

Im Vergleich zu den Gebirgsarten IQP-QS-1c/1d weisen die Gebirgsarten IQP-QP-1c/1d geringere Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften auf. Mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 5 % sind die Gebirgsarten IQP-QS-1c/1d den Gebirgsarten IQP-QP-1c/1d je-

doch deutlich untergeordnet.

Die Homogenbereiche 1c und 1d unterscheiden sich im Abschnitt der NHS-I vor allem durch die Orientierung der Schieferung. Während im Bereich 1c die Schieferung mit  $0^\circ$  bis  $30^\circ$  sehr flach einfällt, ist diese im Homogenbereich 1d mit  $40^\circ$  bis  $70^\circ$  wesentlich steiler. Der Homogenbereich 1c, der die Gebirgsarten IQP-QP-1c und IQP-QS-1c beinhaltet, ist die ersten 600 m der NHS-I vorzufinden. Die restlichen 210 m ist Homogenbereich 1d mit den Gebirgsarten IQP-QP-1d und IQP-Qs-1d maßgebend.

In Abbildung 2.7 ist die Verteilung aller vier Gebirgsarten grafisch dargestellt.

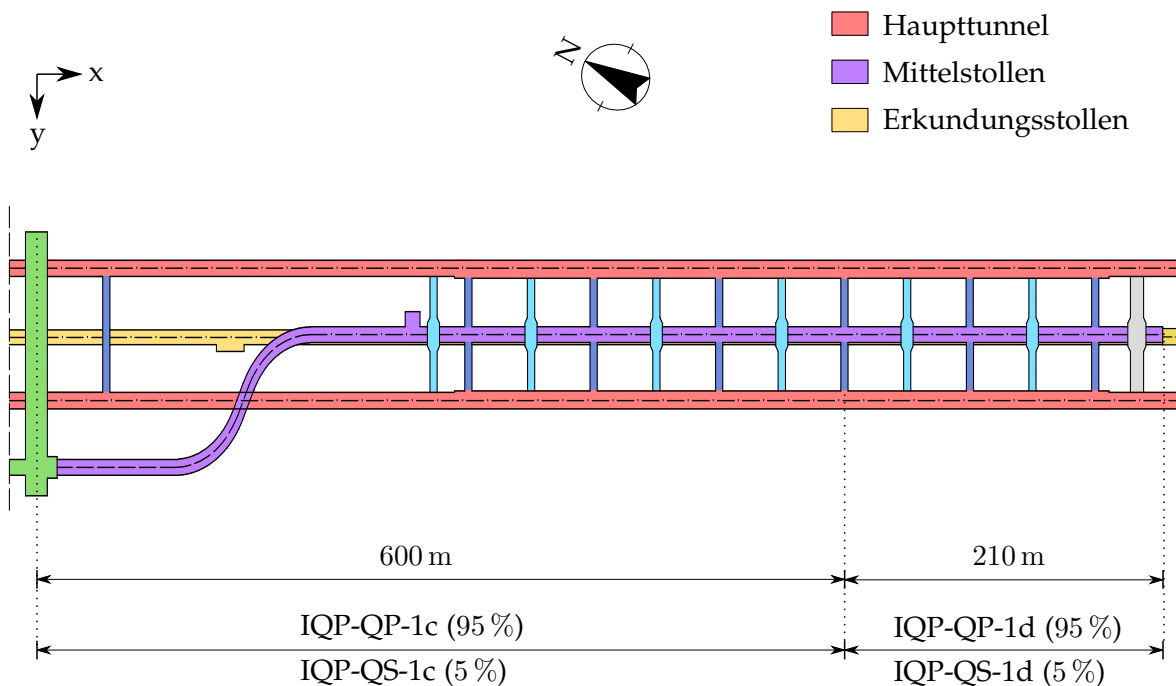


Abbildung 2.7: Verteilung der Gebirgsarten.

### 2.2.3.2 Störungszone

Beim Auffahren des Erkundungsstollens im Bereich der NHS-I wurden mehrere diskrete Störungszone lokalisiert, wobei nur eine Störungszone (ESI-f4158) als geotechnisch relevant eingestuft ist. Die restlichen durchörterten Störungszone hatten keinen Einfluss auf das Gebirgsverhalten im Vergleich zum umlagernden Gebirge.

Die Störungszone ESI-f4158 wurde beim Vorantreiben des Erkundungsstollens von PK 6+240 bis PK 6+320 durchörtert (s. Abbildung 2.9 auf S. 13). Abbildung 2.8 zeigt beispielhaft eine Aufnahme der Ortsbrust bei PK 6+255. Die mittelsteil bis steil (Einfallswinkel

zwischen  $45^\circ$  und  $70^\circ$ ) westfallende Störungszone wanderte mit fortschreitendem Vortrieb von der linken Ulme nach rechts durch den Querschnitt (Reinhold, 2013). Zum Zeitpunkt der Ortsbrustaufnahme lag die Störungszone mittig im Querschnitt des Erkundungsstolens.

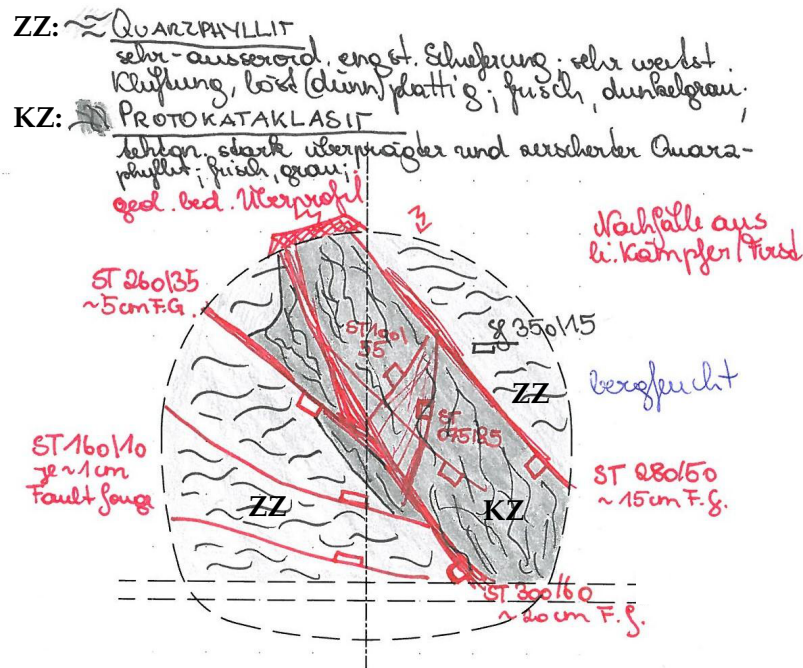


Abbildung 2.8: Ortsbrustdokumentation der Störungszone ESI-f4158 (Reinhold, 2013).

Der Aufbau der Störungszone kann in eine Kernzone (KZ) mit beidseitig angrenzender Zerrüttungszone (ZZ) gegliedert werden.

Die 5,5 m mächtige Kernzone besteht aus entfestigtem sowie geschiefertem Protokataklasit<sup>2</sup> sowie mehreren geringmächtigen Scherbahnen, welche mit fault gouge<sup>3</sup> gefüllt sind. Die 11,5 m mächtige, beidseitige Zerrüttungszone (10,5 m im liegenden und 1,5 m im hängenden Bereich) ist durch ein Gebirge mit erhöhter Trennflächendichte sowie geringmächtigen Scherbahnen aus Protokataklasit und fault gouge gekennzeichnet.

Die Störungszone weist eine Gesamtmächtigkeit von 17 m auf. Durch das subparallele An-

<sup>2</sup>Entfestigter und geschieferter Protokataklasit: Stellt ein sprödetektonisch mäßig bis stark durchbewegtes Gestein dar. Es ist geprägt durch engständige Schieferungs- und Scherflächen mit einer dominanten Vorzugsorientierung bei stark streuenden Orientierungswerten der einzelnen Flächen. Festigkeit in Form von einer Restfestigkeit. Das Materialverhalten ist als anisotrop eingestuft (Reinhold, 2013).

<sup>3</sup>Fault gouge: Stellt ein bindig-kohäsives Gesteinszerreibsel im Feinkornbereich dar. Die Kohäsion ist primär durch seine intergranulare Haftung im Feinkornbereich gegeben. Im Projektraum häufig geschiefert anzutreffen. Das Materialverhalten ist als isotrop eingestuft (Reinhold, 2013).

schneiden der beiden Haupttunnel und des Mittelstollens wird die Verschnittlänge bzw. die beeinflusste Länge der Störungszone jedoch deutlich größer.

Das Gebirgsverhalten im Erkundungsstollen wird als druckhaft beschrieben. Ein stark asymmetrisches Verformungsverhalten führte zu maximalen Verschiebungsbeträgen von ca. 16 cm mit kriechender Tendenz (Reinhold, 2013).

Folgende Bauwerke liegen im Bereich der Störungszone:

- Haupttunnel-Ost ca. bei PK 6+220,0
- Haupttunnel-West ca. bei PK 6+380,0
- Mittelstollen ca. bei PK 0+335,0

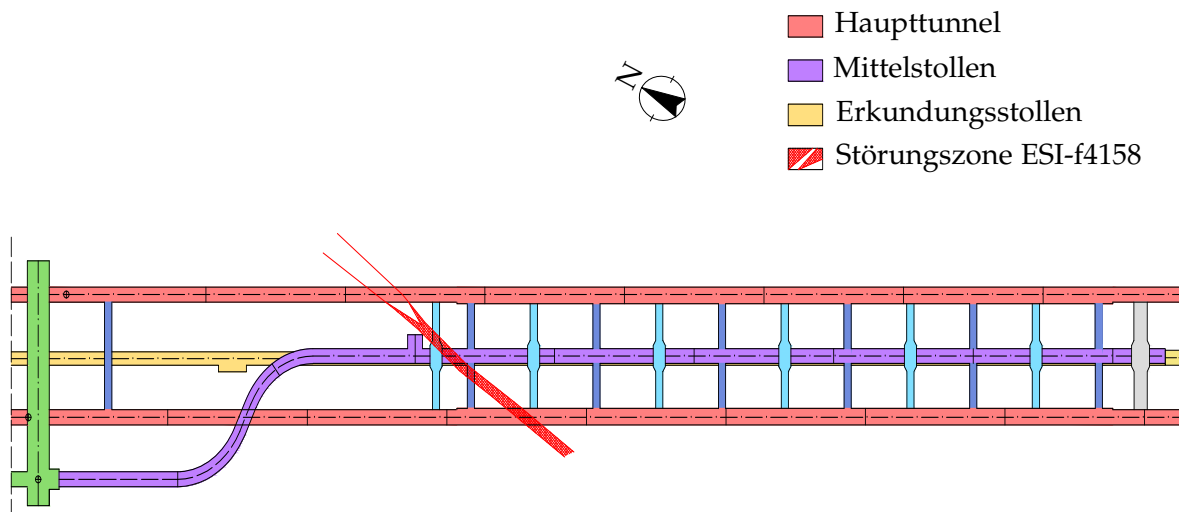


Abbildung 2.9: Lage der Störungszone ESI-f4158.

### 2.2.3.3 Geomechanische Parameter

In den nachfolgenden Tabellen 2.4 und 2.5 sind die prognostizierten Parameter der Gebirgsarten und die Parameter der Störungszone ESI-f4158 aufgelistet.



Tabelle 2.4: Prognostizierten Parameter der Gebirgsarten in der NHS-I (Reinhold, 2013).

Parameter	Homogenbereich 1c		Homogenbereich 1d	
	IQP-QP-1c	IQP-QS-1c	IQP-QP-1d	IQP-QS-1d
$h_{\ddot{u}}$ [m]	535-840		840-895	
$D$ [-]	0	0	0	0
$GSI$ [-]	40-50	45-55	40-50	45-55
$E$ [MPa]	6000	10 000	6000	10 000
$c$ [MPa]	1,3-1,8	1,7-2,3	1,8	2,3
$\varphi$ [°]	28-32	34-38	28	34
$\psi$ [°]	0	0	0	0
$\nu$ [-]	0,21	0,18	0,21	0,18

Tabelle 2.5: Prognostizierten Parameter der Störungszone in der NHS-I (Reinhold, 2013).

SZ-ESI-f4158		
Parameter	Zerrüttungszone	Kernzone
$h_{\ddot{u}}$ [m]	650-700	
$D$ [-]	0,50	–
$GSI$ [-]	30-35	–
$E$ [MPa]	1000	600
$c$ [MPa]	0,50	0,30
$\varphi$ [°]	28	26
$\psi$ [°]	0	0
$\nu$ [-]	0,25	0,30

mit:

$h_{\ddot{u}}$	.....	Überlagerung
$D$	.....	Disturbance Faktor
$GSI$	.....	Geological Strength Index
$E$	.....	Elastizitätsmodul
$c$	.....	Kohäsion
$\varphi$	.....	Reibungswinkel
$\psi$	.....	Dilatanzwinkel
$\nu$	.....	Querdehnzahl

### 2.2.4 Bauablauf

Im folgenden Kapitel wird der Bauablauf, d.h. die Ausbruchsreihenfolge der Bauwerke Erkundungsstollen, Haupttunnel-Ost, Haupttunnel-West und Mittelstollen, erläutert.

Zu Beginn des Projektes wurde der Abschnitt des Erkundungsstollens im Bereich der NHS-I ausgebrochen. Dieser wurde im Jahr 2013 fertiggestellt.

Seit 2015 läuft der Ausbruch der restlichen Bauwerke der NHS-I. Dabei wurde zuerst der Haupttunnel-West berücksichtigt, von welchem zunächst die Kalotte rund 30 m vorgetrieben wurde. Im Anschluss wurde die Strosse - bis kurz davor - nachgezogen. Dasselbe Ausbruchsschema wurde zuerst beim Mittelstollen und dann beim Haupttunnel-Ost wiederholt.

Nach Ausbruch des Haupttunnels-Ost wurde der Kalottenvortrieb des Mittelstollens bis TM 240 fortgesetzt. Hier befindet sich der Mittelstollen direkt über dem Erkundungsstollen. Anschließend wurde die Strosse bis zu TM 198 nachgezogen. Als Verstärkung für die spätere Unterfahrung des Haupttunnels-West wurde in einem zweiten Schritt die Sohle mit Ring- und Sohlschluss (TM 192,5 bis TM 135) rückschreitend ausgebrochen. Nach diesen Arbeiten wurde der Vortrieb des Mittelstollens vorläufig eingestellt und mit dem Ausbruch des Haupttunnels-Ost fortgefahren. Dabei wurde zuerst die Kalotte ausgebrochen und abschnittsweise die Strosse immer wieder nachgezogen. Nach den Arbeiten am Kalotten- und Strossenvortrieb wurde die Sohle rückschreitend ausgebrochen. Mit dem Abschluss des Vortriebs wurde dasselbe Ausbruchskonzept für den Haupttunnel-West angewendet.

In Tabelle 2.6 ist der Bauablauf der beiden Haupttunnel und des Mittelstollens in chronologischer Reihenfolge aufgelistet. Dieser Bauablauf entspricht jenem Plan, welcher seit Mai 2017 aktuell ist. Demnach sind die beiden Haupttunnel vollständig (d.h. Kalotte, Strosse und Sohle) ausgebrochen. Die Kalotte des Mittelstollens steht bei TM 240 (Ziel ist TM 840). Ein großer Teil des Mittelstollens ist somit noch auszubrechen. Darunter fallen auch die Annäherung an den Erkundungsstollen und die gleichzeitige Durchörterung der Störungszone.

Tabelle 2.6: Bauablauf der Haupttunnel und des Mittelstollens.

Bauwerk	VT	Teilquerschnitt	Tunnelmeter		Fertigstellung [%]
			von	bis	
Haupttunnel-West	VT 5.5	Kalotte	8,5	39,0	4,8
Haupttunnel-West	VT 5.5	Strosse	6,5	34,9	4,1
Mittelstollen	VT 5.1	Kalotte	15,0	45,0	5,4
Mittelstollen	VT 5.1	Strosse	15,0	40,0	4,8
Haupttunnel-Ost	VT 5.4	Kalotte	8,5	36,0	4,4
Haupttunnel-Ost	VT 5.4	Strosse	8,5	34,5	4,2
Mittelstollen	VT 5.1	Kalotte	45,0	240,0	28,6
Mittelstollen	VT 5.1	Strosse	40,0	198,0	23,6
Mittelstollen	VT 5.1	Sohle	192,5	135,0	6,9
Haupttunnel-Ost	VT 5.4	Kalotte	36,0	820,0	100
Haupttunnel-Ost	VT 5.4	Strosse	34,5	820,0	100
Haupttunnel-Ost	VT 5.4	Sohle	8,5	820,0	100
Haupttunnel-West	VT 5.5	Kalotte	39,0	820,0	100
Haupttunnel-West	VT 5.5	Strosse	34,0	820,0	100
Haupttunnel-West	VT 5.5	Sohle	8,5	820,0	100

## 2.3 Erläuterung der Problemstellung

Im folgenden Kapitel wird auf die Problemstellung der vorliegenden Masterarbeit eingegangen. Dabei werden zunächst Beobachtungen, welche in der Vergangenheit erfasst wurden, aufgezeigt. Diese Erkenntnisse können in der weiterer Folge mit dem noch ausstehenden Bauprozess der NHS-I - der Annäherung des Mittelstollens an den Erkundungsstollen - in Verbindung gebracht werden.

### 2.3.1 Bisherige Erkenntnisse

Am BBT haben Fahrten von Tunnel über Stollen sehr häufig zu Schäden an der Spritzbetonschale des zu überfahrenden Vortriebs geführt. Diese Schäden waren als Risse und

Abplatzungen in der Spritzbetonschale ersichtlich, obwohl die gemessenen Verschiebungen an der Tunnellaibung nur gering ausgefallen sind. Dabei wurden Hebungen in der Firste und horizontale Konvergenzen der beiden Ulmen beobachtet. Dieser Schadensprozess konnte durch die Verringerung der Auflast bei gleichbleibenden horizontalen Lasten erklärt werden (Holzleitner & Lanbach, 2015).

### **2.3.2 Vorhersehbare Probleme an der Nothaltestelle Innsbruck**

Die NHS-I zeigte bereits erste Ansätze eines vergleichbaren, zuvor beschriebenen, Gebirgsverhaltens. Bei TM 240 des Mittelstollens ist es im Bereich des darunterliegenden Erkundungsstollens bereits zu lokalen Rissen und Abplatzungen gekommen. Die Bergfeste - gemessen von der Kalottenbasis des Mittelstollens bis zur Firste des Erkundungsstollens - beträgt an diesem Punkt in etwa 13 m. In der weiteren Folge nähert sich der Mittelstollen bis zu einer minimalen Bergfeste von 3,6 m dem Erkundungsstollen an (minimale Bergfeste gemessen von der Sohle des Mittelstollens bis zur Firste des Erkundungsstollens). Bei der Annäherung muss der Mittelstollen zudem noch die Störungszone ESI-f4158 durchfahren. Der noch ausstehende Bauprozess der NHS-I stellt somit eine Herausforderung dar. Aufgrund der ersten Schadensbilder wurde der Erkundungsstollen bereits mit einem Steinschlagnetz gesichert. Da der Erkundungsstollen als Ver- und Entsorgungsstollen für die Tunnelbohrmaschine erforderlich ist und somit viel befahren wird, stellt er weiters eine Gefahr für Mensch und Maschine dar. Um weitere Schäden und eventuell verbundene Baustillstände der Tunnelbohrmaschine zu vermeiden, wurde der Vortrieb des Mittelstollens vorerst eingestellt und andere Vortriebe vorgezogen.

## 3 Numerische Simulation

Um den Einfluss der beiden Haupttunnel und des Mittelstollens auf den Erkundungsstollen zu erfassen, wird eine zweidimensionale numerische Berechnung mit dem Finite-Elemente-Programm RS2 von Rocscience durchgeführt. Das folgende Kapitel beschreibt die Umsetzung der Simulation.

### 3.1 Allgemein

Abbildung 3.1 zeigt einen Übersichtsplan der NHS-I. Neben einer exzentrischen Lage des Mittelstollens (Schnitt A-A) wird auch eine zentrische Lage des Mittelstollens (Schnitt B-B bis Schnitt G-G) simuliert. Die zentrische Lage des Mittelstollens stellt die vertikale Annäherung des Mittelstollens an den Erkundungsstollen dar.

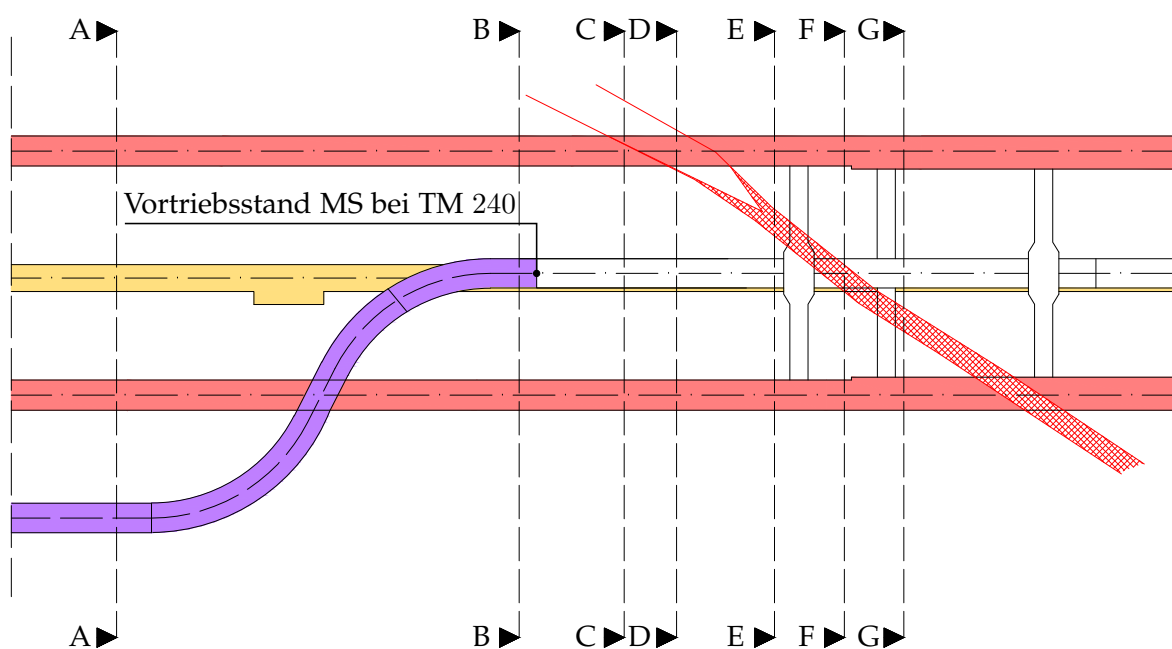


Abbildung 3.1: Bereich der NHS-I in der numerischen Simulation.

Der Bereich der NHS-I befindet sich zur Gänze im Innsbrucker Quarzphyllit mit der dominanten Gebirgsart IQP-QP-1c. Die Überlagerung in diesem Bereich liegt zwischen 600 m (Schnitt A-A) und 700 m (Schnitt G-G).

Die Annäherung des Mittelstollens an den Erkundungsstollen beginnt bei Schnitt B-B mit einer Bergfeste von 8,1 m. Die minimale Bergfeste von 3,6 m ist bei Schnitt F-F erreicht. In Abbildung 3.2 ist beispielhaft Schnitt F-F im Programm RS2 dargestellt. Die dargestellte Störungszone ESI-f4158 ist dabei über die gesamte Ortsbrust des Erkundungsstollens ersichtlich und streicht teilweise durch den darüberliegenden Mittelstollen. Zur Darstellung der diskreten Störungszone wurde für jeden Schnitt der numerischen Berechnungen ein Einfallswinkel von  $60^\circ$  gegen die Horizontale gewählt.

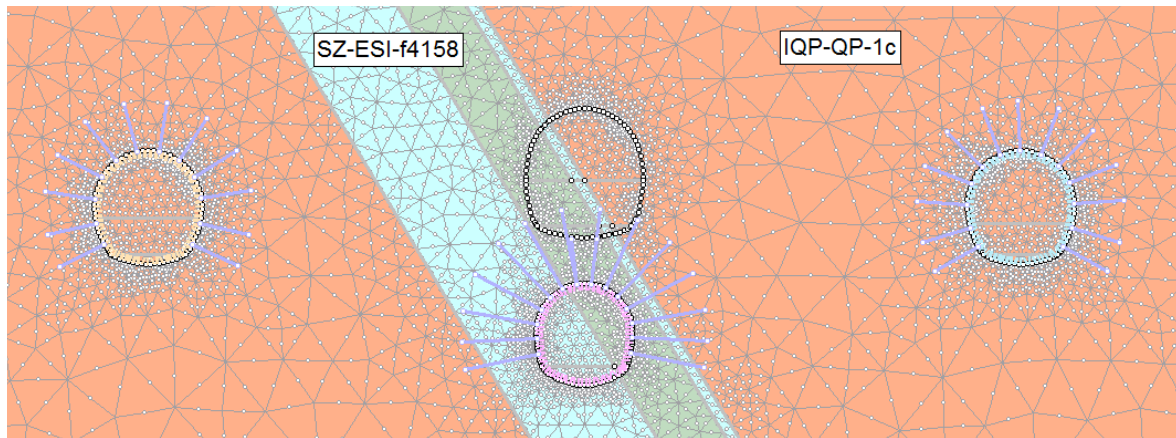


Abbildung 3.2: Schnitt F-F in RS2.

## 3.2 Programmeinstellungen

Das folgende Kapitel beschreibt spezifische Einstellungen des Programms RS2 um die numerische Simulation durchzuführen.

### 3.2.1 Primärer Spannungszustand

Der Spannungszustand wird als konstant über das ganze Modell betrachtet. Diese Annahme kann getroffen werden, da die NHS-I mit einer Überlagerungshöhe von 600 m bis 700 m als tiefliegender Tunnelkomplex angesehen wird.

Die Primärspannungen  $\sigma_v$  und  $\sigma_h$  werden nach Formel 3.1 und 3.2 bestimmt:

$$\sigma_v = \gamma * h_{\ddot{u}} \quad (3.1)$$

$$\sigma_h = \sigma_v * K_0 \quad (3.2)$$

<u>mit:</u>	$\sigma_v$	[MPa]	Vertikale Primärspannung
	$\sigma_h$	[MPa]	Horizontale Primärspannung
	$\gamma$	[kN/m <sup>3</sup> ]	Wichte des Gebirges
	$h_{\ddot{u}}$	[m]	Überlagerungshöhe
	$K_0$	[-]	Seitendruckbeiwert

Der Seitendruckbeiwert wird in allen Berechnungen mit  $K_0 = 1$  angenommen. Bei einer Gebirgswichte von 27 kN/m<sup>3</sup> und Überlagerungshöhen zwischen 600 m und 700 m variieren die Primärspannungen von  $\sigma_v = \sigma_h = 16,2$  MPa – 18,9 MPa, je nach dargestelltem Schnitt.

### 3.2.2 Randbedingungen

Um den tiefliegenden Baukomplex zu simulieren, muss die NHS-I zunächst zu einem Berechnungsquerschnitt begrenzt werden. Dabei wird die Größe der Umgrenzung so gewählt, dass der Ausbruch von Tunnel und Stollen keinen Spannungseinfluss an den Rändern des Modells aufweist. Herrschen an den Rändern nach einem Ausbruch weiterhin die Primärspannungen, ist das Berechnungsmodell groß genug gewählt. Zudem werden die Lagerbedingungen der Ränder in vertikaler und horizontaler Richtung gesperrt, um das außerhalb des Berechnungsquerschnittes liegende Gebirge zu simulieren. Abbildung 3.3 zeigt die Modellgröße und die Lagerbedingungen im Programm RS2. Der Abstand von einer Tunnelröhre bis zu einer der vier Modellbegrenzungen beträgt in etwa das 10-fache eines Tunneldurchmessers.

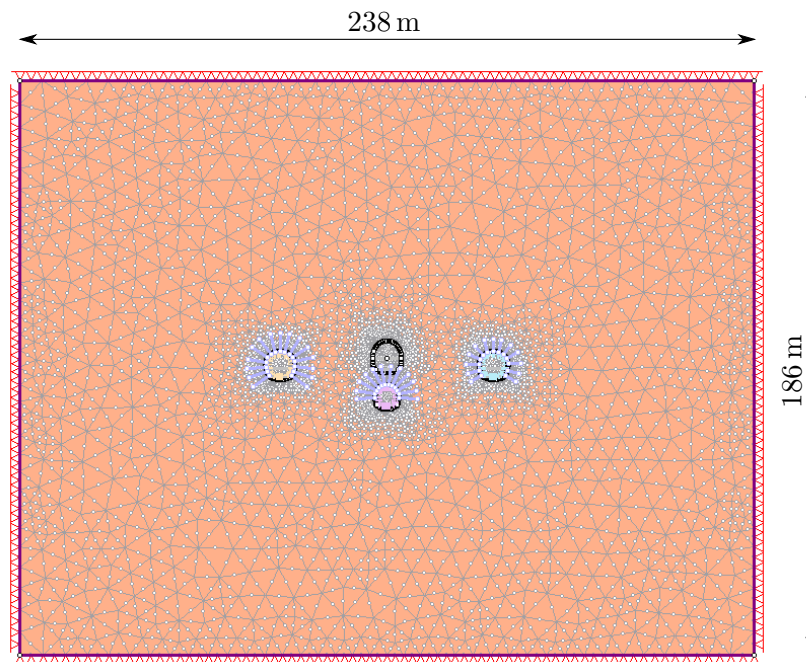


Abbildung 3.3: Modellgröße in RS2.

### 3.2.3 Netzparameter

Für die numerischen Berechnungen wird das Finite-Elemente-Netz mit dreieckigen Elementen („6-noded-triangles“), bestehend aus jeweils drei Integrationspunkten, abgebildet. Dabei wird das Netz abgestuft generiert, d.h. das Netz wird an den Ausbruchsrändern der Tunnel und Stollen verfeinert dargestellt (s. Abbildung 3.3). Je feiner das Finite-Elemente-Netz dabei dargestellt wird, desto genauer fallen die numerischen Berechnungen aus.

### 3.2.4 Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb

Für die Simulation wird das Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb (1772/1882) angewendet. Es besagt, dass Versagen eines Festkörpers dann eintritt, sobald die äußeren Schubspannungen den inneren Schwerwiderstand überschreiten. In Abbildung 3.4 ist das Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb in einem Normalspannungs-Schubspannungs-Diagramm grafisch dargestellt. Dabei stellt  $\sigma_1$  die größte und  $\sigma_3$  die kleinste Hauptnormalspannung dar.



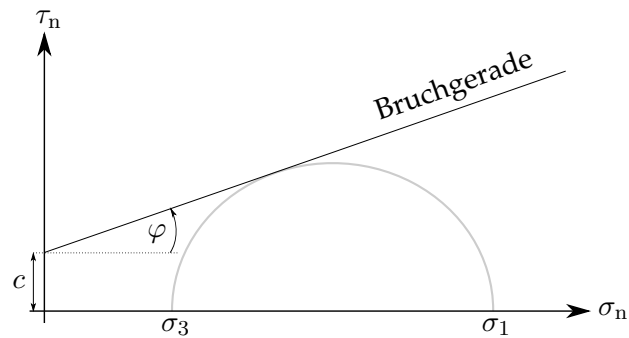


Abbildung 3.4: Normalspannungs-Schubspannungs-Diagramm.

Mathematisch lässt sich jeder Punkt auf der Bruchgeraden durch die Beziehung aus Formel 3.3 (Coulomb, 1773) ausdrücken:

$$\tau_n = c + \sigma_n * \tan(\varphi) \quad (3.3)$$

<u>mit:</u>	$\sigma_n$	[MPa]	Normalspannung
	$\tau_n$	[MPa]	Schubspannung
	$c$	[MPa]	Kohäsion
	$\varphi$	[°]	Reibungswinkel

Wenn ein Punkt auf der Bruchgeraden liegt, versagt der Festkörper. Weiters kann aus dem Normalspannungs-Schubspannungs-Diagramm eine Beziehung zwischen den beiden Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  abgeleitet werden, welche durch Formel 3.4 (Coulomb, 1773) beschrieben wird:

$$\sigma_1 = \sigma_3 * \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} + 2 * c * \frac{\cos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \quad (3.4)$$

Wenn die kleinste Hauptnormalspannung  $\sigma_3$  gleich Null ist, ergibt sich aus Formel 3.4 (Coulomb, 1773) die einaxiale Druckfestigkeit  $\sigma_c$  (Formel 3.5):

$$\sigma_c = 2 * c * \frac{\cos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \quad (3.5)$$

### 3.3 Parameteranpassung

Nachdem die Einstellungen des Programms RS2 definiert waren, konnte mit der numerischen Simulation gestartet werden. Für die Berechnungen mit RS2 wurden zuerst die prognostizierten Parameter der Gebirgsart IQP-QP-1c (s. Tabelle 2.4) und die prognostizierten Parameter der Störungszone (s. Tabelle 2.5) verwendet. Diese prognostizierten Parameter wurden dann auf ihre Plausibilität überprüft. Dabei wurde der Bauablauf - vorerst ohne Berücksichtigung der Stützmittel - mit dem Programm RS2 simuliert. Die simulierten Verschiebungen wurden anschließend mit den real gemessenen Verschiebungen verglichen. Bei zu großen Abweichungen von den simulierten und den real gemessenen Verschiebungen wurden die prognostizierten Parameter angepasst. Zur besseren Kontrolle wurden dafür mehrere Abschnitte der NHS-I simuliert. Zum Vergleich der Verschiebungen wurden jeweils die beiden Ulmen und die Firste herangezogen. Die Vorverschiebung, d.h. die Verschiebung, welche vor dem Ausbruch eines Tunnelabschnittes passiert und nicht gemessen wird, wurde dabei abgeschätzt. Diese beträgt in der Regel etwa ein Drittel der gesamten Verschiebung. Aus diesem Grund sollten die simulierten Verschiebungen auch immer etwas größer als die real gemessenen Verschiebungen ausfallen. Folgendes Fazit wird aus dem Vergleich der Verschiebungen gezogen:

#### *Gebirgsart IQP-QP-1c:*

Die simulierten Verschiebungen aus den Berechnungen mit den prognostizierten Parametern der Gebirgsart IQP-QP-1c lieferten, verglichen mit den real gemessenen Verschiebungen, sehr ähnliche Werte. Aus diesem Grund wurde aus den prognostizierten Parametern der Gebirgsart IQP-QP-1c ein Mittelwert gebildet. Die Gegenüberstellung der prognostizierten und der angepassten Werte ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

#### *Störungszone ESI-f4158:*

Die simulierten Verschiebungen aus den Berechnungen mit den prognostizierten Parametern der Störungszone ESI-f4158 lieferten, verglichen mit den real gemessenen Verschiebungen, deutlich höhere Werte. Deshalb wurden die Elastizitätsmodule sowohl in der Kernzone, als auch in der Zerrüttungszone um das doppelte gesteigert. Dementsprechend wurde auch die Kohäsion geringfügig erhöht. Erst dann lieferten die Modelle vergleichbare Ergebnisse mit den gemessenen Verschiebungen. Die Gegenüberstellung der Werte ist in Tabelle 3.2 dargestellt.

Im weiteren Verlauf der vorliegenden Masterarbeit werden jeweils die angepassten Parameter aus den Tabellen 3.1 und 3.2 verwendet.

Tabelle 3.1: Parameteranpassung der Gebirgsart IQP-QP-1c.

IQP-QP-1c			
Parameter	Prognostiziert	Angepasst	
$E$ [MPa]	6000	6000	
$c$ [MPa]	1,3 - 1,8	1,5	
$\varphi$ [°]	28 - 32	30	
$\psi$ [°]	0	0	
$\nu$ [—]	0,21	0,21	

Tabelle 3.2: Parameteranpassung der Störungszone ESI-f4158.

Parameter	Kernzone		Zerrüttungszone	
	Prognostiziert	Angepasst	Prognostiziert	Angepasst
$E$ [MPa]	1000	2000	600	1200
$c$ [MPa]	0,3	0,4	0,5	0,6
$\varphi$ [°]	26	26	28	28
$\psi$ [°]	0	0	0	0
$\nu$ [—]	0,3	0,3	0,25	0,25

mit:  $E$  ..... Elastizitätsmodul  
 $c$  ..... Kohäsion  
 $\varphi$  ..... Reibungswinkel  
 $\psi$  ..... Dilatanzwinkel  
 $\nu$  ..... Querdehnzahl

### 3.4 Vorentspannung nach Vlachopoulos

Bevor die Stützmittel eines Tunnelabschnittes eingebaut werden, erfährt das vom Tunnel umlagernde Gebirge bereits eine Verschiebung - die Vorverschiebung. Dieser Verschiebungsanteil wird nach der Methode von Vlachopoulos (2009) bestimmt. Im folgenden wird der theoretische Hintergrund der Methode nach Vlachopoulos und die Erfassung des Vor-

entlastungsfaktors mit dem Finite-Elemente-Programm RS2 beschrieben.

Die Methode ist auf kreisrunde Querschnitte in einem hydrostatischen Spannungsfeld ( $K_0 = 1$ ) beschränkt. Des weiteren weist das Gebirge ein linear-elastisches sowie idealplastisches Materialverhalten auf (Hoek et al., 2007).

Vlachopoulos (2009) hat gezeigt, dass die radialen Verschiebungen entlang der Tunnelachse und die Entwicklung der plastischen Radien direkt voneinander abhängig sind. Demnach ist ein Längsverschiebungsprofil hauptsächlich von der Ausdehnung der plastischen Zone abhängig. Obwohl alle restlichen Parameter normiert werden, ändert sich das Längsverschiebungsprofil mit der Größe des plastischen Radius (Vlachopoulos & Diederichs, 2009).

In RS2 lässt sich die fortschreitende Ortsbrust mit der Annahme eines inneren Ausbaudruckes  $p_i$ , welcher sukzessive reduziert wird, simulieren. Dabei wird zunächst der innere Ausbaudruck mit den in-situ Spannungen gleichgesetzt ( $p_i = p_0$ ) und schrittweise bis auf Null reduziert ( $p_i = 0$ ). Stellt man den Innendruck  $p_i$  mit den Radialverschiebungen  $u_i$  in einem Diagramm dar, ergibt sich die Gebirgskennlinie. Bis zu einem bestimmten kritischen Ausbaudruck  $p_{kr}$  verhält sich das Gebirge dabei elastisch und geht anschließend in den plastischen Bereich über (Hoek et al., 2007). Ist der Innendruck  $p_i$  gleich Null, ergibt sich die maximale radiale Verschiebung  $u_{im}$ . In Abbildung 3.5 ist eine exemplarische Gebirgskennlinie von einem Tunnel dargestellt.

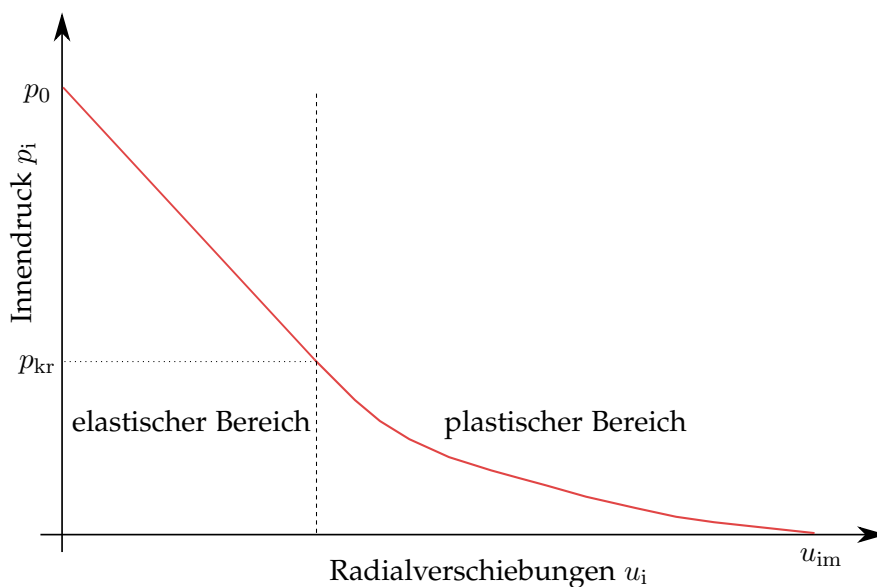


Abbildung 3.5: Gebirgskennlinie eines Tunnels.

Sulem, Panet und Guenot (1987) entwickelten einen analytischen Ansatz zur Bestimmung des plastischen Radius und der plastischen Verformung. Der plastische Radius  $R_P$  lässt sich dabei nach Formel 3.6 (Hoek et al., 2007) bestimmen:

$$R_P = R_T \left[ \frac{2(p_0(k-1) + \sigma_c)}{(1+k)((k-1)p_i + \sigma_c)} \right]^{\frac{1}{(k-1)}} \quad (3.6)$$

<u>mit:</u>	$R_P$	[m]	Plastischer Radius
	$R_T$	[m]	Tunnelradius
	$\sigma_c$	[MPa]	Einaxiale Druckfestigkeit
	$p_0$	[MPa]	In-situ Spannung
	$p_i$	[MPa]	innerer Ausbaudruck
	$k$	[-]	Gebirgskonstante $k = \frac{1+\sin(\varphi)}{1-\sin(\varphi)}$

Wenn in der Formel 3.6 der innere Ausbaudruck  $p_i$  Null gesetzt wird, ergibt sich der maximale plastische Radius  $R_{PM}$ . Durch Umformen der Formel 3.6 erhält man das Verhältnis des Radius  $R_{PM}$  zum Tunnelradius  $R_T$  (Hoek et al., 2007):

$$\frac{R_{PM}}{R_T} = \left[ \frac{2(p_0(k-1) + \sigma_c)}{(1+k)\sigma_c} \right]^{\frac{1}{(k-1)}} \quad (3.7)$$

Beim plastischen Versagen des Gebirges werden die Verschiebungen nach Formel 3.8 bestimmt (Hoek et al., 2007):

$$u_{ip} = \frac{R_T(1+\nu)}{E} \left[ 2(1-\nu)(p_0 - p_{kr}) \left( \frac{R_{PM}}{R_T} \right)^2 - (1-2\nu)(p_0 - p_i) \right] \quad (3.8)$$

Wird in der Formel 3.8 der innere Ausbaudruck  $p_i$  Null gesetzt, ergibt sich die maximale plastische Radialverschiebung  $u_{im}$ . Mit dem Verhältnis  $\frac{R_{PM}}{R_T}$  und dem Wert der maximalen Radialverschiebung  $u_{im}$  können im weiteren Verlauf die Verschiebungen

- an der Ortsbrust ( $X = 0$ ),
- vor der Ortsbrust ( $X < 0$ ) und
- hinter der Ortsbrust ( $X > 0$ )

analytisch ermittelt werden (Hoek et al., 2007).

Die Radialverschiebungen an der Ortsbrust  $u_{if}$  ergeben sich nach Vlachopoulos (2009) zu:

$$u_{if} = \frac{u_{im}}{3} * e^{-0,15(R_{PM}/R_T)} \tag{3.9}$$

Die Verschiebungen vor der Ortsbrust ( $X < 0$ ) ergeben sich nach Vlachopoulos (2009) zu:

$$u_i = \frac{u_{if}}{u_{im}} * e^{(X/R_T)} \tag{3.10}$$

Die Verschiebungen hinter der Ortsbrust ( $X > 0$ ) ergeben sich nach Vlachopoulos (2009) zu:

$$u_i = 1 - \left(1 - \frac{u_{if}}{u_{im}}\right) * e^{\left(\frac{-3X/R_T}{2R_{PM}/R_T}\right)} \tag{3.11}$$

In Abbildung 3.6 sind die numerischen Analysen von Vlachopoulos (2009) in einem Diagramm zusammengefasst. Hierbei werden jeweils die normierten Parameter der Verschiebung und des plastischen Radius verwendet.

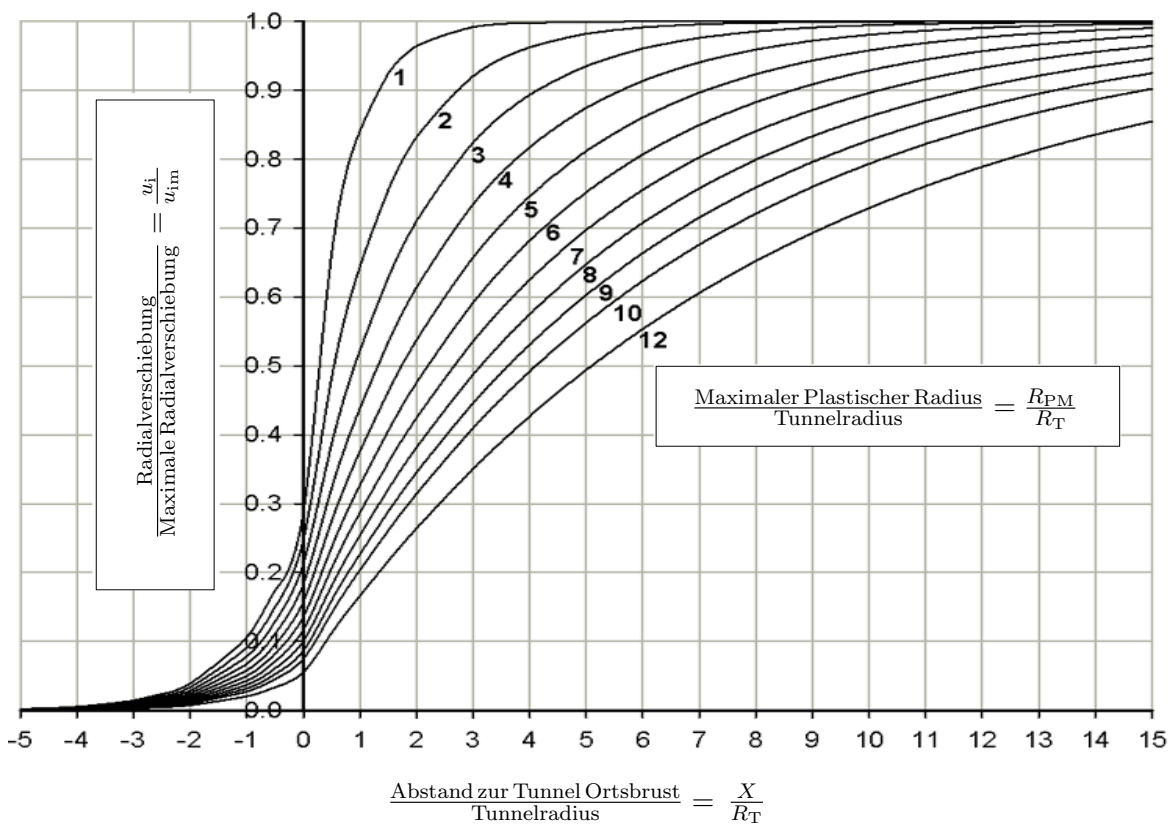


Abbildung 3.6: Radialverschiebungsverteilung nach Vlachopoulos (2009).

## 3.5 Simulation des Bauablaufes

Mit Hilfe der Baustellendokumentation kann der Bauablauf für die Schnitte A-A bis G-G der NHS-I simuliert werden. Im folgenden Abschnitt wird die Vorgehensweise zur Bestimmung der Vorverschiebung zunächst erläutert und anschließend an einem Beispiel dargestellt und ausgewertet.

### 3.5.1 Bestimmung der Vorverschiebung

Um die Vorverschiebung  $u_i$  und den dazugehörigen Innendruck  $p_i$  (Vorentlastungsfaktor) mit RS2 zu bestimmen, wird das Diagramm aus Abbildung 3.6 verwendet. Der maximale plastische Radius  $R_{PM}$  und die maximale radiale Verschiebung  $u_{im}$  werden aus RS2 entnommen. Dabei wird immer vom selben Punkt ausgegangen, d.h., dass die Stelle mit der maximalen Ausdehnung des plastischen Radius auch für die Radialverschiebung herangezogen wird. Bei streuender Verteilung von maximaler Verschiebung und maximalen plastischen Radius werden mehrere Punkte zur Bestimmung der Vorverschiebung herangezogen und das Ergebnis gemittelt. Mit dem Verhältnis  $\frac{R_{PM}}{R_T}$  kann anschließend das entsprechende Längsverschiebungsprofil aus Abbildung 3.6 interpoliert werden.

Im Bereich der NHS-I wechselt die Abschlagslänge der Kalotte zwischen 1,3 m und 1,7 m. Da der Abstand häufig variiert, wird der Mittelwert von  $X = 1,5$  m für jeden Kalottenausbruch gewählt. Für den Strossen- und Sohleausbau werden deutlich höhere Abschlagslängen gewählt. Aus diesem Grund fallen die Vorverschiebungen und der Vorentlastungsfaktor deutlich höher aus.

Da die zu untersuchenden Querschnitte der NHS-I nicht kreisrund sind, müssen weiters äquivalente Tunnelradien  $R_{T,\ddot{a}q}$  für jeden Querschnitt angenommen werden. In Tabelle 3.3 sind die äquivalenten Tunnelradien aufgelistet.

Mit der Bestimmung der Verhältnisse  $\frac{R_{PM}}{R_T}$  und  $\frac{X}{R_T}$  kann mit Hilfe des Diagramms aus Abbildung 3.6 das Verhältnis  $\frac{u_i}{u_{im}}$  abgelesen werden. Multipliziert man den abgelesenen Wert mit der maximalen Verschiebung  $u_{im}$ , erhält man die Verschiebung am Punkt  $X$  hinter der Ortsbrust. Um diesen Verschiebungsbetrag darzustellen, muss der entsprechende Innendruck  $u_i$  aufgebracht werden. Durch sukzessives Reduzieren kann der entsprechende Wert des Innendruckes linear interpoliert werden.

Tabelle 3.3: Äquivalente Tunnelradien.

Bauwerk	Regelprofil	Äquivalenter Tunnelradius $R_{T,\ddot{a}q}$
Haupttunnel-Ost	RP-HT-RH	4,5 m
Haupttunnel-Ost	RP-HT-AH	5,0 m
Haupttunnel-West	RP-HT-RH	4,5 m
Haupttunnel-West	RP-HT-AH	5,0 m
Mittelstollen	RP-NH-RM	5,0 m
Erkundungsstollen	RP-EKS-A	4,0 m

### 3.5.1.1 Auswertung der Vorverschiebung

Im folgenden Kapitel wird die Auswertung des Vorentlastungsfaktors erläutert. Hierfür wird ein Beispiel eines Kalottenausbruchs (inklusive Strossenausbruch) des Erkundungsstollens herangezogen. Im vorliegenden Beispiel streicht die Störungszone ESI-f4158 nahezu vollkommen durch die Ortsbrust des Erkundungsstollens. In Abbildung 3.7 ist ein Schnitt durch den Erkundungsstollen dargestellt.

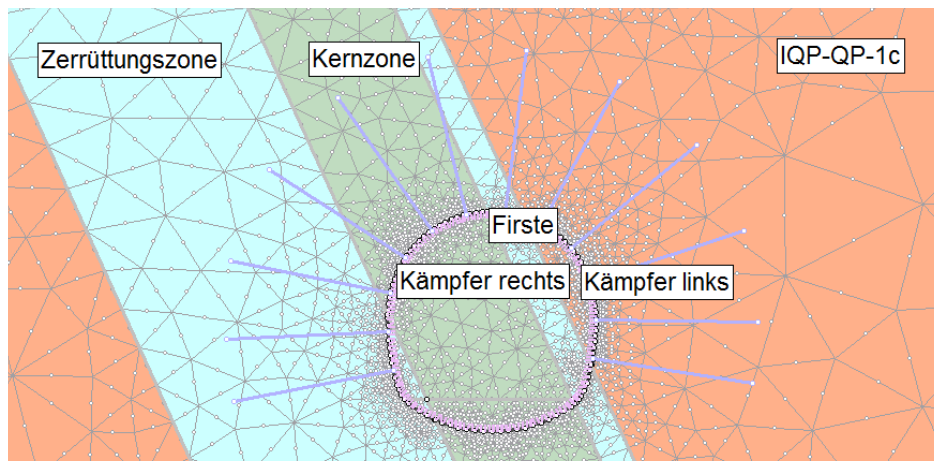


Abbildung 3.7: Schnitt durch den Erkundungsstollen.

Um den entsprechenden Vorentlastungsfaktor zu erfassen, wurde zunächst die Kalotte inklusive Strosse voll ausgebrochen. Dann wurde ein innerer Ausbaudruck von  $p_i = p_0$  auf die Tunnellaubung aufgebracht und schrittweise bis  $p_i = 0$  reduziert. Anschließend wurde die Radialverschiebung  $u_i$  und der maximale plastische Radius  $R_{PM}$  der beiden Kämpfer und der Firste aus dem Programm RS2 entnommen. In Tabelle 3.4 sind die Radialverschie-



bungen, die sich auf die aufgebrachte Stützkraft beziehen, aufgelistet. Tabelle 3.5 stellt die maximalen plastischen Radien bei einem Innendruck von  $p_i = 0$  dar. Die Werte aus den Tabellen 3.4 und 3.5 werden im Anschluss zur Bestimmung des Vorentlastungsfaktors verwendet.

Tabelle 3.4: Stützkraft und radiale Verschiebungen aus RS2.

Stützdruk $p_i/p_0$ [-]	Radialverschiebung $u_i$ [m]				
	Kämpfer links	Firste	Kämpfer rechts	Mittelwert	
1	0,000	0,000	0,000	0,000	
0,9	0,010	0,005	0,002	0,006	
0,8	0,020	0,009	0,004	0,011	
0,7	0,030	0,014	0,006	0,017	
0,6	0,040	0,019	0,008	0,022	
0,5	0,050	0,023	0,010	0,028	
0,4	0,062	0,031	0,012	0,035	
0,3	0,080	0,045	0,016	0,047	
0,2	0,116	0,071	0,022	0,070	$\Rightarrow u_i$
0,1	0,201	0,127	0,034	0,121	
0,06	0,272	0,171	0,042	0,162	
0,03	0,361	0,225	0,053	0,213	
0	0,528	0,318	0,071	0,306	$\Rightarrow u_{im}$

Tabelle 3.5: Maximale plastische Radien aus RS2.

Stützdruk $p_i/p_0$ [-]	Maximaler Plastischer Radius $R_{PM}$ [m]			
	Kämpfer links	Firste	Kämpfer rechts	Mittelwert
0	13,00	10,80	9,40	11,10

Mit der Bestimmung des maximalen plastischen Radius  $R_{PM}$  und dem äquivalenten Tunnelradius des Erkundungsstollens kann das Verhältnis  $\frac{R_{PM}}{R_T}$  rechnerisch ermittelt werden:

$$\frac{R_{PM}}{R_T} = \frac{11,10 \text{ m}}{4 \text{ m}} = \underline{2,78}$$

Der Einbau der Stützmittel findet nach  $X = 1,5 \text{ m}$  statt. Somit ergibt sich das Verhältnis:

$$\frac{X}{R_T} = \frac{1,5 \text{ m}}{4 \text{ m}} = \underline{0,375}$$

Mit den berechneten Verhältnissen  $\frac{R_{PM}}{R_T}$  und  $\frac{X}{R_T}$  kann nun aus Abbildung 3.6 das Verhältnis  $\frac{u_i}{u_{im}}$  grafisch ermittelt werden. In der nachstehenden Abbildung 3.8 ist die grafische Ermittlung dargestellt.

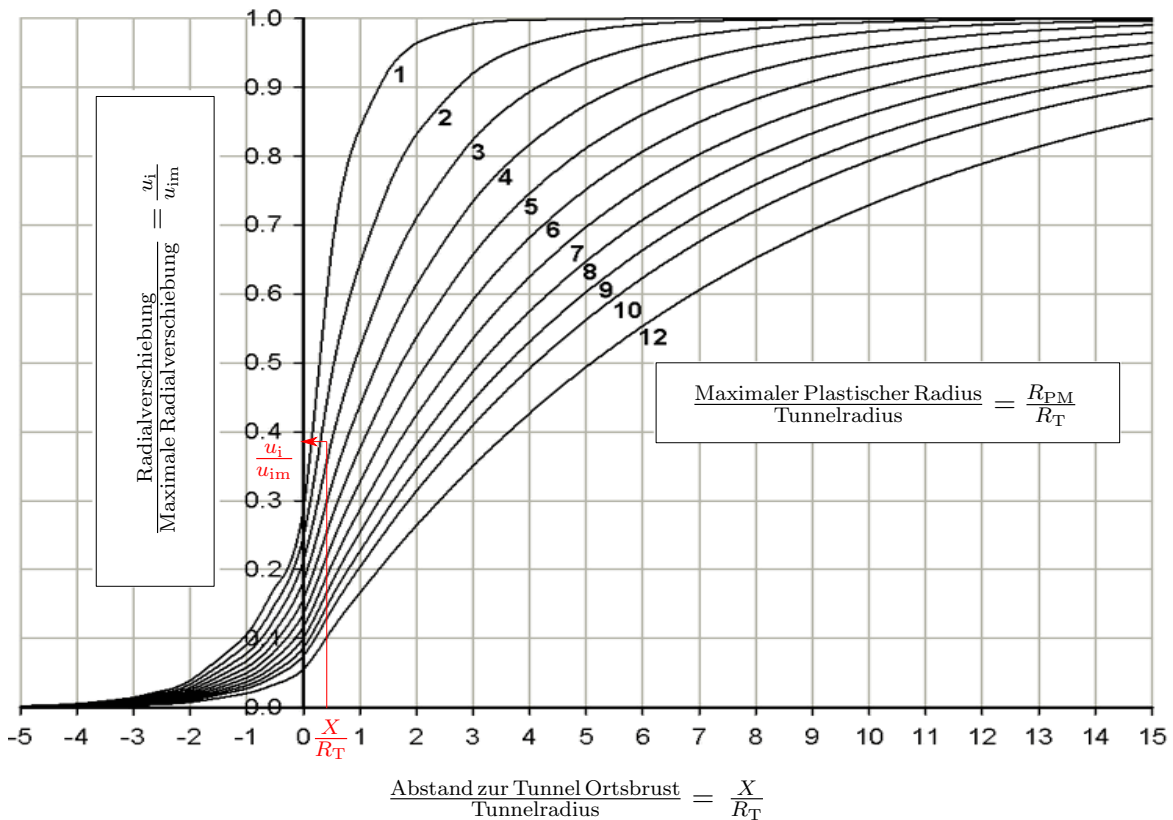


Abbildung 3.8: Auswertung der Radialverschiebungsverteilung (Vlachopoulos & Diederichs, 2009).

Aus der grafischen Ermittlung erhält man ein Verhältnis von  $\frac{u_i}{u_{im}} = 0,38$ . Mit der maximalen radialen Verschiebung  $u_{im}$  aus Tabelle 3.4 kann die Vorverschiebung  $u_i$  berechnet werden:

$$\frac{u_i}{u_{im}} = 0,38 \Rightarrow \underline{u_i} = 0,38 * u_{im} = 0,38 * 0,306 \text{ m} = \underline{0,116 \text{ m}}$$

Mit Hilfe der Vorverschiebung kann nun der relevante Ausbaudruck anhand Tabelle 3.4

linear interpoliert oder anhand der Gebirgslinie grafisch ermittelt werden. In Abbildung 3.9 sind die Gebirgslinien und der Ausbaudruck dargestellt. In den später folgenden Berechnungen wurde der Ausbaudruck mittels linearer Interpolation bestimmt.

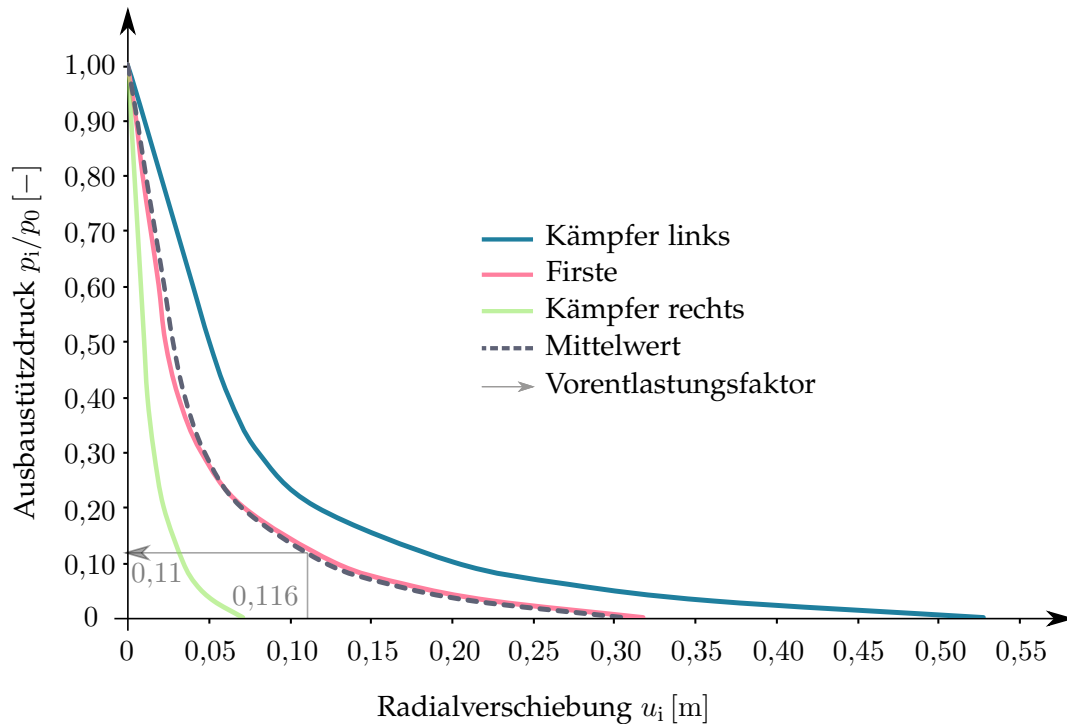


Abbildung 3.9: Gebirgskennlinien zur Bestimmung des Ausbaustützdruckes.

Aus Tabelle 3.4 bzw. Abbildung 3.9 ergibt sich bei einer Vorverschiebung von 0,116 m ein Verhältnis von  $\frac{p_i}{p_0} = 0,11$ . Durch Umformen des Verhältnisses erhält man einen inneren Ausbaudruck von  $p_i = 0,11 * p_0$ . Somit beträgt der innere Ausbaudruck 11 % der in-situ Spannung  $p_0$ , um die Vorverschiebung von 0,116 m zu erreichen.

### 3.5.2 Stützmittel

In der NHS-I werden die Stützmittel Anker, Spritzbeton, Ausbaubögen und Baustahlgitter verwendet. Im folgenden wird auf die Eigenschaften der Stützmittel und deren Einbau mit dem Programm RS2 eingegangen.

### 3.5.2.1 Anker

Als Ankersystem werden im Abschnitt der NHS-I hauptsächlich mörtelgebettete Betonstahlanker (SN-Anker) verwendet. Bei dieser Ankersicherung wird zunächst ein Bohrloch vorgebohrt, welches mit Mörtel gefüllt wird. Anschließend wird der Vollstabanker in das Bohrloch eingeführt. Der Mörtel sorgt dabei für eine optimale Verbundwirkung zwischen dem Gebirge und dem Stahlanker.

Im Bereich der NHS-I variiert die Ankerlänge zwischen 4 m und 6 m - je nach Beschaffenheit des umlagernden Gebirges. Der Einbau der Anker erfolgt im ersten Abschlag. Dementsprechend wird der Einbau auch mit dem ersten Vorentlastungsfaktor simuliert. In Tabelle 3.6 ist die verwendete Ankerart mit den zugehörigen Eigenschaften aufgelistet.

Tabelle 3.6: Ankereigenschaften.

Ankerart	$d$	$E$	$f_t$
SN-Anker	25 mm	210 000 MPa	250 kN

mit:  $d$  ..... Durchmesser  
 $E$  ..... Elastizitätsmodul  
 $f_t$  ..... Zugfestigkeit

### 3.5.2.2 Spritzbeton

Zur weiteren Sicherung des Hohlraumrandes wird Spritzbeton verwendet. Der Spritzbeton erhält in der Simulation zeitabhängig reduzierte Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften. Je nach Vorentlastungsfaktor, welche auf den Tunnelhohlraum aufgebracht wird, wird ein bestimmter Abstand zur Ortsbrust simuliert. Die Eigenschaften des Spritzbetons hängen dabei von der Zeit ab, die von dem jeweiligen Abstand zur Ortsbrust verstreicht.

**Junger Spritzbeton:** Der Einbau des Spritzbetons erfolgt im ersten Abschlag. Diese stellt in der numerischen Simulation auch den ersten Vorentlastungsfaktor dar. Der Spritzbeton ist zu diesem Zeitpunkt noch sehr jung und hat demnach die geringste Steifigkeit und Festigkeit.

**Alter Spritzbeton:** Mit dem nächsten Vorentlastungsfaktor wird ein Abstand von drei Abschlagslängen zur Ortsbrust simuliert. Hier hat der zuvor eingebaute Spritzbeton bereits

ein gewisses Alter und weist somit eine erhöhte Steifigkeit und Festigkeit auf.

**Ausgehärteter Spritzbeton:** Wird ein beliebiger Tunnelabschnitt mindestens 28 Tage nach dem Einbau des Spritzbetons ausgebrochen, erhält dieser eine weitere Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit. Ab diesem Zeitpunkt wird der Spritzbeton als voll ausgehärtet angenommen.

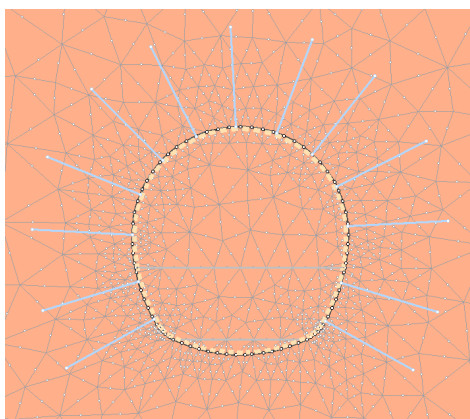
In Tabelle 3.7 ist die Entwicklung der Spritzbetoneigenschaften aufgelistet.

Tabelle 3.7: Steifigkeits- und Festigkeitsparameter des Spritzbetons.

Parameter	Junger Spritzbeton	Alter Spritzbeton	Ausgehärteter Spritzbeton
$E$ [MPa]	5000	20 000	35 000
$f_c$ [MPa]	6,5	25	45
$f_t$ [MPa]	0,75	2,75	5
$\nu$ [-]	0,2	0,2	0,2

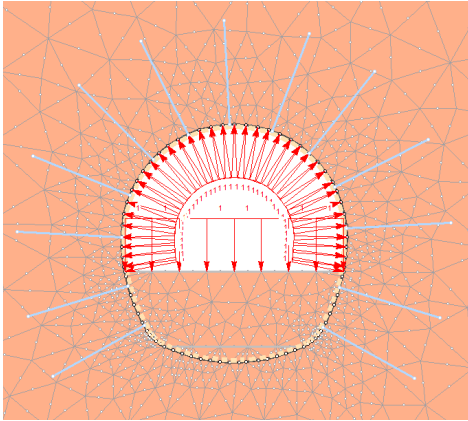
mit:  $E$  ..... Elastizitätsmodul  
 $f_c$  ..... Druckfestigkeit  
 $f_t$  ..... Zugfestigkeit  
 $\nu$  ..... Querdehnzahl

Im folgenden wird mit Hilfe eines Beispiels der Stützmitteleinbau in das Programm RS2 demonstriert. Diese Vorgehensweise wird anhand eines Kalottenausbruchs in chronologischer Reihenfolge dargestellt und erläutert.



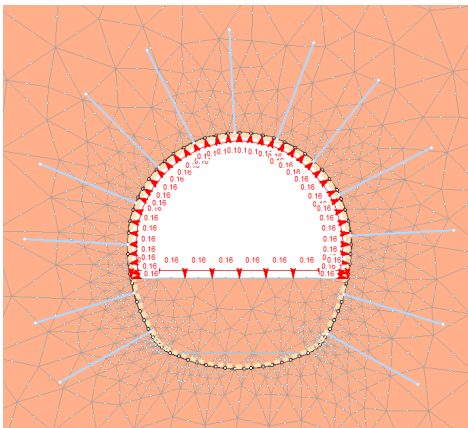
#### ***Phase 1: Primärspannungszustand***

Zu Beginn ist der Querschnitt noch nicht ausgebrochen. Es wirken die Primärspannungen  $\sigma_v$  und  $\sigma_h$ . Die dargestellten Anker und der Spritzbeton sind noch nicht aktiv.



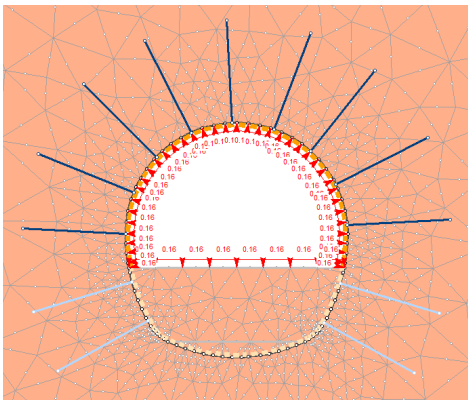
### ***Phase 2: Voll wirkende Stützkraft***

Die Kalotte wird ausgebrochen. Dem Gebirge wirkt der Innendruck von  $p_i = p_0$  entgegen. Somit herrscht ein Gleichgewichtszustand und die Primärspannungen  $\sigma_v$  und  $\sigma_h$  wirken weiterhin. Die dargestellten Anker und der Spritzbeton sind weiterhin nicht aktiv.



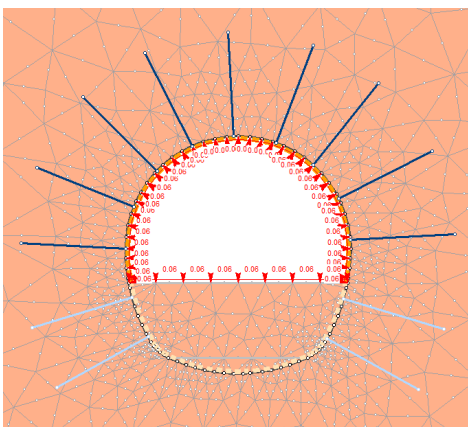
### ***Phase 3: Erste Entlastung***

Der Innendruck wird reduziert, um den Zustand im ersten Abschlag hinter der Ortsbrust zu simulieren. Die dargestellten Anker und der Spritzbeton sind weiterhin nicht aktiv.



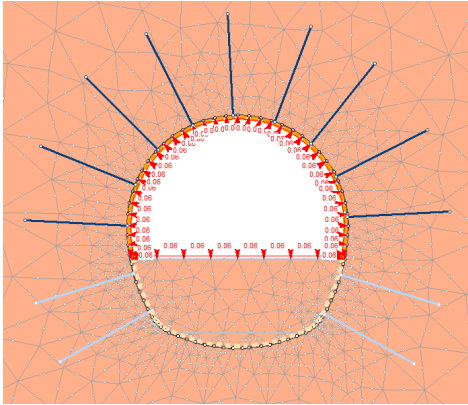
### ***Phase 4: Einbau der Stützmittel***

Nun werden die Stützmittel (Anker und Spritzbeton) im Kalottenbereich eingebaut. Der junge Spritzbeton erhält dabei eine reduzierte Festigkeit und Steifigkeit. Vorerst gibt es keine weiteren Verschiebungen und die Stützmittel sind noch unbelastet.



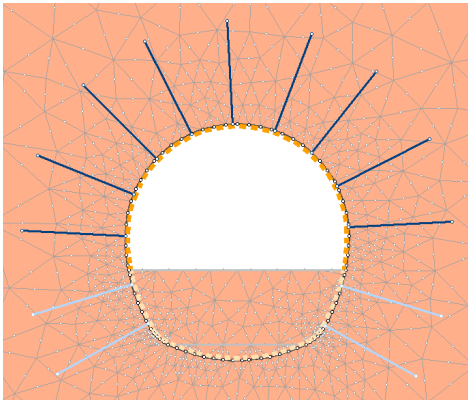
### ***Phase 5: Zweite Entlastung***

Dieser Schritt stellt einen Zustand drei Abschlagslängen hinter der Ortsbrust dar. Die mit der weiteren Entlastung verbundene Deformation wird den Stützmitteln aufgeprägt, wodurch sie einen Widerstand auf das Gebirge ausüben.



#### ***Phase 6: Erhöhung der Stützmittelparameter***

Drei Abschlagslängen hinter der Ortsbrust wird die Steifigkeit und Festigkeit des Spritzbetones im Kalottenbereich erhöht (alter Spritzbeton). Dies hat vorerst keine weiteren Verschiebungen zufolge.



#### ***Phase 7: Volle Entlastung***

Die Verschiebungen durch den Kalottenvortrieb sind abgeklungen ( $p_i = 0$ ) und die Stützmittel erfahren eine weitere Belastung. Die volle Steifigkeit und Festigkeit des Spritzbetons wird mit dem Ausbruch eines anderen Tunnelvortriebs angesetzt.

Diese Vorgehensweise - von Phase 2 bis Phase 7 - wird für jeden weiteren Teilausbruch (Kalotte, Strosse und Sohle) der einzelnen Bauwerke angewendet.

### **3.5.2.3 Ausbaubögen und Baustahlgitter**

Als Ausbausystem kommen 3-Gurt Träger (70-20-30) mit einer Höhe von 70 mm und einem 20 mm und 30 mm breiten Durchmesser der Längseisen zum Einsatz. Dabei wird ein Baustahlgitter des Typs AQ 50 verwendet. Beide Stützmittel werden im Programm RS2 nicht explizit simuliert, sondern über die Zugfestigkeit des Spritzbetons miteinbezogen.

## 4 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse aus der numerischen Simulation mit RS2 dargestellt und erläutert. Dabei wird in erster Linie ermittelt, wie sich der Ausbruch der beiden Haupttunnel und des Mittelstollens auf den Erkundungsstollen auswirkt.

### 4.1 Allgemein

Zunächst wird der Einfluss auf den Erkundungsstollen bei exzentrischer Lage des Mittelstollens beschrieben. Hierbei wird Schnitt A-A verwendet. Im Anschluss wird erläutert, wie sich der Erkundungsstollen bei zentrischer Lage des Mittelstollens verhält. Diese Analyse stellt die Annäherung des Mittelstollens an den Erkundungsstollen dar und berücksichtigt die Schnitte B-B bis G-G. Die Schnitte (A-A bis G-G) der numerischen Simulation sind im Übersichtsplan in Abbildung 3.1 auf S. 18 dargestellt. Zur Darstellung und Interpretation der Ergebnisse der einzelnen Analyseschritte werden folgende Kriterien berücksichtigt:

- In-situ Spannungszustand
- Stützmittel
- Plastifizierung des Gebirges
- Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens
- Spannungsentwicklung rund um den Erkundungsstollen
- Auslastung der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens



## 4.2 Exzentrische Lage des Mittelstollens

Im folgenden Kapitel wird die gegenseitige Beeinflussung von Tunnel und Stollen bei einer ausmittigen Lage des Mittelstollens untersucht. Zur Darstellung der Analyse wurde der Schnitt A-A herangezogen.

### 4.2.1 Schnitt A-A

Der Schnitt A-A bildet die exzentrische Lage des Mittelstollens ab und wird in Abbildung 4.1 dargestellt. Der Achsabstand aller dargestellten Tunnelbauwerke beträgt hier jeweils 35 m. Gemäß der Dokumentation des Bauablaufes sind an dieser Stelle alle Tunnelbauwerke vollkommen ausgebrochen. Für die Simulation wurde der reale Bauablauf aus Tabelle 2.6 verwendet.

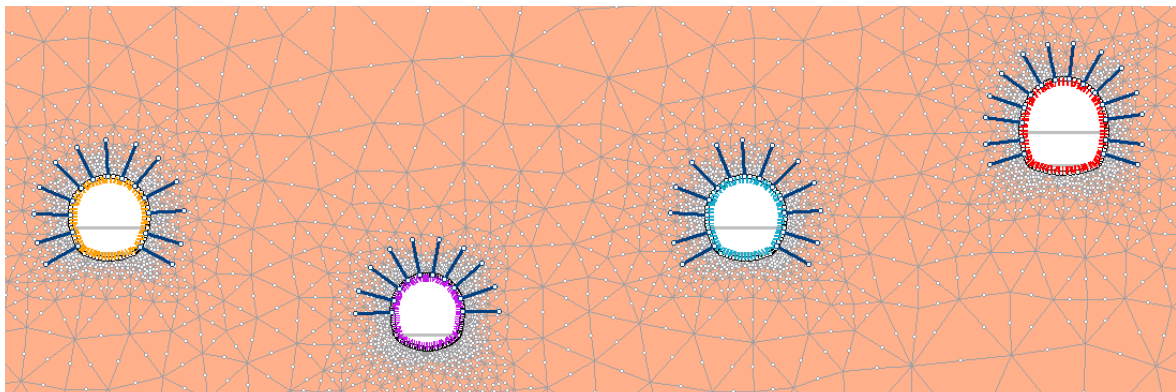


Abbildung 4.1: Schnitt A-A - Mittelstollen exzentrisch.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse bei exzentrischer Lage des Mittelstollens dargestellt und erläutert.

#### 4.2.1.1 In-situ Spannungszustand

Bei einer Überlagerungshöhe von  $h_{\ddot{u}} = 600$  m und einem Seitendruckbeiwert von  $K_0 = 1$  betragen die vertikalen und horizontalen in-situ Spannungen  $\sigma_v = \sigma_h = 16,2$  MPa (lt. Formel 3.1 & 3.2, S. 20).

#### 4.2.1.2 Stützmittel

Neben 4 m langen SN-Ankern wurde in allen Vortrieben Spritzbeton in einer Stärke von 20 cm eingebaut.

#### 4.2.1.3 Plastifizierung des Gebirges

In Abbildung 4.2 ist die Ausdehnung der plastischen Zone nach dem Ausbruch aller Bauwerke dargestellt. Der rote Gebirgsbereich, der jeweils die einzelnen Tunnelvortriebe umrundet, verhält sich zu 100 % plastisch. Der blaue Gebirgsbereich hingegen kennzeichnet sich durch elastisches Gebirgsverhalten (0 % plastisch) aus. In Abbildung 4.2 ist ersichtlich, dass die plastischen Zonen der einzelnen Tunnelbauwerke weit voneinander entfernt liegen. Aus diesem Grund ist die gegenseitige Beeinflussung von Tunnel und Stollen als gering einzustufen.

Diese Methode zur Darstellung der Plastizität des Gebirges wird auch in den nachfolgenden Analysen der vorliegenden Masterarbeit verwendet.

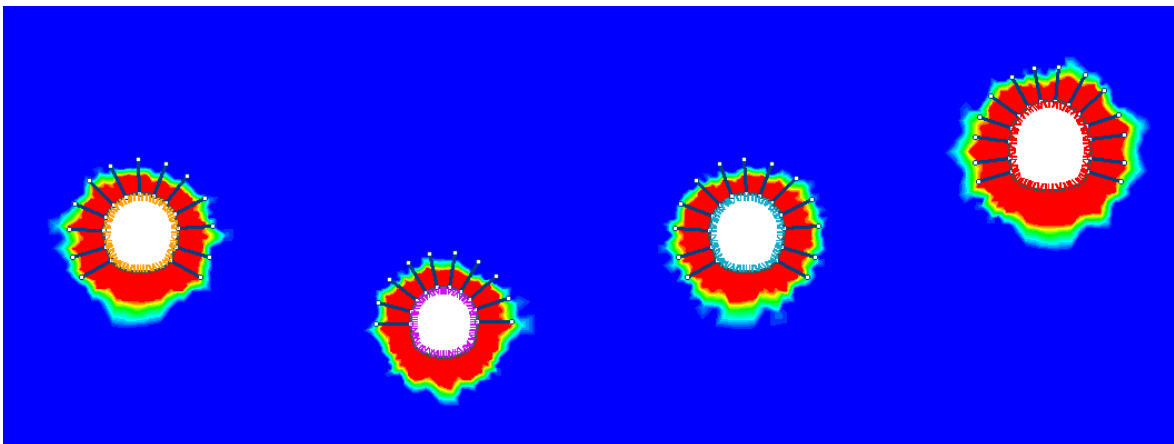


Abbildung 4.2: Schnitt A-A - Entwicklung der plastischen Zone.

#### 4.2.1.4 Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens

Abbildung 4.3 beschreibt die Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens infolge des Ausbruchs jedes einzelnen Tunnelvortriebs. Zur Darstellung der Verschiebungsentwicklung wurden beide Ulmen und die Firste berücksichtigt. Diese Methode zur Darstellung der Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens wird auch in den nachfolgenden

den Analysen der vorliegenden Masterarbeit verwendet.

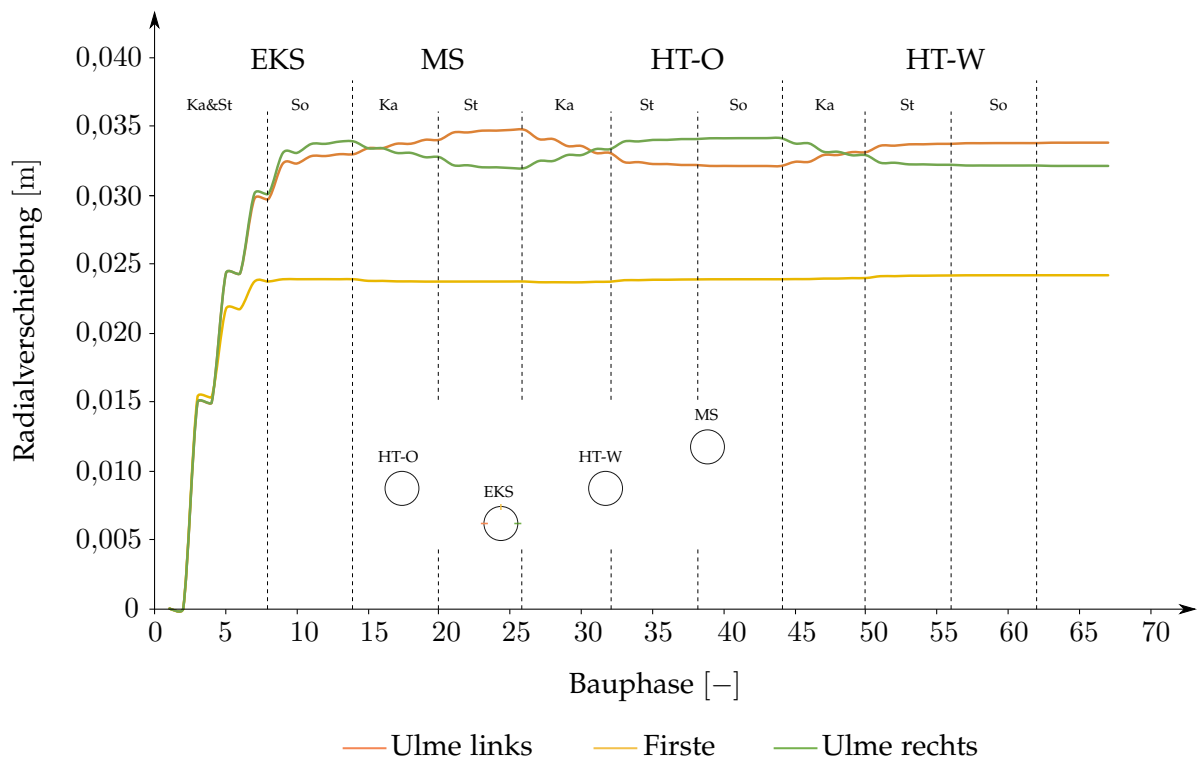


Abbildung 4.3: Schnitt A-A - Verschiebungsentwicklung.

Wie in Abbildung 4.3 ersichtlich, verschieben sich die beiden Ulmen des Erkundungsstollens aufgrund des eigenen Vortriebs um ca. 3,3 cm. Die Firste erfährt mit ca. 2,3 cm einen geringeren Verschiebungswert.

Mit dem Ausbruch des Mittelstollens und der beiden Haupttunnel weisen die beiden Ulmen einen zusätzlichen Verschiebungsbetrag im Millimeterbereich auf. Dies ist auf die Reduzierung der horizontalen Verspannung zurückzuführen. Die Konvergenzen sind jedoch so gering, dass sie keinen merkbaren Einfluss auf den Erkundungsstollen hinterlassen. Aufgrund der mittigen Lage des Erkundungsstollens ist zudem ein Ausgleich der radialen Verschiebungen der beiden Ulmen erkennbar.

Die Firste des Erkundungsstollens erfährt keine zusätzlichen Verschiebungen.

#### 4.2.1.5 Spannungsentwicklung rund um den Erkundungsstollen

In Abbildung 4.4 ist die Entwicklung der größten Hauptnormalspannung  $\sigma_1$  rund um den Erkundungsstollen dargestellt, die sich mit dem Ausbruch der einzelnen Tunnelvortriebe

bildet. Zur Darstellung der Spannungsentwicklung wurden auch hier die beiden Ulmen und die Firste herangezogen.

Es ist erkennbar, dass die Spannungen an der Firste nach dem Ausbruch des Erkundungsstollens abnehmen und an den beiden Ulmen langsam zunehmen. Die niedrigen Spannungsdifferenzen ab dem Ausbruch des Erkundungsstollens sind aufgrund der weiten Abstände der einzelnen Bauwerke erklärbar und schließen auf eine geringe gegenseitige Beeinflussung.

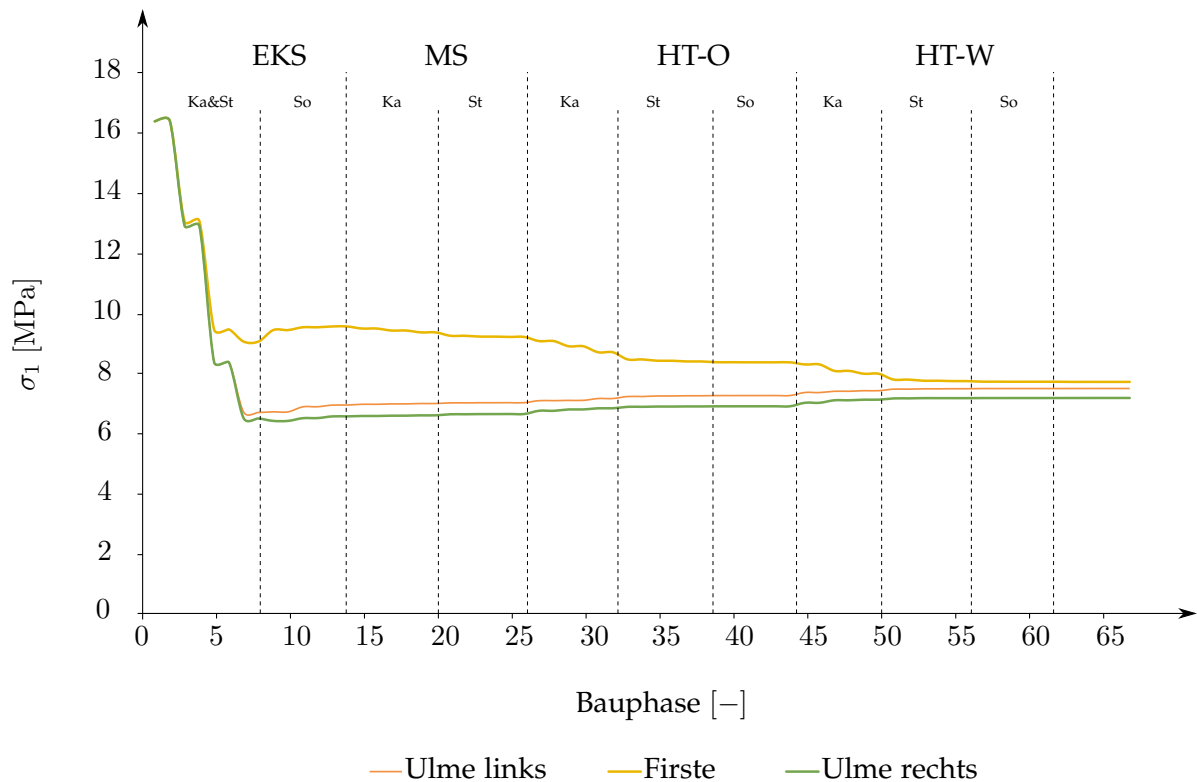


Abbildung 4.4: Schnitt A-A - Spannungsentwicklung.

#### 4.2.1.6 Auslastung der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens

In den beiden Abbildungen 4.5 und 4.6 ist die Auslastung der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens im Bereich der Kalotte und Strosse dargestellt. Für die Analyse der Tragfähigkeit werden  $QN$ - und  $MN$ -Interaktionsdiagramme verwendet. Der Nachweis wird dabei nur für den Spritzbeton der Kalotte inklusive Strosse dargestellt. Die rote Umgrenzung in den Abbildungen stellt dabei den Sicherheitsfaktor von  $SF = 1$  dar. Liegen die Punkte innerhalb der Umgrenzung, tritt kein Versagen der Spritzbetonschale ein. Diese Methode zur Darstellung der Auslastung der Spritzbetonschale - bezogen auf den Kalotten-

und Strossenbereich - wird auch in den nachfolgenden Analysen der vorliegenden Masterarbeit verwendet.

Abbildung 4.5 zeigt die Belastung der Spritzbetonschale nach dem Ausbruch des Erkundungsstollens und Abbildung 4.6 die Belastung der Spritzbetonschale nach Ausbruch aller Vortriebe. Ein Vergleich der beiden Abbildungen zeigt, dass eine gegenseitige Beeinflussung von Tunnel und Stollen vorhanden ist. Aufgrund der erhöhten Schnittkräfte in der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens in Abbildung 4.6 ist eine Interaktion der Tunnelvortriebe zwar erkennbar, sie hat jedoch keinen Einfluss auf die Stabilität der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens.

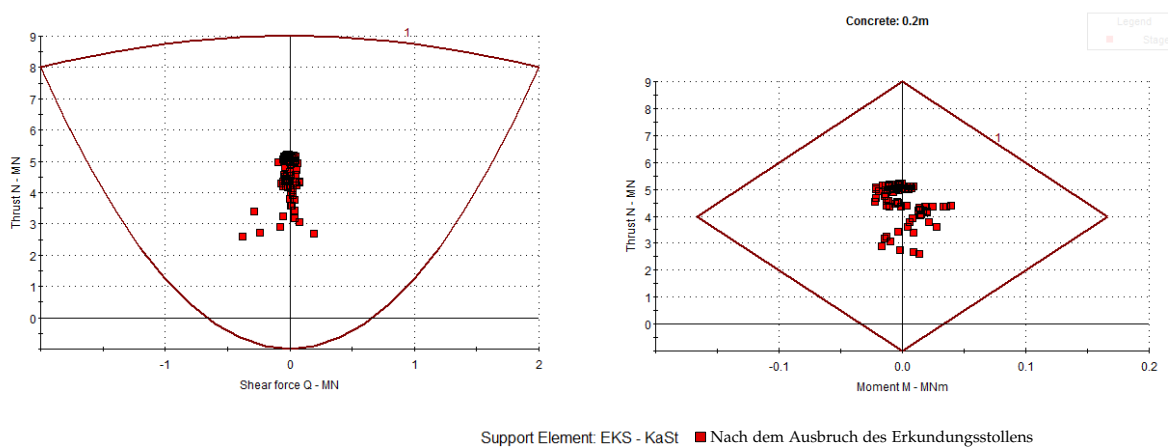


Abbildung 4.5: Schnitt A-A - Interaktion nach dem Ausbruch des Erkundungsstollens.

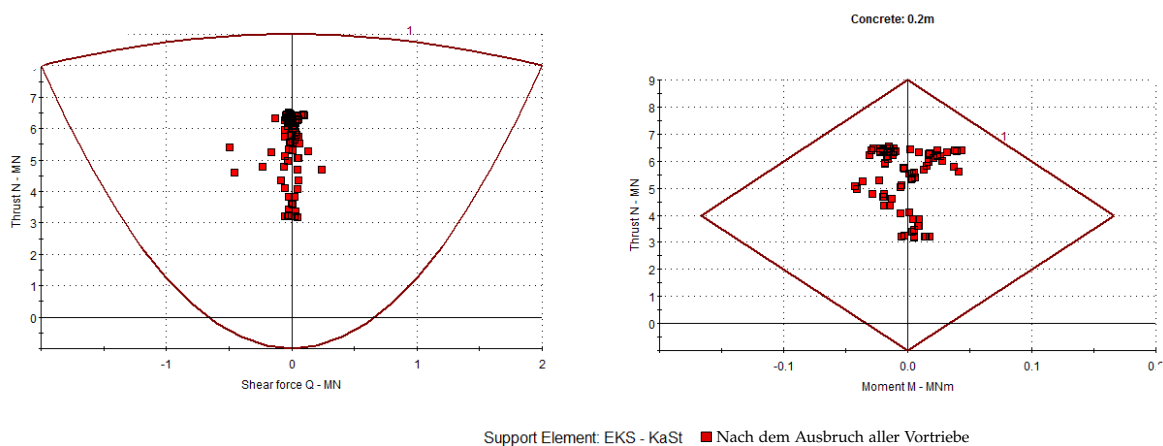


Abbildung 4.6: Schnitt A-A - Interaktion nach dem Ausbruch aller Vortriebe.

In Abbildung 4.7 ist die Normalkraft entlang der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Normalkraft - mit fortschreitendem Ausbruch der Vortriebe - an den beiden Ulmen zunimmt und an der Firste bzw. Sohle abnimmt. In der

Sohle sinken die Spannungen mit dem Ausbruch der beiden Haupttunnel so weit ab, dass Zugspannungen entstehen. Die Entwicklung der Normalkraft ist durch die Spannungskonzentration im Bereich der Ulmen, bzw. dem Spannungsrückgang im First- und Sohlbereich erklärbar. Eine Auswirkung auf die Druck- und Zugtragfähigkeit der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens hat der Ausbruch aller Vortriebe allerdings nicht. Diese Methode zur Darstellung der Normalkraft entlang der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens wird auch in den nachfolgenden Analysen der vorliegenden Masterarbeit verwendet. Startpunkt zur Darstellung der Normalkraft ist jeweils die linke Ulme und setzt sich dann gegen den Uhrzeigersinn weiter fort. Zur besseren Übersicht wird die Lage der beiden Ulmen, der Sohle und der Firste entlang des Tunnelumfangs hervorgehoben.

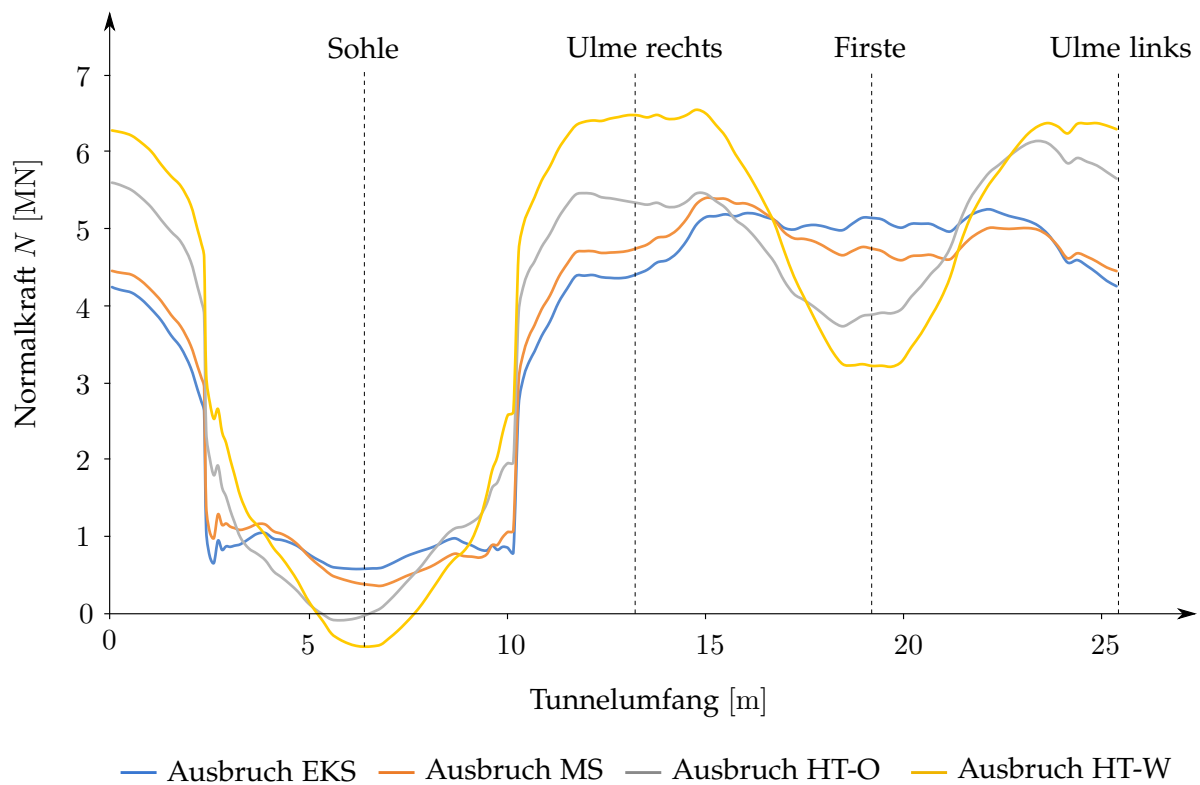


Abbildung 4.7: Schnitt A-A - Entwicklung der Normalkraft.

### 4.3 Zentrische Lage des Mittelstollens

Neben der exzentrischen Lage wurde auch eine zentrische Lage des Mittelstollens zur Analyse herangezogen. Dafür wurden mehrere Schnitte (B-B bis G-G) erstellt und simuliert. Diese Schnitte stellen zudem die Annäherung des Mittelstollens an den Erkundungsstollen dar. Dies bedeutet, dass die Bergfeste von Schnitt zu Schnitt abnimmt. Im folgenden Kapitel werden zunächst die Ergebnisse von Schnitt B-B und anschließend die Ergebnisse von Schnitt F-F erläutert. Der Schnitt F-F wurde dabei zweimal betrachtet: mit und ohne Berücksichtigung der Störungszone ESI-f4158.

#### 4.3.1 Schnitt B-B

Der Schnitt B-B aus Abbildung 4.8 stellt in der Berechnung den ersten Schnitt bei zentrischer Lage des Mittelstollens dar. Gemäß der Dokumentation des Bauablaufes wurde an dieser Stelle die Kalotte des Mittelstollens bereits ausgebrochen. Der Abstand von der Kalottenbasis des Mittelstollens bis zur Firste des Erkundungsstollens beträgt hier 12,5 m. Auch die Störungszone kommt zum Vorschein und liegt im Einflussbereich der linken Ulme des Haupttunnels-Ost.

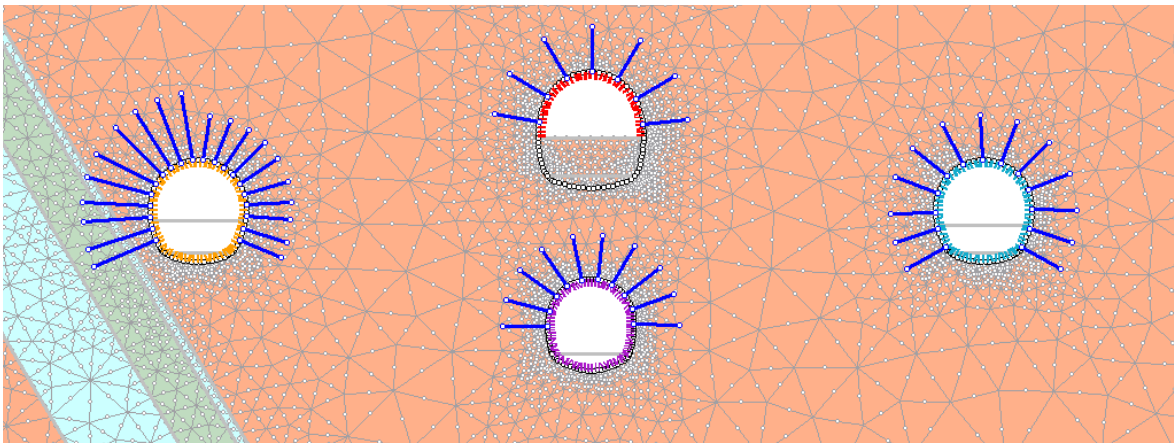


Abbildung 4.8: Schnitt B-B - Mittelstollen zentrisch.

##### 4.3.1.1 In-situ Spannungszustand

Bei einer Überlagerungshöhe von  $h_{\ddot{u}} = 650$  m und einem Seitendruckbeiwert von  $K_0 = 1$  betragen die vertikalen und horizontalen in-situ Spannungen  $\sigma_v = \sigma_h = 17,55$  MPa.

#### 4.3.1.2 Stützmittel

Neben 4 m langen SN-Ankern wurden im Schnitt B-B aufgrund des Einflusses der Störungszone im Haupttunnel-Ost auch 6 m lange Anker im Bereich der linken Ulme eingesetzt. Die Spritzbetonstärke der beiden Haupttunnel und des Mittelstollens wurde mit 25 cm festgelegt, während im Erkundungsstollen zunächst 20 cm aufgetragen wurden. Nachdem es jedoch zu Schäden an der Spritzbetonschale kam, erfolgte im Erkundungsstollen die Aufbringung einer zusätzlichen 10 cm starken Spritzbetonschicht (BBT-SE, 2013). Diese Instandsetzung erfolgte im Bereich Schnitt B-B bis Schnitt D-D und wurde auch in der Simulation berücksichtigt.

#### 4.3.1.3 Plastifizierung des Gebirges

In Abbildung 4.9 ist die Ausdehnung der plastischen Zone nach der Simulation des realen Bauablaufes dargestellt. Es ist erkennbar, dass sich die plastische Zone des Erkundungsstollens mit der plastischen Zone des Mittelstollens überschneidet. Dies geschieht bereits nach dem Ausbruch der Kalotte des Mittelstollens. Somit ist die Interaktion der Stollen deutlich und führt zu größeren Deformationen, insbesondere im Firstbereich des Erkundungsstollens.

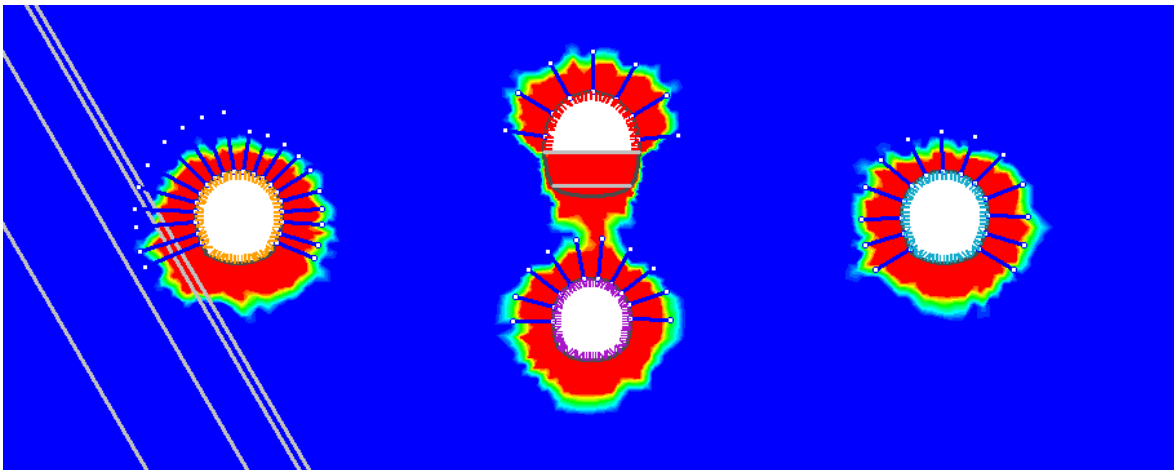


Abbildung 4.9: Schnitt B-B - Entwicklung der plastischen Zone.

#### 4.3.1.4 Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens

Abbildung 4.10 beschreibt die Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens nach dem Ausbruch jedes einzelnen Tunnelvortriebs. Zur Darstellung wurden beide Ulmen und



die Firste berücksichtigt.

Zunächst verschieben sich die Ulmen um ca. 3,6 cm und die Firste um ca. 2,5 cm. Mit dem Ausbruch der Kalotte des Mittelstollens erfährt die Firste des Erkundungsstollens einen Rückgang der Verschiebung von ca. 7 mm. Das bedeutet, dass sich die Firste des Erkundungsstollens hebt. Die Ulmen weisen hingegen zusätzliche Radialverschiebungen im Millimeterbereich auf.

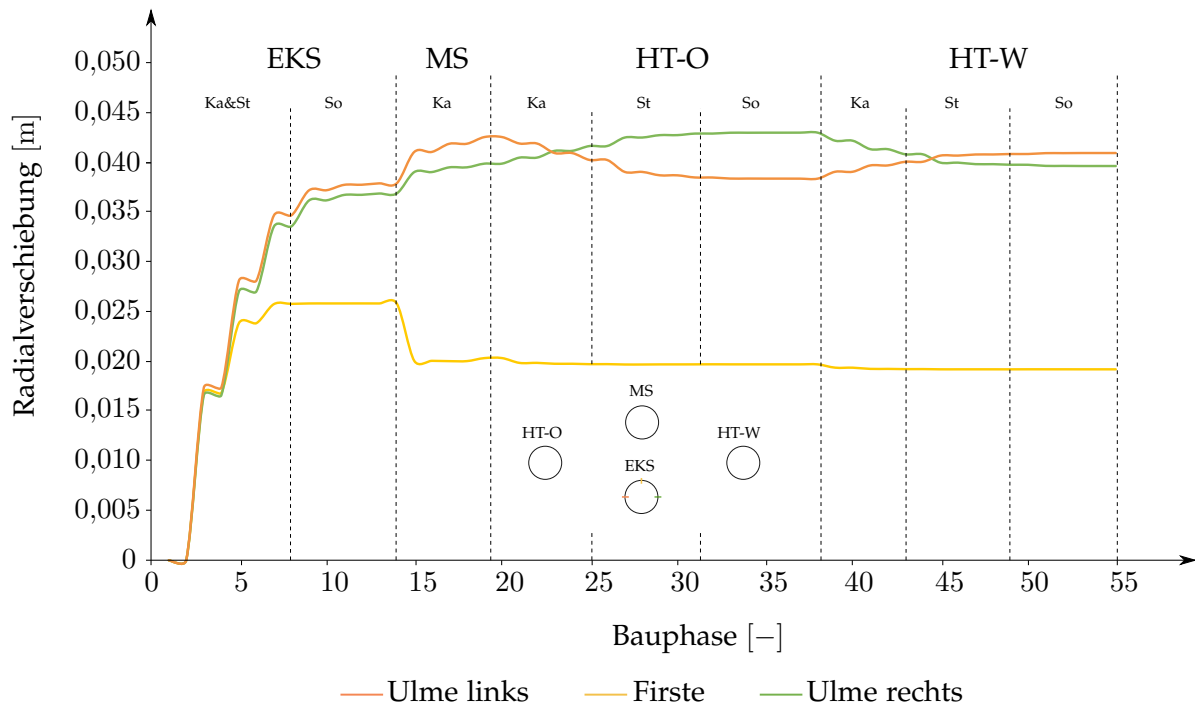


Abbildung 4.10: Schnitt B-B - Verschiebungsentwicklung.

#### 4.3.1.5 Spannungsentwicklung rund um den Erkundungsstollen

Die Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens ist durch die Wegnahme der Auflast bei gleichbleibenden horizontalen Spannungen zu erklären. Es kommt zu einer Spannungs-konzentration im Bereich der Firste des Erkundungsstollens, während aufgrund des Vortriebes des Mittelstollens die Ulmen einen Spannungsrückgang erfahren. Die Entwicklung der größten Hauptnormalspannung ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Mit dem Ausbruch der beiden Haupttunnel steigen die Spannungen an den beiden Ulmen wieder leicht an, während sie in der Firste nach dem Anstieg wieder sinken.

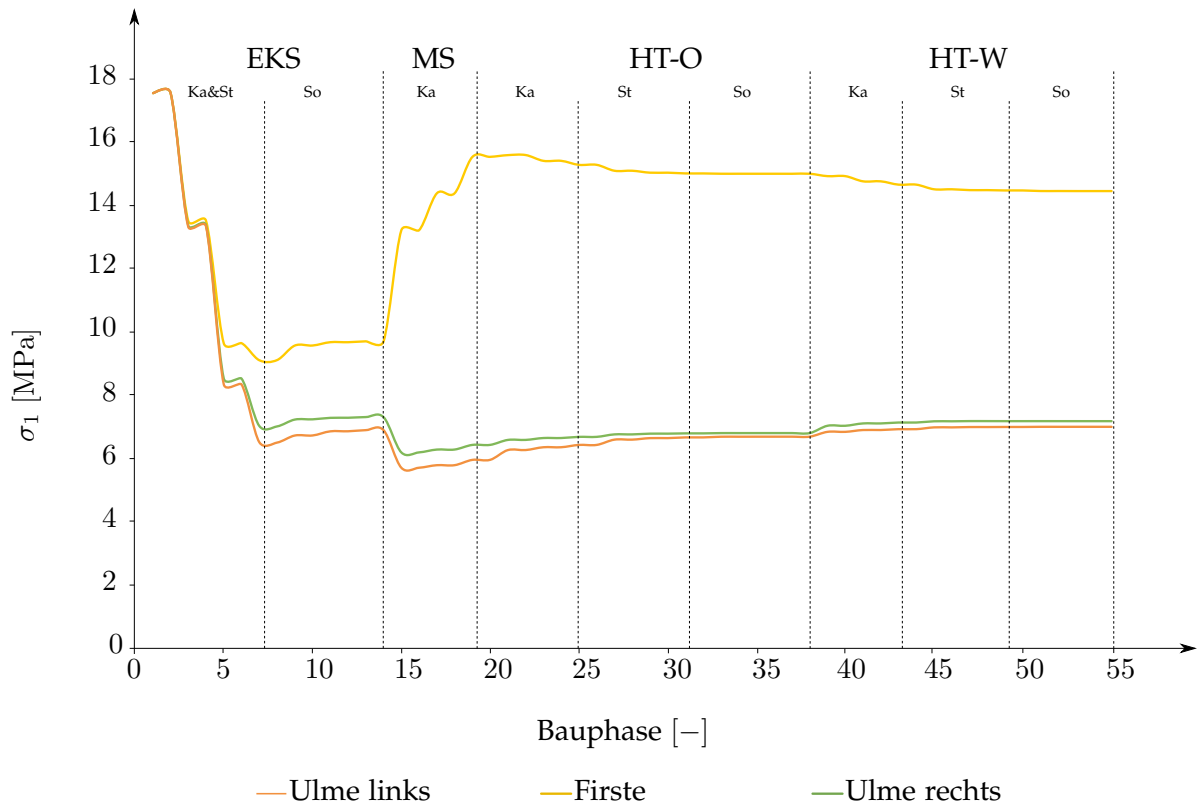


Abbildung 4.11: Schnitt B-B - Spannungsentwicklung.

#### 4.3.1.6 Auslastung der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens

In den Abbildungen 4.12, 4.13 und 4.14 sind Interaktionsdiagramme der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens abgebildet. Zur Darstellung der Diagramme wurden folgende Zeitpunkte berücksichtigt:

- nach dem Ausbruch des Erkundungsstollens (Abbildung 4.12),
- nach dem Ausbruch der Kalotte des Mittelstollens (Abbildung 4.13) und
- nach dem Ausbruch aller Vortriebe (Abbildung 4.14).

Mit dem Ausbruch des Mittelstollens wird die Tragfähigkeit der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens überschritten. Die Firste wird aufgrund der wirkenden Normalkraft zu stark belastet und versagt daher. Dieses Versagen spiegelt sich in Form von Rissbildungen bzw. Abplatzungen im Firstbereich der Spritzbetonschale wider. Mit dem Ausbruch der beiden Haupttunnel reduziert sich die Normalkraft im Bereich der Firste wieder, während sie an den Ulmen leicht ansteigt.

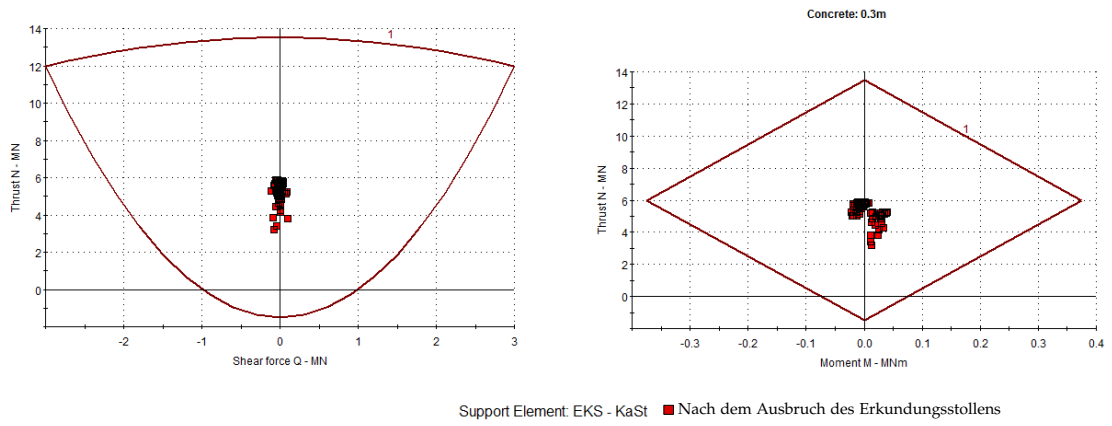


Abbildung 4.12: Schnitt B-B - Interaktion nach dem Ausbruch des Erkundungstollens.

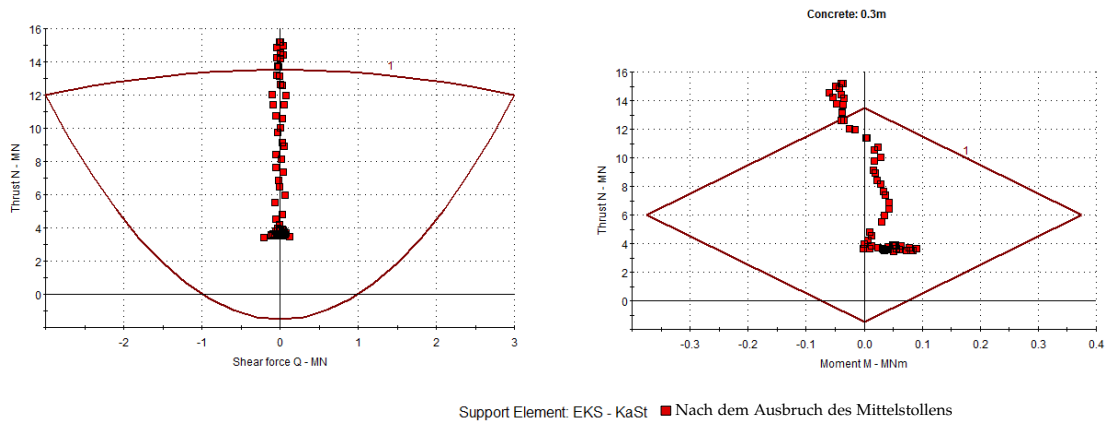


Abbildung 4.13: Schnitt B-B - Interaktion nach dem Ausbruch des Mittelstollens.

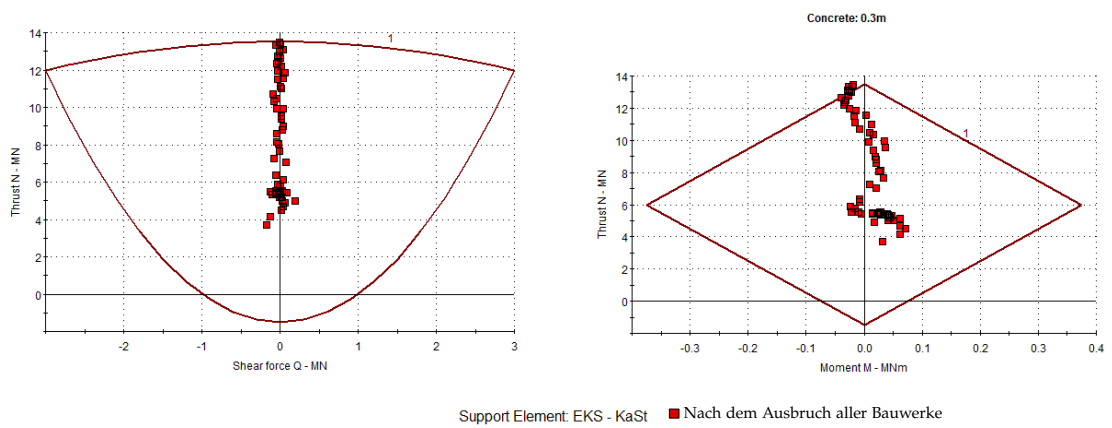


Abbildung 4.14: Schnitt B-B - Interaktion nach dem Ausbruch aller Bauwerke.

In Abbildung 4.15 ist die Entwicklung der Normalkraft entlang der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens dargestellt. Auch hier ist erkennbar, dass mit dem Ausbruch der beiden Haupttunnel die Normalkraft im Bereich der Firste und der Sohle wieder sinkt, während sie an den Ulmen erneut ansteigt. An den Ulmen erreicht die Normalkraft zudem dasselbe Spannungsniveau, welches bereits nach dem Ausbruch des Erkundungsstollens herrschte.

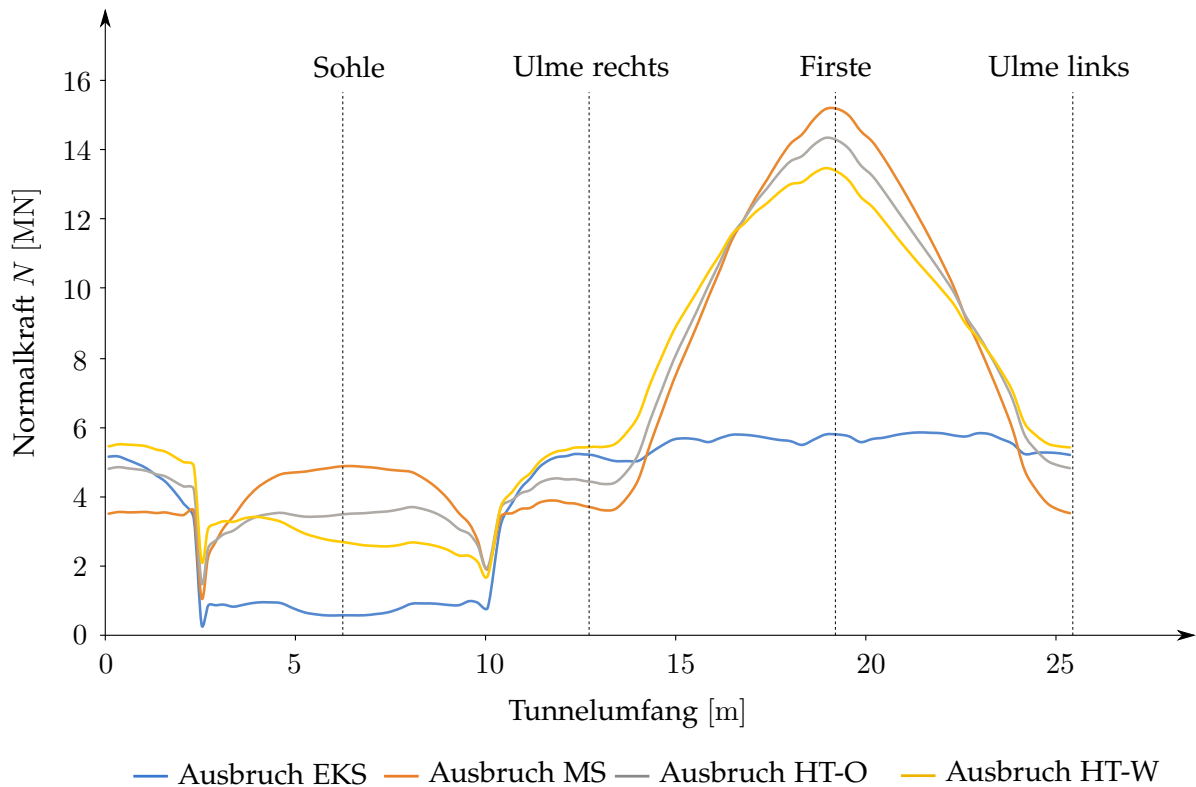


Abbildung 4.15: Schnitt B-B - Entwicklung der Normalkraft.

### 4.3.2 Schnitt F-F

Schnitt F-F stellt einen späteren Abschnitt der NHS-I bei zentrischer Lage des Mittelstollens dar. Gemäß der Dokumentation des Bauablaufes wurde an dieser Stelle der Mittelstollen noch nicht ausgebrochen. Mit dem Ausbruch des Mittelstollens wäre allerdings die minimale Bergfeste von 3,6 m - gemessen von der Sohle des Mittelstollens bis zur Firste des Erkundungsstollens - erreicht. Die Störungszone ESI-f4158 wandert im Vergleich zu Schnitt B-B weiter nach Westen und durchstreicht im Schnitt F-F zur Gänze die Ortsbrust des Erkundungsstollens. In der Abbildung 4.16 ist Schnitt F-F dargestellt.

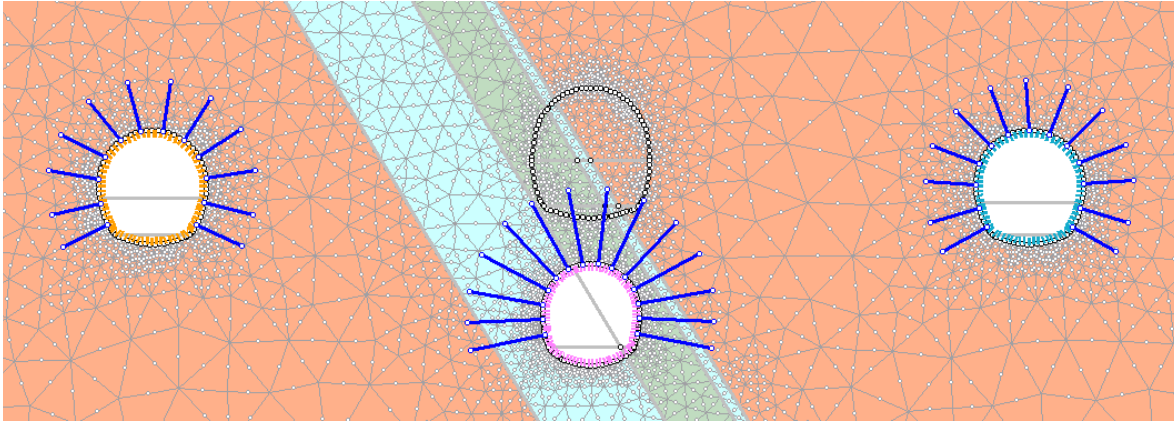


Abbildung 4.16: Schnitt F-F - Mittelstollen zentrisch.

#### 4.3.2.1 In-situ Spannungszustand

Bei einer Überlagerungshöhe von  $h_{\ddot{u}} = 685$  m und einem Seitendruckbeiwert von  $K_0 = 1$  betragen die vertikalen und horizontalen in-situ Spannungen  $\sigma_v = \sigma_h = 18,50$  MPa.

#### 4.3.2.2 Stützmittel

Im Schnitt F-F wurden 4 m und 6 m lange SN-Anker eingebaut. Aufgrund der Lage der Störungszone wurden die 6 m langen Anker über den gesamten Querschnitt des Erkundungsstollens eingebaut. Die Anker des Erkundungsstollens, welche in den Querschnitt des Mittelstollens eindringen, werden mit dem Strossen- und Sohlevortrieb des Mittelstollens abgeschnitten. Die Spritzbetonstärke wurde mit 25 cm für beide Haupttunnel festgesetzt. Im Erkundungsstollen wurde eine Spritzbetonstärke von 20 cm aufgetragen. Nachdem es aufgrund der Störungszone zu Schäden an der Spritzbetonschale gekommen ist, wurde im Erkundungsstollen die beschädigte Spritzbetonschale abschlagsweise abgelautet und durch eine neue 25 cm starke Spritzbetonschicht ersetzt (BBT-SE, 2013). Diese Sanierung erfolgte im Bereich Schnitt E-E bis Schnitt G-G und wurde auch in der Simulation berücksichtigt.

#### 4.3.2.3 Plastifizierung des Gebirges

In den beiden Abbildungen 4.17 und 4.18 sind die plastischen Zonen des Gebirges nach der Simulation des Bauablaufes dargestellt. In Abbildung 4.17 ist die plastische Zone ohne Ausbruch des Mittelstollens dargestellt. Aufgrund der Lage der Störungszone ist die plasti-

sche Zone rund um den Erkundungsstollen deutlich höher als um die beiden Haupttunnel. Mit Ausbruch des Mittelstollens vergrößert sich die plastische Zone noch einmal deutlich (s. Abbildung 4.18).

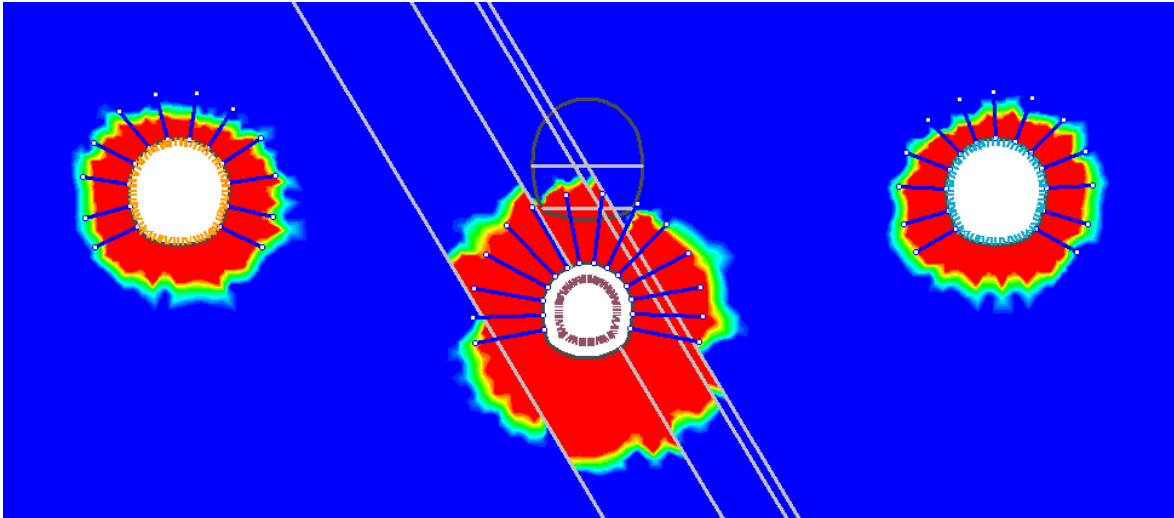


Abbildung 4.17: Schnitt F-F - Entwicklung der plastischen Zone ohne Mittelstollen.

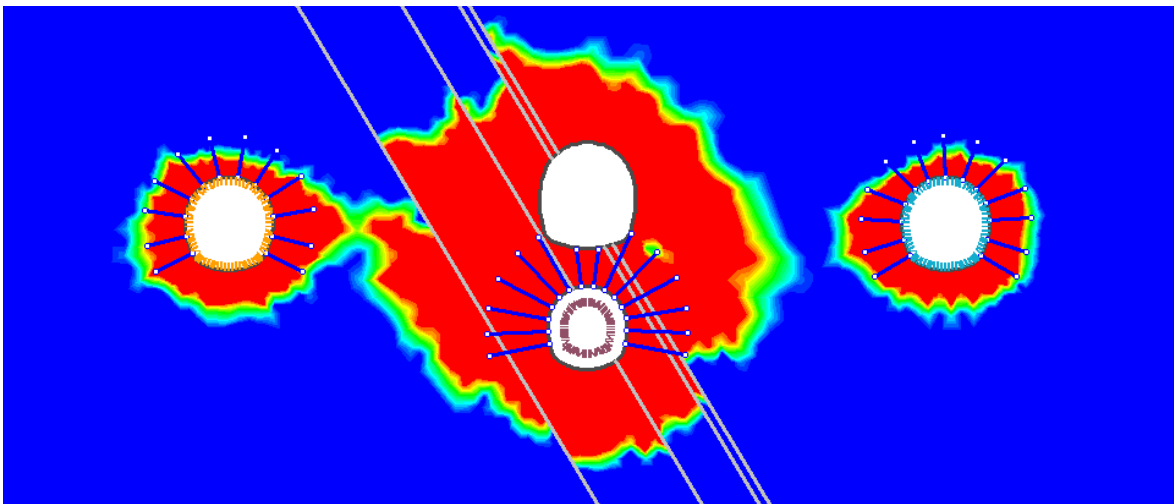


Abbildung 4.18: Schnitt F-F - Entwicklung der plastischen Zone mit Mittelstollen.

Je nach Lage und Einfallswinkel der Störungszone kann es zur Überschneidung der plastischen Zonen mit einem der beiden Haupttunnel führen. Eine so stark ausgeprägte plastische Zone macht sich insbesondere durch erhöhte Verschiebungswerte bemerkbar. Aufgrund der Störungszone können somit auch die Haupttunnel mit dem Ausbruch des Mittelstollens stärker beeinflusst werden.

#### 4.3.2.4 Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens

Abbildung 4.19 beschreibt die Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens nach dem Ausbruch jedes einzelnen Tunnelvortriebs. Zur Darstellung der Verschiebungsentwicklung wurden die Ulmen und die Firste herangezogen.

Aufgrund der Lage der Störungszone hat der Erkundungsstollen im Schnitt F-F höhere Verschiebungswerte als bei den vorherigen Analysen. Sie betragen zwischen 16 cm und 30 cm. Mit dem Ausbruch der beiden Haupttunnel ändert sich an den Verschiebungswerten kaum etwas.

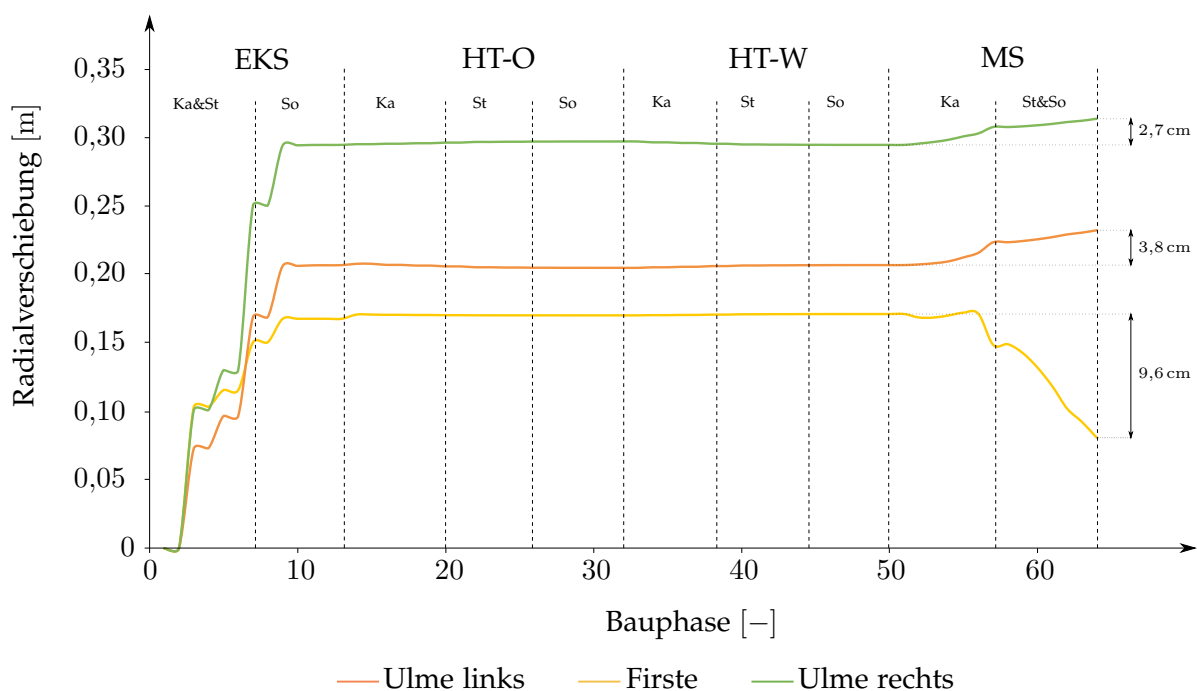


Abbildung 4.19: Schnitt F-F - Verschiebungsentwicklung.

Durch den Ausbruch des Mittelstollens kommt es zu deutlichen Verschiebungen des Erkundungsstollens. Die beiden Ulmen verschieben sich zwischen 2,7 cm und 3,8 cm. Die Höhe und Verteilung der zusätzlichen radialen Verschiebungen des Erkundungsstollens hängt dabei wesentlich von der Lage der Störungszone im Raum ab.

Die Firste erfährt aufgrund des Ausbruchs des Mittelstollens eine Hebung von 9,6 cm. Ein Großteil dieser Hebung geschieht während des Ausbruchs der Strosse inklusive Sohle. Dies ist auf die - im Vergleich mit dem Kallotenausbruch - erneute Verringerung der Bergfeste von 10 m auf 3,6 m zurückzuführen.

#### 4.3.2.5 Spannungsentwicklung rund um den Erkundungsstollen

In Abbildung 4.20 wird die Entwicklung der größten Hauptnormalspannung dem Bauablauf gegenübergestellt.

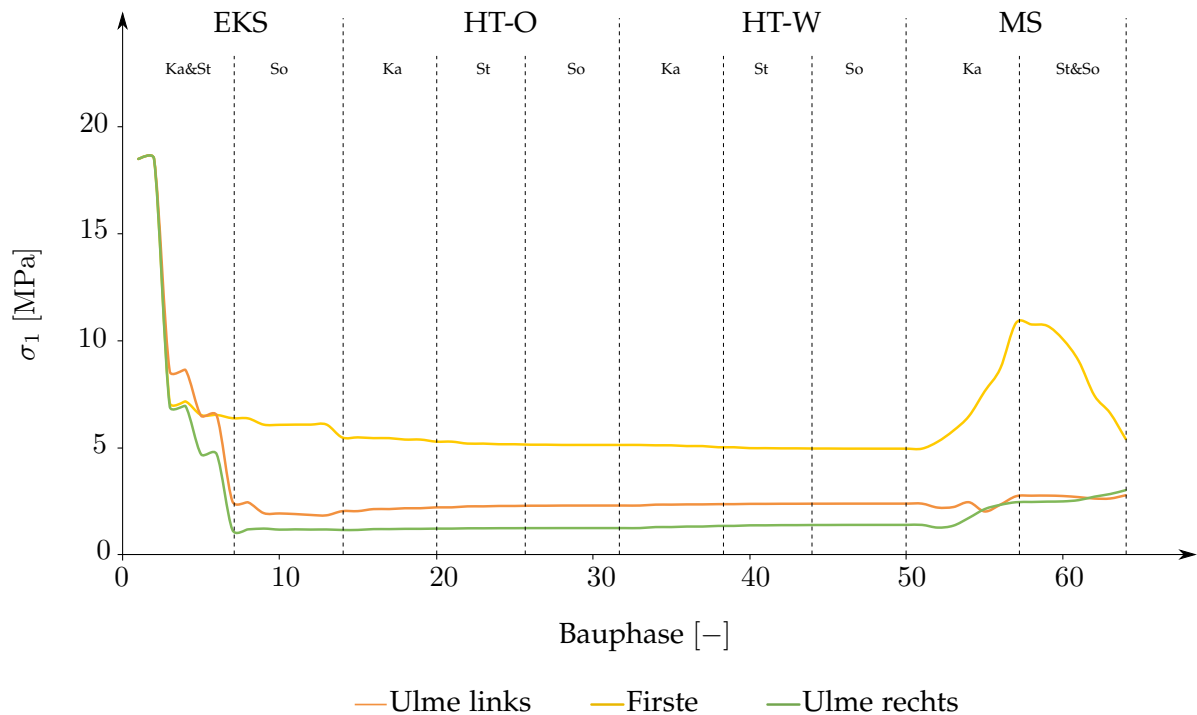


Abbildung 4.20: Schnitt F-F - Spannungsentwicklung.

Auch hier ist erkennbar, dass sich die Spannungen rund um den Erkundungsstollen erst mit Beginn des Ausbruchs des Mittelstollens merklich ändern. Von dieser Spannungsänderung ist im Wesentlichen der Firstbereich des Erkundungsstollens betroffen. Mit dem Ausbruch der Kalotte steigen die Spannungen zunächst deutlich an. Aufgrund des Ausbruchs der Strosse und der Sohle sinken diese jedoch wieder und erreichen nahezu dasselbe Spannungsniveau wie vor dem Ausbruch des Mittelstollens. Grund für den Spannungsrückgang ist die Lage der Störungszone, insbesondere der Kernzone. Diese liegt im Schnitt F-F zwischen Mittelstollen und Erkundungsstollen im Bereich der Bergfeste.



#### 4.3.2.6 Auslastung der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens

Der Rückgang der größten Hauptnormalspannung im Firstbereich des Erkundungsstollens hat auch eine Reduktion der Normalkraft in der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens zur Folge. Die Sohle, welche von der Zerrüttungszone umschlossen wird, erfährt hingegen eine Erhöhung der Normalkraft durch den Strossen- und Sohlausbruch vom Mittelstollen. In Abbildung 4.21 ist die Normalkraft entlang der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens dargestellt.

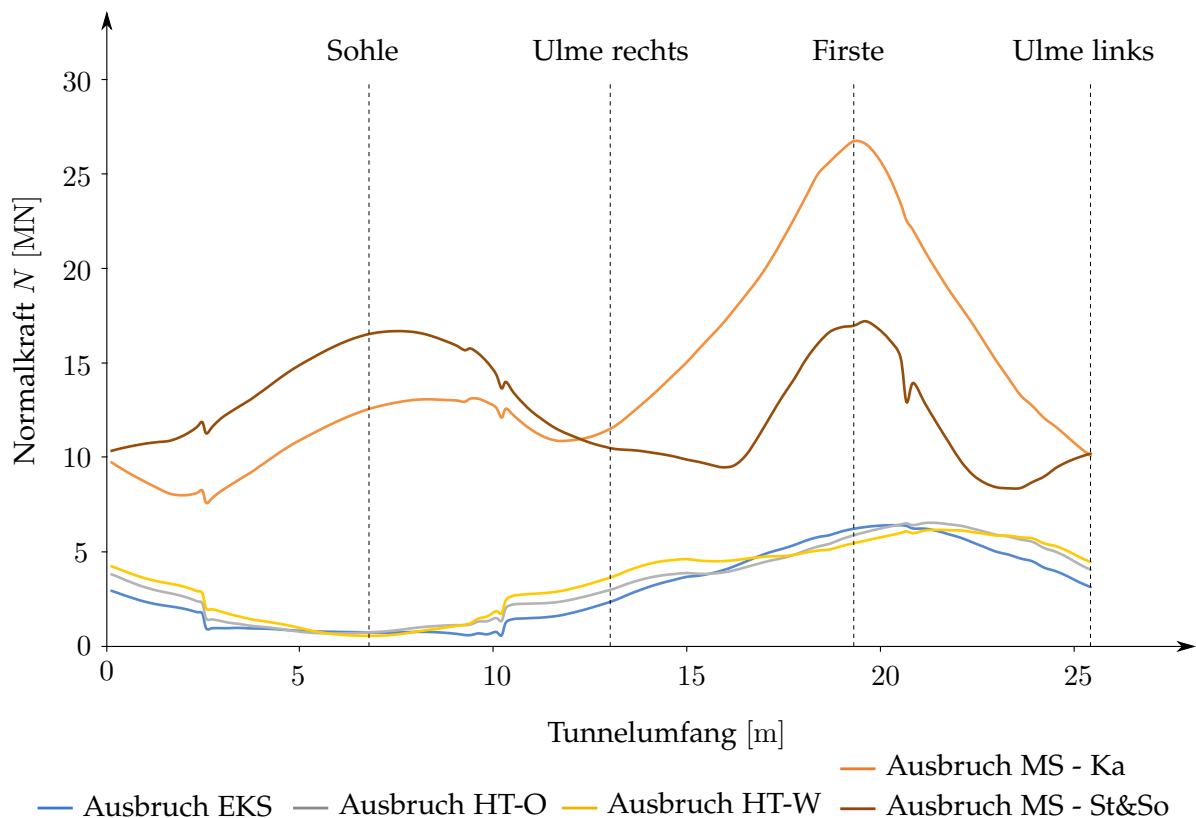


Abbildung 4.21: Schnitt F-F - Entwicklung der Normalkraft.

In den Abbildungen 4.22 und 4.23 sind Interaktionsdiagramme der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens dargestellt. In Abbildung 4.22 ist zunächst die Auslastung der Spritzbetonschale nach dem Ausbruch des Erkundungsstollens und der beiden Haupttunnel abgebildet. Die Zusatzbelastung der Spritzbetonschale aufgrund des Ausbruchs der beiden Haupttunnel ist dabei gering. In Abbildung 4.23 ist die Auslastung der Spritzbetonschale nach dem Ausbruch des Mittelstollens dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Spritzbetonfestigkeit bereits nach dem Ausbruch der Kalotte deutlich überschritten wird. Mit dem Ausbruch der Strosse und Sohle sinkt zwar die Normalkraft, allerdings wird das Biegemom-

ment in der Spritzbetonschale im First- und Kämpferbereich des Erkundungsstollens höher.

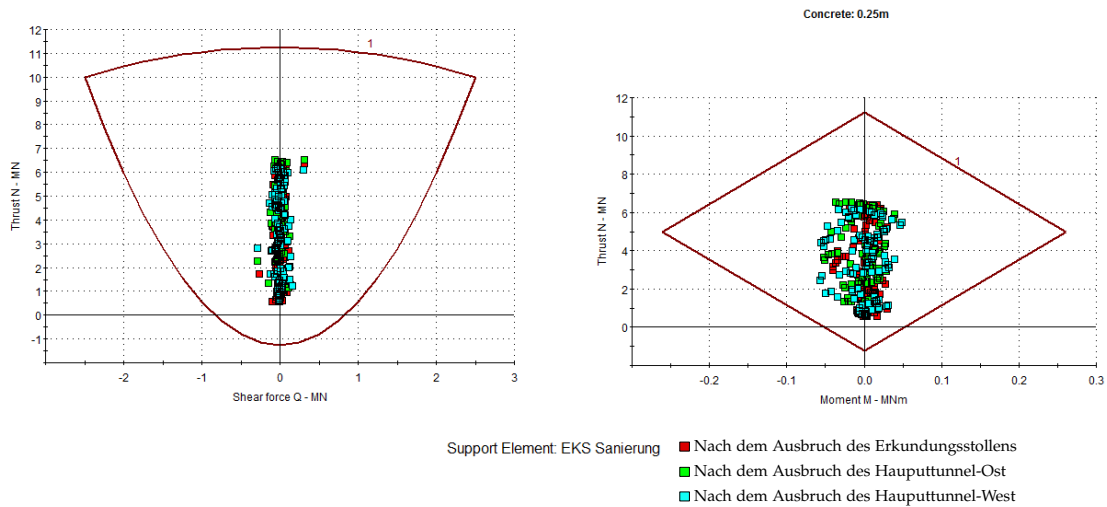


Abbildung 4.22: Schnitt F-F - Interaktion nach dem Ausbruch der Haupttunnel.

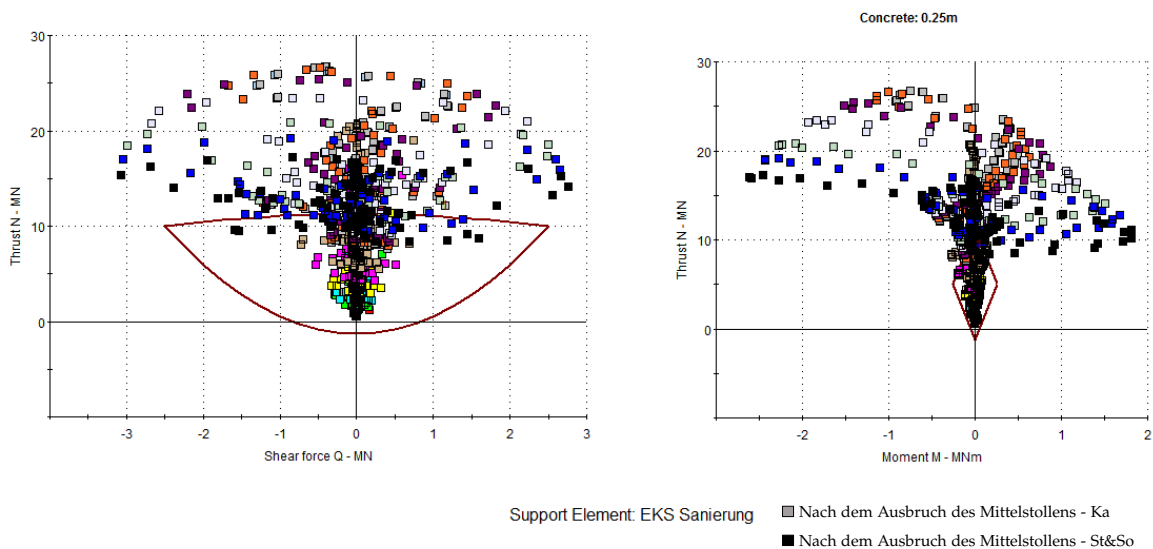


Abbildung 4.23: Schnitt F-F - Interaktion nach dem Ausbruch des Mittelstollens.

### 4.3.3 Schnitt F-F - Ohne Berücksichtigung der Störungszone

Im Folgenden wird der Einfluss auf den Erkundungsstollen ohne Berücksichtigung der Störungszone untersucht. Hierbei wird erneut Schnitt F-F verwendet. Dieser Analyseschritt stellt einen späteren Abschnitt der NHS-I dar, wo die Störungszone nicht mehr im Einflussbereich der Vortriebe liegt. Der Mittelstollen wurde zunächst ohne Einbau jeglicher Stützmitteln ausgebrochen. Dabei wurde die interne Stützkraft  $p_i$  schrittweise bis auf Null

reduziert. In Abbildung 4.24 ist Schnitt F-F ohne Berücksichtigung der Störungszone abgebildet.

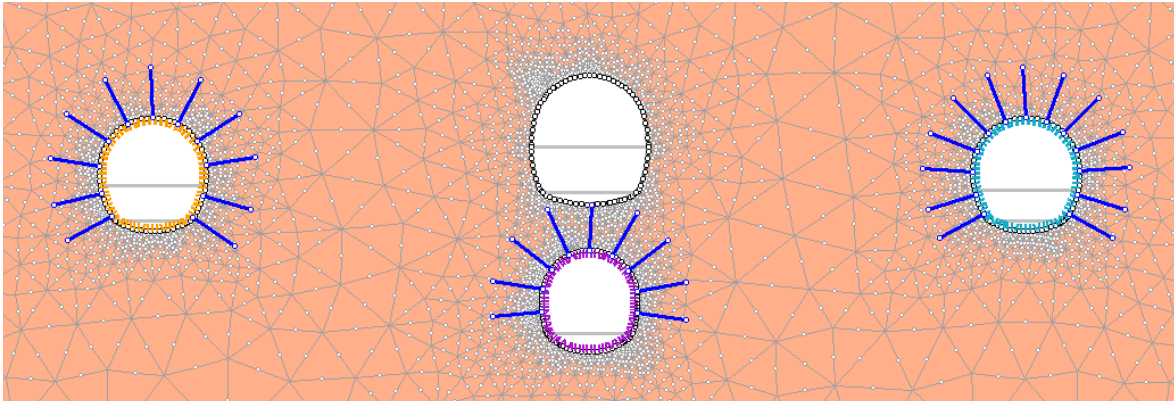


Abbildung 4.24: Schnitt F-F - Mittelstollen zentrisch ohne Störungszone.

#### 4.3.3.1 In-situ Spannungszustand

Das in-situ Spannungsfeld wurde wie beim zuvor beschriebenen Schnitt F-F inklusive der Darstellung der Störungszone mit  $\sigma_v = \sigma_h = 18,50$  MPa gewählt.

#### 4.3.3.2 Stützmittel

In dieser Analyse wurden in jedem Vortrieb 4 m lange SN-Anker eingebaut. Die Spritzbetonstärke beträgt 25 cm für beide Haupttunnel. Im Erkundungsstollen hingegen wurde eine Spritzbetonstärke von 20 cm aufgetragen.

#### 4.3.3.3 Plastifizierung des Gebirges

In Abbildung 4.25 ist die Ausdehnung der plastischen Zone dargestellt. Es wird deutlich, dass die plastischen Zonen symmetrischer und kleiner ausfallen, wenn die Störungszone nicht berücksichtigt wird.

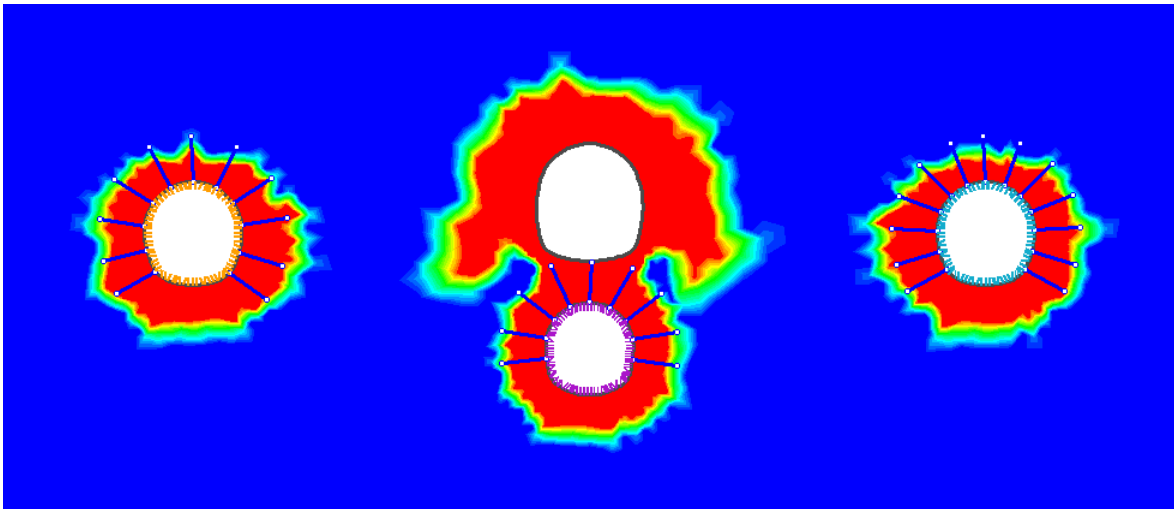


Abbildung 4.25: Schnitt F-F - Entwicklung der plastischen Zone ohne Störungszone.

#### 4.3.3.4 Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens

In Abbildung 4.26 ist die Verschiebungsentwicklung des Erkundungsstollens im Schnitt F-F ohne Berücksichtigung der Störungszone nach dem Ausbruch jedes einzelnen Tunnelvortriebs abgebildet.

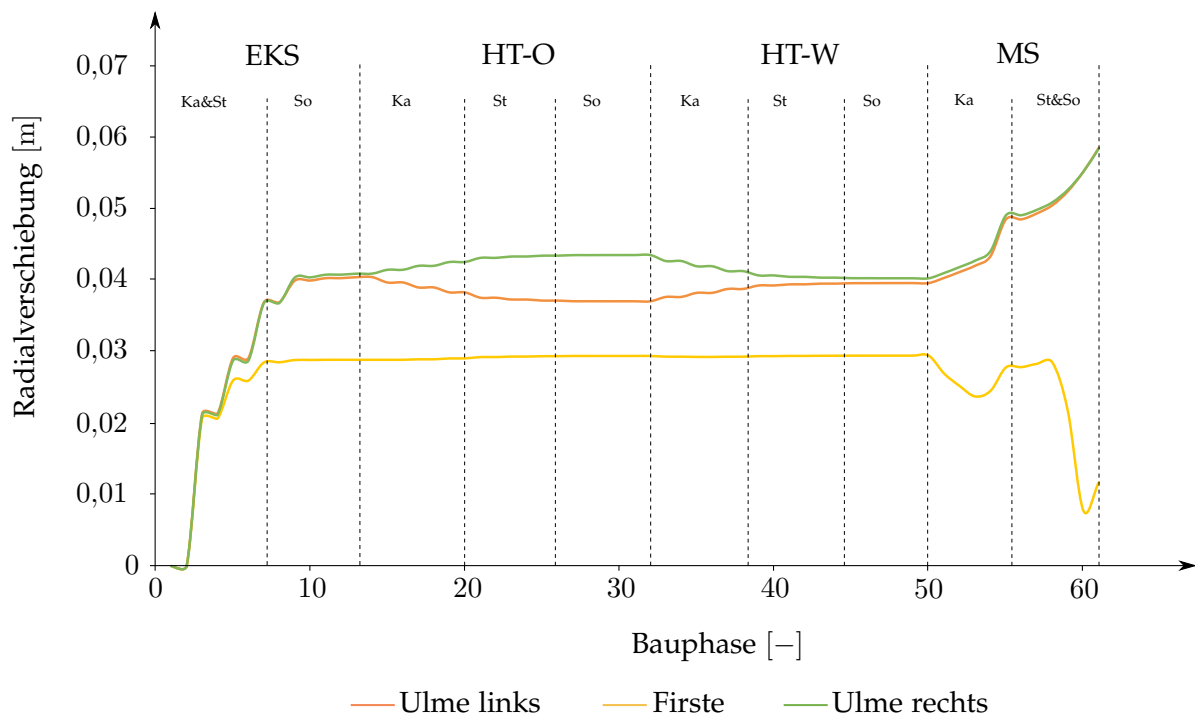


Abbildung 4.26: Schnitt F-F - Verschiebungsentwicklung ohne Störungszone.

Die Verschiebung der beiden Ulmen zeigt eine deutliche Symmetrie auf. Die Firste erfährt erst mit Ausbruch des Mittelstollens eine zusätzliche Verschiebung in Form einer Hebung.

#### 4.3.3.5 Spannungsentwicklung rund um den Erkundungsstollen

In Abbildung 4.27 ist die Spannungsentwicklung des Erkundungsstollens nach dem Ausbruch jedes einzelnen Tunnelvortriebs abgebildet. Der Firstbereich des Erkundungsstollens erfährt dabei eine deutliche Erhöhung der größten Hauptnormalspannung. Je geringer der innere Ausbaudruck ausfällt, desto höher steigen die Spannungen an.

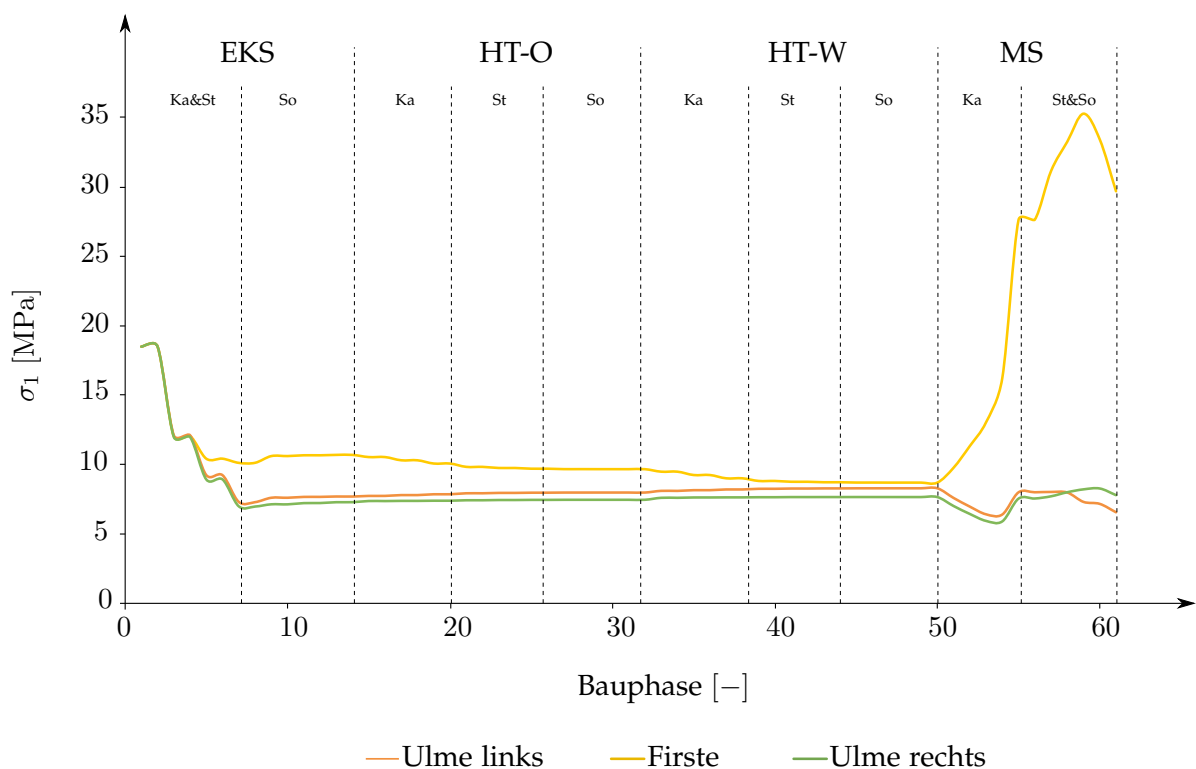


Abbildung 4.27: Schnitt F-F - Spannungsentwicklung ohne Störungszone.

#### 4.3.3.6 Auslastung der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens

In Abbildung 4.28 ist die Auslastung entlang der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens dargestellt. Im Gegensatz zum Schnitt F-F mit Berücksichtigung der Störungszone steigen hier die Normalkräfte mit dem Ausbruch der Strosse inklusive Sohle weiter an. Somit wird der Spritzbeton des Erkundungsstollens insbesondere im Bereich der Firste stärker beansprucht.

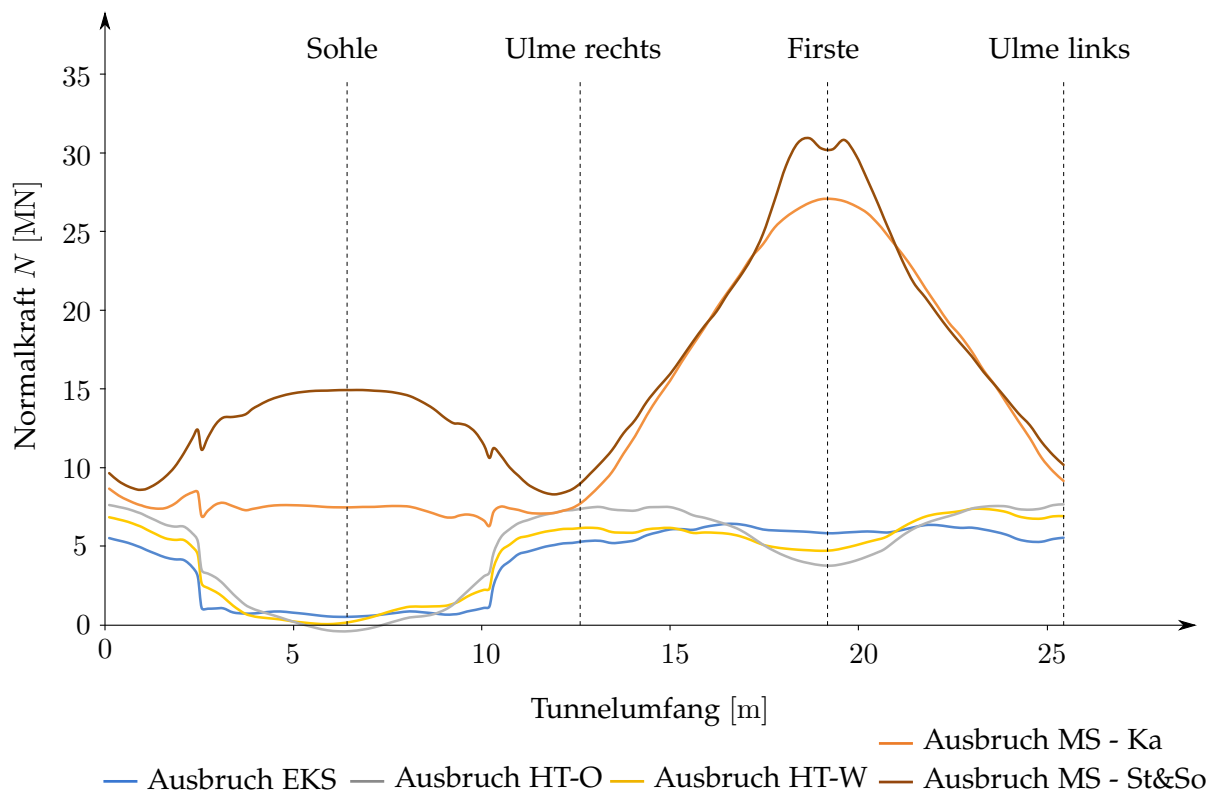


Abbildung 4.28: Schnitt F-F - Entwicklung der Normalkraft ohne Störungszone.

#### 4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Analyseschritte der vorliegenden Masterarbeit zusammengefasst. Zunächst wird auf die Ergebnisse des Mittelstollens bei exzentrischer Lage eingegangen. Danach folgt die Besprechung der Ergebnisse bei zentrischer Lage des Mittelstollens. Zuletzt werden noch beobachtete Ereignisse beschrieben und gemessene mit berechnete Verschiebungen verglichen.

##### *Exzentrische Lage des Mittelstollens:*

Es ist ersichtlich, dass eine exzentrische Lage des Mittelstollens (Schnitt A-A) den Erkundungsstollen kaum beeinflusst. Obwohl die beiden Ulmen geringe horizontale Konvergenzen aufweisen, gleichen sich die Verschiebungen durch die symmetrische Lage der Bauwerke (Erkundungsstollen und Haupttunnel) aus. Aus diesem Grund ist nach dem Ausbruch aller Bauwerke bei den Verschiebungen der beiden Ulmen kaum ein Unterschied auszu-

machen.

Auch die Spritzbetonschale des Erkundungsstollens weist nur eine geringe Erhöhung der Normalkraft auf. Diese Erhöhung betrifft indes nur die beiden Ulmen. Insgesamt lässt sich zur exzentrischen Lage des Mittelstollens sagen, dass die Tragfähigkeit der Spritzbetonschale noch Reserven aufweist.

#### *Zentrische Lage des Mittelstollens:*

Im Gegensatz zur exzentrischen Lage zeigt eine Analyse der zentrischen Lage des Mittelstollens deutliche Auswirkungen auf den Erkundungsstollen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Analyseschritte kurz zusammengefasst.

Bereits Schnitt B-B liefert in der numerischen Simulation erste Anzeichen einer Beeinflussung des Erkundungsstollens. Obwohl die minimale Bergfeste von 3,6 m noch nicht erreicht wurde, wird die Tragfähigkeit der Spritzbetonschale nach dem Ausbruch der Kalotte des Mittelstollens überschritten. Vom Versagen der Spritzbetonschale ist vor allem der Firstbereich des Erkundungsstollens betroffen.

Bei Schnitt F-F ist die Annäherung des Mittelstollens an den Erkundungsstollen vollbracht und somit die minimale Bergfeste von 3,6 m erreicht. Aufgrund der geringen Bergfeste und der ungünstig liegenden Störungszone ist der Einfluss auf den Erkundungsstollen groß. Die plastischen Zonen, welche teilweise eine gemeinsame Zone bilden, lassen bereits eine starke Interaktion erahnen. Nach dem Ausbruch des Mittelstollens weisen die beiden Ulmen eine Zusatzverschiebung im Zentimeterbereich auf. Die Firste des Erkundungsstollens erfährt hingegen eine Hebung von knapp 10 cm. Die Spannungskonzentrationen rund um den Erkundungsstollen führen demnach zu einer deutlichen Überbeanspruchung im nahezu gesamten Bereich der Spritzbetonschale. Wird Schnitt F-F ohne Störungszone modelliert, ändert sich an der Interaktion kaum etwas. Es ist jedoch hervorzuheben, dass sich mit Ausbruch der Strosse und Sohle des Mittelstollens die Normalkraft in der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens - im Gegensatz zum Modell mit der Störungszone - erhöht. Die Steigerung der Normalkraft bezieht sich dabei insbesondere auf den First- und Sohlbereich.

Weiters ist noch festzuhalten, dass der Ausbruch der beiden Haupttunnel in keinem der simulierten Schnitte einen relevanten Einfluss auf die Auslastung der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens aufweist.

**Beobachtete Ereignisse:**

Die an der NHS-I beobachteten Ereignisse unterstützen die Ergebnisse der vorliegenden numerischen Simulation. Nachdem zu einem späteren Zeitpunkt die Kalotte des Mittelstollens über die ganze NHS-I ausgebrochen wurde, sind über große Abschnitte hinweg Schäden an der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens aufgetreten. Betroffen waren hier meist der First- und Kämpferbereich. Zusätzlich wurden an manchen Stellen des Erkundungsstollens deformierte Ausbaubögen beobachtet (Sulzbacher & Willegger, 2017). Abbildung 4.29 zeigt beispielhaft zwei Aufnahmen der abgeplatzten Spritzbetonschale des Erkundungsstollens, welche auf den Kalottenausbruch des Mittelstollens zurückzuführen sind.



Abbildung 4.29: Abplatzungen der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens  
(Fotos: Christoph Willegger).

**Gegenüberstellung von Verschiebungen:**

Im Folgenden werden die am Erkundungsstollen gemessene Verschiebungen (Messquerschnitt MQ 6631) den berechneten Verschiebungen gegenübergestellt. Zur Darstellung der berechneten Verschiebungen wird Schnitt F-F - ohne Berücksichtigung der Störungszone - verwendet. Dieser ist in Abbildung 4.30 dargestellt und spiegelt die Situation des Messquerschnittes MQ 6631 wider.



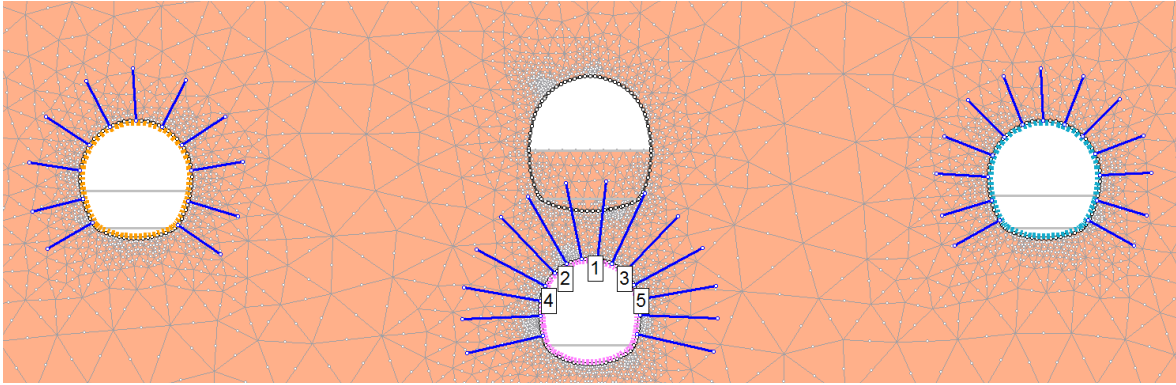


Abbildung 4.30: Gegenüberstellung der Verschiebungen bei MQ 6631.

Die gemessenen Verschiebungen beziehen sich nur auf den Ausbruch der Kalotte des Mittelstollens. Zum direkten Vergleich der berechneten und gemessenen Verschiebungen wurden in RS2 nach dem Ausbruch der beiden Haupttunnel alle Verschiebungsbeträge Null gesetzt. In Abbildung 4.31 sind die fünf Messpunkte (MQ 6631) des Erkundungstollens, welche zur Darstellung der berechneten Verschiebungen verwendet werden, im Detail abgebildet.

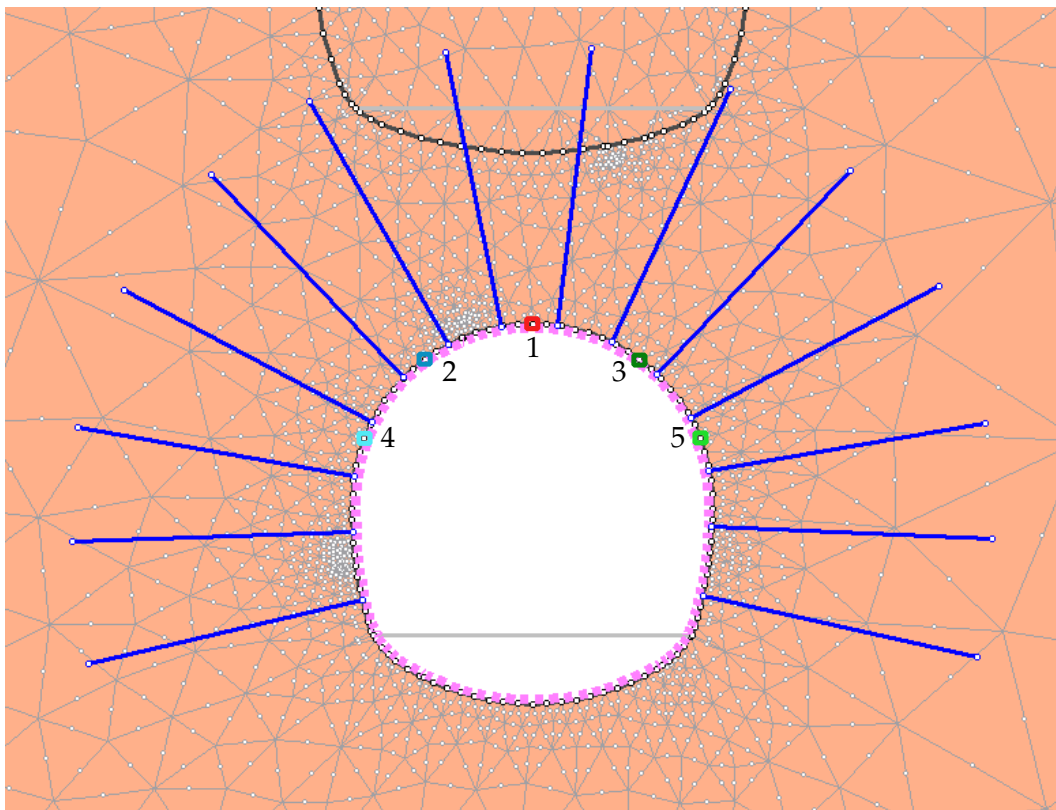


Abbildung 4.31: MQ 6631 - Messpunkte des Erkundungstollens.

Abbildung 4.32 zeigt die gemessenen vertikalen Verschiebungen im Erkundungsstollen bei MQ 6631. Es ist ersichtlich, dass sich aufgrund des Ausbruchs der Kalotte des Mittelstollens alle fünf Messpunkte im Bereich von ca. 5 mm heben.

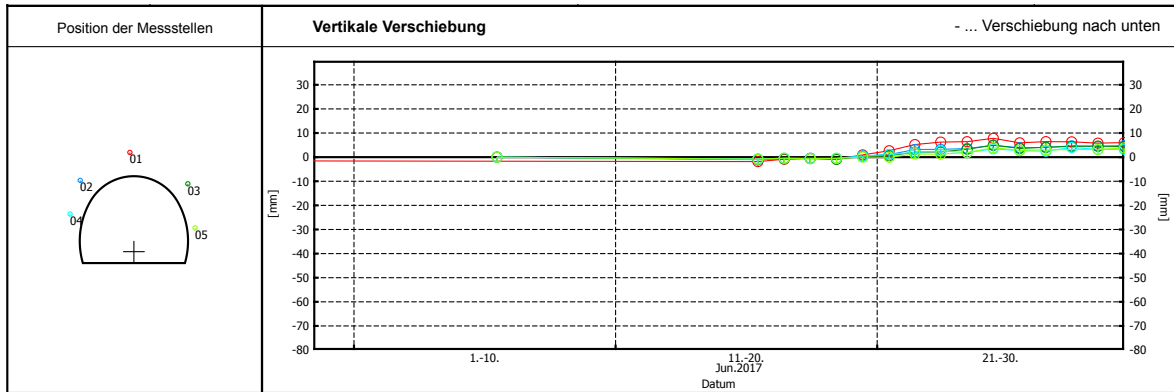


Abbildung 4.32: MQ 6631 - Gemessene vertikale Verschiebungen (ARGE-GTM, 2017).

Abbildung 4.33 zeigt die berechneten vertikalen Verschiebungen im Erkundungsstollen. Auch hier ist eine Hebung aller fünf Messpunkte im Bereich von ca. 5 mm ersichtlich.

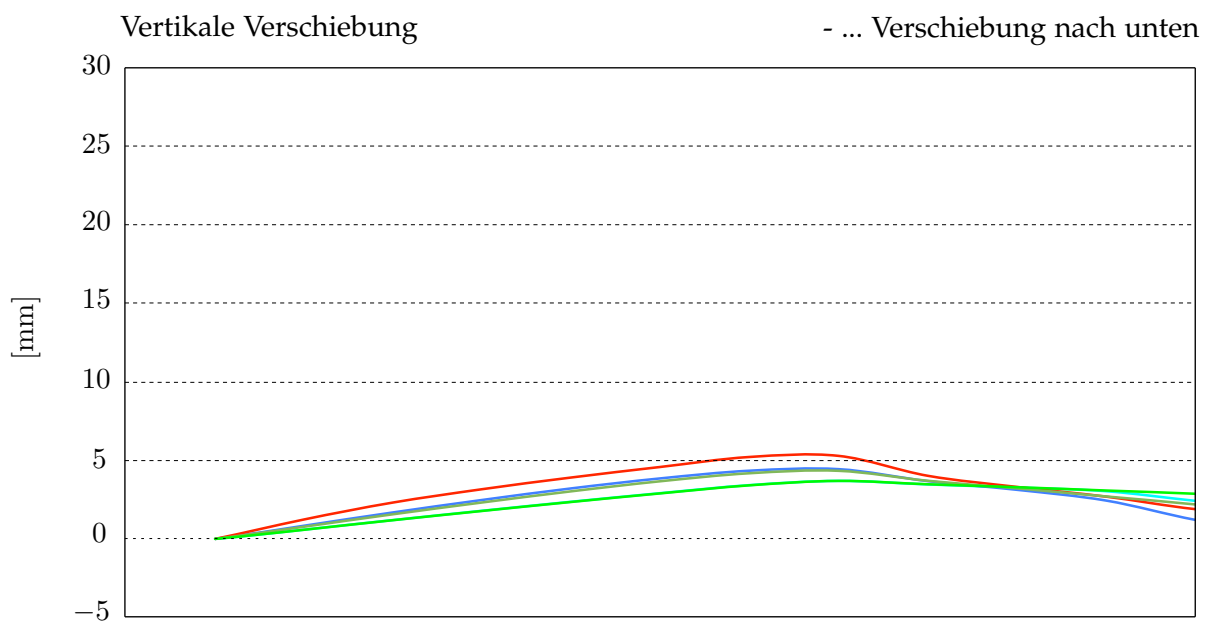


Abbildung 4.33: Berechnete vertikale Verschiebungen.

Abbildung 4.34 zeigt die gemessenen horizontalen Verschiebungen im Erkundungsstollen bei MQ 6631. Alle fünf Messpunkte zeigen dabei eine Zunahme der horizontalen Verschiebungen und somit eine Verkleinerung des Querschnittes. Bei Blick in Stationierungsrichtung verschieben sich die in blau dargestellten linken Messpunkte (linke Ulme und linker Kämpfer) um ca. 8 mm nach rechts und die in grün dargestellten rechten Messpunkte (rechte Ulme und rechter Kämpfer) um ca. 4 mm nach links.

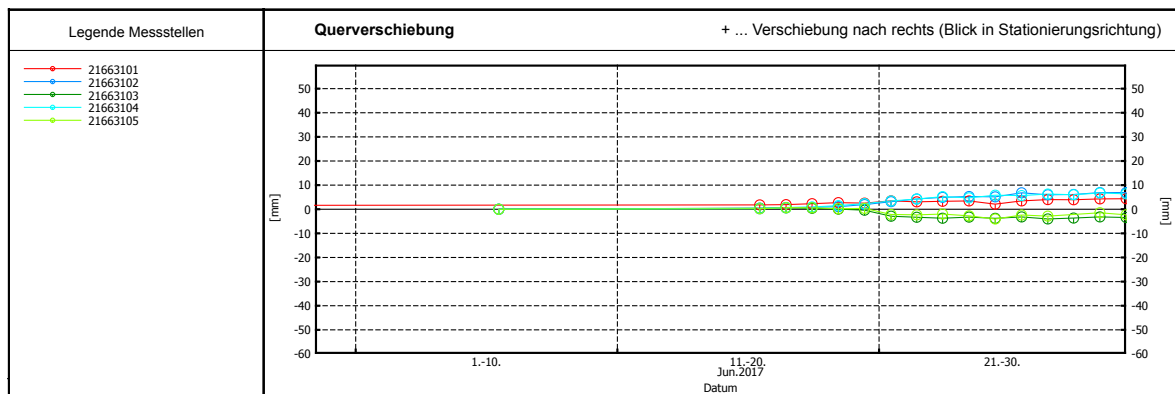


Abbildung 4.34: MQ 6631 - Gemessene horizontale Verschiebungen (ARGE-GTM, 2017).

Abbildung 4.35 zeigt die berechneten horizontalen Verschiebungen im Erkundungsstollen. Auch diese berechneten Verschiebungen zeigen ähnliche Werte wie die gemessenen Verschiebungen, insbesondere die Messpunkte der beiden Ulmen und Kämpfer.

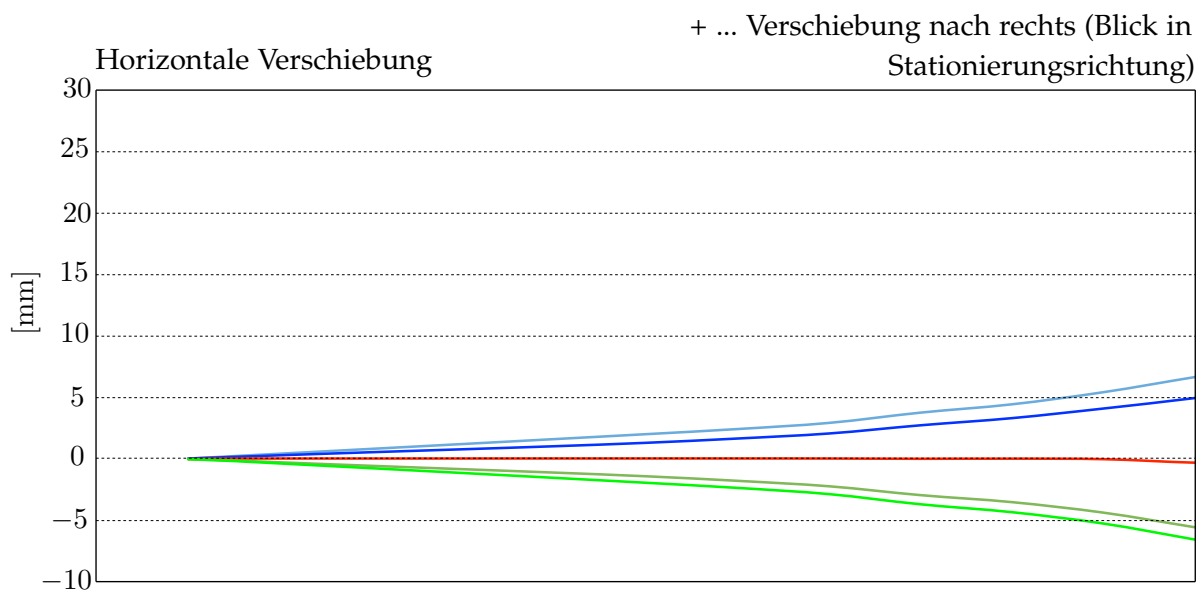


Abbildung 4.35: Berechnete horizontale Verschiebungen.

## 5 Fazit

Die vorliegende Masterarbeit präsentiert eine generelle Übersicht der Nothaltestelle Innsbruck des Brenner Basistunnels. Neben der Beschreibung der baulichen Aspekte wurde vor allem die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Tunnelvortriebe untersucht, wobei der Erkundungsstollen im Vordergrund der Analyse steht. Hierbei wurde eine zweidimensionale numerische Simulation mit dem Programm RS2 von Rocscience durchgeführt. Diese Simulation wurde - aufgrund der Vorrangigkeit der gegenseitigen Beeinflussung und den hinzukommenden komplizierten geologischen sowie geomterischen Verhältnissen der Nothaltestelle - sehr einfach gehalten. So wurden unter anderem die Vorverschiebungen der einzelnen Vortriebe abgeschätzt und für die Störungszone vereinfacht das Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb verwendet. Obwohl die durchgeführte Simulation Vereinfachungen und somit Limitationen mit sich bringt, können wichtige Erkenntnisse und Rückschlüsse gewonnen werden. Dies zeigt sich vor allem durch die Gegenüberstellung der beobachteten Ereignisse mit den berechneten Ergebnissen. Letztere zeigen unter anderem ein Versagen der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens, welches bereits nach dem Ausbruch der Kalotte des Mittelstollens einsetzt. Die Dokumentation des fortschreitenden Bauablaufs bestätigt das Ergebnis der vorliegenden numerischen Simulation. Nachdem die Kalotte des Mittelstollens vollständig ausgebrochen wurde, waren deutliche Schäden an der Spritzbetonschale des Erkundungsstollens erkennbar. Die Berechnungen zeigen des Weiteren, dass die Schale des Erkundungsstollens mit dem Ausbruch der Strosse und Sohle des Mittelstollens einer erhöhten Belastung ausgesetzt wird. Diese Ergebnisse bzw. Ereignisse lassen darauf schließen, dass bei der Bauplanung die starke Interaktion der Tunnelbauwerke im Bereich der Nothaltestelle Innsbruck unterschätzt wurde. Der steife Ausbau des Erkundungsstollens kann die durch den Ausbruch des Mittelstollens bedingten Spannungskonzentrationen nicht aufnehmen und zeigt somit zu keinem Zeitpunkt ein stabiles Verhalten. Aufgrund dieser Problematik und der Unwirtschaftlichkeit des steifen Ausbaus wird im Folgenden ein möglicher Lösungsansatz vorgestellt.

Um den Erkundungsstollen im Bereich der Nothaltestellen des Brenner Basistunnels nicht zu gefährden, stellt die Methode des nachgiebigen Ausbaus ein alternatives Vortriebskonzept dar. Diese Methode wird besonders in druckhaftem Gebirge eingesetzt und bedingt, aufgrund des Zulassens von radialen Verschiebungen, dass ein Versagen der Spritzbetonschale verhindert wird. Eine Art des nachgiebigen bzw. duktilen Ausbausystems stellen Stauchelemente dar, welche in Verbindung mit Spritzbeton und Anker verwendet werden und einen kontrollierten Lastaufbau erlauben. Hier sei das System LSC (Lining Stress Controllers) der Firma Alwag erwähnt, das gegenüber anderen duktilen Stauchelementen deutliche Vorteile aufweist (Radončić et al., 2009). In Abbildung 5.1 ist ein LSC Element mit je vier axial beanspruchten Stauchrohren und die zugehörige Arbeitslinie dargestellt. Die Arbeitslinie zeigt einen annähernd linearen Anstieg des Widerstands bis zu einem Stauchweg von ca. 80 mm und einer Kraft von ca. 2250 kN. Diese Last bleibt dann über mehrere Zentimeter Stauchung des LSC Elements in etwa konstant (Radončić et al., 2009). Die Arbeitslinie mit dem geforderten Stauchweg lässt sich dabei auf die jeweiligen Gebirgsverhältnisse optimieren, indem die Länge oder die Anzahl der Elemente verändert wird (Radončić et al., 2009).

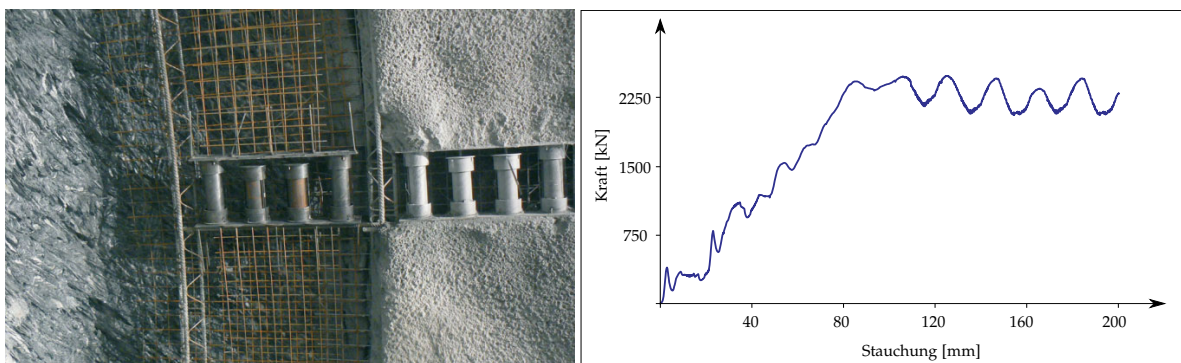


Abbildung 5.1: Links: LSC Elemente mit je 4 Stauchrohren. Rechts: Zugehörige Arbeitslinie eines Stauchelements, entnommen aus (Radončić et al., 2009).

Bei duktilen Ausbausystemen ist neben der räumlichen und zeitlichen Entwicklung der Verschiebungen vor allem die zeitabhängige Entwicklung der Spritzbetoneigenschaften von besonderer Bedeutung (Radončić et al., 2009). Um ein duktiler Ausbausystem am Erkundungsstollen auf der Länge einer Nothaltestelle des Brenner Basistunnels auszulegen, ist eine weiterführende - numerische oder analytische - Berechnung erforderlich.

---

## Literaturverzeichnis

- ARGE-GTM (2017). Geotechnische Messung im Bereich Tulfes-Pfons des Brenner Basistunnels. Unveröffentlichtes Dokument der BBT SE.
- BBT-SE (2013). Ausbaufestlegung EKS-A-71, Anordnung zusätzlicher Maßnahmen und Stützmittel. Unveröffentlichtes Dokument der BBT SE.
- BBT-SE (2016a). Der Brenner Basistunnel - ein neuer Verbindungsweg durch die Alpen. Broschüre der BBT SE.
- BBT-SE (2016b). Projektbereich Innsbruck. Broschüre der BBT SE.
- Bergmeister, K., Weifner, T., & Collizzollo, M. (2012). Auswirkungen der geometrischen Lage der Tunnel auf die Gebirgsplastifizierung und die Spritzbetonschale beim Brenner Basistunnel. *Beton-und Stahlbetonbau*, 107(11), 735–748.
- Brandner, R., Reiter, F., & Töchterle, A. (2008). Überblick zu den Ergebnissen der geologischen Vorerkundung für den Brenner Basistunnel. *Geo Alp*, 5, 165–174.
- Coulomb, C. A. (1773). Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. *Mem. Div. Sav. Acad.*, 7, 343–387.
- Eckbauer, W., Insam, R., & Zierl, D. (2014). Planungsoptimierungen beim Brenner Basistunnel aus Sicht der Instandhaltung und Nachhaltigkeit. *Geomechanik und Tunnelbau*, 7(5).
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Diederichs, M., & Corkum, B. (2007). Rock-support interaction analysis for tunnels in weak rock masses. *Evert Hoek, Practical Rock Engineering. Rocscience*.
- Holzleitner, W. & Lanbach, B. (2015). Annäherung Vortrieb Mittelstollen an den Erkundungsstollen. Unveröffentlichter Technischer Bericht der BBT SE.

- Mohr, O. (1882). Über die Darstellung des Spannungszustandes und des Deformationszustandes eines Körperelementes und über die Anwendung derselben in der Festigkeitslehre. *Der Civilingenieur*, 28, 113–156.
- Radončić, N., Schubert, W., & Moritz, B. (2009). Ductile support design. Zur Auslegung duktiler Ausbauten. *Geomechanics and tunnelling*, 2(5), 561–577.
- Reinhold, C. (2013). Geologisch-hydrogeologisch-geomechanische Planung. Unveröffentlichter Technischer Bericht der BBT SE.
- Reinhold, C. & Töchterle, A. (2013). Ermittlung der geomechanischen Kennwerte von Störungszonen im Innsbrucker Quarzphyllit auf Basis der Erkundungsergebnisse beim Brenner Basistunnel. In *19. Tagung für Ingenieurgeologie*.
- Sulem, J., Panet, M., & Guenot, A. (1987). An Analytical Solution for Time-dependent Displacements in a Circular Tunnel. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, volume 24, (pp. 155–164). Elsevier.
- Sulzbacher, G. & Willegger, C. (2017). Bericht der Geotechnik. Unveröffentlichter Technischer Bericht der BBT SE.
- Vlachopoulos, N. & Diederichs, M. (2009). Improved longitudinal displacement profiles for convergence confinement analysis of deep tunnels. *Rock mechanics and rock engineering*, 42(2), 131–146.