



Mit Beteiligung der Europäischen Union aus dem Haushalt der Transeuropäischen Verkehrsnetze finanziertes Vorhaben

Opera finanziata con la partecipazione dell'Unione Europea attraverso il bilancio delle reti di trasporto transeuropee



Ausbau Eisenbahnachse München-Verona  
**BRENNER BASISTUNNEL**  
Ausführungsplanung

Potenziamento asse ferroviario Monaco-Verona  
**GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO**  
Progettazione esecutiva

<b>D0700: Baulos Mauls 2-3</b>		<b>D0700: Lotto Mules 2-3</b>					
<b>Projekteinheit</b> Gesamtbauwerke Teil 1		<b>WBS</b> Opere generali Parte 1					
<b>Dokumentenart</b> Statische Berechnung		<b>Tipo Documento</b> Calcolo statico					
<b>Titel</b> Statische Berechnung CT2-T4		<b>Titolo</b> Relazione di calcolo CT2-T4					
 <b>RTI 4P</b> Raggruppamento Temporaneo di Imprese 4P <small>via Pio Iler S.r.l., Via G.B. Sammartini 5, 20125 Milano, Tel.: +39 026767911, Fax: +39 0287152612</small>		Generalplaner / Responsabile integrazioni prestazioni specialistiche Ing. Enrico Maria Pizzarotti Ord. Ingg. Milano N° A 29470					
<b>Mandataria</b>  PRO ITER Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l.	<b>Mandante</b>  PÖYRY	<b>Mandante</b>  pini swiss engineers	<b>Mandante</b>  PASQUALI-RAUSA ENGINEERING S.r.l./G.m.b.H.				
Fachplaner / il progettista specialista Ing. Enrico Maria Pizzarotti Ord. Ingg. Milano N° A 29470		Fachplaner / il progettista specialista					
	<b>Datum / Data</b>	<b>Name / Nome</b>	<b>Gesellschaft / Società</b>				
	Bearbeitet / Elaborato 30.01.2015	Moja	Pro Iter				
	Geprüft / Verificato 30.01.2015	Rivoltini	Pro Iter				
 <b>BBT</b> Galleria di Base del Brennero Brenner Basistunnel BBT SE		<b>Name / Nome</b> R. Zurlo	<b>Name / Nome</b> K. Bergmeister				
Projekt-kilometer / Chilometro progetto von / da 32.0+88 bis / a 54.0+15 bei / al	Projekt-kilometer / Chilometro opera von / da 46.7+69 bis / a 54.0+15 bei / al	Status Dokument / Stato documento	Massstab / Scala -				
Staat Stato	Los Lotto	Einheit Unità	Nummer Numero	Dokumentenart Tipo Documento	Vertrag Contratto	Nummer Codice	Revision Revisione
02	H61	OP	090	KST	D0700	21053	21

## Bearbeitungsstand Stato di elaborazione

Revision Revisione	Änderungen / Modifiche	Verantwortlicher Änderung Responsabile modifica	Datum Data
21	Abgabe für Ausschreibung / Emissione per appalto	Rivoltini	30.01.2015
20	Überarbeitung infolge Dienstanweisung Nr. 1 vom 17.10.2014 / Revisione a seguito ODS n°1 del 17.10.14	Rivoltini	04.12.2014
11	Projektvollständigung und Umsetzung der Verbesserungen aus dem Prüfverfahren / Completamento progetto e ricepimento istruttoria	Rivoltini	09.10.2014
10	Endabgabe / Consegna definitiva	Rivoltini	31.07.2014

<b>1</b>	<b>EINFÜHRUNG</b>	
<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>MATERIALIEN</b>	
<b>2</b>	<b>MATERIALI</b> .....	<b>9</b>
2.1	SPRITZBETON	
2.1	BETONCINO PROIETTATO .....	9
2.2	LEHRGERÜSTE	
2.2	CENTINE.....	9
2.3	ANKER	
2.3	ANCORAGGI .....	9
2.4	BETON	
2.4	CALCESTRUZZO.....	9
2.5	BEWEHRUNGSSTAHL	
2.5	ACCIAIO DA ARMATURA.....	10
<b>3</b>	<b>GEOTECHNISCHES MODELL</b>	
<b>3</b>	<b>MODELLO GEOTECNICO</b> .....	<b>11</b>
3.1	GEOLOGIE UND GEOMECHANIK	
3.1	GEOLOGIA E GEOMECCANICA.....	11
<b>4</b>	<b>GEBIRGSVERHALTEN</b>	
<b>4</b>	<b>COMPORAMENTO DELLA ROCCIA</b> .....	<b>14</b>
4.1	ABSCHÄTZUNG DES GEBIRGSVERHALTEN	
4.1	VALUTAZIONE DEL COMPORAMENTO DELLA ROCCIA.....	14
<b>5</b>	<b>AUSSENSCHALE</b>	
<b>5</b>	<b>RIVESTIMENTO DI PRIMA FASE</b> .....	<b>18</b>
5.1	ANALYSE DER AUSBRUCHPHASEN	
5.1	ANALISI DELLE FASI DI SCAVO .....	18
5.1.1	Der Berechnungskodex	
5.1.1	Il codice di calcolo .....	18
5.1.2	Analysierte Ausbruchquerschnitte	
5.1.2	Sezioni analizzate .....	19
5.1.3	Bildendes Gebirgsmodell	
5.1.3	Modello costitutivo dell'ammasso .....	19
5.1.4	Modellgeometrie und Ausgangsspannungslage	
5.1.4	Geometria del modello e stato tensionale iniziale .....	19
5.1.5	Eigenschaften der Außenschale	
5.1.5	Caratteristiche dei rivestimenti di prima fase .....	20
5.1.6	Laststufe	
5.1.6	Step di carico.....	20
5.1.7	Nachweisverfahren	
5.1.7	Procedura di verifica.....	22
5.1.8	Ergebnisse	
5.1.8	Risultati.....	22
5.2	ANALYSE DER ORTBRUSTSTABILITÄT	
5.2	ANALISI DELLA STABILITÀ DEL FRONTE .....	22
5.2.1	Nachweisverfahren	
5.2.1	Procedura di verifica.....	22

5.2.2	Ergebnisse	
5.2.3	Risultati	
5.3	VERHALTENSÜBERPRÜFUNG ZUM AUSBRUCH UND BEMESSUNG DES AUSBRUCHQUERSCHNITTS CT2-A (BP47/1) DES GEBIRGES FVM-S-PS	
5.3	VERIFICA DEL COMPORTAMENTO ALLO SCAVO E DIMENSIONAMENTO DELLA SEZIONE CT2-A (BP 47/1) NELL'AMMASSO FVM-S-PS .....	23
5.3.1	Der Berechnungskodex	
5.3.1	Il codice di calcolo .....	23
5.3.2	Bildendes Gebirgsmodell	
5.3.2	Modello costitutivo dell'ammasso .....	23
5.3.3	Schematisierung der Konsolidierung	
5.3.3	Schematizzazione dei consolidamenti .....	24
5.3.4	Modell zur Festlegung der Kurve Konvergenz- Ortsbrustabstand	
5.3.4	Modello per la determinazione della curva Convergenza - Distanza dal fronte .....	24
5.3.5	Modell zur Festlegung der Kurve Radialdruck -Konvergenz	
5.3.5	Modello per la determinazione della curva Pressione radiale - Convergenza .....	26
5.3.6	Bemessung der Außenschale	
5.3.6	Dimensionamento dei rivestimenti di prima fase .....	29
<b>6</b>	<b>INNENSCHALE</b>	
<b>6</b>	<b>RIVESTIMENTO DEFINITIVO .....</b>	<b>35</b>
6.1	STABWERKSMODELLE	
6.1	METODO DELLE REAZIONI IPERSTATICHE .....	35
6.2	MODELLIERUNG DER BETTUNG	
6.2	INTERAZIONE TERRENO-STRUTTURA .....	35
6.2.1	Modellierung der Bettung	
6.2.1	Rigidezza radiale .....	36
6.2.2	Federkonstanten Auflagerbereich/Sohle	
6.2.2	Costante della molla nelle zone di appoggio / fondo .....	36
6.3	LASTENANALYSE	
6.3	ANALISI DEI CARICHI .....	37
6.3.1	Eigengewicht G1	
6.3.1	Peso proprio G1 .....	37
6.3.2	Betonauffüllung über dem Sohlgewölbe G3	
6.3.2	Riempimento in cls al di sopra dell'arco rovescio G3 .....	37
6.3.3	Wasserdruck G4	
6.3.3	Pressione idraulica G4 .....	37
6.3.4	Gebirgslast G5	
6.3.4	Carico dell'ammasso G5 .....	37
6.3.5	Kriechen und Schwinden des Betons G6	
6.3.5	Viscosità e ritiro del calcestruzzo G6 .....	37
6.3.6	Temperatur Q1	
6.3.6	Temperatura Q1 .....	38
6.3.7	Erdbebeneinwirkung E1	
6.3.7	Azione sismica E1 .....	38
6.3.8	Aufprall A2	
6.3.8	Urto A2 .....	39
6.3.9	Brand A3	
6.3.9	Incendio A3 .....	39
6.4	EINWIRKUNGSKOMBINATIONEN	
6.4	COMBINAZIONI DI CARICO .....	39

6.5	NACHWEISE	
6.5	VERIFICHE .....	40
6.5.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)	
6.5.1	Stati Limite Ultimi (SLU) .....	40
6.5.1.1	Teilsicherheitsfaktoren Einwirkungen	
6.5.1.1	Coefficienti parziali di sicurezza per le azioni .....	40
6.5.1.2	Kombinationsbeiwerte Einwirkungen	
6.5.1.2	Coefficienti di combinazione delle azioni .....	40
6.5.1.3	Einwirkungskombinationen	
6.5.1.3	Combinazione delle azioni.....	41
6.5.1.4	Teilsicherheitsfaktoren der Widerstände	
6.5.1.4	Coefficienti parziali di sicurezza per le resistenze .....	41
6.5.1.5	Überprüfung auf Beulspannung	
6.5.1.5	Verifica a pressoflessione.....	41
6.5.1.6	Querkraftüberprüfung	
6.5.1.6	Verifica a taglio .....	42
6.5.2	Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (GZG)	
6.5.2	Stati Limite Esercizio (SLE) .....	43
6.5.2.1	Teilsicherheitsfaktoren Einwirkungen	
6.5.2.1	Coefficienti parziali di sicurezza delle azioni.....	43
6.5.2.2	Kombinationsbeiwerte der Einwirkungen	
6.5.2.2	Coefficienti di combinazione delle azioni .....	43
6.5.2.3	Einwirkungskombinationen	
6.5.2.3	Combinazioni delle azioni.....	43
6.5.2.4	Teilsicherheitsfaktoren der Widerstände	
6.5.2.4	Coefficienti parziali di sicurezza per le resistenze .....	43
6.5.2.5	Ermittlung der Verformungen	
6.5.2.5	Calcolo delle deformazioni .....	43
6.5.2.6	Begrenzung der Rissbreiten	
6.5.2.6	Limitazione dello spessore delle fessure .....	43
6.6	BAULICHE DURCHBILDUNG	
6.6	STRUTTURA COSTRUTTIVA .....	44
6.6.1	Expositionsklasse und Mindestbetondeckung	
6.6.1	Classe di esposizione e copriferro minimo .....	44
6.6.2	Mindestbewehrung	
6.6.2	Armatura minima .....	44
6.7	ERGEBNISSE	
6.7	RISULTATI .....	45
<b>7</b>	<b>VERZEICHNISSE</b>	
<b>7</b>	<b>ELENCHI.....</b>	<b>46</b>
7.1	TABELLENVERZEICHNIS	
7.1	ELENCO DELLE TABELLE.....	46
7.2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	
7.2	ELENCO DELLE ILLUSTRAZIONI.....	47
7.3	ANLAGENVERZEICHNIS	
7.3	ELENCO APPENDICI .....	47
7.4	REFERENZDOKUMENTE	
7.4	BIBLIOGRAFIA E FONTI .....	47
7.4.1	Eingangsdokumente	
7.4.1	Documenti in ingresso .....	47

7.4.2 Normen und Richtlinien	
7.4.2 Normativa.....	48
7.4.3 Literatur	
7.4.3 Letteratura.....	49

**ANHANG 1 - KENNLINIEN**

**APPENDICE 1 - LINEE CARATTERISTICHE**

**ANHANG 2 - FDM-ANALYSE**

**APPENDICE 2 - ANALISI FDM**

**ANHANG 3 - FEM-ANALYSE DER INNENSCHALE**

**APPENDICE 3 - ANALISI FEM DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO**

## 1 EINFÜHRUNG

Der vorliegende Bericht beinhaltet die Bemessung der Außen- und Innenschalen der Querstollen Typs 2, welche zwischen den Kilometrierungen Km 46+769 und 54.0+15 (Oströhre) konventionell vorgetrieben werden.

Wie aus folgende zusammenfassende Tabelle hervorgeht, sind die innerhalb dieser Strecke errichteten Querstollen 11, von denen einer, der 48/3, bereits innerhalb des Baulos Muls I vorgetrieben wurde. Außerdem wird der 49/1, obwohl Stollen des Typs 1, mit einem breiten Querschnitt vorgetrieben um den Durchgang des TBM-Kopfes bei der Baustellenphase zu ermöglichen.

Der gleiche verwendete Querschnitt für den Ausbruch der Querstollen des Typs 1 wird auch für den Wannenausbruchquerschnitt CT1-V auf Höhe des Stollens Typ 1 im Tiefpunkt (CT49/2) angewandt.

## 1 INTRODUZIONE

La seguente relazione riporta il dimensionamento dei rivestimenti, di prima fase e definitivi, dei cunicoli trasversali tipo 2, scavati in tradizionale tra le progr. Km 46+769 e 54.0+15 (Canna Est).

Come si evince dalla seguente tabella riassuntiva, i cunicoli trasversali realizzati all'interno di questa tratta sono 11, di cui uno, il 48/3, è già stato scavato all'interno del lotto Muls I. Inoltre, il 49/1, pur essendo un cunicolo tipo 1, verrà scavato con una sezione larga per permettere il passaggio della testa della TBM in fase di cantiere.

La medesima sezione utilizzata per lo scavo dei cunicoli trasversali tipo 2 è utilizzata anche per lo scavo della sezione della vasca CT1-V in corrispondenza del cunicolo tipo 1 nel punto di minimo (CT49/2).

n°	Tipo	Progr. Est	GL Est	GL Ovest
		[km]		
47/1	CT2	47+000	T	T
48/3	CT2	48+574	E-T	E-T
49/1	CT1	49+229	MA	MAT
49/2	CT1-V	49+590		
51/1	CT2	51+000		
51/2	CT3	51+333		
52/2a	CT2	52+300		
52/2	CT2	52+333		
53/3	CT4	53+000	D	D
54/1a	CT2	53+970	DM	DM
54/1	CT2	54+000		

Tabelle 1: Synoptische Tafel der Stollen CT2-CT3-CT4

Tabella 1: Quadro sinottico dei cunicoli CT2-CT3-CT4

Für alle neuen Stollen sieht der vorgesehene Querschnitt für den Aushub in Klasse II (CT2/CT3/CT4-T2), mit einer maximalen Ausbruchbreite und -höhe (inkl. 5 cm Extraaushub) von jeweils 8.76 m und 6.06 m, radiale Nietungen vor, welche aus Superswellex Pm16, Länge 3.0 m, Querabstand 1.8 m und Längsabstand 1.5 m bestehen. Die Nietung ist auf 90° an der Kappe erstreckt. Im Höchstabstand von 4.5 m (3 Abschlänge) von der Ortsbrust ist die Ausführung einer 10 cm (nominal) dicke Spritzbetonschicht der Festigkeitsklasse C30/37, als Abschluss der 5 cm Spritzbeton die vor dem Nietungseinsatz angebracht wurden, vorgesehen.

Die Innenschale besteht aus Beton der Festigkeitsklasse C30/37 mit variable Stärke von 35 cm in Nähe der Kappe bis zu 41 cm an der Sohlplatte. Diese Stärken sind als nominal zu verstehen, sie entsprechen also 30 und 35 cm mindestens ohne Bau- und Trassierungstoleranz, respektive an Kappe und an Sohlplatte.

Per tutti i cunicoli di nuova realizzazione, la sezione prevista per affrontare lo scavo in classe II (CT2/CT3/CT4-T2), avente una larghezza e un'altezza massima di scavo (compresi 5 cm di extrascavo) rispettivamente di 8.76 m e 6.06 m, prevede chiodature radiali costituite da Superswellex Pm16, lunghezza 3.0 m, con passo trasversale 1.8 m e longitudinale 1.5 m. La chiodatura è estesa su 90° in calotta. Ad una distanza massima di 4.5 m (3 sfondi) dal fronte è prevista la realizzazione di uno strato di 10 cm (nominali) di betoncino proiettato, classe di resistenza C30/37, a completamento dei 5 cm di betoncino messi in opera prima dell'installazione dei chiodi.

Il rivestimento definitivo è costituito da calcestruzzo C30/37 con spessore variabile da 35 cm in corrispondenza della calotta fino a 41 cm in platea. Tali spessori sono da intendersi come spessori nominali che, al netto delle tolleranze di costruzione e di tracciamento, si traducono in 30 e 35 cm minimi, rispettivamente in calotta e platea.

Bei den Ausbruchstrecken in Klasse III (Ausbruchquerschnitte CT2/CT3/CT4-T3) wird der Ersatz der Superswellex Pm16 mit Pm24, 4.5 m lang, an der Kappe auf 120° verteilt, und die Reduzierung der maximalen Bereichslänge von 4.5 auf 3 m, mit unveränderte Erhaltung der anderen Geometrien, vorgesehen.

Bei den Strecken in Klasse II, mit Überdeckungen über 1000m wird ein verstärkter Ausbruchsquerschnitt (CT2/CT3/CT4-TRb) mit Nietungen des Typs Dywidag SN28, Länge 5.5 m, auch an den Widerlagern vorgesehen und Bereiche von maximaler Länge eines Abschlags (1.5 m) geplant. Dieser Ausbruchsquerschnitt ermöglicht es mögliche Rockburst-Phänomene zu begrenzen. Die Geometrien der Schalen ändern sich nicht im Vergleich zu den Ausbruchquerschnitten in Klasse 2 und 3.

Um mögliche Bereiche mit einer höheren Veränderungsstufe des Gebirges anzugehen, wird auch ein Ausbruchsquerschnitt in Klasse IV (CT2/CT3/CT4-T4) vorgesehen, mit einer maximalen Ausbruchbreite und -höhe (inkl. 10 cm Extraushub) von jeweils 9.54 m und 7.59 m. Der Ausbruchsquerschnitt sieht eine Innenschale vor, welche aus nominalen 30cm Spritzbeton der Festigkeitsklasse C30/37 besteht, welcher mit zwei Lehrgerüste IPN160, Abstand 0.5 - 1.5 m bewehrt, sowie eventueller Radialnietung mittels R38N Bohrschrauben oder Anker Typ Dywidag SN28, jeweils 6 und 5.5 m lang, Querabstand 1.8 m und Längsabstand 1.5 m. Es ist außerdem die Möglichkeit der Ausführung von Ortsbrustkonsolidierungen mittels 26 Bohrschrauben R38N, 12 m lang, mit Mindestüberlappung von 6 m, vorgesehen.

Die Innenschale dieser Strecke erweist eine nominale Stärke jeweils an der Kappe und am Gegengewölbe von 55 und 126 cm, welche ohne Toleranzen 50 und 120 cm entsprechen. Nur auf Höhe des CT2-b (BP47/1) beträgt die Mindeststärke des Gegengewölbes 130 cm.

Gegenstand dieses Berichts ist die Bemessung der Ausbruchquerschnitte CT2/CT3/CT4-T4.

Es wird klargestellt, dass die in diesem Bericht aufgezeigte Querstollenbemessung, vor der Verfügbarkeit der Ergebnisse des Erkundungsstollenausbruchs, in der Strecke unter dem BP47/1, durchgeführt wurde. Der Ausbruch hat ein sich Hinausziehen der geomechanischen Bedingungen, welche die Maulstaler Verwerfung charakterisieren (Gebirge FVM-S-PS und FVM-S-B), hervorgehoben, wobei die vorherige Grenze zwischen tektonisierte Zone der besagten Verwerfung und den Paraschiefern (GA-BCA-GS-10g/GA-BCA-A-10g) weiter nach Norden verschoben wird. Die neue geomechanische Charakterisierung betrifft den Querstollen 47/1, welcher, aufgrund der oben genannten Ergebnissen, sich innerhalb von Gebirgen (FVM-S-PS und FVM-S-B) mit schlechteren

Nelle tratte di scavo in classe III (sezione CT2/CT3/CT4-T3) si prevede di sostituire i Superswellex Pm16 con Pm24 di lunghezza 4.5 m, estesi su 120° in calotta, e di ridurre la lunghezza massima dei campi da 4.5 a 3 m, mantenendo invariate tutte le altre geometrie.

Nelle tratte in classe II con coperture maggiori di 1000m è prevista una sezione di scavo (CT2/CT3/CT4-TRb) rinforzata con chiodature tipo Dywidag SN28, lunghezza 5.5 m, anche sui piedritti e con campi di lunghezza massima pari ad uno sfondo (1.5 m). Tale sezione consente di limitare i possibili fenomeni di rockburst. Le geometrie dei rivestimenti non variano rispetto alle sezioni di scavo in classe 2 e 3.

Per affrontare possibili zone con una maggior livello di alterazione dell'ammasso è prevista anche una sezione di scavo in classe IV (CT2/CT3/CT4-T4), avente una larghezza e un'altezza massima (compresi 10 cm di extrascavo) rispettivamente di 9.54 m e 7.59 m. La sezione prevede un rivestimento di prima fase costituito da 30cm nominali di betoncino proiettato C30/37 armato con due centine IPN160 a passo 0.5 - 1.5 m ed un eventuale chiodatura radiale mediante autoperforanti R38N o ancoraggi tipo Dywidag SN28, lunghezza 6 e 5.5 m rispettivamente, passo trasversale 1.8 m e longitudinale 1.5 m. E' inoltre prevista la possibilità di realizzare dei consolidamenti del fronte mediante 26 autoperforanti R38N lunghi 12 m con sovrapposizione minima di 6 m.

Il rivestimento definitivo di questa tratta presenta una spessore nominale di 55 e 126 cm rispettivamente in calotta e arco rovescio che, al netto delle tolleranze, si traducono in spessori minimi di 50 e 120 cm. Solo in corrispondenza del CT2-b (BP47/1) lo spessore minimo dell'arco rovescio è di 130 cm.

Oggetto della presente relazione è il dimensionamento delle sezioni CT2/CT3/CT4-T4

Si precisa che il dimensionamento dei cunicoli trasversali, riportato nella presente relazione, è stato condotto prima che fossero rese disponibili le risultanze dello scavo del Cunicolo Esplorativo nella tratta sottostante il BP47/1. Lo scavo ha messo in evidenza un protrarsi delle condizioni geomeccaniche caratterizzanti la zona della faglia della val di Mules (ammassi FVM-S-PS e FVM-S-B), spostando verso nord il precedente limite tra la zona tettonizzata della suddetta faglia e i parascisti (GA-BCA-GS-10g/GA-BCA-A-10g). La nuova caratterizzazione geomeccanica interessa il cunicolo trasversale 47/1 che, sulla base delle sopracitate risultanze, si ritroverà all'interno di ammassi (FVM-S-PS e FVM-S-B), con caratteristiche geomeccaniche peggiori rispetto a quelle previste.

In una fase successiva della progettazione sono state pertanto sviluppate delle analisi integrative, riportate al paragrafi 5.3 che hanno confermato l'efficacia degli interventi previsti per la sezione di scavo CT2-b-T4 anche all'interno degli ammassi



geomechanischen Eigenschaften als die vorhergesehenen befinden wird.

In einer nachfolgenden Planungsphase wurden daher ergänzende Berechnungen durchgeführt, welche, aufgezeigt in Kapitel 5.3, den Wirkungsgrad der für den Ausbruchquerschnitt CT2-b-T4 vorgesehenen Maßnahmen auch im Inneren der von der Maulstaler Verwerfung charakterisierten Gebirgen (FVM-S-PS und FVM-S-B) bewiesen

Zur Schalenbemaßung von CT2/CT3/CT4-T2/TRb/T3 wird auf den entsprechenden Bericht verweisen.

caratterizzanti la faglia della val di Mules (FVM-S-PS e FVM-S-B).

Per il dimensionamento dei rivestimenti della sezione CT2/CT3/CT4-T2/TRb/T3 si rimanda alla relazione specifica.

## 2 MATERIALIEN

### 2.1 SPRITZBETON

Für die Bemessung der Außenschale wird ein Spritzeton der Festigkeitsklasse C30/37 mit folgenden Eigenschaften angenommen:

$$E_{cm} = 32000 \text{ MPa}$$

$$f_{ck} = 30.71 \text{ MPa}$$

Wobei:

- $E_{cm}$  = Mittelwert Sekantenmodul
- $f_{ck}$  = charakteristische Druckfestigkeit des Spritzbetons nach 28 Tagen

## 2 MATERIALI

### 2.1 BETONCINO PROIETTATO

Per il dimensionamento del rivestimento di prima fase in betoncino proiettato si considera un calcestruzzo classe di resistenza C30/37 con le seguenti caratteristiche:

Dove:

- $E_{cm}$  è il valore medio del modulo elastico secante
- $f_{ck}$  è la resistenza caratteristica a compressione del betoncino proiettato a 28 giorni

### 2.2 LEHRGERÜSTE

Die metallischen Lehrgerüste bestehen aus Stahl S355 mit folgenden Eigenschaften:

$$E_s = 210000 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = 355 \text{ MPa}$$

Wobei:

- $E_s$  = Elastizitätsmodul
- $N_y$  = Ermüdungslast

### 2.2 CENTINE

Le centine metalliche sono realizzate con acciaio S355 aventi le seguenti caratteristiche:

Dove:

- $E_s$  è il modulo elastico
- $f_{yk}$  è la tensione caratteristica di snervamento

### 2.3 ANKER

Es wird der Einsatz von Anker des Typs Dywidag SN28 und Bohrschrauben R38N mit folgenden Eigenschaften vorgesehen:

$$E_s = 210000 \text{ MPa}$$

$$N_y = 413 \text{ kN (SN28)}$$

$$N_y = 400 \text{ kN (R38N)}$$

Wobei:

- $E_s$  = Elastizitätsmodul
- $N_y$  = Ermüdungslast

### 2.3 ANCORAGGI

Si prevede l'utilizzo di ancoraggi tipo Dywidag SN28 e autoperforati R38N aventi le seguenti caratteristiche:

Dove:

- $E_s$  è il modulo elastico
- $N_y$  e il carico di snervamento

### 2.4 BETON

Für die Bemessung der Innenschale wird ein Beton der Festigkeitsklasse C30/37 mit folgenden Eigenschaften berücksichtigt:

### 2.4 CALCESTRUZZO

Per il dimensionamento del rivestimento definitivo si considera un calcestruzzo con classe di resistenza C30/37 con le seguenti caratteristiche:

$$E_{cm} = 32000 \text{ MPa}$$

$$f_{ck} = 30.71 \text{ MPa}$$

Wobei:

- $E_{cm}$  = Mittelwert Elastizitätsmodul
- $f_{ck}$  = charakteristische Druckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen

Dove:

- $E_{cm}$  è il valore medio del modulo elastico
- $f_{ck}$  è la resistenza a compressione caratteristica del calcestruzzo dopo 28 giorni

## 2.5 BEWEHRUNGSSTAHL

Für die Bemessung der Außenschale ist Stahl des Typs B450C heranzuziehen:

## 2.5 ACCIAIO DA ARMATURA

Per il dimensionamento dell'anello si utilizza l'acciaio tipo B450C:

$$E_s = 210000 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = 450 \text{ MN/m}^2$$

wobei:

- $E_s$  = Elastizitätsmodul
- $f_{yk}$  = charakteristischer Wert der Streckgrenze des Betonstahls

dove:

- $E_s$  è il modulo elastico
- $f_{yk}$  è la tensione caratteristica di snervamento acciaio per cemento armato

### 3 GEOTECHNISCHES MODELL

#### 3.1 GEOLOGIE UND GEOMECHANIK

Gemäß den geomechanischen und Detailplanungsprofilen [3][4][5][6][7][8][9][10], durchqueren die Haupttunnel 6 geomechanisch homogene Zonen, mit variablen Überdeckungen, die von 90 m bis 1305 m reichen.

n°	Typo	Progr. Est	Zone number	Rock mass name	H
		[km]			[m]
47/1	CT2	47+000	14	BCA-GS-10g	590
48/3	CT2	48+574	24	GB-G-GA9	880
49/1	CT1	49+229	26	GB-G-GA1	1270
49/2	CT1-V	49+590	26	GB-G-GA1	1270
51/1	CT2	51+000	28	GB-G-GA1	1305
51/2	CT3	51+333	28	GB-G-GA4	1240
52/2a	CT2	52+300	30	GB-G-GA5	995
52/2	CT2	52+333	30	GB-G-GA5	985
53/3	CT4	53+000	31	GB-G-GA6	410
54/1a	CT2	53+970	31	GB-G-GA6	100
54/1	CT2	54+000	31	GB-G-GA6	90

Tabelle 2: Geomechanische homogene Zonen

### 3 MODELLO GEOTECNICO

#### 3.1 GEOLOGIA E GEOMECCANICA

In accordo con i profili geomeccanici e progettuali di dettaglio [3][4][5][6][7][8][9][10] i cunicoli trasversali sono ubicati in 6 zone geomeccanicamente omogenee con coperture variabili da 90 m a 1305 m.

n°	Typo	Progr. Est	Zone number	Rock mass name	H
		[km]			[m]
47/1	CT2	47+000	14	BCA-GS-10g	590
48/3	CT2	48+574	24	GB-G-GA9	880
49/1	CT1	49+229	26	GB-G-GA1	1270
49/2	CT1-V	49+590	26	GB-G-GA1	1270
51/1	CT2	51+000	28	GB-G-GA1	1305
51/2	CT3	51+333	28	GB-G-GA4	1240
52/2a	CT2	52+300	30	GB-G-GA5	995
52/2	CT2	52+333	30	GB-G-GA5	985
53/3	CT4	53+000	31	GB-G-GA6	410
54/1a	CT2	53+970	31	GB-G-GA6	100
54/1	CT2	54+000	31	GB-G-GA6	90

Tabella 2: Zone geomeccaniche omogenee

Wie zuvor angedeutet, haben die Ergebnisse des Erkundungstollenausbruchs hervorgehoben, dass das Gebirge, benannt BCA-GS-10g, auf Höhe des BP47/1 nicht vorhanden ist, sondern dass weiterhin die Maulstaler Verwerfung mit den FVM-S-PS und FVM-S-B benannten Gebirgen vorkommt, welche durch das Vorhandensein von Glimmerschiefer und Kataklasit charakterisiert sind.

Folgende Tabellen zeigen die geomechanischen Grundparameter, die jede geomechanisch homogene Zone bestimmt

Come precedentemente accennato, le risultanze dello scavo del Cunicolo Esplorativo hanno evidenziato che in corrispondenza del BP47/1 non è presente l'ammasso denominato BCA-GS-10g, ma permane la presenza della faglia della Val di Mules con gli ammassi denominati FVM-S-PS e FVM-S-B, caratterizzati dalla presenza di micascisti e cataclasite.

Le seguenti tabelle riportano i parametri geomeccanici caratteristici di base che caratterizzano ciascuna zona geomeccanicamente omogenea.

Zone number	Rock mass name	Class	GSI	$\sigma_{ci}$	$m_i$	$E_i$	$\gamma$
		[-]	[-]	[MPa]	[-]	[MPa]	[KN/m <sup>3</sup> ]
14	BCA-GS-10g	III	50	72.5	15.5	50550	27.3
24	GB-G-GA9	II	73	105.5	22	30950	26.7
26	GB-G-GA1	I	85	105.5	22	30950	26.7
		II	65	105.5	22	30950	26.7
		III	45	105.5	22	30950	26.7
28	GB-G-GA3	I	86	117.5	22	26450	26.7
		II	66	117.5	22	26450	26.7
		III	46	117.5	22	26450	26.7
30	GB-G-GA5	I	87	108	22	27000	26.7
		II	67	108	22	27000	26.7
		III	47	108	22	27000	26.7
31	GB-G-GA6	II	66	108	22	27000	26.7
		III	46	108	22	27000	26.7

Tabelle 3: Charakterisierung des Gebirges jeder homogenen Zone

Tabella 3: Caratterizzazione degli ammassi di ciascuna zona omogenea

Zone number	Rock mass name	Class	GSI	$\sigma_{ci}$	$m_i$	$E_i$	$\gamma$
		[-]	[-]	[MPa]	[-]	[MPa]	[kN/m <sup>3</sup> ]
19bis	FVM-S-PS	IV	52	5	20	30000	27
	FVM-S-B	IV	42	25	23	25000	27

Tabelle 4: Charakterisierung der Gebirge auf Höhe des BP47/1

Tabella 4: Caratterizzazione degli ammassi in corrispondenza del BP47/1

Wobei:

- $\gamma$  = spezifisches Gewicht des Gebirges
- $\sigma_{ci}$  = einaxialen Druckfestigkeit der Gesteinsmatrix
- $m_i$  = Krümmungsparameter aus triaxialem Druckversuch des Gebirgsmaterial
- $E_i$  = Verformungsmodul der Gesteinsmatrix
- GSI = *Geological Strength Index*

Die typischen Verformungs- und Festigkeitsparameter jeder Strecke wurden gemäß dem Bruchkriterium nach Hoek & Brown [28] berechnet, welches und im geomechanischem Hauptbericht [1] näher beschrieben wird.

Dove:

- $\gamma$  è il peso di volume naturale dell'ammasso roccioso.
- $\sigma_{ci}$  è la resistenza a compressione monoassiale di matrice.
- $m_i$  è un parametro di curvatura dell'involuppo di rottura triassiale del materiale roccia.
- $E_i$  è il modulo di deformazione di matrice.
- GSI è il *Geological Strength Index*.

I parametri di deformabilità e di resistenza caratteristici di ciascuna tratta sono stati calcolati in accordo al principio di linearizzazione dell'involuppo di rottura proposto da Hoek & Brown [28] e esplicitato nella relazione geomeccanica generale [1].

Zone number	Rock mass name	Class	Zone max overburden	$\gamma$	$\phi_{picco}$	$\phi_{res}$	$c_{picco}$	$c_{res}$	$E_{rm}$	$\psi$
		[-]	[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°]
14	BCA-GS-10g	III	590	27.3	41.6	33.9	2.3	1.5	15528.2	5.2
24	GB-G-GA9	II	880	26.7	50.7	37.6	5.7	2.5	24304.2	12.7
26	GB-G-GA1	I	1270	26.7	50.9	34.7	9.3	3.2	28678.1	12.7
		II		26.7	45.9	34.7	5.9	3.2	19551.7	10.1
		III		26.7	40.2	33.9	4.3	3.0	6922.0	5.0
28	GB-G-GA3	I	1305	26.7	51.7	35.3	10.3	3.4	24704.6	12.9
		II		26.7	46.8	35.4	6.4	3.4	17274.0	10.5
		III		26.7	41.2	34.6	4.7	3.2	6316.0	5.1
30	GB-G-GA5	I	995	26.7	53.1	36.7	9.1	2.7	25404.1	13.3
		II		26.7	48.5	36.8	5.4	2.7	18196.1	11.2
		III		26.7	42.9	36.0	3.9	2.6	6877.6	5.4
31	GB-G-GA6	II	410	26.7	54.4	43.5	3.3	1.5	17633.2	12.3
		III		26.7	49.4	42.6	2.2	1.4	6447.4	6.2

Tabelle 5: tipische Parameter der Gebirges in den unterschiedlichen Zonen und Klassen

Tabella 5: Parametri caratteristici dell'ammasso nelle diverse zone e classi

Zone number	Rock mass name	Class	Zone max overburden	$\gamma$	$\phi_{picco}$	$\phi_{res}$	$c_{picco}$	$c_{res}$	$E_{rm}$	$\psi$
		[-]	[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°]
19bis	FVM-S-PS	IV	590	27.0	23.8	18.0	0.9	0.6	10374	3.3
	FVM-S-B	IV	590	27.0	34.3	29.0	1.5	1.1	4574	4.3

Tabelle 6: tipische Parameter des Gebirges auf Höhe des BP47/1

Tabella 6: Parametri caratteristici dell'ammasso in corrispondenza del BP47/1

Wobei:

- $\Phi_{picco}$  = Reibungswinkel am Peak
- $\Phi_{res}$  = Restreibungswinkel
- $c_{picco}$  = Kohäsion am Peak

Dove:

- $\Phi_{picco}$  è la resistenza al taglio di picco.
- $\Phi_{res}$  è la resistenza al taglio residua.
- $c_{picco}$  è la coesione di picco.

- $c_{res}$  = Restkohäsion
- $E_{rm}$  = Gebirgsmodul
- $\psi$  = Dilatanz

- $c_{res}$  è la coesione residua.
- $E_{rm}$  è il modulo d'ammasso.
- $\psi$  è la dilatanza.

## 4 GEBIRGSVERHALTEN

Die Ermittlung der Gebirgslast, sowie die Ermittlung der Lastableitung von der Außen- auf die Innenschale erfolgt in Abhängigkeit des Gebirgsverhaltens:

- Bei druckhaftem Gebirgsverhalten werden die Gebirgslasten durch die numerische Modellierung der Interaktion zwischen Gebirge und Ausbau ermittelt.
- Bei trennflächendominiertem Gebirgsverhalten ermitteln sich die Gebirgslasten in erster Linie aus der Bruchkörperanalyse.

Zur Einschätzung des Gebirgsverhaltens und zur Differenzierung zwischen den beiden Gebirgsverhalten ist das Kennlinienverfahren anzuwenden.

### 4.1 ABSCHÄTZUNG DES GEBIRGSVERHALTEN

Zur Abschätzung des Gebirgsverhalten wurde das Kennlinienverfahren eingesetzt.

Beim Kennlinienverfahren wird das wechselseitige Verhältnis, zwischen radialem Druck auf den Umriss des Hohlraums  $p$  und radiale Verschiebung  $u_r$  (späterhin Konvergenz) auf den Umriss selbst, bestimmt.

Diese Linien wurden hier durch ein elastisch-plastisch bildendes Modell, mit softening und nicht-assoziiertem Fluss des Gebirgsmaterials, laut Mohr-Coulomb, in ihrer von Ribacchi vorgeschlagenen Formulierung [24], trassiert.

Die analysierten Kurven, zur Ermittlung des Verhalten Gebirge-Ausgrabung, sind:

- Radialer Druck - Konvergenz
- Konvergenz - Ortsbrustabstand
- Radialer Druck - Ausdehnung der Plastischen Zone über das Ausbruchprofil hinaus
- Ortsbrustabstand - Ausdehnung der Plastischen Zone über das Ausbruchprofil hinaus
- Ortsbrustabstand - fiktive Ausbruchkräfte (die fiktiven Ausbruchkräfte sind die radialen Drucke, welche prozentuell zum ursprünglichen lithostatischen Druck ausgedrückt werden; durch Anwendung dieser auf die Wände eines zylinderförmigen Hohlraums von unendlicher Länge, werden dieselben radialen Konvergenzen  $u_r$  erreicht, die man in einem realen Hohlraum hat).

Die Kurve "Konvergenz- Ortsbrustabstand" ist durch eine vereinfachte analytische Prozedur ermittelt worden die folgende Relationen benutzt (siehe Nguyen, Minh et al. und [25]):

## 4 COMPORTAMENTO DELLA ROCCIA

Il calcolo del carico dell'ammasso e il calcolo del trasferimento del carico dal rivestimento esterno al rivestimento definitivo dipendono dal comportamento dell'ammasso:

- In caso di comportamenti dell'ammasso di tipo spingente, i carichi si calcolano tramite modellazione numerica dell'interazione fra ammasso e rivestimento;
- In caso di ammasso altamente fratturato, i carichi si calcolano mediante l'analisi dei blocchi potenzialmente instabili.

Per la valutazione del comportamento dell'ammasso e per la differenziazione tra i due comportamenti si utilizza il metodo delle curve caratteristiche.

### 4.1 VALUTAZIONE DEL COMPORTAMENTO DELLA ROCCIA

Il metodo utilizzato per la valutazione del comportamento dell'ammasso è il metodo delle linee caratteristiche.

Nelle Linee Caratteristiche viene definito il legame reciproco tra pressione radiale sul contorno del cavo  $p$  e spostamento radiale  $u_r$  (detto nel seguito convergenza) sul contorno stesso.

In questa sede tali linee sono state tracciate assumendo un modello costitutivo elasto-plastico con softening e flusso non associato del materiale roccia secondo Mohr-Coulomb, nella loro formulazione proposta da Ribacchi [24].

Le curve analizzate per la determinazione del comportamento dell'ammasso roccioso allo scavo sono:

- Pressione Radiale – Convergenza.
- Convergenza – Distanza dal Fronte.
- Pressione Radiale – Estensione della Fascia Plastica oltre il profilo di scavo.
- Distanza dal fronte – Estensione della Fascia Plastica oltre il profilo di scavo.
- Distanza dal Fronte – Forze Fittizie di Scavo (le forze fittizie di scavo sono le pressioni radiali, espresse in percentuale sulla pressione litostatica originaria, che, applicate alle pareti di una cavità cilindrica di lunghezza infinita, consentono di ottenere le stesse convergenze radiali  $u_r$  che si hanno nella cavità reale).

La curva "Convergenza – Distanza dal fronte" è stata ricavata attraverso un procedimento analitico semplificato che sfrutta le seguenti relazioni (si vedano Nguyen, Minh et al. e [25]):

$$u_f = 0.3 \cdot u_{inf}$$

$$\frac{c(x)}{c_{inf}} = 1 - \left[ \frac{1}{1 + x / (0.84 \cdot R_{inf})} \right]^2$$

wobei:

- $u_f$  = Ortsbrustkonvergenz
- $u_{inf}$  = absolute Konvergenz ins Unendliche
- $c(x) = c_r$  = relative Konvergenz
- $c_{inf}$  = relative Konvergenz ins Unendliche
- $x$  = Ortsbrustabstand
- $R_{inf}$  = plastischer Gesamtradius (ins Unendliche)

dove:

- $u_f$  è la convergenza al fronte
- $u_{inf}$  è la convergenza assoluta all'infinito
- $c(x) = c_r$  è la convergenza relativa
- $c_{inf}$  è la convergenza relativa all'infinito
- $x$  è la distanza dal fronte
- $R_{inf}$  è il raggio plastico totale (all'infinito)

Die Kurven "Ortsbrustabstand - fiktive Aushebungskräfte" und "Ortsbrustabstand - plastischer Streifen" sind per Herausarbeitung von den andren dreien entnommen worden.

Per quanto riguarda le curve "Distanza dal fronte – Forze Fittizie di scavo" e "Distanza dal fronte - Fascia Plastica", esse sono derivate dalle altre tre per estrapolazione.

In Tabelle 7 ist ein Annahmekriterium [26][27] aufgezeigt welches der Einschätzung des Verhaltens der Ortsbrust in Abhängigkeit der Berechnungsergebnisse aus dem Gebirgskennlinienverfahren dient (Konvergenz an der Ortsbrust und Ausdehnung der plastischen Zone an der Ortsbrust).

In Tabella 7 si riporta un criterio [26] [27] per stimare il comportamento del fronte di scavo in funzione dei risultati delle analisi con le linee caratteristiche (convergenza al fronte e estensione della fascia plastica al fronte).

Fronte stabile Stabile Ortsbrust	Fronte stabile a breve termine Kurzzeitige Stabile Ortsbrust	Tendenza all'instabilità del fronte Neigung zur Instabilität der Ortsbrust	Fronte instabile Instabile Ortsbrust
$C_f < 1\% R_{scavo}$	$1\% R_{scavo} < C_f < 2\% R_{scavo}$	$2\% R_{scavo} < C_f < 3\% R_{scavo}$	$C_f > 3\% R_{scavo}$
$F_{pl f} \ll R_{scavo}$	$F_{pl f} < R_{scavo}$	$F_{pl f} \geq R_{scavo}$	$F_{pl f} \gg R_{scavo}$

Tabelle 7: vorgeschlagene Stabilitätskriterien in [26] [27];  $c_f$  = Ortsbrustkonvergenz;  $F_{pl f}$  = Umfang des plastischen Streifens an der Ortsbrust;  $R_{scavo} = r_{eq}$  = entsprechender Ausbruchradius.

Tabella 7: Criteri di stabilità proposti in [26] [27];  $c_f$  = convergenza al fronte;  $F_{pl f}$  = estensione della fascia plastica al fronte;  $R_{scavo} = r_{eq}$  = raggio equivalente di scavo.

Die ausgeführten Berechnungen mit dem Kennlinienverfahren berücksichtigen einen Ausbruchradius von 3.77 m. Es wurden auch die Kennlinien der bereits vorgetriebenen Stollen ausgeführt, um das Gebirgsverhalten und demzufolge die erwartete Last auf die neugeplanten Innenschalen auszuwerten.

Le analisi con le Linee Caratteristiche sono state eseguite considerando un raggio di scavo equivalente di 3.77 m. Sono state fatte le Linee Caratteristiche anche dei cunicoli già scavati per valutare il comportamento dell'ammasso e conseguentemente il carico atteso sui rivestimenti definitivi di nuova progettazione

In Folge ist die Tabelle mit den Hauptergebnissen aufgezeigt:

Di seguito è riportata una tabella con i principali risultati:



Zone number	Rock mass name	Class	Zone max overburden	$c_f$	$c_a$	$c_r$	$F_{plf}$	$F_{pla}$	$c_f/R$	$F_{plf}/R$	$c_r/R$	$F_{pla}/R$
				[-]	[m]	[cm]	[cm]	[cm]	[m]	[m]	[%]	[%]
14	BCA-GS-10g	III	590	0.32	1.07	0.75	0.00	1.81	0.09%	0.00	0.20%	0.48
24	GB-G-GA9	II	880	0.20	0.66	0.46	0.00	0.55	0.05%	0.00	0.12%	0.14
26	GB-G-GA1	I	1270	0.24	0.80	0.56	0.00	0.48	0.06%	0.00	0.15%	0.13
		II		0.49	1.64	1.15	0.00	1.29	0.13%	0.00	0.30%	0.34
		III		1.59	5.29	3.70	0.00	2.02	0.42%	0.00	0.98%	0.53
28	GB-G-GA3	I	1305	0.26	0.85	0.60	0.00	0.30	0.07%	0.00	0.16%	0.08
		II		0.54	1.80	1.26	0.00	1.14	0.14%	0.00	0.33%	0.30
		III		1.68	5.60	3.92	0.00	1.82	0.45%	0.00	1.04%	0.48
30	GB-G-GA5	I	995	0.15	0.49	0.34	0.00	-0.05	0.04%	0.00	0.09%	0.0
		II		0.34	1.15	0.80	0.00	0.86	0.09%	0.00	0.21%	0.23
		III		1.05	3.49	2.44	0.00	1.48	0.28%	0.00	0.65%	0.39
31	GB-G-GA6	II	410	0.10	0.32	0.22	0.00	0.07	0.03%	0.00	0.06%	0.02
		III		0.32	1.06	0.74	0.00	0.56	0.08%	0.00	0.20%	0.15

Tabelle 8: Zusammenfassung der Ergebnisse des Kennlinienverfahrens

Die durchgeführten Berechnungen heben keine Verformungs- und Stabilitätsproblematik hervor; das erwartete Verhalten des Ausbruchs ist substantiell des elastischen Typs, und die Ortsbrust erweist sich als stabil, bei substantieller Erhaltung der maximalen Festigkeitsmerkmale des durchdrungenen Materials.

Nur bei den Zonen 26 und 28 in Klasse III heben die durchgeführten Nachweise ein Zuwachs, jedenfalls unter dem Ausbruchradius, der plastischen Zone hervor und der Konvergenzen; die relative Konvergenz ist in Höhe von 4 cm.

Die Parameter der Zone 28 in Klasse III wurden zur Berechnung des Ausbruchquerschnitts CT2-T3 angewandt.

Zur Bemessung des Ausbruchquerschnitts CT2-T4 wurde vorsichtshalber, angesichts der Eigenschaften des Gebirges GB-G-GA7 (südlich von Kilometrierung km 54.100) mit einer Überdeckung von 1000 m, das Ausbruchverhalten ausgewertet. Diese Arbeitshypothesen sind sehr vorsichtig, erlauben es aber die Ungewissheit der geomechanischen Voraussichten zu erfassen.

In folgenden Tabellen werden die typischen geomechanischen Grundparameter der obengenannten geomechanisch homogenen Zonen, die typischen Verformungs- und Widerstandsparameter jeder Strecke, und letztendlich die Ergebnisse des Kennlinienverfahrens aufgezeigt.

Tabella 8: Sintesi dei risultati delle linee caratteristiche

Le analisi effettuate non evidenziano alcuna problematica deformativa e di stabilità; il comportamento del cavo atteso è di tipo sostanzialmente elastico, e il fronte si presenta stabile, conservando sostanzialmente le caratteristiche di massima resistenza del materiale attraversato.

Solo in corrispondenza delle zona 26 e 28 in classe III le verifiche condotte evidenziano un incremento della fascia plastica, comunque inferiore del raggio di scavo, ed un incremento delle convergenze; la convergenza relativa è dell'ordine dei 4cm.

I parametri della zona 28 in classe III sono stati adottati per il calcolo della sezione CT2-T3.

Per il dimensionamento della sezione CT2-T4, cautelativamente, si è valutato il comportamento allo scavo considerando anche le caratteristiche dell'ammasso GB-G-GA7 (presente a sud della progressiva km 54.100) con una copertura di 1000 m e le caratteristiche dell'ammasso GB-G-GA4 con una copertura di 1000 m. Tali ipotesi sono molto cautelative, ma permettono di considerare l'incertezza sulle previsioni geomeccaniche,

Nelle seguenti tabelle sono riportati i parametri geomeccanici caratteristici di base delle suddette zone geomeccanicamente omogenee, i parametri di deformabilità e di resistenza caratteristici di ciascuna tratta e, infine, i risultati delle linee caratteristiche.

Zone number	Rock mass name	Class	GSI	$\sigma_{ci}$	$m_i$	Ei	$\gamma$
		[-]	[-]	[MPa]	[-]	[MPa]	[kN/m <sup>3</sup> ]
32	GB-G-GA7	III	44	45	13	12500	26.7
		IV	24	45	13	12500	26.7
29	GB-G-GA4	II	59	81	20	26500	26.7
		III	39	81	20	26500	26.7

Tabelle 9: Charakterisierung der Gebirge GB-G-GA4 - GB-G-GA7

Tabella 9: Caratterizzazione degli ammassi GB-G-GA4 - GB-G-GA7

Zone number	Rock mass name	Class	Zone max overburden	$\gamma$	$\phi_{picco}$	$\phi_{res}$	$c_{picco}$	$c_{res}$	$E_{rm}$	$\psi$
		[-]	[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°]
32	GB-G-GA7	III	100	26.7	48.4	41.8	0.6	0.4	2616.3	6.1
		IV	100	26.7	41.6	38.6	0.3	0.3	706.5	0.0
29	GB-G-GA4	II	995	26.7	43.3	33.6	4.1	2.4	13178.1	7.9
		III	995	26.7	37.5	32.4	3.0	2.2	3950.7	4.7

Tabelle 10: Typische Parameter der Gebirge GB-G-GA4 - GB-G-GA7 in unterschiedlichen Klassen

Tabella 10: Parametri caratteristici degli ammassi GB-G-GA4 - GB-G-GA7 nelle diverse classi

Zone number	Rock mass name	Class	Zone max overburden	$c_f$	$c_a$	$c_r$	$F_{plf}$	$F_{pla}$	$c_f/R$	$F_{plf}/R$	$c_r/R$	$F_{pla}/R$
		[-]	[m]	[cm]	[cm]	[cm]	[m]	[m]	[%]	[%]	[%]	[%]
32	GB-G-GA7	III	100	0.19	0.64	0.45	0.00	0.57	0.05%	0.00	0.12%	0.15
		IV	100	0.88	2.92	2.05	0.00	1.36	0.23%	0.00	0.54%	0.36
29	GB-G-GA4	II	995	0.64	2.13	1.49	0.00	1.69	0.17%	0.00	0.40%	0.45
		III	995	2.54	8.48	5.94	0.17	2.59	0.67%	0.04	1.57%	0.69

Tabelle 11: Zusammenfassung der Ergebnisse der Kennlinien

Tabella 11: Sintesi dei risultati delle linee caratteristiche

Die Parameter der Zone 29 in Klasse III sind zur Berechnung des Abschnitts CT2-T4 angewandt worden.

I parametri della zona 29 in classe III sono stati adottati per il calcolo della sezione CT2-T4.

In folgende Tabelle sind die Kennlinienergebnisse des Ausbruchquerschnitts CT2-b des BP47/1 in den Gebirgen FVM-S-PS und FVM-S-B aufgezeigt.

Nella seguente tabella sono riportati i risultati delle linee caratteristiche della sezione CT2-b del BP47/1 negli ammassi FVM-S-PS e FVM-S-B.

Zone number	Rock mass name	Class	Zone max overburden	$c_f$	$c_a$	$c_r$	$F_{plf}$	$F_{pla}$	$c_f/R$	$F_{plf}/R$	$c_r/R$	$F_{pla}/R$
		[-]	[m]	[cm]	[cm]	[cm]	[m]	[m]	[%]	[%]	[%]	[%]
19bis	FVM-S-PS	IV	590	8.79	29.30	20.51	11.48	22.91	2.31%	302.20%	5.40%	602.90%
	FVM-S-B	IV	590	1.91	6.37	4.46	0.95	3.96	0.50%	24.94%	1.17%	104.12%

Tabelle 12: Ergebnisse der Kennlinien auf Höhe des BP47/1

Tabella 12: Risultati delle linee caratteristiche in corrispondenza del BP47/1

Die Parameter der neuen geomechanischen Charakterisierung auf Höhe des BP47/1 erweisen, insbesondere im FVM-S-PS benannten Gebirge, höhere Konvergenzen und plastische Zonen als die, welche durch die Parameter der Zone 29 erhalten wurden. Ergänzend zu den mit den Parametern der Zone 29 (Gebirge GB-G-GA4) durchgeführten Berechnungen, werden daher im Kapitel 5.3 einige Bemerkungen betreffend die Zuverlässigkeit der vorgesehenen Maßnahmen für den Ausbruchquerschnitt CT2-b-T4 (BP47/1) aufgezeigt.

I parametri della nuova caratterizzazione geomeccanica in corrispondenza del BP47/1 mostrano convergenze e fasce plastiche superiori rispetto a quelle ottenute con i parametri della zona 29, in particolare nell'ammasso denominato FVM-S-PS. Ad integrazione delle analisi svolte con i parametri della zona 29 (ammasso GB-G-GA4), nel paragrafo 5.3 vengono pertanto riportate alcune considerazioni in merito all'affidabilità degli interventi previsti per la sezione CT2-b-T4 (BP47/1).

## 5 AUSSENSCHALE

### 5.1 ANALYSE DER AUSBRUCHPHASEN

Aus der Berechnung des Kennlinienverfahrens geht hervor, dass die Zone 29 in Klasse III, welche als Bezug zur Bemessung des Ausbruchquerschnitts CT2-T4 gilt, Konvergenzen bzgl. dem Gebirge von 6 cm sowie die Bildung einer plastischen Zone von 2m erweist.

Das Ausbruchverhalten und die Gebirgslastanalyse auf den Schalen, auch den Innenschalen, wurden mit dem Finite-Differenzen-Programm FLAC durchgeführt. Dieses ermöglicht Lastentwicklung und das spannungs-verformende Verhalten des Gebirges während der einzelnen Bauphasen zu verfolgen.

Modellierung im ebenen Verformungszustand, d.h.:

- Die Definition des geotechnischen Bezug Modells das ein Querschnitt zur Tunnelachse darstellt;
- Die Definition des Spannungs-Verformungs-Verhaltens und der Festigkeit des Gebirges ist vom Ausbruch abhängig;
- Die Definition des Spannungszustands im Gebirge, vor dem Tunnelvortrieb ist erforderlich;
- Die einzelnen Ausbruchphasen sowie die entsprechende Ausbruchsicherung werden modelliert.

#### 5.1.1 Der Berechnungskodex

Die Zahlanalysen wurden mit Hilfe des Berechnungsprogramms FLAC 7.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua) durchgeführt, ein Berechnungskodex zur Analyse der Ebenen Probleme, die das mechanische Verhalten von kontinuierlichen Media (Böden, Gebirge) und interagierende Strukturen betrifft. Die Berechnungen wurden entwickelt um das Verhalten des Hohlraums zu analysieren und die Angemessenheit der vorgesehenen Schalen zu kontrollieren

Die Analysenmethode zu den Finite-Differenzen besteht in der Diskretisierung der Differentialgleichungen, die das zu überprüfende physische Problem regieren, indem man den Ableitungen ein Verhältnis innerhalb Finite-Werten substituiert. So gehen Differentialgleichungen in algebraische Gleichungen über, die dann in weiteren Berechnungsschritten zu lösen sind. Der Berechnungsalgorithmus folgt einem ausdrücklichen Lagrange-Schema zur direkten Zeitintegration, welches eine leichte (und sehr schnelle) Bearbeitung der nichtlinearen Systeme, mit hohen Verformungen, mit sehr fortgeschrittenen Einsturz- und Instabilitätslagen zulässt. Die Diskretisierung wird durchgeführt indem ein Teil des berücksichtigten Kontinuums mit einem Raster, aus quadratischen Maschen bei denen die

## 5 RIVESTIMENTO DI PRIMA FASE

### 5.1 ANALISI DELLE FASI DI SCAVO

Dall'analisi delle linee caratteristiche, la zona 29 in classe III, presa di riferimento per il dimensionamento della sezione CT2-T4, mostra convergenze relative dell'ammasso dell'ordine di 6 cm e la formazione di una fascia plastica di 2.6m.

Il comportamento allo scavo e l'analisi del carico d'ammasso sui rivestimenti, anche definitivi, è stato condotto mediante il programma alle differenze finite FLAC. Quest'ultimo consente di seguire la storia di carico e il comportamento tensio-deformativo dell'ammasso roccioso durante tutte gli step per la realizzazione dell'opera.

Le analisi, condotte nell'ipotesi di deformazioni piane, comportano:

- La definizione del modello geotecnico di riferimento che rappresenta una sezione trasversale all'asse della galleria;
- La definizione delle leggi sforzo-deformazione e di resistenza dell'ammasso roccioso interessato dagli scavi;
- La definizione dello stato tensionale presente nell'ammasso prima dello scavo della galleria;
- La simulazione delle fasi di scavo e di messa in opera dei sostegni.

#### 5.1.1 Il codice di calcolo

Le analisi numeriche sono svolte utilizzando il programma di calcolo numerico FLAC 7.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua), codice di calcolo per l'analisi di problemi piani riguardanti il comportamento meccanico di mezzi continui (terreni, rocce) e di strutture interagenti. Le analisi sono sviluppate per analizzare il comportamento del cavo e verificare l'adeguatezza dei rivestimenti previsti.

Il metodo di analisi alle differenze finite consiste nella discretizzazione delle equazioni differenziali che governano il problema fisico in esame sostituendo alle derivate un rapporto tra termini finiti. In tal modo le equazioni differenziali si trasformano in equazioni algebriche da risolversi in passi successivi di calcolo. L'algoritmo di calcolo segue uno schema lagrangiano "esplicito" per integrazione diretta nel tempo, in grado di lavorare agevolmente (e molto velocemente) per sistemi non lineari, con grandi deformazioni, con stati di collasso molto avanzati e in condizioni di instabilità. La discretizzazione viene operata sovrapponendo alla porzione di continuo considerata una griglia, a maglie quadrilatera, in cui in corrispondenza dei nodi sono definite le grandezze in gioco. A ciascuna zona si assegnano le proprietà fisiche e meccaniche

Spielgrößen an den Knoten festgelegt sind, überlagert wird. Jeder Zone werden die physischen und mechanischen Eigenschaften zugeordnet die dessen Verhalten bei der Berechnung charakterisieren. Die Scheitel jeder Zone bilden die Rasterknoten, an dessen Koordinaten die Lagrange-Formulierung, zur Analyse des Kontinuums, ausgerichtet ist. Die erste Ableitung einer Funktion, hinsichtlich einer unabhängigen Variablen, kann mit einem Verhältnis zwischen der von der Funktion erlittenen Differenz beim Wechsel von einem Knoten zum angrenzenden, und der entsprechenden Differenz der unabhängigen Variablen ersetzt werden. Für jeden Rasterknoten schätzt man die Masse  $m$ , die Resultante der externen Kräfte  $F_e$  (Gravitation, externe Lasten, usw.), die Resultante der internen Kräfte  $F_i$ , welche per Integrierung der Kräfte in den vom selben Knoten verbundenen Zonen berechnet werden, und die aus dem Gleichgewicht gebrachten Kraft, die auf den Knoten wirkt  $F_u$  (unbalance force  $F_u = F_e - F_i$ ). Um das System im Gleichgewicht zu halten muss die nichtbalancierte Kraft gleich null sein. Im Allgemeinen endet der iterative Prozess wenn die nichtbalancierte Kraft an einen niedrigeren Wert als den der festgelegten Toleranz gelangt.

#### 5.1.2 Analysierte Ausbruchquerschnitte

Zur Bemessung des Ausbruchquerschnitts CT2-T4 wurden der Ausbruchquerschnitt mit der Stollenüberdeckung 52/2a (H=995 m) in der homogenen Strecke 29 (GB-G-GA-4) und die Gebirgsparameter in Klasse III (Tabelle 10) berücksichtigt.

#### 5.1.3 Bildendes Gebirgsmodell

Das Gebirge ist als ein kontinuierlich elastisch-plastisches Medium modelliert worden mit einem Festigkeitskriterium des Typs Mohr-Coulomb mit softening und nicht assoziiertem Fließgesetz. Insbesondere sind die elastischen (Verformungsmodul und Poisson-Beiwert), elastisch-plastischen (Reibungswinkel und Peak- und Restkohäsion) und physischen (Dichte) Eigencharakteristika der vom Ausbruch betroffenen Felsen festgelegt worden.

#### 5.1.4 Modellgeometrie und Ausgangsspannungslage

Aufgrund der Symmetrie der zu untersuchenden Problemstellung, erstreckt sich das Berechnungsmodell über eine Breite von 100 m ab den Grenzen der Hohlräume und über eine Höhe von 200 m, von denen 100 m unter und 100 m über der Schienenoberkante liegen. Durch die gewählten Modellabmessungen kann davon ausgegangen werden, dass eventuelle Randeinflüsse vernachlässigbar werden. Das Gebirge wurde mittels zweidimensionaler, quadratischer Elemente mit Abmessungen von ca. 200x200 cm diskretisiert. In der Nähe des Tunnels wird die Mesh verdichtet und die Elemente erreichen Abmessungen von ca. 50x50 cm.

che ne caratterizzeranno il comportamento nell'analisi. I vertici di ogni zona costituiscono i nodi della griglia, alle cui coordinate è riferita la formulazione Lagrangiana adottata per l'analisi del continuo. La derivata prima di una funzione, rispetto ad una variabile indipendente, si può sostituire con il rapporto tra la variazione subita dalla funzione nel passare da un nodo ad uno contiguo e la corrispondente variazione della variabile indipendente. Per ogni nodo della griglia si valuta la massa  $m$ , la risultante delle forze esterne  $F_e$  (gravità, carichi esterni, ecc.), la risultante delle forze interne  $F_i$ , calcolata per integrazione degli sforzi nelle zone collegate da uno stesso nodo, e la forza sbilanciata agente sul nodo  $F_u$  (unbalance force  $F_u = F_e - F_i$ ); affinché il sistema sia in equilibrio la forza sbilanciata deve essere nulla. In genere, il processo iterativo termina quando la forza sbilanciata arriva ad un valore minore di una tolleranza prestabilita.

#### 5.1.2 Sezioni analizzate

Per il dimensionamento della sezione CT2-T4 si è considerata la sezione con la copertura del cunicolo 52/2a (H=995 m) nella tratta omogenea 29 (GB-G-GA-4) e i parametri d'ammasso in classe III (Tabella 10).

#### 5.1.3 Modello costitutivo dell'ammasso

L'ammasso è stato modellato come un mezzo continuo elasto-plastico avente criterio di resistenza di tipo Mohr-Coulomb con softening e legge di flusso non associata. In particolare sono state assegnate le caratteristiche elastiche (modulo di deformazione e coefficiente di Poisson), elasto-plastiche (angolo di resistenza al taglio e coesione, di picco e residui) e fisiche (densità) proprie delle rocce interessate dallo scavo.

#### 5.1.4 Geometria del modello e stato tensionale iniziale

Il modello di calcolo, in virtù della simmetria del problema, si estende per 100 m in larghezza e 200 m in altezza, di cui 100 m al di sotto del piano del ferro e 100 m al di sopra di quest'ultimo. Tali limiti sono sufficienti per ritenere trascurabili gli effetti di bordo. L'ammasso è stato discretizzato mediante elementi bidimensionali quadrati di dimensioni pari a circa 200x200 cm, infitti in prossimità della galleria, dove assumono dimensioni pari a circa 50x50 cm.

Le condizioni di vincolo al contorno del modello prevedono spostamenti impediti in entrambe le direzioni lungo il boundary inferiore e spostamenti impediti in direzione orizzontale lungo i boundary verticali. Sul boundary superiore è applicata una

Die gewählten Auflagerbedingungen verhindern Verschiebung in beide Richtungen am unteren Modellrand und blockieren Verschiebungen in horizontaler Richtung an den vertikalen Modelrändern. Am oberen Modellrand wurde ein Druck aufgebracht, welcher der vorhandenen Bodenauflast (von Tunnel bis Geländeoberkante) entspricht.

Der Tunnel hat eine maximale Ausbruchbreite und -höhe (inkl. 10 cm Extraaushub) von jeweils 9.54 m und 7.86 m.

Die Kraftlage vor Ort ist gemäß folgenden Verhältnissen ausgewertet worden:

$$\sigma_y = \gamma \cdot z$$

$$\sigma_x = K_0 \cdot \sigma_z$$

Wobei:

- Z = Abstand des allgemeinen Elements von der Geländeoberkante
- $K_0$  = Beiwert des waagrecchten Schubs das gleich 0.75 angenommen ist.

pressione pari al peso del terreno presente in sito fino alla quota del piano campagna.

La galleria ha una larghezza e un'altezza massima di scavo (compresi 10 cm di extrascavo) rispettivamente di 9.54 m e 7.86 m.

Lo stato di sforzo in sito è stato valutato secondo le seguenti relazioni:

Dove

- Z rappresenta la distanza del generico elemento dal piano campagna
- $K_0$  è il coefficiente di spinta orizzontale, assunto pari ad 0.75.

#### 5.1.5 Eigenschaften der Außenschale

Folgende Tabelle stellt die Eigenschaften der Außenschale des analysierten Ausbruchquerschnitts da:

	Betoncino			Armatura I fase	
	Classe	Sp. nominale	Sp. Minimo	Tipo	Passo
		[cm]	[cm]	[-]	[m]
<b>CT2-T4</b>	C30/37	30	25	2IPN160	1.5 - 0.5

Tabelle 13: Eigenschaften der Außenschale CT2-T4

Bei der Modellierung der Außenschale wurde dem Spritzbeton ein Elastizitätsmodul von 15GPa angewandt, um die Reifezeit des Betons im Verhältnis zum Ortsbrustabstand zu erfassen.

#### 5.1.6 Laststufe

Nach einer ersten Phase der Modellinitialisierung, zur Berechnung des Ausgangsgleichgewichts, wird die Tunnelausbruch mittels Trägheits-Kräften des Ausbruchs simuliert (späterhin TKA). Der Prozentsatz dieser Kräfte an der Ortsbrust (26%) und vor der Außenschale wurde aufgrund der Ergebnisse des Kennlinienverfahrens bestimmt.

#### 5.1.5 Caratteristiche dei rivestimenti di prima fase

La seguente tabella riporta le caratteristiche dei rivestimenti di prima fase della sezione analizzata:

Tabella 13: Caratteristiche rivestimenti di prima fase CT2-T4

Nella modellazione del rivestimento di prima fase al betoncino proiettato è stato assegnato un modulo elastico di 15GPa per considerare il tempo di maturazione del cls in funzione della distanze dal fronte.

#### 5.1.6 Step di carico

Dopo una prima fase di inizializzazione del modello, necessaria per calcolare l'equilibrio iniziale, lo scavo della galleria viene simulato mediante l'utilizzo delle Forze Fittizie di Scavo, di seguito denominate FFS. La percentuale di tali forze al fronte (26%) e prima del rivestimento di prima fase è definita sulla base dei risultati delle Linee Caratteristiche.

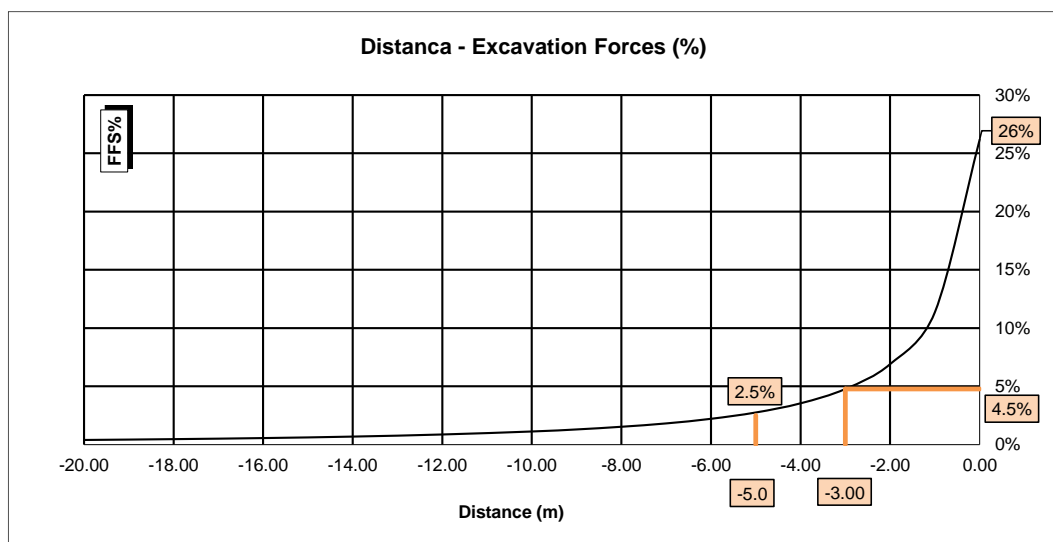


Abbildung 1: TKA an der Ortsbrust und bei Einsetzung der Nietungen

Figura 1: FFS al fronte e all'installazione delle chiodature

Nachfolgend sind die Berechnungsstufen zusammengefasst:

Di seguito sono riassunti gli step di calcolo:

- 1) Geostatische Ausgangslage mit Bestimmung der Geometrie, der Umgebungslagen, der Stratigraphie und der geostatischen Ausgangsspannungen;
  - 2) Annullierung der Zonen innerhalb der Ausbruchs und Reduktion der TKA bis zum Wert den sie an der Ortsbrust einnehmen (TKA =38%);
  - 3) Reduktion der TKA bis zum Wert den sie bei der Einsetzung der Außenschale einnehmen. Die Berechnungen bei nicht gestützter Hohlraumbedingung haben eine relative untere Konvergenz am Extraaushub erwiesen. Vorsichtshalber hat man beschlossen der Außenschale einen variablen Prozentsatz der TKA von 4.5 bis 2.5% der lithostatischen Ausgangslast anzuwenden. Daher sind zwei Modelle erzeugt worden, einer mit TKA=4.5% und einer mit TKA=2.5%.
  - 4) Einführung des numerischen Außenstützenmodells 2IPN120, Abstand 0.50 und 1.5m jeweils an 4.5% und 2.5% der TKA und Annullierung der TKA (TKA=0%).
  - 5) Entfernung der Außenschale und Simulation der Langzeitkonfiguration mit der Einsetzung der Innenschale. Diese ist mit der Bewehrungsmatte verbunden mittels ein Schnittstellenelement, mit normaler dem Gebirge entsprechende Steifigkeit, und tangentielle Steifigkeit gleich Null. Dieses Schnittstellenelement ermöglicht die Wirkung der Abdichtungsschicht zwischen den zwei Schalen zu berücksichtigen, indem es die tangentialen Spannungen annulliert, darüber hinaus erlaubt es die Drucke, welche auf der Innenschale wirken, zu schätzen.
- 1) Condizione geostatica iniziale con definizione della geometria, delle condizioni al contorno, della stratigrafia e delle tensioni geostatiche iniziali;
  - 2) Annullamento delle zone all'interno dello scavo e riduzione delle forze FFS, fino al valore che assumono al fronte (FFS=26%);
  - 3) Riduzione delle FFS fino al valore che assumono nel momento dell'installazione del rivestimento di I fase. Le analisi in condizioni di cavità non sostenuta hanno confermato una convergenza relativa inferiore all'extrascavo. Cautelativamente, si è deciso di assegnare al rivestimento di prima fase una percentuale delle FFS variabile dal 4.5 al 2.5% del carico litostatico iniziale. Sono stati pertanto fatti due modelli, uno con FFS=4.5% e uno con FFS=2.5%.
  - 4) Introduzione nel modello numerico dei sostegni di I fase, 2IPN120 a passo 0.50 e 1.5 m rispettivamente al 4.5% e al 2.5% delle FFS e annullamento delle FFS (FFS=0%).
  - 5) Rimozione del rivestimento di prima fase e simulazione della configurazione a lungo termine con l'installazione del rivestimento definitivo. Quest'ultimo è collegato alla mesh mediante un elemento interfaccia avente rigidità normale pari a quella dell'ammasso e rigidità tangenziale nulla. Quest'ultimo elemento, oltre a consentire di valutare le pressioni che agiscono sul rivestimento definitivo, consente di considerare l'effetto del pacchetto di impermeabilizzazione presente tra i due rivestimenti, annullando le tensioni tangenziali.

### 5.1.7 Nachweisverfahren

Gemäß den NTC 2000 sind die aus dem FDM Modell entnommenen Wirkungen auf die Außenschale um  $Y_G = 1,30$  erhöht und die Widerstände des strukturellen Querschnitts um  $Y_c = 1,50$  reduziert, d.h.  $Y_s = 1,15$ .

Die Nachweise ergeben sich als zufriedenstellend wenn folgende Ungleichung verifiziert ist:

$$E_d \leq R_d$$

Wobei:

- $R_d$  = Bemessungswert Widerstand
- $E_d$  = Bemessungswert Einwirkung

### 5.1.8 Ergebnisse

Die in Anhang 3 aufgezeigten Berechnungen bestätigen tatsächlich die in Tabella 8 dargestellten Ergebnisse des Kennlinienverfahrens. Die relative Konvergenz bei der Kappe wird, dank der Außenschalenwirkung, von 5.9 cm auf 3.5 cm reduziert, während die absolute Konvergenz von 8.6 cm auf 7.1 cm sinkt.

Die Plastizität ist in Höhe von 2.5 m.

Der vom Gebirge ausgeübter Druck auf die Innenschale, bei Verfall der Nietungen, ist in Höhe von 500 kPa.

## 5.2 ANALYSE DER ORTBRUSTSTABILITÄT

### 5.2.1 Nachweisverfahren

Zur Durchführung der Stabilitätsberechnungen der Ortsbrust werden die charakteristischen Werte der geotechnischen Parameter angewandt und mit folgenden Faktoren reduziert:

Parameter / Parametri	Symbol / Simbolo	Faktor / Fattore
Effektiver Reibungswinkel / Angolo di attrito effettivo <sup>a</sup>	$\gamma_{\phi'}$	1.25
effektive Kohäsion / Coesione effettiva	$\gamma_c$	1.25
undrainierte Scherfestigkeit / Resistenza a taglio non drenata	$\gamma_{cu}$	1.4
einaxiale Druckfestigkeit / Resistenza a compressione monoassiale	$\gamma_{qu}$	1.6
Wichte / Peso specifico	$\gamma_\gamma$	1
<sup>a</sup> Dieser Faktor wird auf $\tan \phi'$ angewendet / valore applicato alla tangente dell'angolo		

Tabelle 14: Teilsicherheitsfaktoren Ortsbrustnachweis

### 5.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Kennlinienverfahrens schließen Instabilitätsphänomene der Ortsbrust aus.

Eingehendere Überprüfungen, wie im nachfolgenden Kapitel dargestellt, wurden für den BP47/1 durchgeführt.

### 5.1.7 Procedura di verifica

In conformità alle NTC 2008 le azioni ricavate dal modello FDM sul rivestimento di prima fase sono aumentate di  $Y_G = 1,30$  e le resistenze della sezione strutturale sono ridotte di  $Y_c = 1,50$  ovvero  $Y_s = 1,15$ .

Le verifiche risultano soddisfatte se è verificata la seguente disuguaglianza:

Dove:

- $R_d$  = Valore della resistenza di progetto
- $E_d$  = Valore di progetto dell'effetto delle azioni

### 5.1.8 Risultati

Le analisi riportate nell'allegato 3 confermano di fatto i risultati delle Linee Caratteristiche esposti in Tabella 11. La convergenza relativa in calotta, grazie all'effetto del rivestimento di prima fase si riduce da 5.9 cm a 3.5 cm mentre la convergenza assoluta si riduce da 8.5 cm a 7.1 cm.

Le plasticizzazioni sono dell'ordine di 2.5 m.

La pressione esercitata dall'ammasso sul rivestimento definitivo, al decadimento delle chiodature, è dell'ordine degli 500 kPa.

## 5.2 ANALISI DELLA STABILITÀ DEL FRONTE

### 5.2.1 Procedura di verifica

Per l'esecuzione dei calcoli di stabilità del fronte vengono applicati i valori caratteristici dei parametri geotecnici ridotti con i seguenti fattori:

Tabella 14: Fattori parziali di sicurezza per la verifica di stabilità del fronte di scavo

### 5.2.3 Risultati

I risultati delle linee caratteristiche escludono fenomeni di instabilità del fronte di scavo.

Verifiche più approfondite sono state eseguite per il BP47/1, come illustrato nel prossimo paragrafo.

### 5.3 VERHALTENSÜBERPRÜFUNG ZUM AUSBRUCH UND BEMESSUNG DES AUSBRUCHQUERSCHNITTS CT2-A (BP47/1) DES GEBIRGES FVM-S-PS

Aus dem Kennlinienverfahren, erweist das Gebirge FVM-S-PS eine Ortsbrustinstabilitätstendenz, mit Konvergenzen an der Ortsbrust in einer Größenordnung von 2.3% des Ausbruchsradius.

Die Vereinbarkeitsüberprüfung der Maßnahmen sowohl die der Gebirgskonsolidierung als auch die der Stützung, welche für den Ausbruchquerschnitt CT2-b-T4 (in den vorhergehenden Kapiteln bemessen) des BP47/1 mit den geomechanischen Parametern des Gebirge FVM-S-PS vorgesehen sind, wurde mittels den Modellen der Finite Differenzen durchgeführt. Insbesondere wurden zwei axialsymmetrische Modelle entwickelt, die in der Lage sind Folgendes nachzubilden:

- Die Kennlinien des nicht gestützten Hohlraums (Radialdruck - Konvergenz)
- Die Kurve Konvergenz- Ortsbrustabstand

Diese Modelle, im Gegensatz zu den in Kapitel 4.1 und Anhang 1 aufgezeigten Kennlinien, erlauben es den Wirkungsgrad der Verfestigungseingriffe zu bewerten. Insbesondere wurden diese Eingriffe durch Übertragung einer Kohäsionserhöhung auf das betroffene Bodenvolumen schematisiert.

#### 5.3.1 Der Berechnungskodex

Die Zahlenanalysen sind mit Hilfe des Rechnungsprogramms FLAC 7.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua) durchgeführt, ein Berechnungskodex zur Analyse der Ebenen Probleme die das mechanische Verhalten von kontinuierlichen Media (Böden, Gebirge) und interagierende Strukturen betrifft, wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben wird.

#### 5.3.2 Bildendes Gebirgsmodell

Das Gebirge ist als ein kontinuierlich elastisch-plastisches Medium modelliert worden mit einem Festigkeitskriterium des Typs Mohr-Coulomb mit softening und nicht assoziiertem Fließgesetz. Insbesondere sind die elastischen (Verformungsmodul und Poisson-Beiwert), elastisch-plastischen (Reibungswinkel und Peak- und Restkohäsion) und physischen (Dichte) Eigencharakteristika der von der Aushebung betroffenen Felsen festgelegt worden.

$\gamma$	$\phi_{\text{picco}}$	$\phi_{\text{res}}$	$c_{\text{picco}}$	$c_{\text{res}}$	$E_{\text{rm}}$ (GSI picco)	$\psi$
[kN/m <sup>3</sup> ]	[°]	[°]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[°]
27.0	23.8	18.0	0.932	0.597	10374	3.3

Tabelle 15: Charakteristische Bruchparameter des Gebirge FVM-S-PS

### 5.3 VERIFICA DEL COMPORTAMENTO ALLO SCAVO E DIMENSIONAMENTO DELLA SEZIONE CT2-A (BP 47/1) NELL'AMMASSO FVM-S-PS

Dall'analisi delle linee caratteristiche, l'ammasso FVM-S-PS mostra una tendenza all'instabilità del fronte di scavo, con convergenze al fronte dell'ordine del 2.3% del raggio di scavo.

La verifica della compatibilità degli interventi, sia di consolidamento dell'ammasso che di sostegno, previsti per la sezione CT2-b-T4 (dimensionati nei paragrafi precedenti) del BP 47/1 con i parametri geomeccanici dell'ammasso FVM-S-PS, è stata condotta mediante modelli alle differenze finite. In particolare, sono stati elaborati due modelli assialsimmetrici in grado di riprodurre:

- La linea caratteristica della cavità non sostenuta (Pressione radiale - Convergenza)
- La curva Convergenza - Distanza dal fronte

Questi modelli, a differenza delle linee caratteristiche riportate al paragrafo 4.1 e in Appendice 1 consentono di valutare l'efficacia degli interventi di consolidamento. In particolare, tali interventi sono stati schematizzati assegnando al volume di terreno interessato un incremento di coesione.

#### 5.3.1 Il codice di calcolo

Le analisi numeriche sono svolte utilizzando il programma di calcolo numerico FLAC 7.0 (Fast Lagrangian Analysis of Continua), codice di calcolo per l'analisi di problemi piani riguardanti il comportamento meccanico di mezzi continui (terreni, rocce) e di strutture interagenti, come descritto al paragrafo 5.1.1

#### 5.3.2 Modello costitutivo dell'ammasso

L'ammasso è stato modellato come un mezzo continuo elasto-plastico avente criterio di resistenza di tipo Mohr-Coulomb con softening e legge di flusso non associata. In particolare sono state assegnate le caratteristiche elastiche (modulo di deformazione e coefficiente di Poisson), elasto-plastiche (angolo di resistenza al taglio e coesione, di picco e residui) e fisiche (densità) proprie delle rocce interessate dallo scavo.

Tabella 15: Parametri di rottura caratteristici dell'ammasso FVM-S-PS



### 5.3.3 Schematisierung der Konsolidierung

Wie zuvor angedeutet, wurden die Konsolidierungen durch Übertragung einer Kohäsionserhöhung  $\Delta c$  auf die betroffenen Zonen schematisiert. Diese Kohäsionserhöhung wurde laut folgendes Verhältnis gewertet:

$$\sigma_3 = \frac{N_y}{A_{inf} \cdot \gamma_s}$$

$$\Delta c = \frac{\sigma_3 \cdot \sqrt{k_p}}{2}$$

wobei:

- $\sigma_3$  = Confinementdruck
- $N_y$  = Ermüdungswiderstand der Bohrschrauben
- $A_{inf}$  = Einflussfläche jeder Bohrschraube
- $\gamma_s$  = Sicherheitskoeffizient (1.15)
- $K_p$  = passiver Druckkoeffizient

Angesichts der Eingriffseigenschaften des Ausbruchquerschnitts CT2-b-T4

- Radialnietungen mit Bohrschrauben R38N mit quadratischem Raster 1.5 x 1.5 m;
- Nr. 26 Bohrschrauben R38N an der Ortsbrust,

ergeben sich folgende Parameter:

### 5.3.3 Schematizzazione dei consolidamenti

Come precedentemente accennato, i consolidamenti sono stati schematizzati assegnando un incremento di coesione  $\Delta c$  alle zone interessate. Tale incremento è stato valutato secondo la seguente relazione:

dove:

- $\sigma_3$  = Pressione di confinamento
- $N_y$  = Resistenza allo snervamento degli autoperforanti
- $A_{inf}$  = Area di influenza di ciascun autoperforante
- $\gamma_s$  = coefficiente di sicurezza (1.15)
- $K_p$  = coefficiente di spinta passiva

Considerando le caratteristiche degli interventi della sezione CT2-b-T4:

- Chiodature radiali costituite da autoperforanti R38N a maglia 1.8 x 1.5 m;
- n°26 autoperforanti R38N sul fronte.

si ricavano i seguenti parametri:

Contorno				Fronte				
$\sigma_3$	$\Delta c$	$c_{picco}$	$c_{res}$	n. inclusi	$\sigma_3$	$\Delta c$	$c_{picco}$	$c_{res}$
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0.129	0.099	1.030	0.696	26	0.189	0.145	1.077	0.742

Tabelle 16: angewandte Parameter für die an Rand und Ortsbrust konsolidierten Zonen

Tabella 16: Parametri adottati per le zone consolidate sul contorno e sul fronte.

### 5.3.4 Modell zur Festlegung der Kurve Konvergenz-Ortsbrustabstand

Das benutzte Modell (Figura 2) ist 100 m x 150 m groß; die Wirkung der Überdeckung (590 m) wurde mittels einen lithostatischen Druck entlang der Gitterrostoberfläche schematisiert. Die Maße der Elemente variieren von 25 x 50 cm im Ausbruchbereich bis 2 x 0.5 m im äußersten Bereich; die oberen und unteren Ränder sind in Längsrichtung mittels Wagen gebunden worden.

Die Präsenz der Ortsbrust- und Randkonsolidierungen wurde durch Übertragung der im vorhergehenden Kapitel festgelegten Kohäsionen auf die vor der Abbaufont vorgelagerten Bereiche, auf eine der Mindestüberlappung der Stäbe entsprechenden

### 5.3.4 Modello per la determinazione della curva Convergenza - Distanza dal fronte

Il modello utilizzato (Figura 2) ha dimensioni di 100 m x 150 m; l'effetto della copertura (590 m) è stato schematizzato mediante una pressione litostatica lungo la superficie della griglia. Gli elementi hanno dimensioni variabili da 25 x 50 cm nell'area di scavo a 2 x 0.5 m nell'area più esterna; i boundary superiori e inferiori sono stati vincolati in direzione longitudinale mediante dei carrelli.

La presenza dei consolidamenti al fronte e al contorno è stata modellata assegnando alle zone antistanti il fronte di scavo, per una lunghezza pari alla sovrapposizione minima delle barre (6m), e sul contorno, per una larghezza di 6 m, le coesioni

Länge (6 m), und am Rand auf eine Breite von 6 m, modelliert. Folgende Abbildung stellt diese Zonen dar.

definite al paragrafo precedente. La seguente figura rappresenta tali zone.

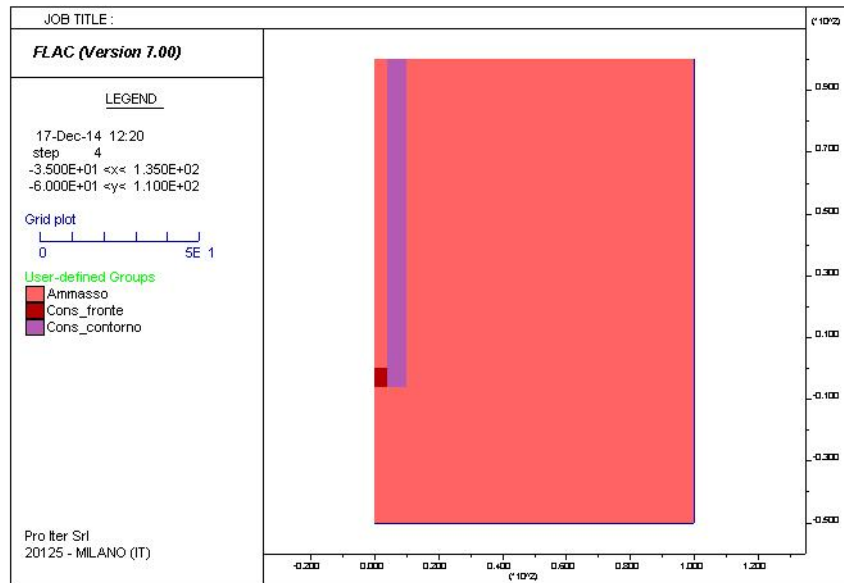


Abbildung 2: Berechnungsmodell

Figura 2: Modello di calcolo

Der Tunnelausbruch wurde durch Annullierung der dem Ausbruch entsprechenden Zonen, und durch Anwendung eines äquivalenten Drucks auf den Rand simuliert. Dieser Druck, ausgehend vom geostatischen Druck, wurde stufenweise bis zu dessen kompletten Annullierung reduziert.

Lo scavo della galleria è stato simulato annullando le zone corrispondenti allo scavo e applicando sul contorno una pressione equivalente. Tale pressione, a partire dalla pressione geostatica, è stata ridotta per step fino al suo completo annullamento.

Einst die Konvergenz erreicht, wurden die Verschiebungen in Richtung x aller Konten am Ausbruchrand registriert, wobei die Kurve Konvergenz - Ortsbrustabstand entnommen wurde.

Raggiunta la convergenza sono stati registrati gli spostamenti in direzione x di tutti i nodi sul contorno dello scavo, ricavando così la curva Convergenza - Distanza dal fronte.

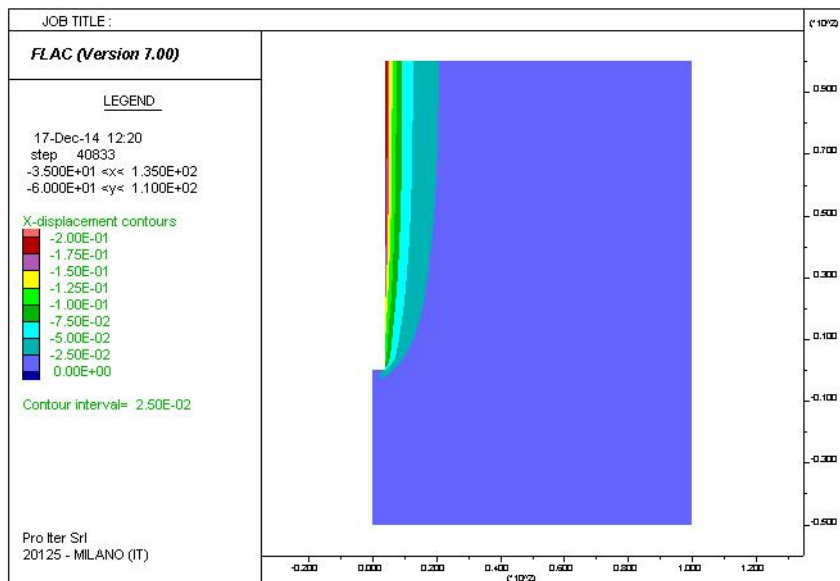


Abbildung 3: horizontale Verschiebung - Modell mit Konsolidierungen

Figura 3: spostamenti in direzione orizzontale

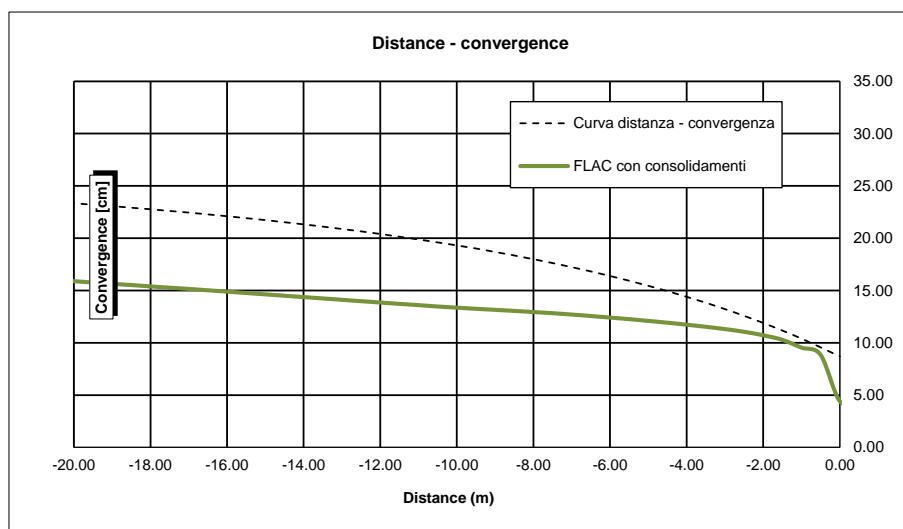


Abbildung 4: Kurve Konvergenz - Ortsbrustabstand

Figura 4: Curva Convergenza - Distanza dal fronte

Aus dem Vergleich der zwei Kurven kann beobachtet werden, wie die vorgesehenen Konsolidierungen die Konvergenzen merklich reduzieren. Die Ortsbrustkonvergenz, insbesondere, reduziert sich auf 4.4 cm, was ungefähr 1% des Ausbruchradius entspricht, wobei die Sicherheit der Ausbruchphase gewährleistet wird.

Dal confronto delle due curve si può osservare come i consolidamenti previsti riducono sensibilmente le convergenze. La convergenza al fronte, in particolare, si riduce a 4.4 cm, pari a circa l'1% del raggio di scavo, garantendo la sicurezza in fase di scavo.

### 5.3.5 Modell zur Festlegung der Kurve Radialdruck - Konvergenz

Das benutzte Modell (Abbildung 5) ist 100 m x 1 m groß; die Wirkung der Überdeckung (590 m) wurde mittels einen lithostatischen Druck entlang der rechten Rands schematisiert. Die Maße der Elemente sind von 25 x 33 cm im konsolidierten Bereich, dagegen wurde das Gebirge mit 1 x 0.33 m großen

### 5.3.5 Modello per la determinazione della curva Pressione radiale - Convergenza

Il modello utilizzato (Figura 5) ha dimensioni di 100 m x 1 m; l'effetto della copertura (590 m) è stato schematizzato mediante una pressione litostatica lungo il boundary di destra. Gli elementi hanno dimensioni di 25 x 33 cm nell'area di scavo e nell'area consolidata mentre l'ammasso è stato

Elementen schematisiert; die oberen und unteren Ränder sind in Längsrichtung mittels Wagen gebunden worden.

Die Präsenz der Radialnietungen wurde durch Übertragung der in Kapitel 5.3.3 bestimmten Kohäsionen, auf den Hohlraumrand, auf eine Breite von 6 m, modelliert. Folgende Abbildung stellt diese Zonen dar.

schematizzato con elementi di dimensioni 1 x 0.33 m; i boundary superiori e inferiori sono stati vincolati in direzione longitudinale mediante dei carrelli.

La presenza delle chiodature radiali è stata modellata assegnando alle zone sul contorno del cavo, per una larghezza di 6 m, le coesioni definite al paragrafo 5.3.3 La seguente figura rappresenta tali zone.

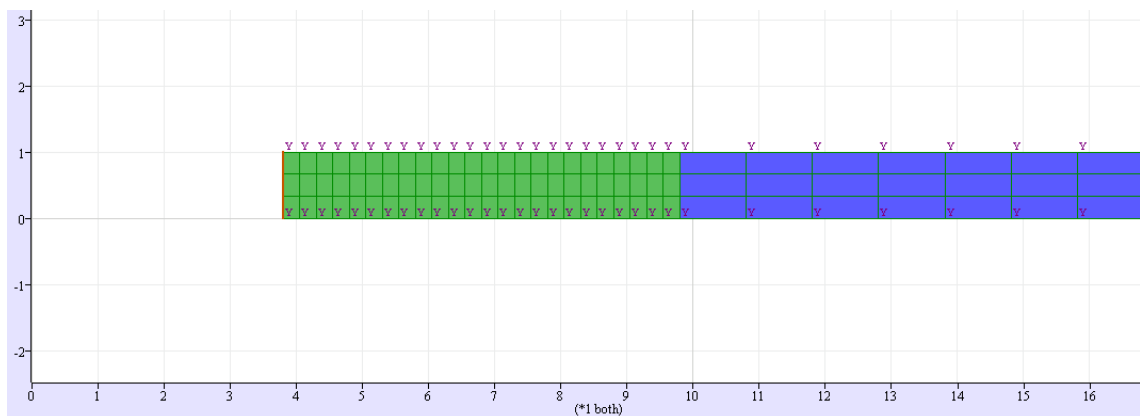
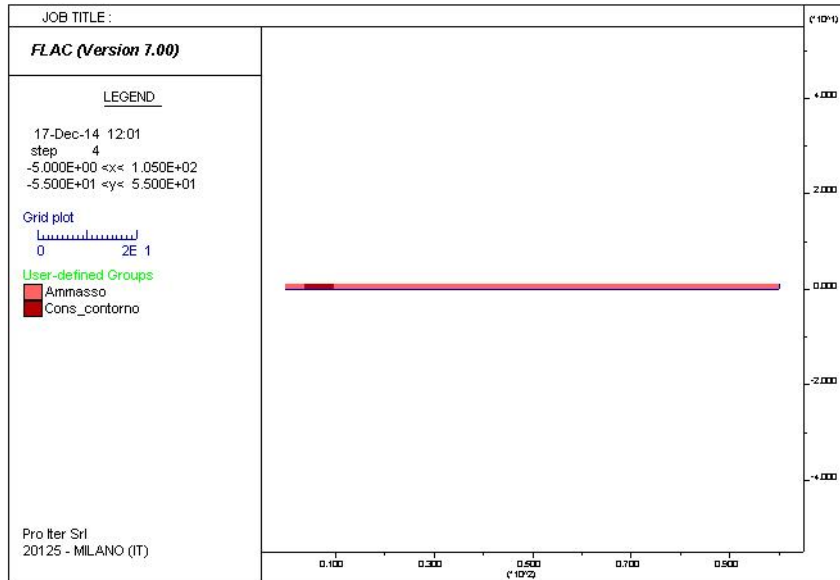


Abbildung 5: Berechnungsmodell

Figura 5: Modello di calcolo

Der Tunnelausbruch wurde durch Annullierung der dem Ausbruch entsprechenden Zonen (x zwischen 0 und 3.80 m), und durch Anwendung eines äquivalenten Drucks auf den Ausbruchrand simuliert. Dieser Druck, ausgehend vom geostatischen Druck, wurde stufenweise bis zu dessen kompletten Annullierung reduziert.

An jeder Entladungsstufe wurde die entsprechende Verschiebung in Richtung x registriert, wobei die Kurve Radialdruck -Konvergenz entnommen wurde.

Lo scavo della galleria è stato simulato annullando le zone corrispondenti allo scavo (x compreso tra 0 e 3.80 m) e applicando sul contorno dello scavo una pressione equivalente. Tale pressione, a partire dalla pressione geostatica, è stata ridotta per step fino al suo completo annullamento.

Ad ogni step di scarico si è registrato il corrispondente spostamento in direzione x, ricavando così la curva Pressione radiale - Convergenza.

Dasselbe Modell wurde auch zur Rückverfolgung der analytischen Kurve von Ribacchi ohne Konsolidierungen genutzt.

Il medesimo modello è stato utilizzato anche per ripercorrere la curva analitica di Ribacchi in assenza di consolidamenti.

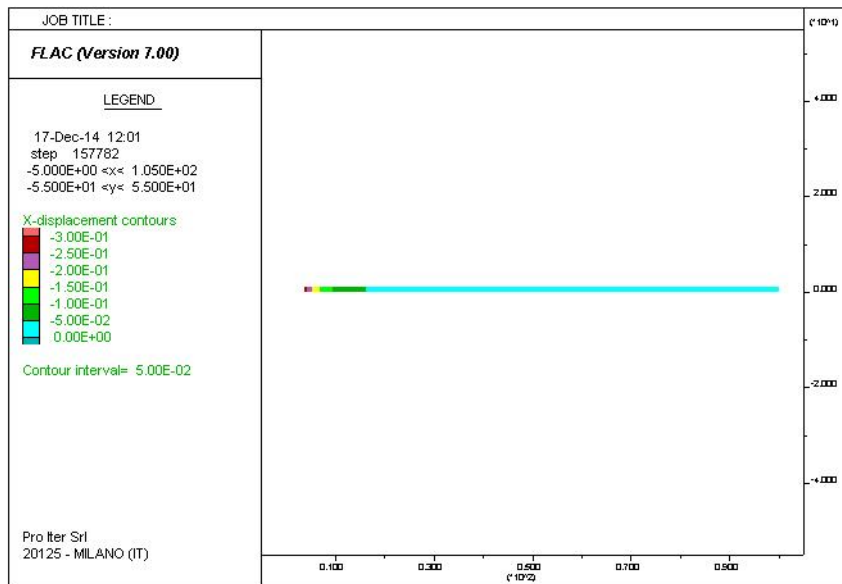


Abbildung 6: Horizontale Verschiebungen - Modell mit Konsolidierungen

Figura 6: Spostamenti in direzione orizzontale - Modello con consolidamenti

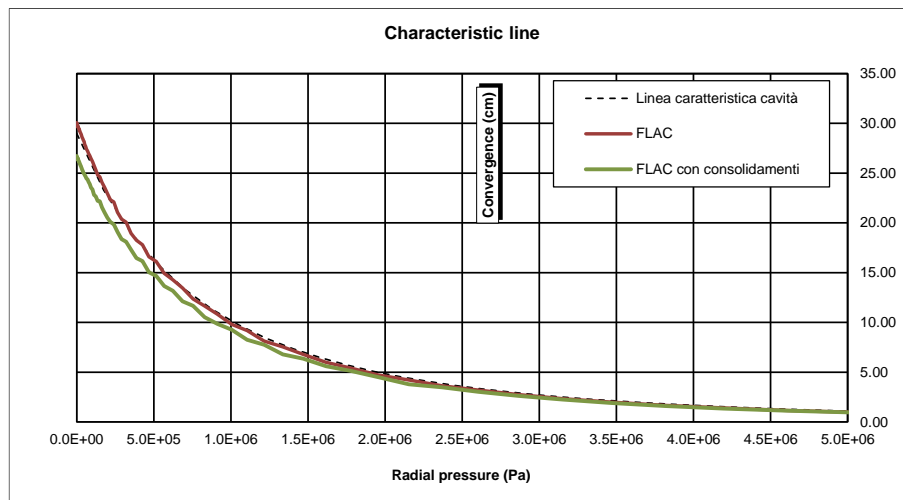


Abbildung 7: Radialdruck - Konvergenz Kurve

Figura 7: Curva Pressione radiale - Convergenza

Aus dem Vergleich der zwei Kurven kann beobachtet werden, dass

Dal confronto delle due curve si può osservare che:

- die aus der FLAC Analyse ohne Konsolidierungen entnommene Kurve bildet mit gute Näherung die theoretische Kurve nach.
- die Radialnietungen reduzieren leicht die Konvergenzen.

- La curva ricavata dall'analisi FLAC in assenza di consolidamenti riproduce con ottima approssimazione la curva teorica.
- Le chiodature radiali sul contorno riducono leggermente le convergenze.

### 5.3.6 Bemessung der Außenschale

Die Außenschale wurde durch Überlappung der Außenschalenkennlinie auf die Hohlraumkennlinie bemessen.

In Anbetracht einer Schalenbemessung mit dem Kennlinienverfahren, wenn man mit  $k$  die elastische Schalensteifigkeit kennzeichnet, wird der elastische Teil der charakteristischen Schalenkurve mittels folgendem Verhältnis ermittelt:

$$P = k \cdot u$$

in dem:

- $P$  = auf die Schale wirkender Außendruck;
- $k$  = Schalensteifigkeit;
- $u$  = radiale Verformung oder Verschiebung am Hohlraumrand.

Wenn die Schale aus zwei unterschiedlichen Stützsystemen besteht (z.B. Spritzbeton und Lehrgerüste), empfiehlt die Literatur die Gesamtsteifigkeit des Systems als Summe der einzelnen Steifigkeiten jeder Komponente zu berechnen.

Daher wurden die Steifigkeiten der Schalenkomponente durch die Verwendung folgende Formeln (mit Annahme der kreisförmigen Spritzbetonschale). Für den Spritzbeton wurde dieses Verhältnis genutzt:

$$k_c = \frac{E_c \cdot (R_i^2 - (R_i - s_c)^2)}{(1 + \nu_c) \cdot R_i \cdot ((1 - 2\nu_c) \cdot R_i^2 + (R_i - s_c)^2)}$$

wobei:

- $E_c$  = Elastizitätsmodul des Betons;
- $\nu_c$  = Poisson-Modul des Betons;
- $R_i$  = Ausbruchradius;
- $s_c$  = Stärke des Spritzbetonrings;

hingegen wurde für die Lehrgerüste dieser Ausdruck genutzt:

$$\frac{1}{k_s} = \frac{S \cdot R_s^2}{E_s \cdot A_s}$$

bei dem:

- $k_s$  = Steifigkeit der Lehrgerüste;
- $R_s$  = entsprechender Radius des Lehrgerüsts;

### 5.3.6 Dimensionamento dei rivestimenti di prima fase

Il rivestimento di prima fase è stato dimensionato sovrapponendo alla linea caratteristica della cavità, la linea caratteristica del rivestimento di prima fase.

Nell'ottica di un dimensionamento dei rivestimenti con il metodo delle linee caratteristiche, se si indica con  $k$  la rigidezza elastica del rivestimento, la parte elastica della curva caratteristica del rivestimento è individuata dalla seguente relazione:

in cui:

- $P$  è la pressione esterna agente sul rivestimento;
- $k$  è la rigidezza del rivestimento;
- $u$  è la deformazione o spostamento radiale al contorno della cavità.

Quando il rivestimento è costituito da due sistemi distinti di sostegno (ad esempio, calcestruzzo proiettato e centine), la letteratura suggerisce di calcolare la rigidezza complessiva dell'intero sistema come somma delle singole rigidezze di ciascun componente.

Si sono dunque calcolate le rigidezze dei componenti del rivestimento, attraverso l'impiego delle seguenti formule (con l'ipotesi di forma circolare del rivestimento in calcestruzzo proiettato). Per il calcestruzzo proiettato si è utilizzata la relazione:

dove:

- $E_c$  è il modulo elastico del calcestruzzo;
- $\nu_c$  è il modulo di Poisson del calcestruzzo;
- $R_i$  è il raggio di scavo;
- $s_c$  è lo spessore dell'anello di calcestruzzo proiettato;

mentre per le centine si è utilizzata l'espressione:

nella quale:

- $k_s$  è la rigidezza delle centine;
- $R_s$  è il raggio equivalente della centina;

- S = Zwischenabstand der Lehrgerüste;
- A<sub>s</sub> = Querschnittswiderstandsfläche des Lehrgerüsts;
- E<sub>s</sub> = Young-Modul des Lehrgerüsts.
- S è la spaziatura delle centine;
- A<sub>s</sub> è l'area della sezione resistente della centina;
- E<sub>s</sub> è il modulo di Young della centina.

Die von den zwei Strukturen angebotenen maximalen Confinementdrücke wurden mit folgenden Verhältnissen berechnet:

Le pressioni massime di confinamento offerte dalle due strutture sono state calcolate con le seguenti relazioni:

$$P_{sc\ max} = \frac{1}{2} \cdot f_{cd} \cdot \left( 1 - \frac{(R_i - s_c)^2}{R_i^2} \right)$$

$$P_{ss\ max} = \frac{f_{sd} \cdot A_s}{S \cdot R_s}$$

in dem:

- f<sub>cd</sub> = Planwiderstand des Spritzbetons;
- R<sub>i</sub> = entsprechender Ausbruchradius;
- s<sub>c</sub> = Schalenstärke;
- A<sub>s</sub> = Querschnittsfläche des Lehrgerüsts;
- f<sub>sd</sub> = Planwiderstand des Stahls;
- S = Längszwischenabstand der Lehrgerüste;
- R<sub>s</sub> = entsprechender Radius des Lehrgerüsts.

in cui:

- f<sub>cd</sub> resistenza di progetto del cls proiettato;
- R<sub>i</sub> raggio equivalente di scavo;
- s<sub>c</sub> spessore del rivestimento;
- A<sub>s</sub> area della sezione trasversale della centina;
- f<sub>sd</sub> resistenza di progetto dell'acciaio;
- S interasse longitudinale delle centine;
- R<sub>s</sub> è il raggio equivalente della centina.

Es wurde außerdem angenommen, dass dieses die kurzfristigen Widerstände seien:

Si è inoltre assunto che le resistenze a breve termine siano:

$$f_{cd} = 0.83 \cdot 0.8 \cdot \frac{R_{ck}}{1.5 \cdot 1.3}$$

$$f_{sd} = \frac{f_{yk}}{1.15 \cdot 1.3}$$

Den Widerständen wurde auch der Koeffizient 1.3 angewandt, um die Normkoeffizienten auf den Belastungen zu berücksichtigen, die hier nicht verstärkt wurden.

Alle resistenze è stata applicato anche il coefficiente 1.3 per tener in conto dei coefficienti di Normativa sulle sollecitazioni, qui non amplificate.

Nach der Steifigkeitsermittlung der zwei Komponente wurden in getrennter Weise die zwei erlaubten Höchstverformungen berechnet, als ob jeder Eingriff allein arbeiten würde:

Dopo aver individuato le rigidzze dei due componenti sono state calcolate, in maniera distinta, le due deformazioni massime consentite, come se ciascun intervento agisse da solo:

$$U_{max} = \frac{P_{max}}{k}$$

in dem:

- U<sub>max</sub> = Höchstkonvergenz;
- P<sub>max</sub> = maximaler auf der Schale wirkender Druckwert;
- K = Steifigkeit des einzelnen Schalenelements.

in cui:

- U<sub>max</sub> è la massima convergenza;
- P<sub>max</sub> il massimo valore di pressione agente sul rivestimento;

Zwischen den zwei Höchstkonvergenzen wurde die kleinere gewählt, weil, wenn sie zusammen wirken, die Stütze mit dem tieferen  $u_r$  Wert den von den zwei Schalen höchst aushaltbaren Druck ermittelt. So wurde der Höchstdruck, der auf die Gesamtschale wirken kann, berechnet (d.h. angesichts der Summe der zwei Steifigkeiten).

- $k$  è la rigidezza del singolo elemento del rivestimento.

Tra le due convergenze massime si è scelta la minore, perché il sostegno con il valore di  $u_r$  inferiore individua la massima pressione sostenibile dai due rivestimenti quando essi agiscono insieme. In tal modo è stata calcolata la massima pressione che può agire sul rivestimento complessivo (considerato, cioè, sommando le due rigidzze):

$$P_{max} = U_{max} \cdot (k_c + k_s)$$

Es wird allerdings beobachtet, dass die Struktursteifigkeiten, die durch Anwendung der oben beschriebenen Formeln entstehen (welche für geschlossene Kreisgeometrien gelten), extrem hoch sind, und nicht die "Verhaltensbeiwerte berücksichtigen, welche folgende Wirkungen erfassen:

- Kombinationsspiele zwischen Gebirge und Struktur;
- zeitversetzte Entwicklung der Spritzbetonwiderstände im Vergleich zur Anbringung mit folgende fortbestehende Erhöhung des Elastizitätsmoduls;
- Fehlen der sofortigen Schließung des Rings mit Gegengewölbe.

Aus diesem Grund wurde auch eine konventionelle Schalensteifigkeit bestimmt, in der Annahme, dass der Höchstdruck, welcher von der Schale ausgeht, bei einer Konvergenz von 1% des Ausbruchradius erreicht sein würde.

Folgende Tabelle zeigt die Berechnungen der oben genannten Größen, mit Schätzung einer Mindeststärke der Außenschale, Festigkeitsklasse C30/C37, von 25 cm, bewehrt mit 2 Lehrgerüste IPN160, Abstand 1.5 m.

$R_c$	$S_c$	$R_s$	$A_s$	$S$	$K_c$	$K_s$	$P_{sc\ max}$	$P_{ss\ max}$	$U_{max\ c}$	$U_{max\ s}$	$U_{max}$	$P_{max}$	$K_c+K_s$	
[m]	[m]	[m]	[-]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[MPa/m]	[MPa]	[MPa]	[m]	[m]	[m]	[MPa]	[MPa/m]	
3.70	0.25	3.70	2IPN160	0.01085	1.50	680.7	108.8	0.823	0.464	0.0012	0.004	0.0012	0.95	789.6

Tabelle 17: Charakteristika der Außenschale CT2-b-T4

In Folge werden die Diagramme mit der Überlappung der Außenschalenkennlinie aufgezeigt.

Si osserva tuttavia che la rigidezza della struttura derivata dall'applicazione delle formule sopra esposte (valide per geometrie circolari chiuse) sono estremamente elevate e non tengono conto di "coefficienti di comportamento" che considerino gli effetti di:

- giochi di accoppiamento tra ammasso e struttura;
- sviluppo differito delle resistenze del calcestruzzo proiettato rispetto alla messa in opera e conseguente progressivo aumento nel tempo del modulo elastico;
- mancanza di chiusura immediata dell'anello con arco rovescio.

Per tale motivo è stata definita anche una rigidezza convenzionale del rivestimento ipotizzando che la pressione massima fornita da quest'ultimo venga raggiunta in corrispondenza di una convergenza pari all'1% del raggio di scavo.

La seguente tabella riporta il calcolo delle sopracitate grandezze considerando uno spessore minimo del rivestimento di prima fase C30/37 pari a 25 cm armato con 2 centine IPN160 a passo 1.5 m.

Tabella 17: Caratteristiche rivestimenti di prima fase CT2-b-T4

Di seguito sono riportati i grafici con la sovrapposizione della linea caratteristica del rivestimento di prima fase.



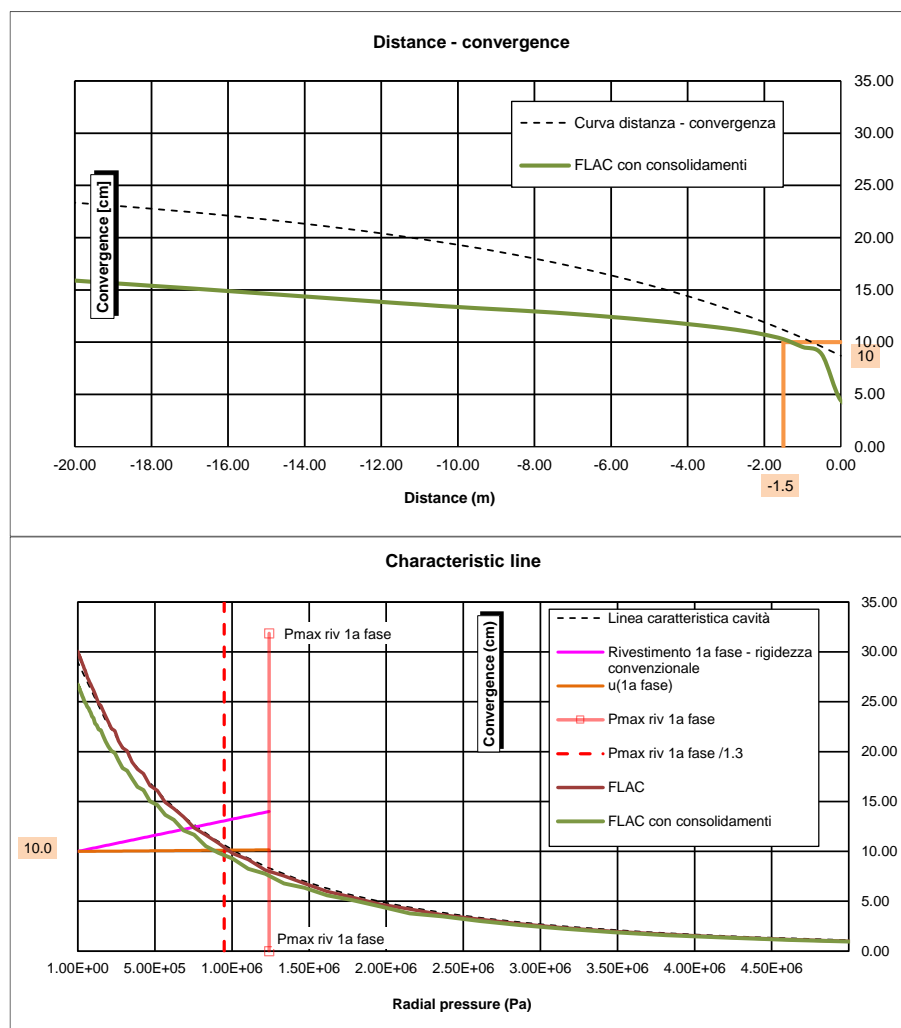


Abbildung 8: Überlappung Kennlinie des Hohlraums und der Schale CT1-a-T4

Figura 8: Sovrapposizione linea caratteristica della cavità e del rivestimento CT1-a-T4

Aus der Ergebnisanalyse entnimmt man, dass:

- der Höchstdruck auf die Außenschale, angesichts der reellen Schalensteifigkeit und der Kennlinie des nicht gestützten Hohlraums, würde vom der Außenschale selbst nur ohne Berücksichtigung des Koeffizienten auf Lasten 1.3 ( $P_{Max/1.3}=970kPa < P_{Ed}=1000kPa < P_{Max}=1240kPa$ ) ertragbar sein.
- Unter Berücksichtigung des Beitrags der Radialnietungen, reduziert sich die Last auf die Schale auf ca. 850kPa; dieser Werte liegt unter dem von der Schale ertragbaren Grenzwert, auch durch den Koeffizienten auf Lasten 1.3 multipliziertem ertragbaren Grenzwert.  
( $P_{Ed}=850kPa < P_{Max/1.3}=970kPa$ ).
- Unter Berücksichtigung der "Verhaltensbeiwerte" zwischen Gebirge und Struktur, reduziert sich die Last weiter bis auf 650kPa.  
( $P_{Ed}=650kPa < P_{Max/1.3}=970kPa$ ).

Dall'analisi dei risultati si evince che:

- La pressione massima sul rivestimento di prima fase, considerando la rigidezza reale del rivestimento e la linea caratteristica della cavità non sostenuta sarebbe sopportabile dal rivestimento stesso solo senza considerare il coefficiente sui carichi 1.3 ( $P_{Max/1.3}=970kPa < P_{Ed}=1000kPa < P_{Max}=1240kPa$ ).
- Considerando il contributo delle chiodature radiali, il carico sul rivestimento si riduce a circa 850kPa, valore inferiore al carico limite sopportabile dal rivestimento, anche fattorizzato del coefficiente sui carichi 1.3  
( $P_{Ed}=850kPa < P_{Max/1.3}=970kPa$ ).
- Considerando i "coefficienti di comportamento" tra ammasso e rivestimento, il carico si riduce ulteriormente, fino a 650kPa.  
( $P_{Ed}=650kPa < P_{Max/1.3}=970kPa$ ).

In Anbetracht der oben genannten Bemerkungen, ist die für den Ausbruchquerschnitt CT2-b-T4 vorgesehene Schale im Stande die Hohlraumstabilität im FVM-S-PS Gebirge zu gewährleisten. Es wird außerdem beobachtet, dass die relative Konvergenz zwischen Ortsbrust und Außenschale unter der Extraushubgröße (10 cm) liegt.

Zur Bestätigung der oben aufgezeigten Ergebnisse wurde auch eine 2D-Modell entwickelt mit Berechnung der Ausbruchphasen des Querschnitts CT2-b (BP47/1) unter den geomechanischen Bedingungen FVM-S-PS (analog zu dem was in Kapitel 5.1 für den Ausbruchquerschnitt CT2 im Gebirge GB-G-GA4).

Dieses Modell, welches im Unterschied zu den oben aufgezeigten axialsymmetrischen Berechnungen es ermöglicht die reelle Querschnittsgeometrie und die Flexionsauswirkungen auf die Schale zu berücksichtigen, hat erwiesen, dass:

- die Außenschale im Fall von Lehrgerüsten mit Abstand 0.5 m 4.5% der Trägheits-Kräfte des Ausbruchs ertragen kann, sowie 3.5% der TKA im Fall von Lehrgerüsten mit 1.5 m Abstand. Diese Kräfte entsprechen relativen kompatiblen Konvergenzen des Hohlraums mit dem Extraushub des Ausbruchquerschnitts CT2-B-T4.
- Die von der Außenschale übertragenen Drücke auf die Innenschale betragen durchschnittlich 500KPa.

Folgende Abbildung zeigt die angewandte Entlastungskurve des Ausbruchquerschnitts CT2-b, hingegen Abbildung 10 die Überprüfung der Außenschale aufzeigt.

Alla luce delle sopracitate considerazioni, il rivestimento previsto per la sezione CT2-b-T4 è in grado di garantire la stabilità del cavo nell'ammasso FVM-S-PS. Si osserva inoltre che la convergenza relativa tra il fronte e l'installazione del rivestimento di prima fase è inferiore all'extrascavo (10 cm).

A conferma dei risultati soprariportati è stata sviluppato anche un modello 2D con l'analisi delle fasi di scavo della sezione CT2-b (BP47/1) nelle condizioni geomeccaniche FVM-S-PS (analogamente a quanto illustrato nel paragrafo 5.1 per la sezione CT2 nell'ammasso GB-G-GA4).

Tale modello, che a differenza delle analisi assialsimmetriche soprariportate consente di considerare la reale geometria della sezione e gli effetti flessioni sul rivestimento, ha mostrato che:

- il rivestimento di prima fase è in grado di sopportare il 4.5 % delle forze fittizie di scavo nell'ipotesi di centine a passo 0.5 m e il 3.5% delle FFS nell'ipotesi di centine a passo 1.5 m. Tali forze corrispondono a convergenze relative del cavo compatibili con l'extrascavo della sezione CT2-b-T4.
- Le pressioni trasmesse dal rivestimento di prima fase al rivestimento definitivo sono mediamente dell'ordine dei 500KPa.

La seguente figura riporta la curva di scarico adottata nella suddetta analisi della sezione CT2-b mentre in Figura 10 è riportata la verifica del rivestimento di prima fase.

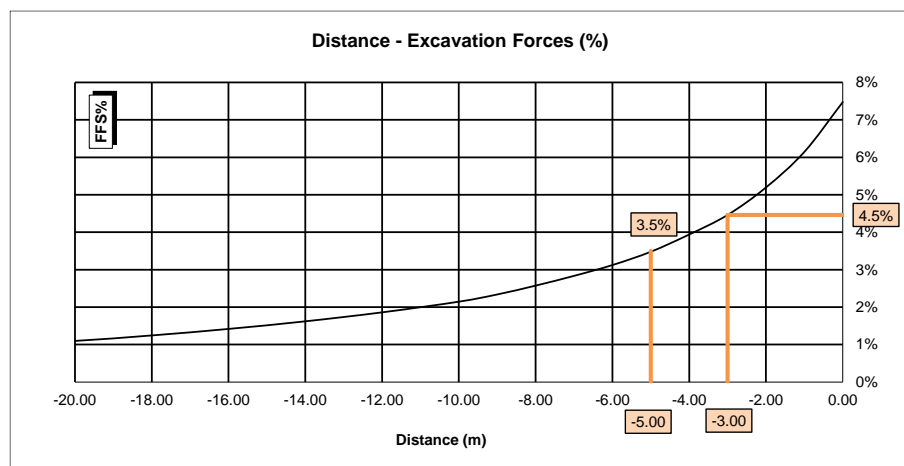


Abbildung 9: TKA an der Ortsbrust und bei Einsetzung der Nietungen (FVM-S-PS)

Figura 9: FFS al fronte e all'installazione delle chiodature (FVM-S-PS)

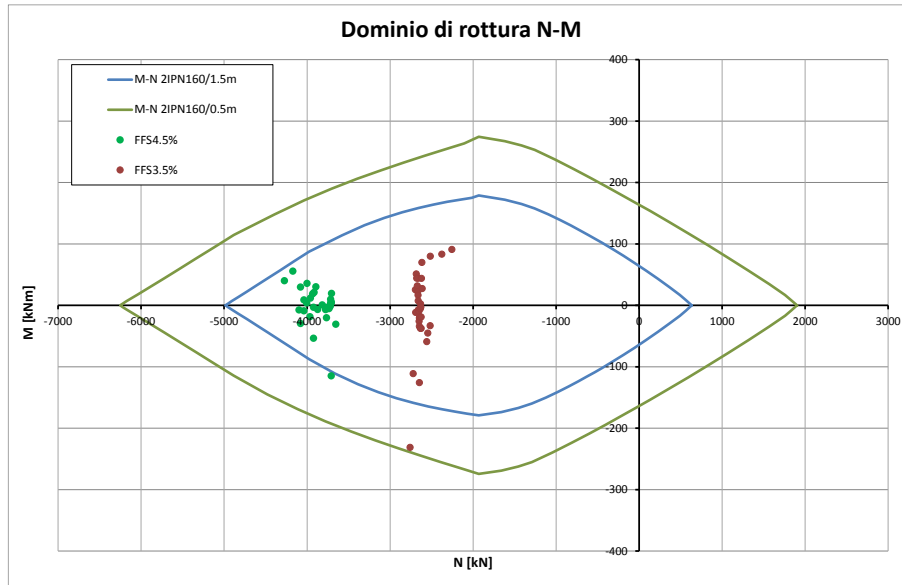


Abbildung 10: CT2-b-T4 (FVM-S-PS) - Überprüfung der Außenschale

Figura 10: CT2-b-T4 (FVM-S-PS) - Verifica rivestimenti di prima fase

## 6 INNENSCHALE

### 6.1 STABWERKSMODELLE

Die Beanspruchungen der Innenschale wurden durch den Kodex SAP2000© (basiert auf die Finite-Elemente-Methode) mit den Stabwerksmodellen berechnet.

Die FEM Berechnung wird mit folgenden Kriterien durchgeführt.

Es wird ein Tunnelquader mit einheitliche Tiefe (1m) berücksichtigt und es wird, mittels ebenen Finite-Elemente des Typs Träger (beam), ein Strukturmodell festgelegt. Die Tunnelschale ist durch Elemente mit einer Länge unter 0.5 m schematisiert, welche die reellen Stärken des erfassten strukturellen Elements erweisen (Kappe, Widerlager, Gegenbogen/Grundplatte).

Die strukturelle Steifigkeit der Trägerelemente wird mit  $E'_c \times I_y$  des nicht gerissenen Querschnitts berechnet. Das Trägheitsmoment  $I_g$  wird angesichts der Ausbruchquerschnittachse aus Beton berechnet, indem das Vorkommen des Stahls, wo dieser vorhanden ist, übergangen wird. Das elastische Modul  $E'_c$  bei ebene Verformungslage ist:

$$E'_c = \frac{E_c}{1 - \nu^2}$$

wobei:

- $E_c$  = Modul der Betonelastizität;
- $\nu$  = Poisson Verhältnis (0.2);

Zur Modellierung des unbewehrten Betons wird ein formendes Modell des elastisch-linearen Materials verwendet. Infolge des Verlusts an Querschnittsteifigkeit, welcher durch die Öffnung von Spalten dort wo die Betonzugfestigkeit überwunden wird (Bildung von plastischen Scharnieren), verursacht ist, wird, laut Absatz 12.5 des EC2, die Neuverteilung der Belastungen erwogen. Die Modellierung der plastischen Scharniere erfolgt durch den Einsatz von Torsionsfedern dessen Steifigkeit mit der Pöttler-Methode [32][33] iterativ berechnet wird.

### 6.2 MODELLIERUNG DER BETTUNG

Die Zusammenwirkung Boden-Struktur wird mittels Einsatz von Link Elementen simuliert, die in Höhe der Modellknoten gesetzt werden und die, nur bei Komprimierung, in der Lage sind der Struktur eine Reaktion zu übertragen die dem Annäherungsdruck Boden-Struktur entspricht.

Die Steifigkeit der Pleuel wird angesichts des Reaktionsmoduls des Bodens  $k$  und der Schnittstelle bestimmt.

## 6 RIVESTIMENTO DEFINITIVO

### 6.1 METODO DELLE REAZIONI IPERSTATICHE

Le sollecitazioni nel rivestimento definitivo sono state calcolate tramite il codice SAP2000© (basato sul Metodo degli Elementi Finiti) con il metodo delle reazioni iperstatiche.

L'analisi FEM è svolta secondo i seguenti criteri.

Si considera un concio di galleria di profondità unitaria (1m) e si definisce un modello della struttura mediante elementi finiti piani di tipo trave (beam). Il rivestimento della galleria è schematizzato con elementi di lunghezza inferiore a 0.5 m aventi gli spessori reali dell'elemento strutturale considerato (calotta, piedritto, arco rovescio/platea).

La rigidità strutturale degli elementi trave è calcolata come  $E'_c \times I_g$ . Il momento d'inerzia  $I_g$  è calcolato rispetto all'asse della sezione in calcestruzzo trascurando la presenza dell'acciaio ove presente. Il modulo elastico  $E'_c$ , in condizioni di deformazioni piane, vale:

dove:

- $E_c$  = modulo di elasticità del calcestruzzo;
- $\nu$  = rapporto di Poisson (0.2);

Per la modellazione del calcestruzzo non armato si utilizza un modello costitutivo del materiale elastico-lineare. Viene presa in considerazione la ridistribuzione delle sollecitazioni in seguito alla perdita di rigidità sezionale causata dall'apertura di fessure laddove venga superata la resistenza a trazione del calcestruzzo (formazione di cerniere plastiche), in accordo con il paragrafo 12.5 dell'EC2. La modellazione delle cerniere plastiche avviene mediante l'inserimento di molle torsionali la cui rigidità è calcolata iterativamente mediante il metodo di Pöttler [32][33].

### 6.2 INTERAZIONE TERRENO-STRUTTURA

L'interazione terreno-struttura viene simulata mediante l'utilizzo di elementi link, posti in corrispondenza dei nodi del modello, e in grado di trasmettere alla struttura, solo se compressi, una reazione pari alla pressione di contatto terreno-struttura.

La rigidità delle bielle è determinata tenendo conto del modulo di reazione del terreno  $k$  e dell'interfaccia.

Die erste wird gemäß den späterhin beschriebenen Verhältnissen bestimmt, respektive für gekrümmte und gradlinige Oberflächen. Die zweite ist, den Eigenschaften des Abdichtungsstreifens zufolge, mit  $60'000\text{kN/m}^3$  angenommen worden. Letztere hat eine Verschiebungswertigkeit unter  $0.5\text{cm}$ . Wenn diese Verschiebungen überwunden sind, wird die Schnittstellensteifigkeit die des Gebirges.

Die tangentielle Steifigkeit ist übergangen worden.

La prima è definita secondo le relazioni di seguito descritte, rispettivamente per superfici curve e rettilinee. La seconda è stata assunta pari a  $60'000\text{kN/m}^3$  in virtù delle caratteristiche del pacchetto di impermeabilizzazione. Quest'ultima ha valenza per spostamenti inferiori a  $0.5\text{cm}$ . Superati tali spostamenti, la rigidità dell'interfaccia diventa quella dell'ammasso.

La rigidità tangenziale è stata trascurata.

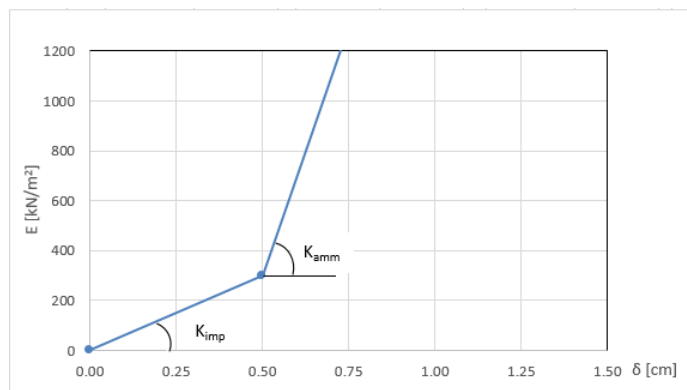


Abbildung 11: Schematisierung der Schnittstelle

Figura 11: Schematizzazione dell'interfaccia

### 6.2.1 Modellierung der Bettung

Zur Bestimmung der radialen Bettung der Innenschale im Gebirge/Boden wird das Elastizitätsmodul  $E$ , der Poisson Koeffizient  $\nu$  des Gebirges, sowie der entsprechende Innenschalenradius  $R$  des Tunnels berücksichtigt:

$$K_R = E \times \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \times R = \frac{E_s}{R}$$

Wobei:

- $K_R$  = Steifigkeit der radialen Bettung Innenschale – Gebirge [ $\text{MN/m}^3$ ]
- $E$  = Elastizitätsmodul des Gebirges
- $E_s$  = Steifemodul des Gebirges
- $\nu$  = Poisson Beiwert des Gebirges
- $R$  = Tunnelradius - Systemlinie

### 6.2.1 Rigidezza radiale

Per la definizione della rigidità del letto di molle radiali in materiale sciolto, si tiene conto del modulo elastico  $E$ , del coefficiente di Poisson  $\nu$  dell'ammasso roccioso e del raggio interno  $R$  della galleria.

Dove:

- $K_R$  = rigidità del letto di molle radiali a contatto con l'anello interno [ $\text{MN/m}^3$ ]
- $E$  = modulo elastico dell'ammasso roccioso
- $E_s$  = modulo edometrico dell'ammasso roccioso
- $\nu$  = coeff. di Poisson dell'ammasso roccioso
- $R$  = raggio della galleria – linea di riferimento

### 6.2.2 Federkonstanten Auflagerbereich/Sohle

Die Stütze der Konstruktion mit Sohlplatte bzw. offener Sohle wird durch Federn mit zugehöriger Steifigkeit abhängig von der Einflussbreite „ $b$ “ der einzelnen Feder modelliert. Die Federkonstanten werden wie folgt berechnet:

Federkonstante  $c_v$  – vertikal

- $c_v = E_{\text{Geb.}} \cdot 0,5 \cdot b$

### 6.2.2 Costante della molla nelle zone di appoggio / fondo

L'appoggio della costruzione con platea oppure con fondo aperto viene modellato con molla con rigidità relativa all'area di influenza della singola molla „ $b$ “. La costante della molla si calcola come segue:

Costante della molla  $c_v$  – verticale

- $c_v = E_{\text{Geb.}} \cdot 0,5 \cdot b$

Federkonstante  $c_h$  – horizontal

- $c_h = 0,5 \cdot c_v$

### 6.3 LASTENANALYSE

Folgende Kürzel werden für die Einwirkungen benutzt:

- G = ständige Einwirkungen
- Q = vorübergehende Einwirkungen
- A = außergewöhnliche Einwirkungen (z.B. Brand, Anprall, Explosion)
- E = Erdbeben

#### 6.3.1 Eigengewicht G1

Das für die Berechnung des Eigengewichts verwendete Volumen basiert auf den Planmaßen der Konstruktion.

Das spezifische Eigengewicht des Stahlbetons ist mit  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$  zu berücksichtigen.

#### 6.3.2 Betonauffüllung über dem Sohlgewölbe G3

Das für die Berechnung des Eigengewichts verwendete Volumen basiert auf den Planmaßen der Konstruktion.

Das spezifische Gewicht des unbewehrten Betons wird mit  $\gamma_{c,na} = 24 \text{ kN/m}^3$  angenommen.

Das spezifische Gewicht des Stahlbetons wird mit  $\gamma_{c,ar} = 25 \text{ kN/m}^3$  angenommen.

Im behandelten Ausbruchquerschnitt ist keine Betonauffüllung vorhanden.

#### 6.3.3 Wasserdruck G4

Der Wasserdruck ist nicht berücksichtigt worden da der Ausbruchquerschnitt dräniert ist.

#### 6.3.4 Gebirgslast G5

Die Gebirgslast entspricht der Last welche auf die Innenschale wirkt bei komplettem Verfall der TKA (letzte Stufe der FDM-Analyse). Bei den Berechnungen mit Anwendung der Außenschale an 2.5% der Aushub-TKA beträgt die Last auf die Innenschale 500kPa.

#### 6.3.5 Kriechen und Schwinden des Betons G6

Das Schwindmaß des Betons wird gemäß NTC 2008 Kap. 11.2.10.6 ermittelt.

Die Kriechzahl  $\varphi$  wird gemäß NTC 2008 Kap. 11.2.10.7 ermittelt.

Die Kriechzahl  $\varphi$  wird gemäß dem NTC 2008 Kap. 11.2.10.7 unter Berücksichtigung des Spannungszustandes aus einer Einwirkungskombination ständiger Lasten (G1 (Eigengewicht) + G2 (Oberleitung) + G5 (Gebirge)) ermittelt.

Costante della molla  $c_h$  – orizzontale

- $c_h = 0,5 \cdot c_v$

### 6.3 ANALISI DEI CARICHI

Per le azioni si utilizzano le seguenti abbreviazioni:

- G = Azioni permanenti
- Q = Azioni variabili
- A = Azioni eccezionali (per es. incendio, urto, esplosione)
- E = Azioni sismiche

#### 6.3.1 Peso proprio G1

Il volume utilizzato per il calcolo del peso proprio si basa sulle dimensioni effettive della struttura.

Il peso specifico del calcestruzzo viene assunto pari  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ .

#### 6.3.2 Riempimento in cls al di sopra dell'arco rovescio G3

Il volume utilizzato per il calcolo del peso proprio si basa sulle dimensioni effettive della struttura.

Il peso specifico del calcestruzzo non armato viene assunto pari a  $\gamma_{c,na} = 24 \text{ kN/m}^3$ .

Il peso specifico del calcestruzzo armato viene assunto pari a  $\gamma_{c,ar} = 25 \text{ kN/m}^3$

Nella sezione in oggetto non è presente un riempimento in cls.

#### 6.3.3 Pressione idraulica G4

Il carico idraulico non è stato considerato in quanto la sezione è drenata.

#### 6.3.4 Carico dell'ammasso G5

Il carico d'ammasso è pari al carico che agisce sul rivestimento definitivo al completo decadimento delle FFS (ultimo step delle analisi FDM). Nelle analisi con l'applicazione del rivestimento di prima fase al 2.5% delle FFS di scavo il carico sul rivestimento definitivo è di circa 500kPa.

#### 6.3.5 Viscosità e ritiro del calcestruzzo G6

La deformazione dovuta al ritiro del calcestruzzo si calcola in base al paragrafo 11.2.10.6 delle NTC 2008.

Il valore di viscosità  $\varphi$  si calcola secondo le NTC 2008, capitolo 11.2.10.7.

Il coefficiente di viscosità  $\varphi$  si calcola ai sensi delle NTC 2008 par. 11.2.10.7, considerando la condizione tensionale derivante dalla combinazione di azioni permanenti (G1 (peso proprio) + G2 (catenaria) + G5 (Carico dell'ammasso)).

Kriechen und Schwinden des Betons bewirkt eine Längenänderung  $\Delta l$ . Diese Längenänderung (Endschwindmaß) liegt, in Form einer gleichmäßigen Temperaturabkühlung, der Rechnung zu Grunde.

Für alle Querschnitte die höher als 25 cm und aus Beton der Festigkeitsklasse C30/37 sind, ergibt sich eine Durchschnittsverformung per autogenes zeitlich unendliches Schwinden von 0.27%. Bei der Dimensionierung wurde das von der Norm vorgeschriebene 50% des Schwindens übernommen, was durch eine gleichmäßige Temperaturabkühlung von -13.4 C° simulierbar ist. Diese Abkühlung muss, z.B., mittels Einsatz eines funktionstüchtigen Superverflüssigungsmittels (Typ MasterGlenium von BASF), nicht-kalkhaltigen Zuschlagstoffen und Zugabe eines Expansionsmittels (Typ MasterLife SRA100 von BASF) bewirkt werden. Das angewendete System muss auf der Baustelle zuvor mit Proben geprüft werden.

Bei der Modellierung der Innenschale, insbesondere bezüglich NTC08 Kapitel 4.1.1.1, verfährt man mit einer gleichmäßigen Temperaturabkühlung von -6.7° C an den GZT und von -8.9°C an den GZG.

### 6.3.6 Temperatur Q1

Zur Dimensionierung der Innenschalen berücksichtigt man, gemäß folgende Tabelle, die je nach Eingangsabstand, zwischen 3 und 10 km, sich ergebenden Temperatureinwirkungen.

Abstand Portal / Distanza dall'imbocco [km]	< 3,0		3,0 - 10,0		>10,0	
Temperaturgradient / gradiente della temperatura $\Delta T$ [°C]	5		2		2	
$\Delta T_{eff}$ [°C]	Winter / inverno	Sommer / estate	Winter / inverno	Sommer / estate	Winter / inverno	Sommer / estate
	-16	16	-10	10	-6	6

Tabelle 18: Temperatureinwirkung

Viscosità e ritiro del calcestruzzo comportano un cambiamento in lunghezza  $\Delta l$  (valore finale del ritiro), su cui deve essere basato il calcolo, in forma di diminuzione uniforme della temperatura.

Per tutte le sezioni con altezza maggiore di 25 cm e calcestruzzo con classe di resistenza C30/37 risulta una deformazione media per ritiro autogeno a tempo infinito pari a 0.27%. Nel dimensionamento si è assunto il 50% del ritiro imposto dalla Normativa, simulabile mediante l'applicazione di un abbassamento uniforme della temperatura di -13.4 C°. Tale riduzione dovrà essere ottenuta, ad esempio, mediante l'utilizzo di un superfluidificante performante (tipo MasterGlenium della BASF), di inerti non calcarei e tramite l'aggiunta di un espansivo (tipo MasterLife SRA100 della BASF). Il sistema adottato dovrà essere verificato con prove preventive in cantiere.

Nella modellazione del rivestimento definitivo, con particolare riferimento al paragrafo 4.1.1.1 dell'NTC08, si procede applicando un abbassamento uniforme della temperatura di -6.7° C agli SLU e di -8.9°C agli SLE.

### 6.3.6 Temperatura Q1

Per il dimensionamento rivestimenti definitivi si considerano azioni termiche, in conformità alla seguente tabella, secondo la distanza dall'imbocco, compresa tra 3 e 10 km.

Tabella 18: Variazione termica

Der Gradient der Temperatur zeigt die Temperaturdifferenz zwischen der Innen- und Außenoberflächen der Schale.

Die aufgrund der Temperatur entstehenden Belastungen beim Bau der Innenschalen werden übergangen.

Die aufgrund der Temperatur ausgehenden Einwirkungen in Folge eines Brands sind Gegenstand des Kapitels 6.3.9.

### 6.3.7 Erdbebeneinwirkung E1

Im Gegensatz zu den anderen Lastkombinationen stellt die Erdbebenlast ein wenig beeinflussenden Zustand da und wird deshalb nicht berücksichtigt.

In Anhang 4 werden auf alle Fälle, zur Darstellung der weiten Sicherheitsgrenze, die widerstandsfähigen Bereiche und die

Il gradiente della temperatura indica la differenza di temperatura tra le superfici interna ed esterna del rivestimento.

Le sollecitazioni derivanti dalla temperatura durante la costruzione dell'anello vengono trascurate.

Le azioni derivanti dalle alte temperatura a seguito di incendio sono oggetto del paragrafo 6.3.9.

### 6.3.7 Azione sismica E1

Il carico sismico rappresenta una condizione poco influente rispetto alle altre combinazioni di carico e pertanto non viene considerata.

Nell'allegato 3 vengono comunque riportati i domini resistenti e i punti immagine dello stato tensionale nei rivestimenti nelle

darstellenden Punkte des Schalenspannungszustands bei den Kombinationen GZT13 und GZT14 (Tabella 19) aufgezeigt.

#### 6.3.8 Aufprall A2

Die Last des Aufpralls wird nur in den Verzweigungskavernen und den Portalen berücksichtigt. Im vorliegenden Bereich wird sie daher nicht berücksichtigt.

#### 6.3.9 Brand A3

Wie im spezifischen Bericht [11] beschrieben, werden die Querstellen nicht durch die Kurve Temperatur/Zeitraum RWS der UNI 11076 überprüft, wie es für alle Haupttunnels gemacht wurde, weil diese Kurve einem Brand entspricht der eine Hitze von einigen MW erreicht, welche für diese Bauwerke unrealistisch ist.

Hier begrenzt man sich mit der Beobachtung, dass, einvernehmlich mit der Tabelle D.6.3 des M.D. 16.02.2007 "Klassifizierung der Feuerbeständigkeit der Bauprodukte und -elemente für Bauwerke", ausreichende Bedingungen zur Gewährleistung der REI 120 Klasse sind:

- Stärke 's' der Strukturelemente größer als 160mm;
- Betondeckung 'a' (Achsenabstand der Bewehrung von der ausgesetzten Oberfläche) größer als 35mm.

Beide Voraussetzungen sind zufriedenstellend.

#### 6.4 EINWIRKUNGSKOMBINATIONEN

Die zu untersuchenden Einwirkungskombinationen müssen gemäß NTC 2008 mit den entsprechenden Kombinationsbeiwerten  $\psi$  berücksichtigt werden.

Die maßgebenden Einwirkungskombinationen für die Dimensionierung der Innenschale sind nachfolgend aufgezeigt:

combinazioni SLU13 e SLU14 (Tabella 19) per mostrare comunque l'ampio margine di sicurezza.

#### 6.3.8 Urto A2

Il carico da urto è da considerare solo nelle caverne di diramazione e ai portali. Nella zona in oggetto non è pertanto considerato.

#### 6.3.9 Incendio A3

Come descritto nella relazione specifica [11], i cunicoli trasversali non vengono verificati secondo la curva Temperatura/Tempo RWS delle UNI 11076, come fatto per tutte le opere principali, in quanto tale curva è relativa ad un incendio che sviluppa un potenza termica dell'ordine di alcune centinaia di MW, irrealistica per le opere in oggetto.

In questa sede ci si limita ad osservare che in accordo alla tabella D.6.3 del D.M. 16.02.2007 "Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione" condizioni sufficienti affinché la classe di resistenza REI 120 sia garantita sono:

- spessore 's' degli elementi strutturali maggiore di 160mm;
- copriferro 'a' (distanza dell'asse delle armature dalla superficie esposta) maggiore di 35mm.

Entrambi i requisiti sono soddisfatti.

#### 6.4 COMBINAZIONI DI CARICO

Le combinazioni delle azioni da analizzare devono essere considerate in conformità alle NTC 2008, con i relativi coefficienti di combinazione  $\psi$ .

Le combinazioni delle azioni rilevanti per il dimensionamento dell'anello sono di seguito riportate:



Lastfall / Caso di carico	ständig / permanenti						vorübergehend / variabili		außergewöhnlich / eccezionali		
	Eigengewicht	Sohibeton	Wasserdruck	Gebirgslast ohne Auftrieb	Kriechen und Schwinden	Quell-druck	Temperatur (Sommer)	Temperatur (Winter)	Erdbeben	Anprall	Brand
	Peso proprio	Carichi permanenti sull'arco rovescio	Carico idraulico	Carichi della roccia in condizioni asciutte	Ritiro e rilassamento	Swelling-Squeezing	Temperatura (Estate)	Temperatura (inverno)	Sisma	Impatto	Fuoco
Einwirkungskombination / Combinazioni	G1	G3	G4	G5	G6	G7	Q1	Q1	E1	A2	A3
druckentlastet / sistema drenato	1	1.35						1.50			
		1.00						1.00			
	2	1.35				1.00			1.50		
		1.00				1.00			1.00		
	5	1.35	1.00	1.35	1.35			1.50			
		1.00	1.00	1.00	1.00			1.00			
	6	1.35	1.00	1.35	1.35	1.00			1.50		
		1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			1.00		
	13	1.00	1.00	1.00	1.00			0.60		1.00	
	14	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			0.60	1.00	

Tabelle 19: Einwirkungskombinationen (in rosa die GZT-Kombinationen und in weiß die GZG-Kombinationen)

Tabella 19: Combinazioni di carico (in rosa le combinazioni SLU e in bianco le combinazioni SLE)

## 6.5 NACHWEISE

Für den Nachweis des Grenzzustandes und der Grenzgebrauchstauglichkeit der Innenschale wurden die Wirkungskombinationen gemäß Vorgaben des NTC2008, Kap. 2.5.3 berücksichtigt.

### 6.5.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

#### 6.5.1.1 Teilsicherheitsfaktoren Einwirkungen

Die zu berücksichtigenden Teilsicherheitsfaktoren variieren abhängig von Kombinationen und Art der Einwirkungen. Gemäß NTC2008 werden folgende Teilsicherheitsfaktoren für ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Bemessungssituationen berücksichtigt:

$$\gamma_{Gj,inf} \text{ günstig/favorevole} = 1,00 / 1,00 / 1,00$$

$$\gamma_{Gj,sup} \text{ ungünstig/sfavorevole} = 1,35 / 1,20 / 1,00$$

$$\gamma_{Q,1,sup} / \gamma_{Q,i,sup} \text{ günstig/favorevole} = 0,00 / 0,00 / 0,00$$

$$\gamma_{Q,1,sup} / \gamma_{Q,i,sup} \text{ ungünstig/sfavorevole} = 1,50 / 1,30 / 1,00$$

Angesichts der Einwirkungen aus dem Schwinden für die Überprüfung im Grenzzustand der Tragfähigkeit, wurde gemäß EC2, Teil 1, Kap. 2.4.2.1, der Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{SH} = 1,0$  berücksichtigt.

#### 6.5.1.2 Kombinationsbeiwerte Einwirkungen

Gemäß EN 1990 bzw. NTC2008 müssen folgende Kombinationsbeiwerte benutzt werden:

Einwirkung /	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Druck / Sog infolge Zugfahrt A1 / Pressione aerodinamica A1	0,8	0,5	0,0
Temperatur Q1 / Forze termiche Q1	0,6	0,6	0,5

Tabelle 20: Kombinationsbeiwerte

## 6.5 VERIFICHE

Per la verifica allo stato limite ultimo ed allo stato limite di esercizio dell'anello sono state considerate le combinazioni delle azioni in conformità delle prescrizioni del paragrafo 2.5.3 delle NTC2008.

### 6.5.1 Stati Limite Ultimi (SLU)

#### 6.5.1.1 Coefficienti parziali di sicurezza per le azioni

I coefficienti parziali di sicurezza da considerare variano in funzione delle combinazioni e del tipo di azioni. In conformità alle NTC2008, per le situazioni di dimensionamento standard, temporanee ed eccezionali sono da considerarsi i seguenti coefficienti parziali di sicurezza:

Considerando le azioni derivanti dal ritiro, per la verifica allo stato limite ultimo, si è considerato, in conformità all'EC2, parte 1, paragrafo 2.4.2.1 il coefficiente parziale di sicurezza  $\gamma_{SH} = 1,0$ .

#### 6.5.1.2 Coefficienti di combinazione delle azioni

In conformità alla EN 1990 ovvero alla NTC2008 devono essere utilizzati i seguenti coefficienti di combinazione:

Tabella 20: Coefficienti di combinazione

### 6.5.1.3 Einwirkungskombinationen

Die zu untersuchenden Einwirkungskombinationen müssen gemäß NTC 2008 mit den entsprechenden Kombinationsbeiwerten  $\psi$  zu berücksichtigt werden.

Die für die Dimensionierung der Innenschale entsprechenden maßgebenden Einwirkungskombinationen sind abhängig von den in-situ vorherrschenden Randbedingungen auszuwählen.

### 6.5.1.4 Teilsicherheitsfaktoren der Widerstände

Die Teilsicherheitsfaktoren der Widerstände bei einer ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation sind, wie mit BBT SE vereinbart, wie folgt zu betrachten, unter Berücksichtigung einer Bauwerklebensdauer von 200 Jahren:

#### Stahlbeton

- Teilsicherheitsbeiwert für den Betonwiderstand  $Y_c = 1,60$
- Minderungsbeiwert zur Berücksichtigung der Langzeitwirkung der Betondruckfestigkeit:  $\alpha_{cc} = 0,85$
- Teilsicherheitsbeiwert für Stahlwiderstand  $Y_s = 1,20$

#### Unbewehrter Beton

- Teilsicherheitsbeiwert für den Betonwiderstand  $Y_c = 1,60$
- Minderungsbeiwert zur Berücksichtigung der Langzeitwirkung der Betondruck- bzw. Zugfestigkeit:  $\alpha_{cc} = 0,80$

Für die Überprüfungen der außergewöhnlichen Bemessungssituation müssen die Teilsicherheitsfaktoren mit  $Y_c = 1,20$  und  $Y_s = 1,00$  berücksichtigt werden. Der Minderungsbeiwert der Betondruckfestigkeit  $\alpha$  bleibt unverändert.

### 6.5.1.5 Überprüfung auf Beulspannung

Die Bemessung des Stahlbetons erfolgt gemäß den Vorgaben des NTC2008, Kap. 4.1.2.1.2.

Bei den unbewehrten überwiegend komprimierten Ausbruchquerschnitten erfolgt die Überprüfung auf Beulspannung, gemäß dem N.T.C. 2008, durch die Überprüfung folgender Ungleichung:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd} = f_{cd} \cdot b \cdot x$$

### 6.5.1.3 Combinazione delle azioni

Le combinazioni delle azioni da analizzare devono essere considerate in conformità alle NTC 2008, con i relativi coefficienti di combinazione  $\psi$ .

Le combinazioni delle azioni rilevanti per il dimensionamento dell'anello devono essere scelte in funzione delle effettive condizioni al contorno in situ.

### 6.5.1.4 Coefficienti parziali di sicurezza per le resistenze

I coefficienti parziali di sicurezza per le resistenze in fase permanente e temporanea vanno considerati, come concordato con BBT SE, come segue tenendo conto della vita utile dell'opera di 200 anni:

#### Calcestruzzo armato

- Coefficiente parziale di sicurezza per la resistenza del calcestruzzo  $Y_c = 1,60$
- Coefficiente riduttivo della resistenza a compressione del calcestruzzo di lunga durata:  $\alpha_{cc} = 0,85$
- Coefficiente parziale di sicurezza  $Y_s$  per la resistenza dell'acciaio  $Y_s = 1,20$

#### Calcestruzzo non armato

- Coefficiente parziale di sicurezza per la resistenza del calcestruzzo  $Y_c = 1,60$
- Coefficiente riduttivo della resistenza a compressione e a trazione del calcestruzzo di lunga durata:  $\alpha_{cc} = 0,80$

Per le verifiche nella situazione di dimensionamento eccezionale i fattori parziali di sicurezza devono essere considerati con  $Y_c = 1,20$  e  $Y_s = 1,00$ . Il coefficiente di riduzione della resistenza a compressione del calcestruzzo  $\alpha$  resta invariato.

### 6.5.1.5 Verifica a pressoflessione

Per il calcestruzzo armato il calcolo segue le indicazioni delle NTC2008, par. 4.1.2.1.2.

Nelle sezioni non armate prevalentemente compresse, la verifica a pressoflessione è condotta, in accordo con le N.T.C. 2008, verificando la seguente disuguaglianza:

$$\text{Con } x = h - 2 \cdot e = h - 2 \cdot \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$$

Wobei:

- $N_{Ed}$ ,  $M_{Ed}$  = Planungsbelastungen;
- $b$  = Breite des Bezugausbruchquerschnitts (1m);
- $h$  = Höhe des Ausbruchquerschnitts;
- $x$  = Höhe des reagierenden Ausbruchquerschnitts.

Dove:

- $N_{Ed}$ ,  $M_{Ed}$  sono le sollecitazioni di progetto;
- $b$  è la larghezza della sezione di riferimento (1m);
- $h$  è l'altezza della sezione;
- $x$  è l'altezza della sezione reagente.

Bei den unbewehrten Ausbruchquerschnitten mit hoher Exzentrizität, bei denen die oben ausgeführte Prüfung offenbar nicht befriedigt ist, berücksichtigt man, gemäß EC2 (§12.3.1), die Betonzugfestigkeit bis zum Planungswert  $f_{ctd}$ . Die Prüfung ergibt sich als zufriedenstellend wenn:

Nelle sezioni non armate con un'elevata eccentricità, in cui la verifica sopra esposta non è ovviamente soddisfatta, in accordo con l'EC2 (§12.3.1) si considera la resistenza a trazione del calcestruzzo fino al valore di progetto  $f_{ctd}$ . La verifica risulta soddisfatta se:

$$\sigma_{1,2} = \frac{N_{Ed}}{A} \pm \frac{M_{Ed}}{J} \cdot (h/2) \leq \begin{cases} f_{cd} \\ f_{ctd} \end{cases}$$

Wobei:

- $J$  = Trägheitsmoment des Ausbruchquerschnitts.

Dove:

- $J$  è il momento d'inerzia della sezione

#### 6.5.1.6 Querkraftüberprüfung

Die Bemessung des Stahlbetons erfolgt gemäß den Vorgaben des NTC2008, Kap. 4.1.2.1.2.3.

Die Bemessung bei der unbewehrten Innenschale erfolgt gemäß des NTC2008, bei Prüfung folgender Ungleichung:

#### 6.5.1.6 Verifica a taglio

Per il calcestruzzo armato il calcolo segue le indicazioni delle NTC2008, par. 4.1.2.1.3.

Per il rivestimento interno non armato si seguono le NTC 2008, verificando la seguente disuguaglianza:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} = f_{cvd} \cdot \frac{b \cdot x}{1.5}$$

$$f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_c \cdot f_{ctd}} \quad \text{per } \sigma_c \leq \sigma_{clim}$$

$$f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_c \cdot f_{ctd} - \delta^2/4} \quad \text{per } \sigma_c > \sigma_{clim}$$

$$\delta = \sigma_c - \sigma_{clim}$$

$$\sigma_{clim} = f_{cd} - 2 \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + f_{cd} \cdot f_{ctd}}$$

Bei den überwiegend komprimierten Ausbruchquerschnitten wird die Durchschnittsbelastung der Komprimierung  $\sigma_c$  als Durchschnitt der Komprimierungen im reagierenden Ausbruchquerschnittsteil 'x' berechnet:

Nelle sezioni prevalentemente compresse, lo sforzo medio di compressione  $\sigma_c$  è calcolato come media delle compressioni nella porzione di sezione reagente 'x':

$$\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{x} = \frac{N_{Ed}}{h - 2 \cdot e}$$

In den Ausbruchquerschnitten mit hoher Exzentrizität, konsequenterweise zur Annahme die Betonzugfestigkeit bis auf den Wert  $f_{ctd}$  zu erfassen, wird der Querkraftwiderstand des Ausbruchquerschnitts ausgewertet, indem der ganze Ausbruchquerschnitt als reagierend ( $x=h$ ) betrachtet wird, und die Spannung  $\sigma_c$  als Durchschnittsspannung des ganzen Querschnitts, sowohl komprimiert als auch gespannt, gewertet wird.

Nelle sezioni con un'elevata eccentricità, coerentemente con l'assunzione di considerare la resistenza a trazione del calcestruzzo fino al valore di  $f_{ctd}$ , la resistenza a taglio della sezione viene valutata considerando reagente l'intera sezione ( $x=h$ ) e valutando la tensione  $\sigma_c$  come tensione media nell'intera sezione, sia compressa che tesa.

$$\sigma_c = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$$

## 6.5.2 Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

### 6.5.2.1 Teilsicherheitsfaktoren Einwirkungen

Bei der Überprüfung des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit müssen die charakteristischen Einwirkungen mit deren Kombinationen berücksichtigt werden.

### 6.5.2.2 Kombinationsbeiwerte der Einwirkungen

In Tabelle 20 befinden sich die bei Einwirkungskombinationen zu berücksichtigenden Beiwerten. Die Kombinationsbeiwerte werden gemäß Tabelle 20 berücksichtigt.

### 6.5.2.3 Einwirkungskombinationen

Die zu untersuchenden Einwirkungskombinationen müssen, gemäß NTC 2008, mit den entsprechenden Kombinationsbeiwerten  $\psi$  berücksichtigt werden.

### 6.5.2.4 Teilsicherheitsfaktoren der Widerstände

Für die Überprüfung des Grenzzustands der Gebrauchstauglichkeit werden die charakteristischen Werte der Widerstände berücksichtigt.

### 6.5.2.5 Ermittlung der Verformungen

Die Ermittlung der Systemverformung erfolgt im GZG unter Berücksichtigung der Kombinationsregeln mit den charakteristischen Einwirkungen sowie den entsprechenden Kombinationsbeiwerten.

### 6.5.2.6 Begrenzung der Rissbreiten

Unter Berücksichtigung der NTC2008, wird im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit die maximale Rissweite  $w_{kai}$  für die maßgebenden Einwirkungskombinationen, unter Berücksichtigung der Teilsicherheitsfaktoren und Minderungsfaktoren  $\psi$  laut Tabelle 19 nachgewiesen. Die zulässige Rissbreite für Normalbeton ohne besondere

## 6.5.2 Stati Limite Esercizio (SLE)

### 6.5.2.1 Coefficienti parziali di sicurezza delle azioni

Nella verifica agli stati limite di esercizio devono essere considerate le azioni caratteristiche con le loro combinazioni.

### 6.5.2.2 Coefficienti di combinazione delle azioni

In Tabella 19 si trovano i coefficienti da considerare nelle combinazioni delle azioni. I coefficienti di combinazione sono da considerare come in Tabella 20.

### 6.5.2.3 Combinazioni delle azioni

Le combinazioni delle azioni da analizzare devono essere considerate in conformità alle NTC 2008, con i relativi coefficienti di combinazione  $\psi$ .

### 6.5.2.4 Coefficienti parziali di sicurezza per le resistenze

Per la verifica agli stati limite di esercizio si devono considerare i valori caratteristici delle resistenze.

### 6.5.2.5 Calcolo delle deformazioni

Il calcolo delle deformazioni del sistema si esegue allo SLE in considerazione delle regole di combinazione con i carichi caratteristici e dei relativi coefficienti di combinazione.

### 6.5.2.6 Limitazione dello spessore delle fessure

In considerazione delle NTC2008, si controlla allo SLE lo spessore massimo delle fessure  $w_{kai}$  per le combinazioni di carico rilevanti, in considerazione dei fattori parziali di sicurezza e dei coefficienti di riduzione  $\psi$  secondo Tabella 19. La larghezza delle fessure ammessa per il cls normale senza

Stärkeanforderung oder bei Abdichtungsvorkommen wird auf  $w_{kal} \leq 0,3$  mm begrenzt.

Bei besonderer Anforderung an Stärke der Betoninnenschale oder bei aggressiven oder sehr aggressiven Umgebungsbedingungen wird die maximale Rissweite auf  $w_{kal} \leq 0,2$  mm begrenzt.

## 6.6 BAULICHE DURCHBILDUNG

### 6.6.1 Expositionsklasse und Mindestbetondeckung

Gemäß UNI 11104 und UNI EN 206-1:2006, wird bei Expositionsklasse XC3/XA1 die Anwendung von Beton der Festigkeitsklasse C30/37, hingegen bei Expositionsklasse XC4/XA2 Beton der Festigkeitsklasse C32/40 vorgesehen.

Die Berechnung der Mindestbetondeckung zur Gewährleistung der Bauwerklebensdauer >100 Jahren ist gemäß N.T.C. 2008 durchgeführt:

	XC3	XC4
Festigkeitsklasse	30/37	32/40
Umweltbedingungen	Normal	Aggressiv
$C_{min}$ [mm]	20	30
Nutzbare Lebenszeit > 100 Jahre	+10	+10
Bauliche Toleranz [mm]	+10	+10

$C_{nom}$ [mm]	40	50
----------------	----	----

Tabelle 21: Mindestbetondeckung

Zur Einheitlichkeit ist eine Betondeckung von 5 cm entlang der ganzen Entwicklung der Tunnels vorgesehen.

### 6.6.2 Mindestbewehrung

Im Fall einer bewehrten Innenschale, wird die Mindestbewehrung im NTC 2008, Punkt 4.1.6.1.1 bestimmt.

Die Querschnittsfläche der Längszugbewehrung darf nicht geringer sein als:

$$A_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \times b \times d$$

und jedenfalls nicht geringer als  $0,0013 \times b \times d$ ,

wobei:

- $b$  = mittlere Breite der Zugzone;
- $d$  = Nutzhöhe des Querschnitts;

partikuläre requisiti di spessore o in presenza di impermeabilizzazione è limitata a  $w_{kal} \leq 0,3$  mm.

In caso di particolari requisiti di spessore del rivestimento interno o di condizioni ambientali aggressive o molto aggressive la larghezza massima è limitata a  $w_{kal} \leq 0,2$  mm.

## 6.6 STRUTTURA COSTRUTTIVA

### 6.6.1 Classe di esposizione e copriferro minimo

In accordo alle UNI 11104 e alle UNI EN 206-1:2006, in classe di esposizione XC3/XA1 è previsto l'utilizzo di calcestruzzo C30/37 mentre in classe di esposizione XC4/XA2 è previsto l'utilizzo di calcestruzzo C32/40.

Il calcolo del copriferro minimo al fine di garantire una vita utile dell'opera >100anni è condotto in accordo alle N.T.C. 2008:

	XC3	XC4
Classe di resistenza	30/37	32/40
Cond. ambientali	Normali	Aggressive
$C_{min}$ [mm]	20	30
Vita utile > 100anni [mm]	+10	+10
Tolleranza costruttiva [mm]	+10	+10

$C_{nom}$ [mm]	40	50
----------------	----	----

Tabella 21: Copriferro minimo.

Per omogeneità si prevede un copriferro netto di 5 cm lungo tutto lo sviluppo delle gallerie.

### 6.6.2 Armatura minima

In caso il rivestimento necessiti di armatura il quantitativo minimo di armatura da inserire viene definito al punto 4.1.6.1.1 delle NTC 2008.

L'area dell'armatura longitudinale in zona tesa non deve essere inferiore a:

- e comunque non minore di  $0,0013 \times b \times d$ ,
- dove:
- $b$  rappresenta la larghezza media della zona tesa;
- $d$  è l'altezza utile della sezione;

- $f_{ctm}$  = Mittelwert der Zugfestigkeit des Betons;
- $f_{yk}$  = charakteristische Wert der Streckengrenze des Betonstahls.

- $f_{ctm}$  è il valore medio della resistenza a trazione del calcestruzzo;
- $f_{yk}$  è il valore caratteristico della resistenza a trazione dell'armatura ordinaria.

## 6.7 ERGEBNISSE

Die durchgeführten Überprüfungen an den unbewehrten Ausbruchquerschnitten laut GZT haben die Bildung 2 plastische Scharniere, welche durch Überschreitung der Planzugfestigkeit des Betons und der daraus folgende Rissbildung und reduzierte lokale Trägheit des Querschnitts bedingt sind, gezeigt. Das Einfügen dieser plastischen Scharniere im Berechnungsmodell ermöglicht die korrekte Prüfung der Lastverteilung in den untersuchten Querschnitten. Die Strukturstatik wird durch die Überprüfung der Anzahl von plastischen Scharnieren (max. 3) und der Rissbreite (<1.0mm) gewährleistet. Die GZG-Überprüfungen zeigen, dass die vorgeschriebenen Dauerhaftigkeitsanforderungen angemessen erfüllt sind.

Die Ergebnisse aus den statischen Berechnungen wurden mittels Vergleich mit vereinfachten Berechnungsmethoden und durch ähnliche Berechnungen an vergleichbaren Bauwerken geprüft. Die erhaltenen Ergebnisse sind daher als akzeptabel und richtig angenommen.

## 6.7 RISULTATI

Le verifiche svolte sulle sezioni non armate secondo lo SLU mostrano la formazione di 2 cerniere plastiche, causate dal superamento della resistenza a trazione di progetto del calcestruzzo con conseguente fessurazione e perdita d'inerzia localizzata della sezione. L'inserimento di tali cerniere nei modelli di calcolo consente di verificare correttamente la ridistribuzione delle sollecitazioni agenti nelle sezioni di verifica. La staticità della struttura è garantita attraverso il controllo del numero di cerniere plastiche che si vengono a formare (massimo 3) e dall'ampiezza (< 1.0mm). Le verifiche svolte allo SLE dimostrano che le esigenze di durabilità prescritte sono opportunamente rispettate.

I risultati emersi dall'analisi statica condotta sono stati validati mediante confronto con metodi di calcolo semplificati e attraverso raffronti con altre analisi svolte su opere paragonabili. I risultati ottenuti sono pertanto ritenuti accettabili e corretti

## 7 VERZEICHNISSE

### 7.1 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Synoptische Tafel der Stollen CT2-CT3-CT4 .....	6
Tabelle 2: Geomechanische homogene Zonen .....	11
Tabelle 3: Charakterisierung des Gebirges jeder homogenen Zone	11
Tabelle 4: Charakterisierung der Gebirge auf Höhe des BP47/1	12
Tabelle 5: typische Parameter der Gebirges in den unterschiedlichen Zonen und Klassen .....	12
Tabelle 6: typische Parameter des Gebirges auf Höhe des BP47/1	12
Tabelle 7: vorgeschlagene Stabilitätskriterien in [26] [27]; $c_f$ = Ortsbrustkonvergenz; $F_{pf}$ = Umfang des plastischen Streifens an der Ortsbrust; $R_{scavo} = r_{eq}$ = entsprechender Ausbruchradius.	15
Tabelle 8: Zusammenfassung der Ergebnisse des Kennlinienverfahrens .....	16
Tabelle 9: Charakterisierung der Gebirge GB-G-GA4 - GB-G-GA7	17
Tabelle 10: Typische Parameter der Gebirge GB-G-GA4 - GB-G-GA7 in unterschiedlichen Klassen.....	17
Tabelle 11: Zusammenfassung der Ergebnisse der Kennlinien	17
Tabelle 12: Ergebnisse der Kennlinien auf Höhe des BP47/117	
Tabelle 13: Eigenschaften der Außenschale CT2-T4.....	20
Tabelle 14: Teilsicherheitsfaktoren Ortsbrustnachweis .....	22
Tabelle 15: Charakteristische Bruchparameter des Gebirge FVM-S-PS	23
Tabelle 16: angewandte Parameter für die an Rand und Ortsbrust konsolidierten Zonen .....	24
Tabelle 17: Charakteristika der Außenschale CT2-b-T4 ....	31
Tabelle 18: Temperatureinwirkung.....	38
Tabelle 19: Einwirkungskombinationen (in rosa die GZT-Kombinationen und in weiß die GZG-Kombinationen) .....	40
Tabelle 20: Kombinationsbeiwerte .....	40
Tabelle 21: Mindestbetondeckung .....	44

## 7 ELENCHI

### 7.1 ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1: Quadro sinottico dei cunicoli CT2-CT3-CT4 .....	6
Tabella 2: Zone geomeccaniche omogenee .....	11
Tabella 3: Caratterizzazione degli ammassi di ciascuna zona omogenea	11
Tabella 4: Caratterizzazione degli ammassi in corrispondenza del BP47/1 .....	12
Tabella 5: Parametri caratteristici dell'ammasso nelle diverse zone e classi	12
Tabella 6: Parametri caratteristici dell'ammasso in corrispondenza del BP47/1 .....	12
Tabella 7: Criteri di stabilità proposti in[26] [27]; $c_f$ = convergenza al fronte; $F_{pf}$ = estensione della fascia plastica al fronte; $R_{scavo} = r_{eq}$ = raggio equivalente di scavo. ....	15
Tabella 8: Sintesi dei risultati delle linee caratteristiche .....	16
Tabella 9: Caratterizzazione degli ammassi GB-G-GA4 - GB-G-GA7	17
Tabella 10: Parametri caratteristici degli ammassi GB-G-GA4 - GB-G-GA7 nelle diverse classi .....	17
Tabella 11: Sintesi dei risultati delle linee caratteristiche ...	17
Tabella 12: Risultati delle linee caratteristiche in corrispondenza del BP47/1 .....	17
Tabella 13: Caratteristiche rivestimenti di prima fase CT2-T4	20
Tabella 14: Fattori parziali di sicurezza per la verifica di stabilità del fronte di scavo.....	22
Tabella 15: Parametri di rottura caratteristici dell'ammasso FVM-S-PS	23
Tabella 16: Parametri adottati per le zone consolidate sul contorno e sul fronte. ....	24
Tabella 17: Caratteristiche rivestimenti di prima fase CT2-b-T4	31
Tabella 18: Variazione termica.....	38
Tabella 19: Combinazioni di carico (in rosa le combinazioni SLU e in bianco le combinazioni SLE) .....	40
Tabella 20: Coefficienti di combinazione.....	40
Tabella 21: Copriferro minimo.....	44

## 7.2 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: TKA an der Ortsbrust und bei Einsetzung der Nietungen	21
Abbildung 2: Berechnungsmodell	25
Abbildung 3: horizontale Verschiebung - Modell mit Konsolidierungen	26
Abbildung 4: Kurve Konvergenz - Ortsbrustabstand	26
Abbildung 5: Berechnungsmodell	27
Abbildung 6: Horizontale Verschiebungen - Modell mit Konsolidierungen	28
Abbildung 7: Radialdruck - Konvergenz Kurve	28
Abbildung 8: Überlappung Kennlinie des Hohraums und der Schale CT1-a-T4	32
Abbildung 9: TKA an der Ortsbrust und bei Einsetzung der Nietungen (FVM-S-PS)	33
Abbildung 10: CT2-b-T4 (FVM-S-PS) - Überprüfung der Außenschale	34
Abbildung 11: Schematisierung der Schnittstelle	36

## 7.3 ANLAGENVERZEICHNIS

- ANHANG 1 - KENNLINIEN
- ANHANG 2 - FDM-ANALYSE
- ANHANG 3 - FEM-ANALYSE DER INNENSCHALE

## 7.4 REFERENZDOKUMENTE

### 7.4.1 Eingangsdokumente

- [1] 02\_H61\_GD\_992\_GTB\_D0700\_13018 - Brenner Basistunnel - Ausführungsplanung - D0700: Baulos Muls 2-3 - Gesamtbauwerke - Technischer Bericht - Allgemeiner geomechanischer Bericht
- [2] 02\_H61\_GD\_090\_GTB\_D0700\_21001 - Brenner Basistunnel - Ausführungsplanung - D0700: Baulos Muls 2-3 - Gesamtbauwerke Teil 1 - Geomechanischer Detailbericht
- [3] 02\_H61\_GD\_090\_GLS\_D0700\_21002 - Brenner Basistunnel - Ausführungsplanung - D0700: Baulos Muls 2-3 - Gesamtbauwerke Teil 1 - Geomechanisches Prognoseprofil Oströhre (Blatt 1/7)
- [4] 02\_H61\_GD\_090\_GLS\_D0700\_21003 - Brenner Basistunnel - Ausführungsplanung - D0700: Baulos

## 7.2 ELENCO DELLE ILLUSTRAZIONI

Figura 1: FFS al fronte e all'installazione delle chiodature	21
Figura 2: Modello di calcolo	25
Figura 3: Spostamenti in direzione orizzontale	26
Figura 4: Curva Convergenza - Distanza dal fronte	26
Figura 5: Modello di calcolo	27
Figura 6: Spostamenti in direzione orizzontale - Modello con consolidamenti	28
Figura 7: Curva Pressione radiale - Convergenza	28
Figura 8: Sovrapposizione linea caratteristica della cavità e del rivestimento CT1-a-T4	32
Figura 9: FFS al fronte e all'installazione delle chiodature (FVM-S-PS)	33
Figura 10: CT2-b-T4 (FVM-S-PS) - Verifica rivestimenti di prima fase	34
Figura 11: Schematizzazione dell'interfaccia	36

## 7.3 ELENCO APPENDICI

- APPENDICE 1 - LINEE CARATTERISTICHE
- APPENDICE 2 - ANALISI FDM
- APPENDICE 3 - ANALISI FEM DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO

## 7.4 BIBLIOGRAFIA E FONTI

### 7.4.1 Documenti in ingresso

- [1] 02\_H61\_GD\_992\_GTB\_D0700\_13018 - Galleria di Base del Brennero - Progettazione esecutiva - D0700: Lotto Muls 2-3 - Opere generali - Relazione tecnica - Relazione geomeccanica generale
- [2] 02\_H61\_GD\_090\_GTB\_D0700\_21001 - Galleria di Base del Brennero - Progettazione esecutiva - D0700: Lotto Muls 2-3 - Opere generali Parte 1 - Relazione geomeccanica di dettaglio
- [3] 02\_H61\_GD\_090\_GLS\_D0700\_21002 - Galleria di Base del Brennero - Progettazione esecutiva - D0700: Lotto Muls 2-3 - Opere generali Parte 1 - Profilo geomeccanico e progettuale di previsione Galleria principale Est (Tav. 1/7)
- [4] 02\_H61\_GD\_090\_GLS\_D0700\_21003 - Galleria di Base del Brennero - Progettazione esecutiva - D0700: Lotto Muls 2-3 - Opere generali Parte 1 -



- |  |  |
|--|--|
| <p>Mauls 2-3 - Gesamtbauwerke Teil 1 - Geomechanisches Prognoseprofil Oströhre (Blatt 2/7)</p> <p>[5] 02_H61_GD_090_GLS_D0700_21004 - Brenner Basistunnel - Ausführungsplanung - D0700: Baulos Mauls 2-3 - Gesamtbauwerke Teil 1 - Geomechanisches Prognoseprofil Oströhre (Blatt 3/7)</p> <p>[6] 02_H61_GD_090_GLS_D0700_21005 - Brenner Basistunnel - Ausführungsplanung - D0700: Baulos Mauls 2-3 - Gesamtbauwerke Teil 1 - Geomechanisches Prognoseprofil Oströhre (Blatt 4/7)</p> <p>[7] 02_H61_GD_090_GLS_D0700_21006 - Brenner Basistunnel - Ausführungsplanung - D0700: Baulos Mauls 2-3 - Gesamtbauwerke Teil 1 - Geomechanisches Prognoseprofil Weströhre (Blatt 1/7)</p> <p>[8] 02_H61_GD_090_GLS_D0700_21007 - Brenner Basistunnel - Ausführungsplanung - D0700: Baulos Mauls 2-3 - Gesamtbauwerke Teil 1 - Geomechanisches Prognoseprofil Weströhre (Blatt 2/7)</p> <p>[9] 02_H61_GD_090_GLS_D0700_21008 - Brenner Basistunnel - Ausführungsplanung - D0700: Baulos Mauls 2-3 - Gesamtbauwerke Teil 1 - Geomechanisches Prognoseprofil Weströhre (Blatt 3/7)</p> <p>[10] 02_H61_GD_090_GLS_D0700_21009 - Brenner Basistunnel - Ausführungsplanung - D0700: Baulos Mauls 2-3 - Gesamtbauwerke Teil 1 - Geomechanisches Prognoseprofil Weströhre (Blatt 4/7)</p> <p>[11] 02_H61_EG_995_KTB_D0700_15003 - Brenner Basistunnel - Ausführungsplanung - D0700: Baulos Mauls 2-3 - Gesamtbauwerke - Sicherheit gegen Feuereinwirkung</p> | <p>Profilo geomeccanico e progettuale di previsione Galleria principale Est (Tav. 2/7)</p> <p>[5] 02_H61_GD_090_GLS_D0700_21004 - Galleria di Base del Brennero - Progettazione esecutiva - D0700: Lotto Mules 2-3 - Opere generali Parte 1 - Profilo geomeccanico e progettuale di previsione Galleria principale Est (Tav. 3/7)</p> <p>[6] 02_H61_GD_090_GLS_D0700_21005 - Galleria di Base del Brennero - Progettazione esecutiva - D0700: Lotto Mules 2-3 - Opere generali Parte 1 - Profilo geomeccanico e progettuale di previsione Galleria principale Est (Tav. 4/7)</p> <p>[7] 02_H61_GD_090_GLS_D0700_21006 - Galleria di Base del Brennero - Progettazione esecutiva - D0700: Lotto Mules 2-3 - Opere generali Parte 1 - Profilo geomeccanico e progettuale di previsione Galleria principale Ovest (Tav. 1/7)</p> <p>[8] 02_H61_GD_090_GLS_D0700_21007 - Galleria di Base del Brennero - Progettazione esecutiva - D0700: Lotto Mules 2-3 - Opere generali Parte 1 - Profilo geomeccanico e progettuale di previsione Galleria principale Ovest (Tav. 2/7)</p> <p>[9] 02_H61_GD_090_GLS_D0700_21008 - Galleria di Base del Brennero - Progettazione esecutiva - D0700: Lotto Mules 2-3 - Opere generali Parte 1 - Profilo geomeccanico e progettuale di previsione Galleria principale Ovest (Tav. 3/7)</p> <p>[10] 02_H61_GD_090_GLS_D0700_21009 - Galleria di Base del Brennero - Progettazione esecutiva - D0700: Lotto Mules 2-3 - Opere generali Parte 1 - Profilo geomeccanico e progettuale di previsione Galleria principale Ovest (Tav. 4/7)</p> <p>[11] 02_H61_EG_995_KTB_D0700_15003 - Galleria di Base del Brennero - Progettazione esecutiva - D0700: Lotto Mules 2-3 - Opere generali - Sicurezza nei riguardi dell'esposizione al fuoco</p> |
|--|--|

#### 7.4.2 Normen und Richtlinien

- [12] Technische Konstruktionsnormen 2008 – NTC 2008;
- [13] Leitfaden N.617, Vorgehensweise zur Anwendung der "Neue technische Konstruktionsnormen", laut MD 14.Januar 2008
- [14] DM 28/10/2005 Sicherheit für Bahntunnel
- [15] UNI EN1990:2006 - Eurocodice 0 – Grundlage für Konstruktion und Dokumentation zur nationalen Umsetzung ;

#### 7.4.2 Normativa

- [12] Norme Tecniche delle Costruzioni 2008 – NTC 2008;
- [13] Circolare n.617, Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al DM 14 gennaio 2008
- [14] DM 28/10/2005 , Sicurezza nelle gallerie ferroviarie.
- [15] UNI EN1990:2006 - Eurocodice 0 – Basi per la progettazione strutturale e documento di applicazione nazionale3

- [16] UNI EN 1991-1; Eurocode 1 – Actions on structures – 2010/2011
- [17] UNI EN 1992:2005 - Eurocodice 2 – Planung von für Stahlbetonbauwerke und Dokumente zur nationalen Umsetzung;
- [18] UNI EN 1997:2005 - Eurocodice 7 – Geotechnik und Dokumente zur nationalen Umsetzung
- [19] UNI EN 1992-1-2:2005 „Planung von Stahlbetonbauwerke Teil 1-2: Allgemeinregelung – Brandschutz Strukturplanung“
- [20] UNI 11076: vom 1. Juli 2003, "Testmodalitäten zur Bewertung des Benehmens der an den Decken von Untertagebauten angebrachten Schutzmaßnahmen in Brandfall".
- [21] D.M. 16.02.2007 "Feuerwiderstandsklassifizierung von Erzeugnisse und Bauelemente für Bauwerke"
- [22] UNI 11104:2004
- [23] UNI EN 206-1:2006

#### 7.4.3 Literatur

- [24] Ribacchi R., Riccioni R. – Stato di sforzo e di deformazione intorno ad una galleria circolare. Gallerie e grandi opere sotterranee, 1977.
- [25] Nguyen-Minh D., Guo C. – Recent progress in convergence confinement method", Eurock '96, pagg. 855-860.
- [26] Gamble J.C. – Durability-plasticity classification of shales. Ph. D. Thesis, University of Illinois, 1971.
- [27] Sakurai – Lessons Learned from Field Measurements in Tunneling. Tunneling and Underground Space Technology, 1997.
- [28] HOEK E., CARRANZA TORRES C., CORKUM B. – Hoek-Brown failure criterion. 2002
- [29] UNWEDGE-roscience, Underground Wedge Stability Analysis Manual
- [30] Wang, J., 1993 - Seismic Design of Tunnels - A Simple State-of-the-Art Design
- [31] Hashash, Y., et al., 2001, - Seismic design and analysis of underground structures, Tunnelling and underground space technology 16, (247-293)
- [32] Pöttler, R. Die unbewehrte Innenschale im Felstunnelbau - Standsicherheit und Verformung im Reißbereich, Beton und Stahlbetonbau Heft 6, 1993

- [16] UNI EN 1991-1; Eurocode 1 – Actions on structures – 2010/2011
- [17] UNI EN 1992:2005 - Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture in calcestruzzo e documento di applicazione nazionale
- [18] UNI EN 1997:2005 - Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica e documento di applicazione nazionale
- [19] UNI EN 1992-1-2:2005 "Progettazione delle strutture in calcestruzzo Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio"
- [20] UNI 11076 del 1 luglio 2003, "Modalità di prova per la valutazione del comportamento di protettivi applicati a soffitti di opere sotterranee, in condizioni di incendi".
- [21] D.M. 16.02.2007 "Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione"
- [22] UNI 11104:2004
- [23] UNI EN 206-1:2006

#### 7.4.3 Letteratura

- [24] Ribacchi R., Riccioni R. – Stato di sforzo e di deformazione intorno ad una galleria circolare. Gallerie e grandi opere sotterranee, 1977.
- [25] Nguyen-Minh D., Guo C. – Recent progress in convergence confinement method", Eurock '96, pagg. 855-860.
- [26] Gamble J.C. – Durability-plasticity classification of shales. Ph. D. Thesis, University of Illinois, 1971.
- [27] Sakurai – Lessons Learned from Field Measurements in Tunneling. Tunneling and Underground Space Technology, 1997.
- [28] HOEK E., CARRANZA TORRES C., CORKUM B. – Hoek-Brown failure criterion. 2002
- [29] UNWEDGE-roscience, Underground Wedge Stability Analysis Manual
- [30] Wang, J., 1993 - Seismic Design of Tunnels - A Simple State-of-the-Art Design
- [31] Hashash, Y., et al., 2001, - Seismic design and analysis of underground structures, Tunnelling and underground space technology 16, (247-293)
- [32] Pöttler, R. Die unbewehrte Innenschale im Felstunnelbau - Standsicherheit und Verformung im Reißbereich, Beton und Stahlbetonbau Heft 6, 1993

[33] Pöttler, R. Standsicherheitsnachweis unbewehrter  
Innenschalen, Bautechnik 67, 1990

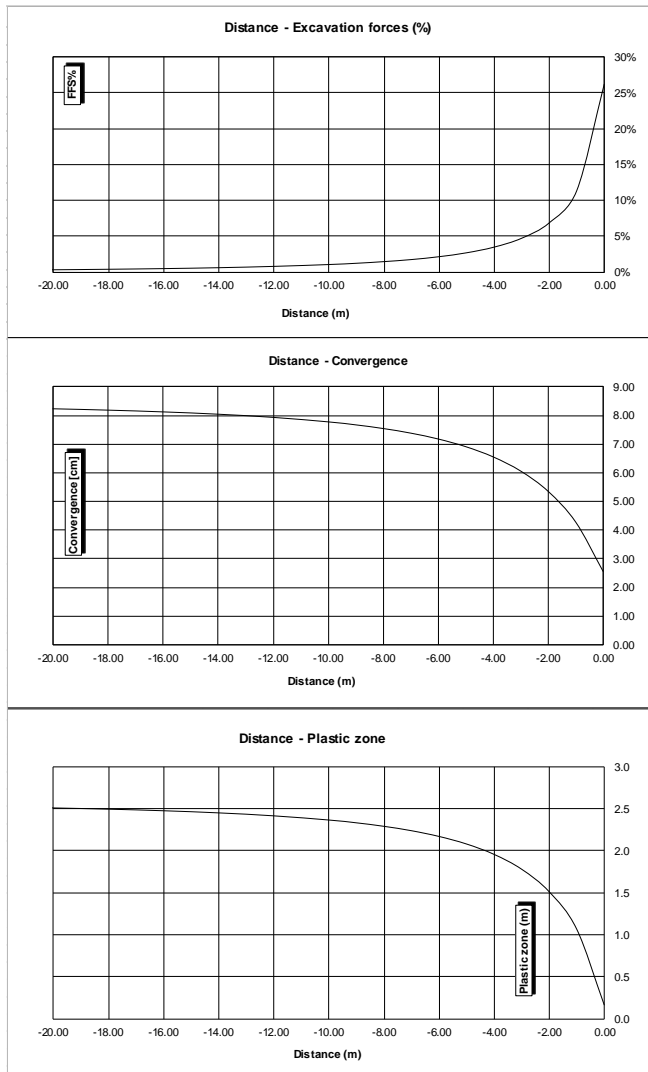
[33] Pöttler, R. Standsicherheitsnachweis unbewehrter  
Innenschalen, Bautechnik 67, 1990

## ANHANG 1 - KENNLINIEN

Aufgezeigt werden in Folge die Kurven:

- Radialer Druck – Konvergenz.
- Konvergenz – Ortsbrustabstand.
- Radialer Druck – Ausdehnung der plastischen Zone über den Ausbruchprofil hinaus.
- Ortsbrustabstand – Ausdehnung der plastischen Zone über den Ausbruchprofil hinaus.
- Ortsbrustabstand – Trägheitskräfte der Ausbruchs

Für die gravierende Strecke in Klasse III (Strecke 29).



## APPENDICE 1 - LINEE CARATTERISTICHE

Di seguito sono riportate le curve:

- Pressione Radiale – Convergenza.
- Convergenza – Distanza dal Fronte.
- Pressione Radiale – Estensione della Fascia Plastica oltre il profilo di scavo.
- Distanza dal fronte – Estensione della Fascia Plastica oltre il profilo di scavo.
- Distanza dal Fronte – Forze Fittizie di Scavo
- Per la tratta più gravosa in classe III (tratta 29).

6 - LC GSI = 39, H = 995m, C0 = 81MPa, mi = 20, Ei = 26500GPa

INPUT DATA		RESULTS	
Weight [N/mc]	26700	At final equilibrium	
Overburden [m]	995	Total convergence [cm]	8.5
Excavation radius [m]	3.77	Convergence after excavation [cm]	5.9
Peak internal friction angle [°]	37.45	Plastic zone thickness [m]	2.6
Post peak internal friction angle [°]	32.38	Equilibrium at excavation face	
Peak cohesion [Pa]	2983006	Convergence [cm]	2.5
Post peak cohesion [Pa]	2176759	1 - (deconfinement ratio) [%]	26.2%
Deformation modulus [Pa]	3.95E+09		
Poisson's ratio [-]	0.3		
Dilation angle [°]	4.68		

c(face) / Radius	0.67 [%]
c(total) / Radius	2.25 [%]
c(after excav) / Radius	1.57 [%]
Pl.thick. (face)/Radius	4.4 [%]
Pl.thick. (total)/Radius	68.8 [%]

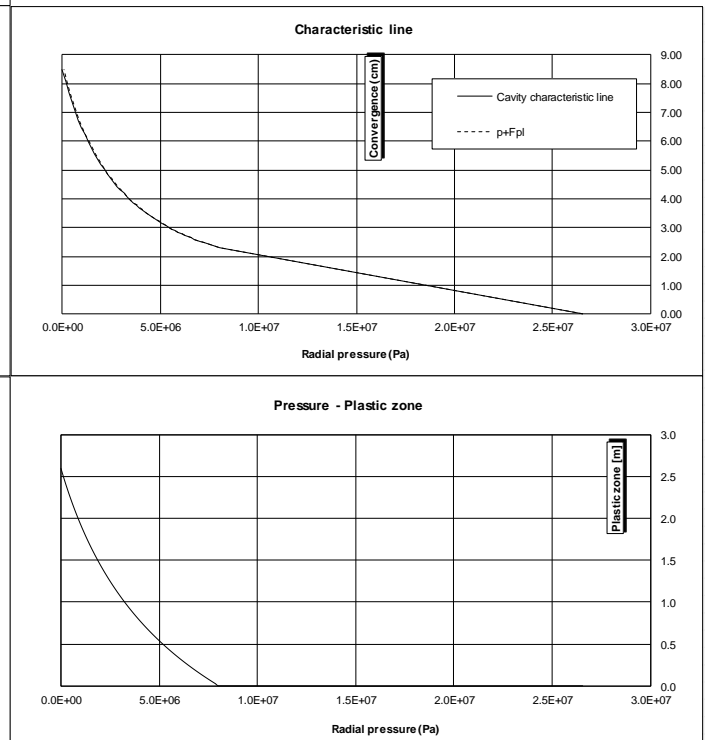
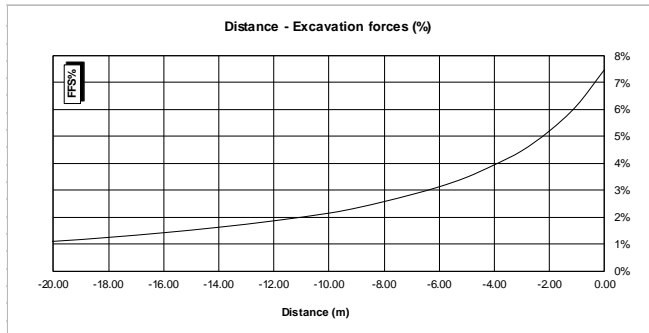


Abbildung 1: Zone 29 (GB-G-GA4) - Klasse III

Illustrazione 1: Zona 29 (GB-G-GA4) - Classe III



**3\_(S-PS) - LC GSI = 52, H = 590m, C0 = 5Mpa, mi = 20, Ei = 30000GPa**

INPUT DATA		RESULTS	
Weight [N/mc]	27000	<b>At final equilibrium</b>	
Overburden [m]	590	Total convergence [cm]	29.3
Excavation radius [m]	3.80	Convergence after excavation [cm]	20.5
		Plastic zone thickness [m]	22.9
Peak internal friction angle [°]	23.81	<b>Equilibrium at excavation face</b>	
Post peak internal friction angle [°]	17.97	Convergence [cm]	8.8
Peak cohesion [Pa]	931554	1 - (deconfinement ratio) [%]	7.5%
Post peak cohesion [Pa]	597027		
Deformation modulus [Pa]	1.04E+10		
Poisson's ratio [-]	0.3		
Dilation angle [°]	3.27		

c(face) / Radius	2.31 [%]
c(total) / Radius	7.71 [%]
c(after excav) / Radius	5.40 [%]
Pl.thick. (face)/Radius	302.2 [%]
Pl.thick. (total)/Radius	602.9 [%]

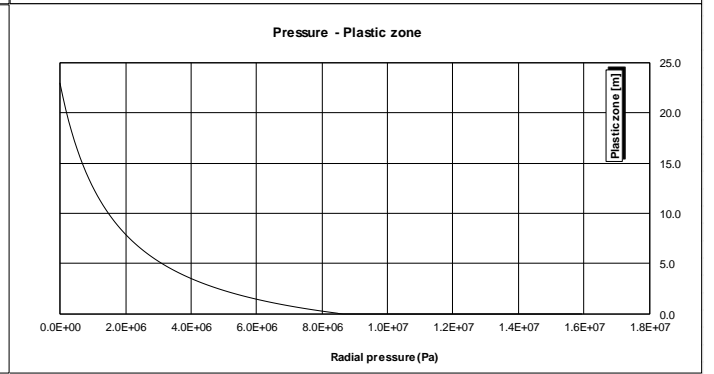
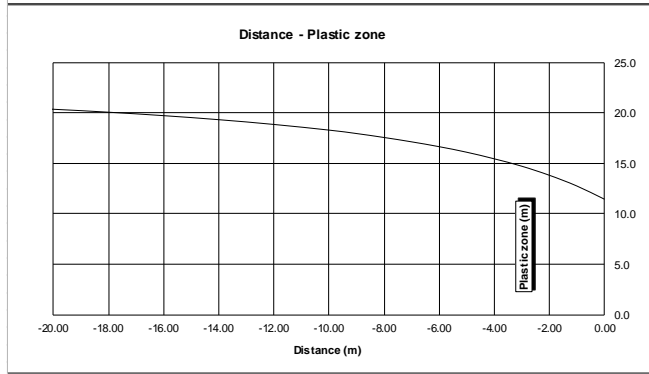
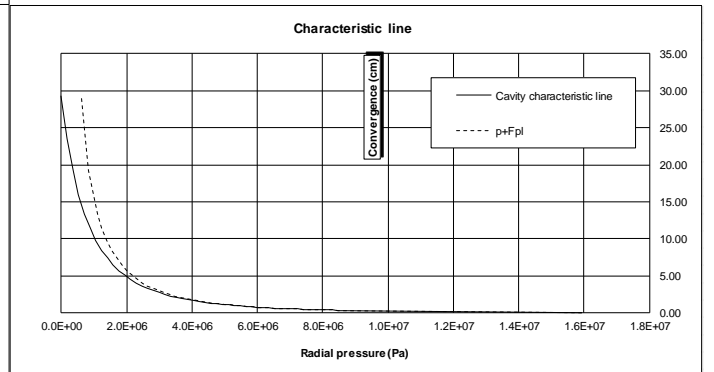
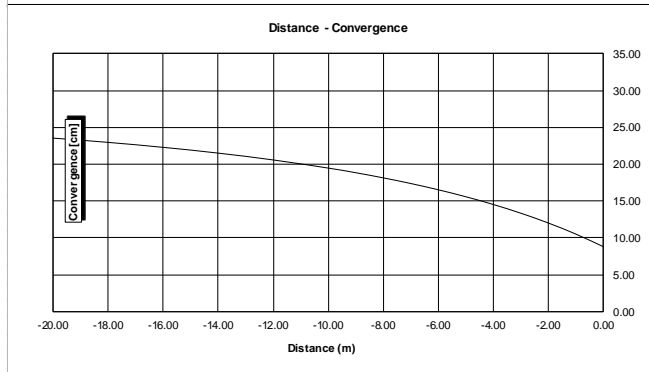


Abbildung 2: Zone 19bis (FVM-S-PS) - Klasse IV

Illustrazione 2: Zona 19bis (FVM-S-PS) - Classe IV

## ANHANG 2 - FDM-ANALYSE

In diesem Anhang sind die wichtigsten Outputs der Finite-Differenzen-Analysen des Ausbruchquerschnitts CT2-T4 dargestellt, welche mit dem Berechnungsprogramm FLAC7.0 durchgeführt wurden.

Modell 1 bezieht sich auf das Modell mit Einsatz von Lehrgerüste 2IPN160, Abstand 1.5 m auf 2.5% der TKA; Modell 2 bezieht sich auf das Modell mit Einsatz von Lehrgerüste 2IPN160, Abstand 0.50 m auf 4.5% der TKA. In folgenden Abbildungen sind die Belastungen in den Lehrgerüsten per einzelner Lehrgerüst aufgezeigt.

## APPENDICE 2 - ANALISI FDM

Nel presente appendice sono riportati i principali output delle analisi alle Differenze Finite della sezione CT2-T4 effettuate con il programma di calcolo FLAC7.0.

Il modello 1 si riferisce al modello con la messa in opera di centine 2IPN160 a passo 1.5 m al 2.5% delle FFS; Il modello 2 si riferisce al modello con la messa in opera di centine 2IPN160 a passo 0.50 m al 4.5% delle FFS. Nelle seguenti illustrazioni, le sollecitazioni nelle centine sono riportate per singola centina

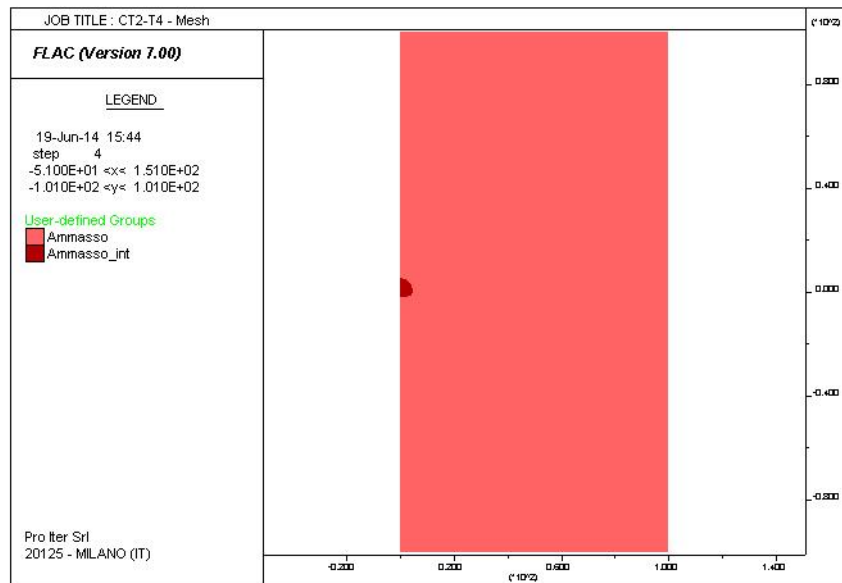


Abbildung 3: CT2-T4 - Modell

Illustrazione 3: CT2-T4 - Modello

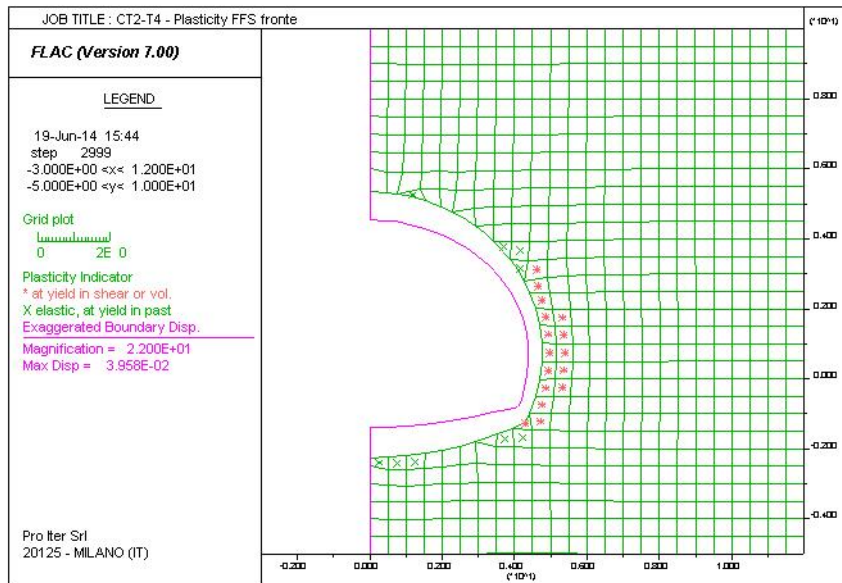


Abbildung 4: CT2-T4 - Ortsbrust Plastizität und Konvergenzen

Illustrazione 4: CT2-T4 - Plasticizzazioni e convergenze al fronte

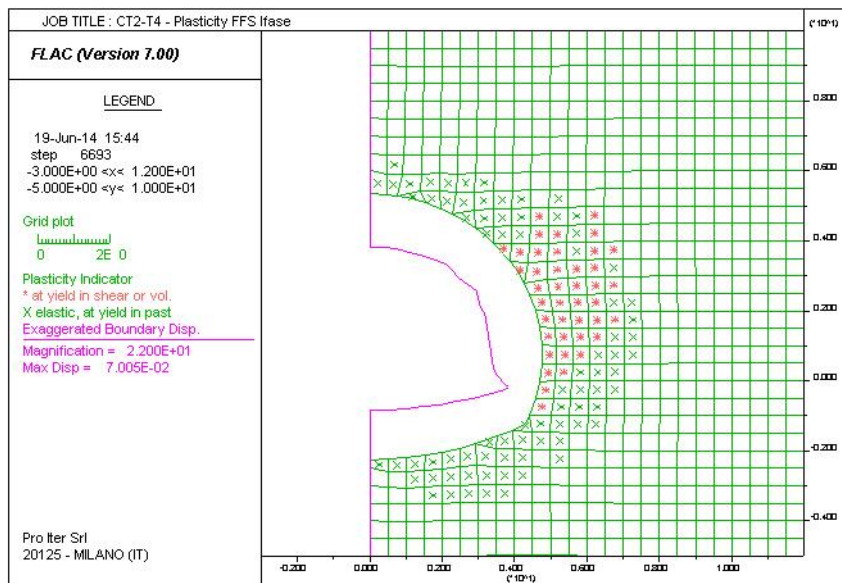


Abbildung 5: CT2-T4 - Modell 1 - Plastizität und Konvergenzen in 5m Entfernung von der Ortsbrust (TKA=2.5%)

Illustrazione 5: CT2-T4 - Modello 1 - Plasticizzazioni e convergenze a 5m dal fronte (FFS=2.5%)

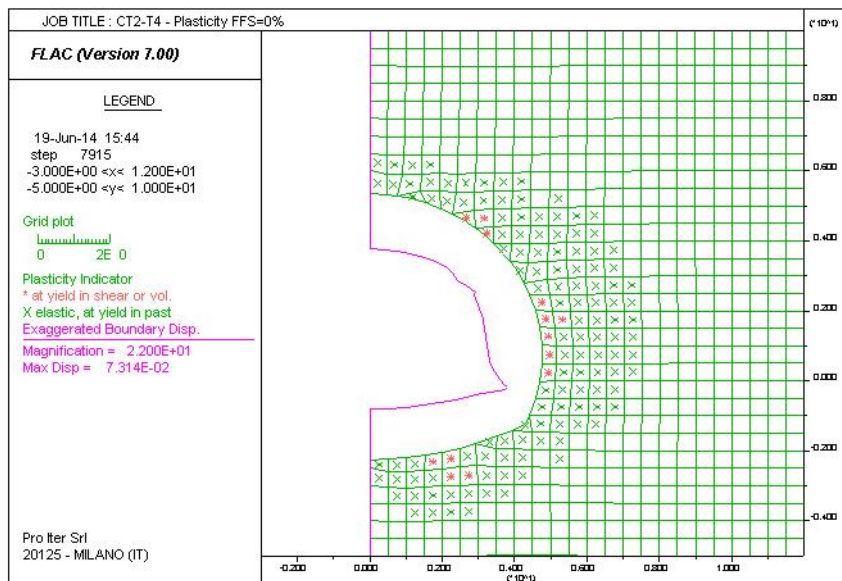


Abbildung 6: CT2-T4 - Modell 1 - Plastizität und Konvergenzen in Endphase (TKA=0%)

Illustrazione 6: CT2-T4 - Modello 1 - Plasticizzazioni e convergenze in fase definitiva (FFS=0%)

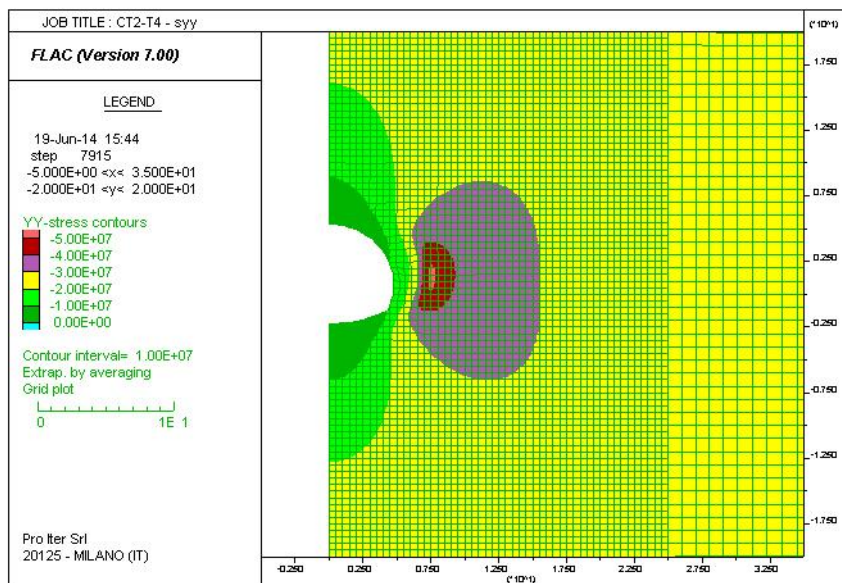


Abbildung 7: CT2-T4 - Modell 1 - Vertikale Kräfte (TKA=0%)

Illustrazione 7: CT2-T4 - Modello 1 - Sforzi verticali (FFS=0%)



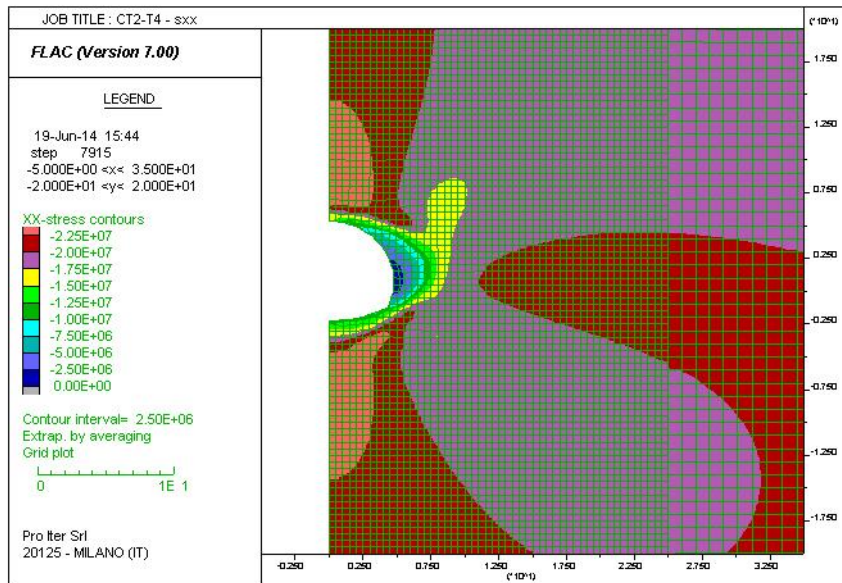


Abbildung 8: CT2-T4 - Modell 1 - Horizontale Kräfte (TKA=0%)

Illustrazione 8: CT2-T4 - Modello 1 - Sforzi orizzontali (FFS=0%)

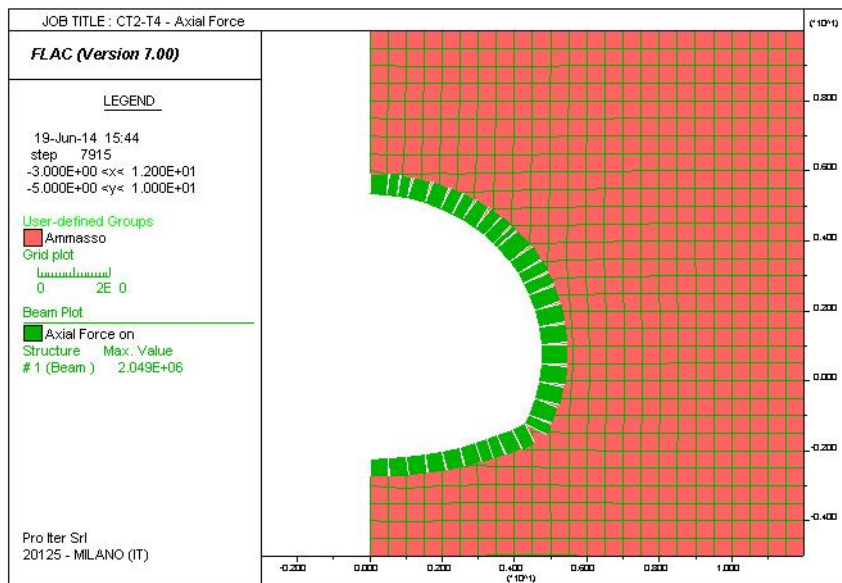


Abbildung 9: CT2-T4 - Modell 1 - Axialwirkung an den Lehrgerüsten (TKA=0%)

Illustrazione 9: CT2-T4 - Modello 1 - Azione assiale nel rivestimento di prima fase (FFS=0%)

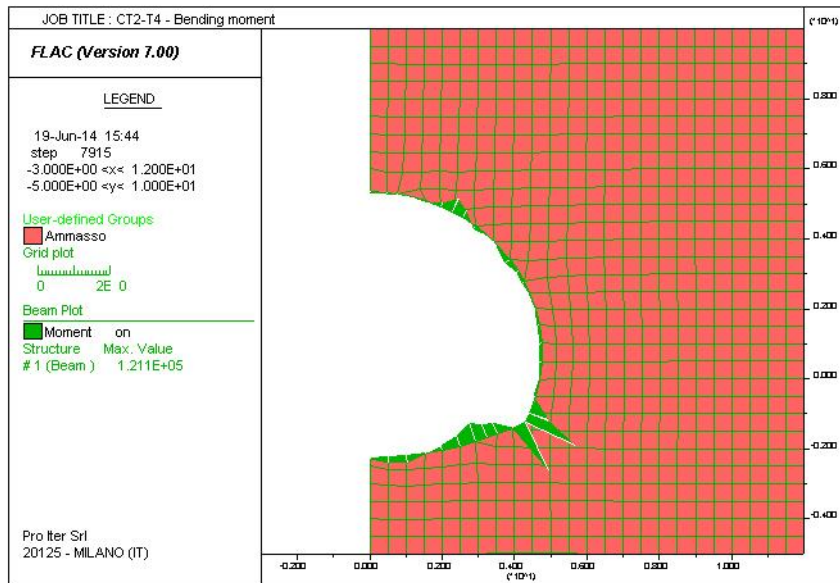


Abbildung 10: CT2-T4 - Modell 1 - Biegemoment an den Lehrgerüsten (TKA=0%)

Illustrazione 10: CT2-T4 - Modello 1 - Momento flettente nel rivestimento di prima fase (FFS=0%)

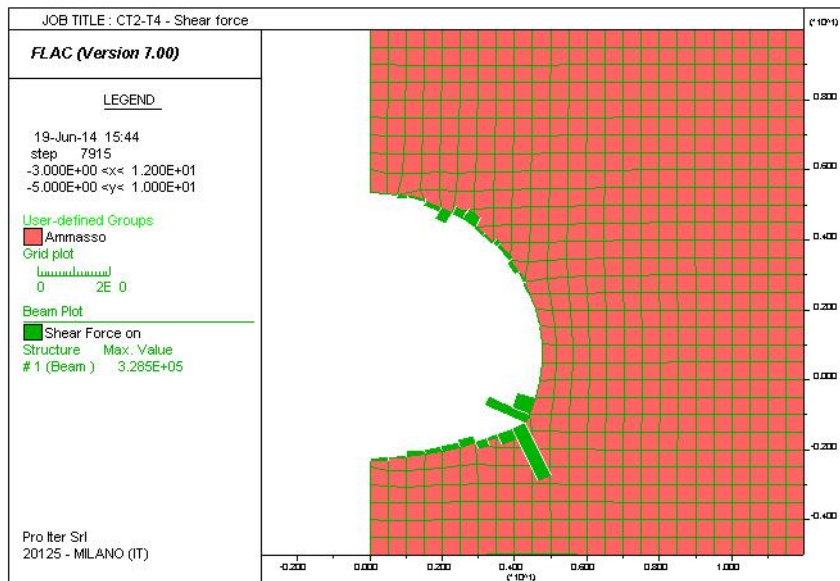


Abbildung 11: CT2-T4 - Modell 1 - Schub an den Lehrgerüsten (TKA=0%)

Illustrazione 11: CT2-T4 - Modello 1 - Taglio nel rivestimento di prima fase (FFS=0%)

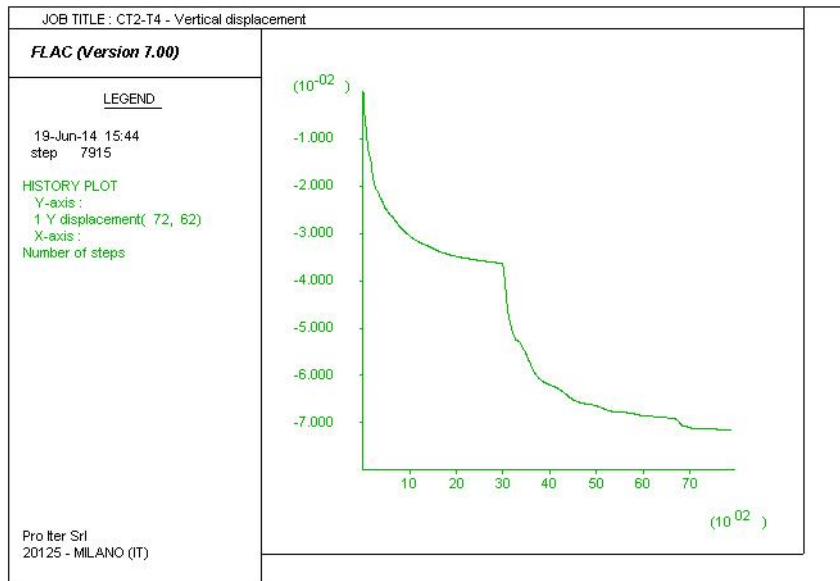


Abbildung 12: CT2-T4 - Modell 1 - Vertikalverschiebung des Kontrollpunkts der Kappe (TKA=0%)

Illustrazione 12: CT2-T4 - Modello 1 - Spostamento verticale del punto di controllo in calotta (FFS=0%)

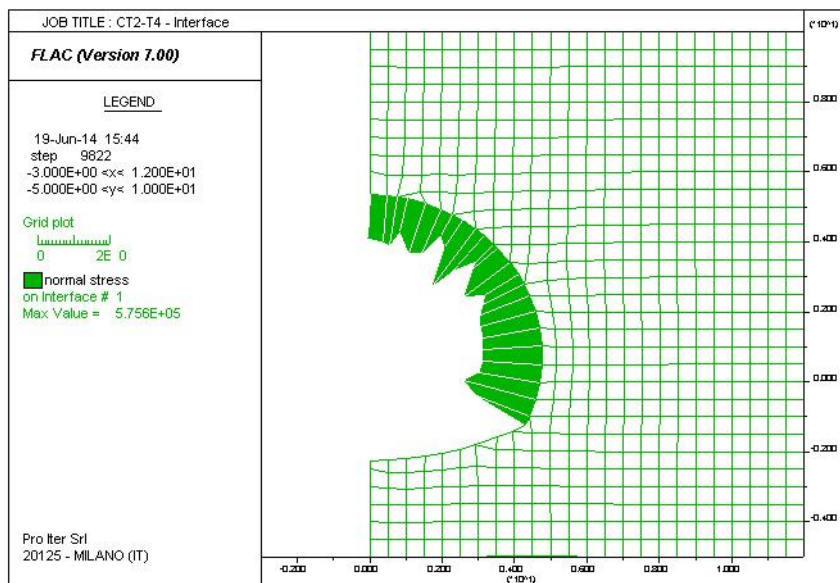


Abbildung 13: CT2-T4 - Modell 1 -Normaldrucke auf die Innenschale

Illustrazione 13: CT2-T4 - Modello 1 -Pressioni normali sul rivestimento definitivo

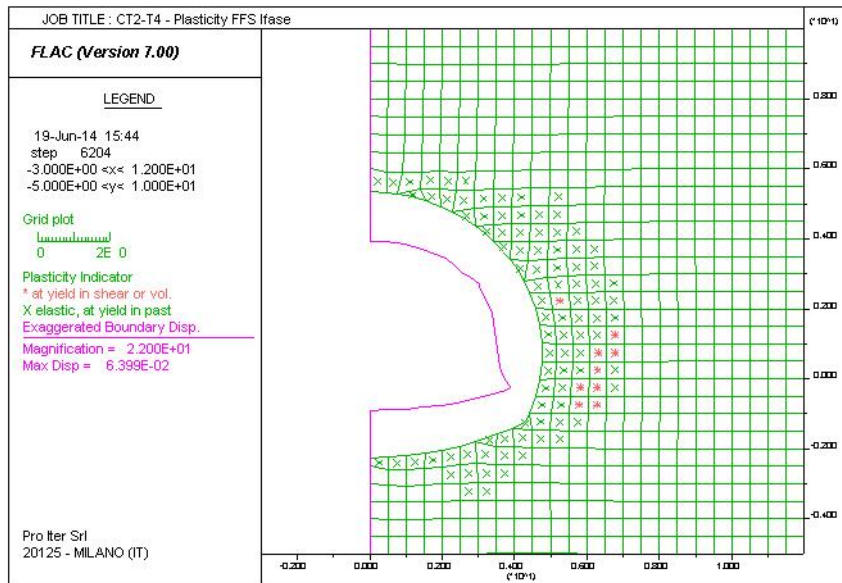


Abbildung 14: CT2-T4 - Modell 2 - Plastizität und Konvergenzen in 3m Entfernung von der Ortsbrust (TKA=4.5%)

Illustrazione 14: CT2-T4 - Modello 2 - Plasticizzazioni e convergenze a 3m dal fronte (FFS=4.5%)

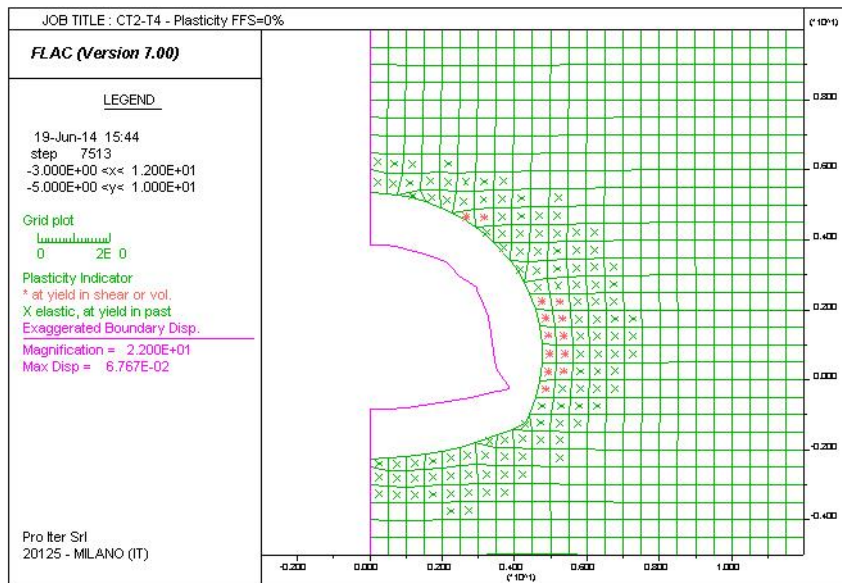


Abbildung 15: CT2-T4 - Modell 2 - Plastizität und Konvergenzen in Endphase (TKA=0%)

Illustrazione 15: CT2-T4 - Modello 2 - Plasticizzazioni e convergenze in fase definitiva (FFS=0%)

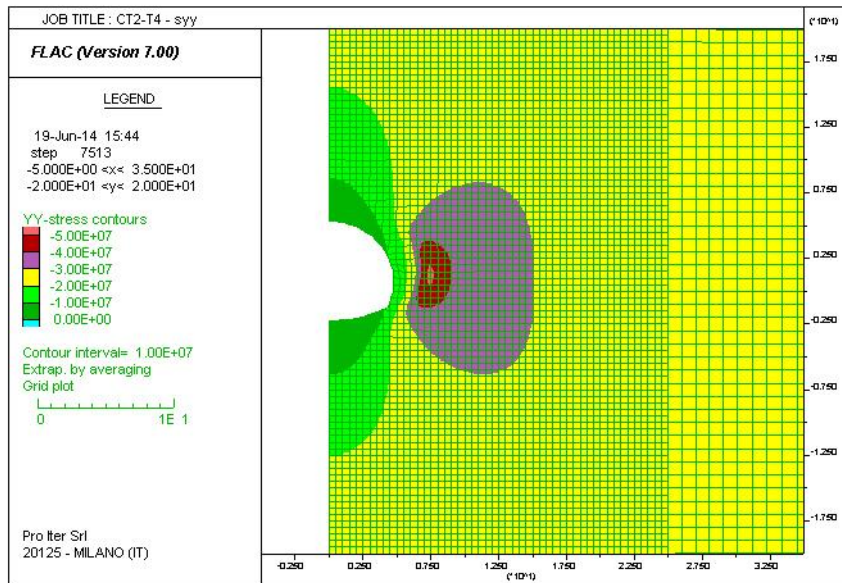


Abbildung 16: CT2-T4 - Modell 2 - Vertikale Kräfte (TKA=0%)

Illustrazione 16: CT2-T4 - Modello 2 - Sforzi verticali (FFS=0%)

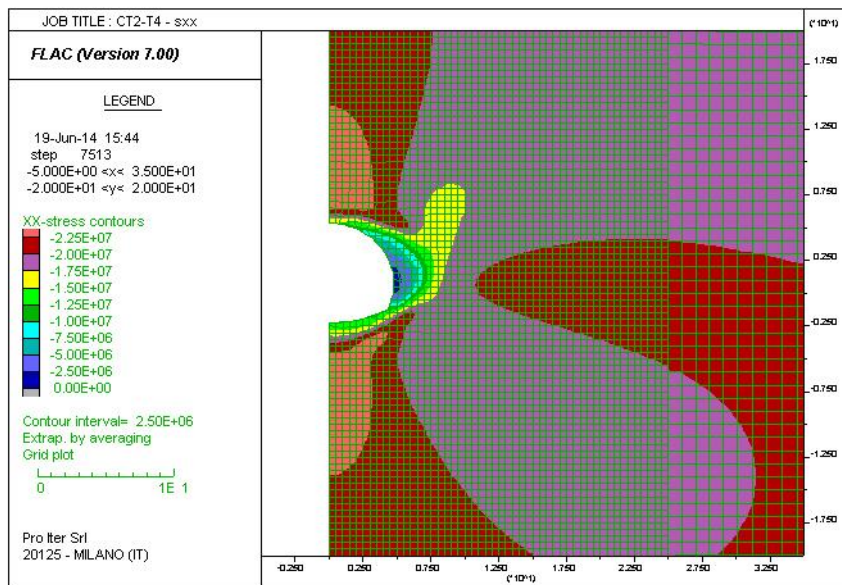


Abbildung 17: CT2-T4 - Modell 2 - Horizontale Kräfte (TKA=0%)

Illustrazione 17: CT2-T4 - Modello 2 - Sforzi orizzontali (FFS=0%)

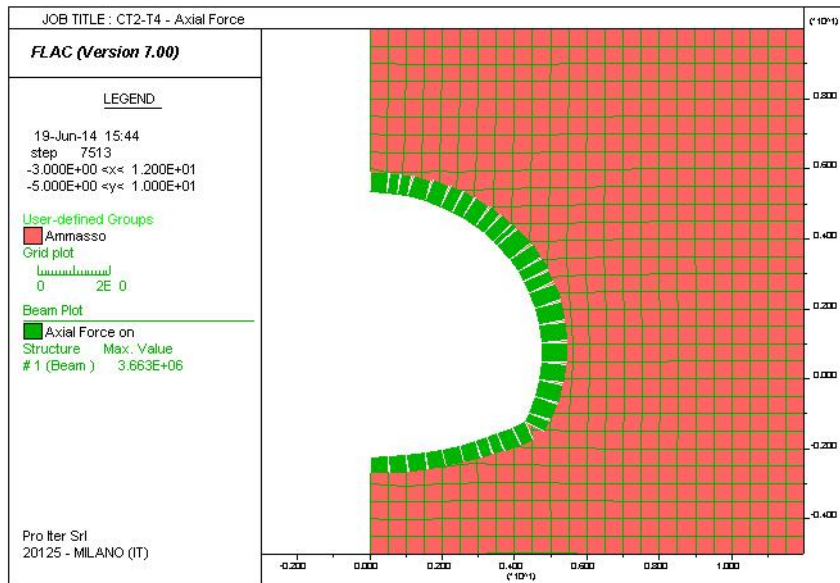


Abbildung 18: CT2-T4 - Modell 2 - Axialwirkung an der Außenschale (TKA=0%)

Illustrazione 18: CT2-T4 - Modello 2 - Azione assiale nel rivestimento di prima fase (FFS=0%)

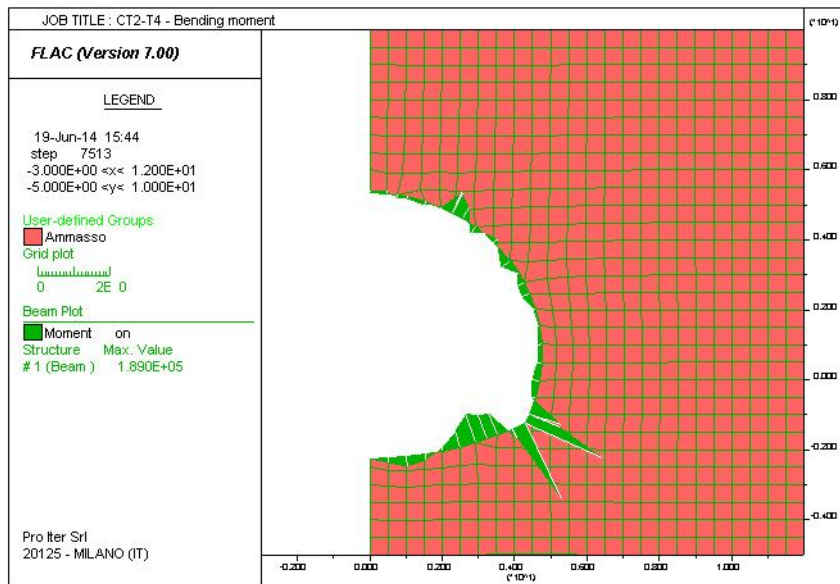


Abbildung 19: CT2-T4 - Modell 2 - Biegemoment an der Außenschale (TKA=0%)

Illustrazione 19: CT2-T4 - Modello 2 - Momento flettente nel rivestimento di prima fase (FFS=0%)

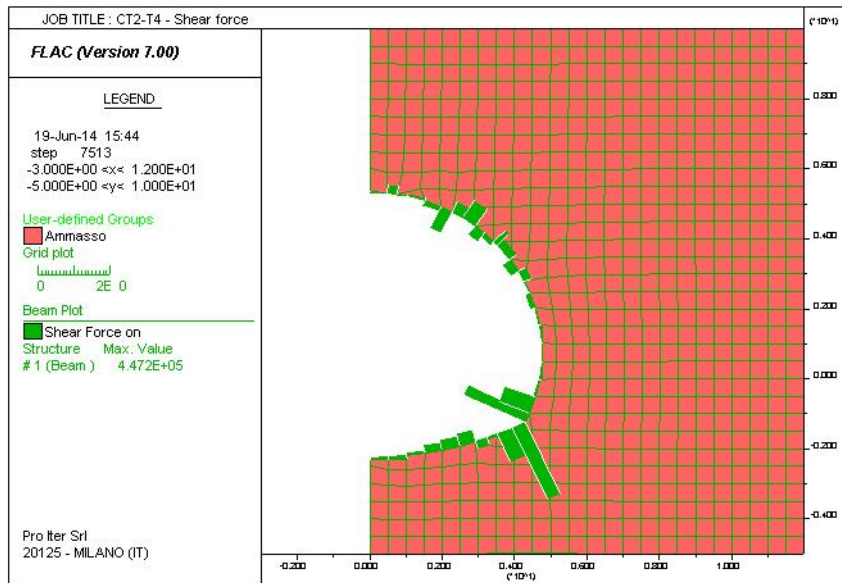


Abbildung 20: CT2-T4 - Modell 2 - Modell 2 Schub an der Außenschale (TKA=0%)

Illustrazione 20: CT2-T4 - Modello 2 - Taglio nel rivestimento di prima fase (FFS=0%)

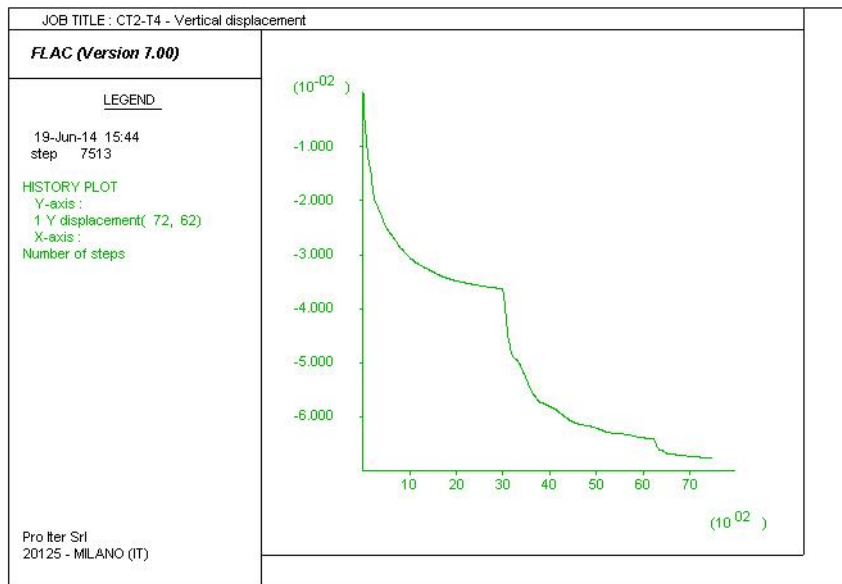


Abbildung 21: CT2-T4 - Modell 2 - Vertikalverschiebung des Kontrollpunkts der Kappe (TKA=0%)

Illustrazione 21: CT2-T4 - Modello 2 - Spostamento verticale del punto di controllo in calotta (FFS=0%)

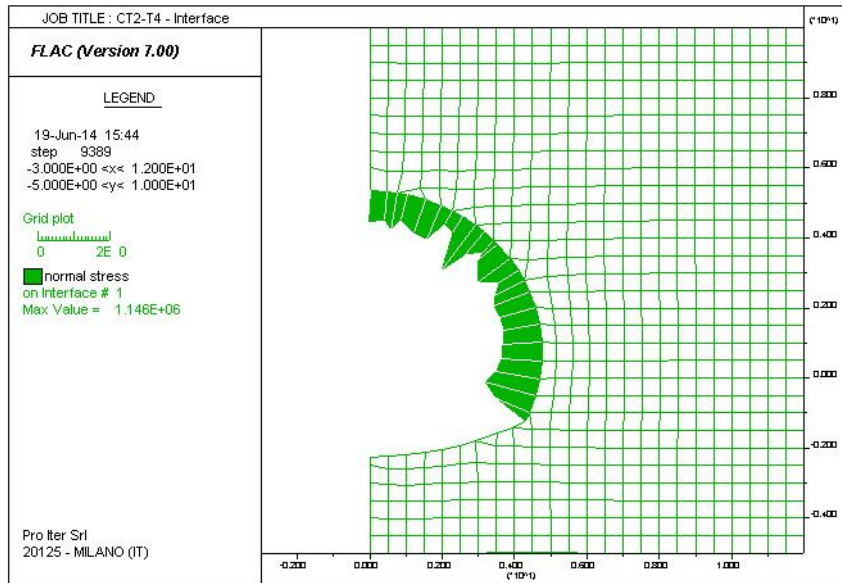


Abbildung 22: CT2-T4 - Modell 2 -Normaldrucke auf die Innenschale

Illustrazione 22: CT2-T4 - Modello 2 -Pressioni normali sul rivestimento definitivo

In folgendem Diagramm ist die Überprüfung der Außenschalen aufgezeigt. Der Bereich und die darstellenden Punkte des Spannungszustandes beziehen sich auf 25 cm Spritzbeton der Festigkeitsklasse C30/37, mit 2IPN160, Abstand 0.50 m und 1.5 m bewehrt. Die aus dem FDM-Modell erhaltenen Belastungen auf die Außenschale wurden um den Wirkungsbeiwert  $Y_G = 1.3$  erhöht.

Nel seguente grafico è riportata la verifica dei rivestimenti di prima fase. Il dominio e i punti immagine dello stato tensionale si riferiscono a 25 cm di betoncino proiettato C30/37 armato con 2IPN160 a passo 0.50 m e 1.5 m. Le sollecitazioni sul rivestimento di prima fase ricavate dal modello FDM sono amplificate per il coefficiente sulle azione  $Y_G = 1.3$ .

Die aus Modell 1 erhaltenen Belastungen sind mit Lehrgerüste Abstand 1.5 m während die Belastungen aus Modell 2 mit Lehrgerüste Abstand 0.50 m (außer einem einzelnen Punkt auf Höhe des Tunnelbogenaufsatzes der als nicht bedeutend eingestuft ist) überprüft worden.

Le sollecitazioni ricavate dal modello 1 sono verificate con le centine a passo 1.5 m mentre le sollecitazioni ricavate dal Modello 2 con centine a passo 0.50 m (a meno di un punto singolare in corrispondenza della muretta che non è ritenuto significativo)

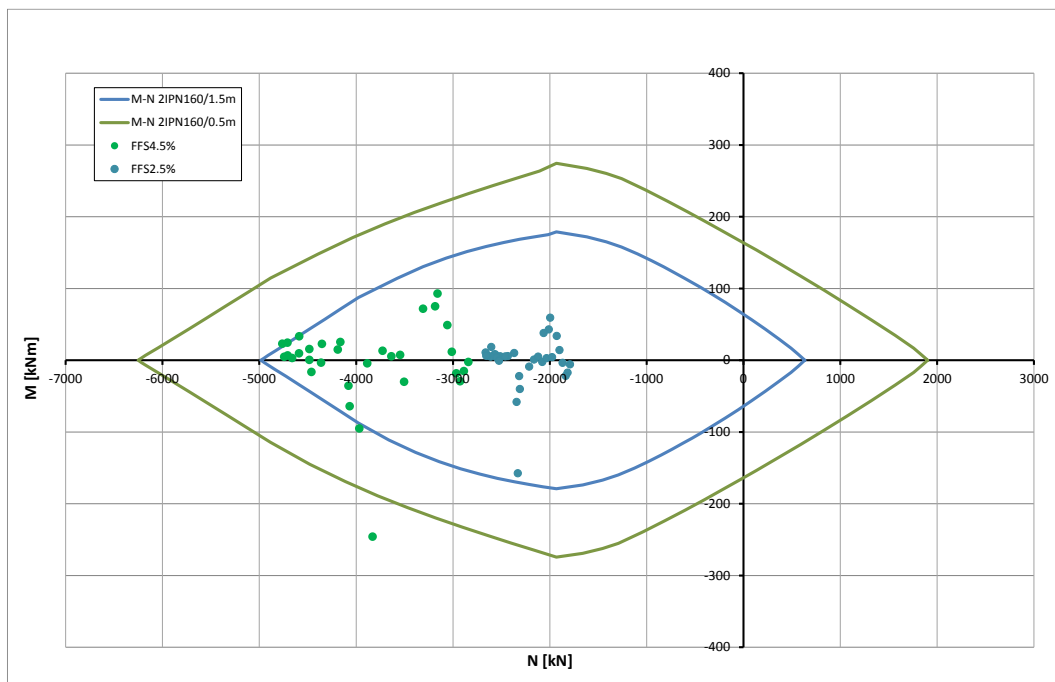


Abbildung 23: Überprüfung der Außenschale

Illustrazione 23: CT2-T4 - Verifica rivestimenti di prima fase



### ANHANG 3 - FEM-ANALYSE DER INNENSCHALE

Anhang 3 beinhaltet die graphischen Darstellungen der wichtigsten In- und Outputs der Innenschalenanalyse, die mit dem Programm SAP2000 durchgeführt wurden.

### APPENDICE 3 - ANALISI FEM DEL RIVESTIMENTO DEFINITIVO

L'appendice 3 contiene le rappresentazioni grafiche dei principali input e output dell'analisi del rivestimento definitivo condotte con il programma SAP2000.

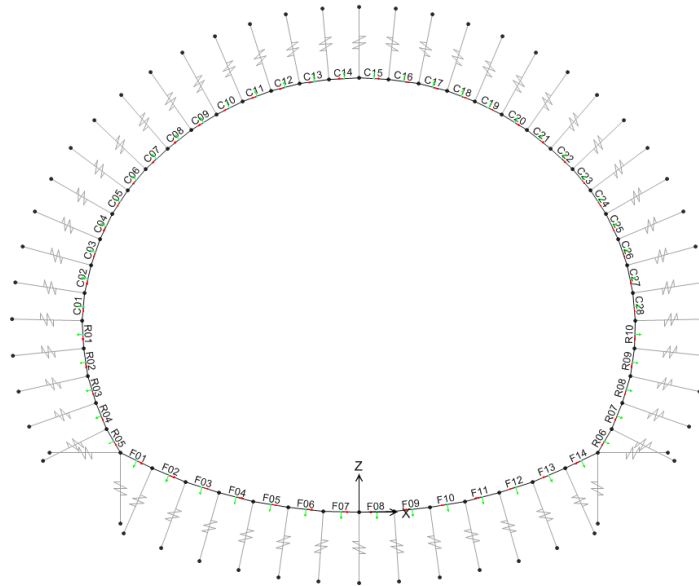


Abbildung 24: Modell CT2-T4

Illustrazione 24: Modello CT2-T4

SectionName	Material	Shape	t3
Text	Text	Text	m
C01	C30/37	Rectangular	0.39
C02	C30/37	Rectangular	0.36
C03	C30/37	Rectangular	0.33
C04	C30/37	Rectangular	0.31
C05	C30/37	Rectangular	0.3
C06	C30/37	Rectangular	0.3
C07	C30/37	Rectangular	0.3
C08	C30/37	Rectangular	0.3
C09	C30/37	Rectangular	0.3
C10	C30/37	Rectangular	0.3
C11	C30/37	Rectangular	0.3
C12	C30/37	Rectangular	0.3
C13	C30/37	Rectangular	0.3
C14	C30/37	Rectangular	0.3
C15	C30/37	Rectangular	0.3
C16	C30/37	Rectangular	0.3
C17	C30/37	Rectangular	0.3
C18	C30/37	Rectangular	0.3
C19	C30/37	Rectangular	0.3
C20	C30/37	Rectangular	0.3
C21	C30/37	Rectangular	0.3
C22	C30/37	Rectangular	0.3
C23	C30/37	Rectangular	0.3
C24	C30/37	Rectangular	0.3
C25	C30/37	Rectangular	0.31
C26	C30/37	Rectangular	0.33
C27	C30/37	Rectangular	0.36
C28	C30/37	Rectangular	0.39

SectionName	Material	Shape	t3
Text	Text	Text	m
F01	C30/37	Rectangular	0.35
F02	C30/37	Rectangular	0.35
F03	C30/37	Rectangular	0.35
F04	C30/37	Rectangular	0.35
F05	C30/37	Rectangular	0.35
F06	C30/37	Rectangular	0.35
F07	C30/37	Rectangular	0.35
F08	C30/37	Rectangular	0.35
F09	C30/37	Rectangular	0.35
F10	C30/37	Rectangular	0.35
F11	C30/37	Rectangular	0.35
F12	C30/37	Rectangular	0.35
F13	C30/37	Rectangular	0.35
F14	C30/37	Rectangular	0.35
R01	C30/37	Rectangular	0.43
R02	C30/37	Rectangular	0.47
R03	C30/37	Rectangular	0.47
R04	C30/37	Rectangular	0.47
R05	C30/37	Rectangular	0.35
R06	C30/37	Rectangular	0.35
R07	C30/37	Rectangular	0.47
R08	C30/37	Rectangular	0.47
R09	C30/37	Rectangular	0.47
R10	C30/37	Rectangular	0.43

Abbildung 25: Stärke der Ausbruchquerschnitte

Illustrazione 25: Spessore delle sezioni

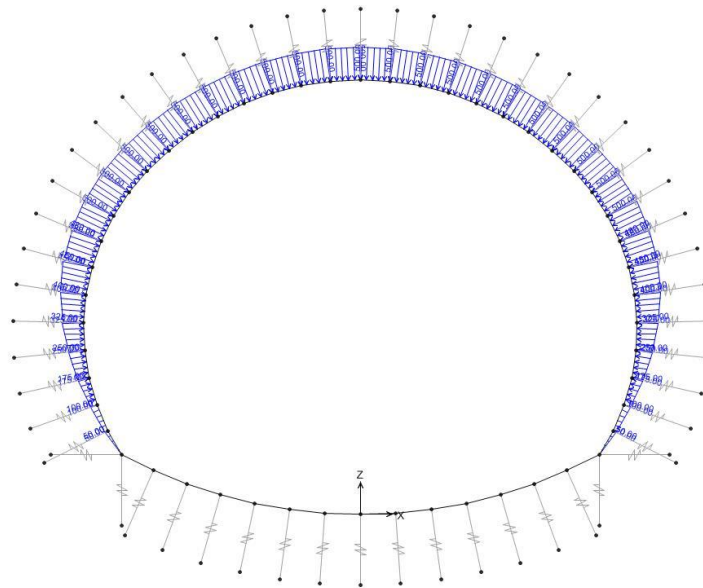


Abbildung 26: Gebirgslast (G5) aus FDM-Analyse

Illustrazione 26: Carico dell'ammasso (G5) da analisi FDM

Im Folgenden wird der Belastungsverlauf im Ausbruchquerschnitt bei der gravierendsten Kombination GZT06 aufgezeigt.

Di seguito viene riportato l'andamento delle sollecitazioni nella sezione nella combinazione più gravosa: SLU06.

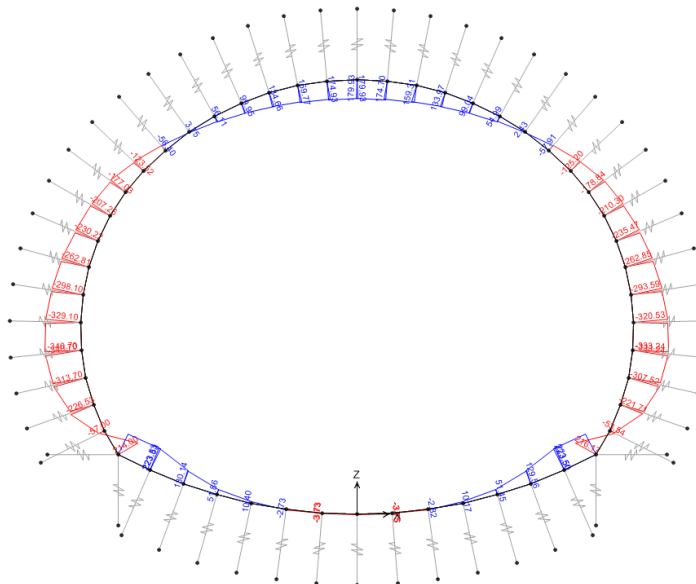


Abbildung 27: GZT06 - Biegemoment

Illustrazione 27: SLU06 - Momento flettente

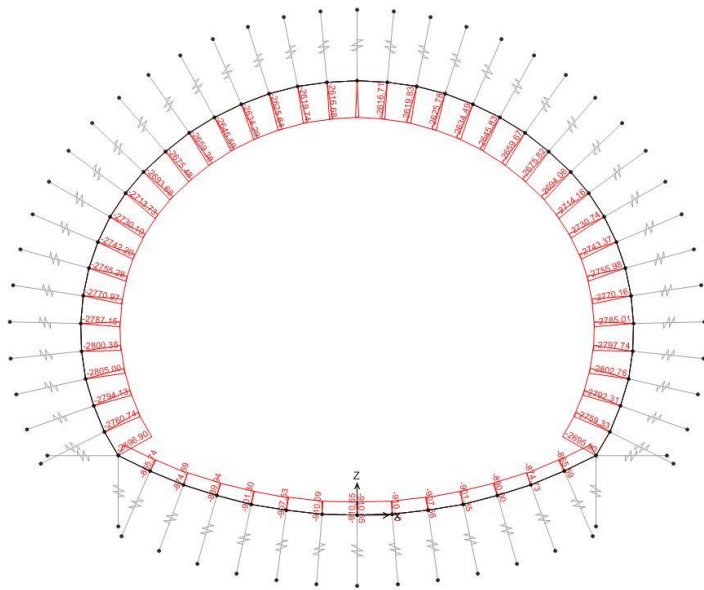


Abbildung 28: GZT06 - Axialwirkung

Illustrazione 28: SLU06 - Azione assiale

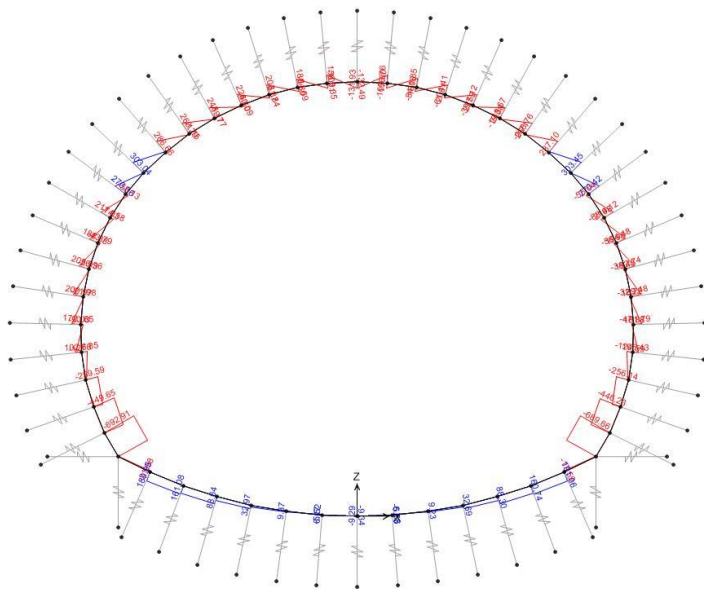


Abbildung 29: GZT06 - Schub

Illustrazione 29: SLU06 - Taglio

In folgenden Tabellen sind GZG- und GZT-Spannungsüberprüfungen der unbewehrten Ausbruchquerschnitte aufgezeigt.

Insbesondere:

Abbildung 30 - GZG Spannungsnachweis mit den vom Modell mit FLAC-Last entnommenen Belastungen.

Nelle seguenti tabelle sono riportate le verifiche tensionali agli SLE e agli SLU delle sezioni non armate.

In particolare:

Illustrazione 30 - Verifiche tensionali agli SLE con le sollecitazioni ricavate dal modello con carico da FLAC.

Illustrazione 31 - Verifiche tensionali agli SLU con le sollecitazioni ricavate dal modello con carico da FLAC. In questa

Abbildung 31 - GZT Spannungsnachweis mit den vom Modell mit FLAC-Last entnommenen Belastungen. In dieser Tabelle sind die Kombinationen aufgeführt die ohne Bildung der plastischen Scharniere festgestellt wurden.

Abbildung 32 - GZT Spannungsnachweis mit den vom Modell mit FLAC-Last entnommenen Belastungen. In dieser Tabelle sind die Kombinationen aufgeführt die mit Bildung 2 plastischen Scharniere festgestellt wurden (GZT06).

tabella sono riportate le combinazioni che sono verificate senza la formazione di cerniere plastiche.

Illustrazione 32 - Verifiche tensionali agli SLU con le sollecitazioni ricavate dal modello con carico da FLAC. In questa tabella sono riportate le combinazioni che sono state verificate con la formazione di 2 cerniere plastiche (SLU06).

TABLE: Element Forces - Frames			Positive le trazioni												VERIFICHE SLE			
Frame	OutputCase	StepType	Estradosso						Intradosso						σ <sub>max</sub>   < f <sub>tk</sub>	σ <sub>max</sub> < f <sub>tdk</sub>		
			P	V3	V2	T	M3	M2	h	σ <sub>1</sub>	σ <sub>2</sub>	σ <sub>3</sub>	σ <sub>4</sub>					
Text1	Text2	Text3	KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	KN-m	[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[ ]	[ ]
C01	SLE01	Max	-84.00	0.00	6.60	0.00	-11.84	0.00	0.58	0.066	-0.356	0.58	0.066	-0.356	OK	OK		
C01	SLE01	Max	-87.84	0.00	6.94	0.00	-14.51	0.00	0.58	0.107	-0.410	0.58	0.107	-0.410	OK	OK		
C02	SLE01	Max	-79.65	0.00	6.86	0.00	-8.97	0.00	0.55	0.033	-0.323	0.55	0.033	-0.323	OK	OK		
C02	SLE01	Max	-83.13	0.00	7.61	0.00	-11.84	0.00	0.55	0.084	-0.386	0.55	0.084	-0.386	OK	OK		
C03	SLE01	Max	-75.68	0.00	6.46	0.00	-6.21	0.00	0.53	-0.010	-0.275	0.53	-0.010	-0.275	OK	OK		
C03	SLE01	Max	-78.76	0.00	7.53	0.00	-8.97	0.00	0.53	0.043	-0.340	0.53	0.043	-0.340	OK	OK		
C04	SLE01	Max	-72.23	0.00	3.62	0.00	-4.51	0.00	0.51	-0.038	-0.246	0.51	-0.038	-0.246	OK	OK		
C04	SLE01	Max	-74.98	0.00	4.97	0.00	-6.21	0.00	0.51	-0.004	-0.290	0.51	-0.004	-0.290	OK	OK		
C05	SLE01	Max	-69.24	0.00	2.92	0.00	-3.03	0.00	0.50	-0.066	-0.211	0.50	-0.066	-0.211	OK	OK		
C05	SLE01	Max	-71.73	0.00	4.54	0.00	-4.51	0.00	0.50	-0.035	-0.252	0.50	-0.035	-0.252	OK	OK		
C06	SLE01	Max	-65.63	0.00	2.42	0.00	-1.70	0.00	0.50	-0.093	-0.174	0.50	-0.093	-0.174	OK	OK		
C06	SLE01	Max	-68.80	0.00	4.33	0.00	-3.03	0.00	0.50	-0.065	-0.210	0.50	-0.065	-0.210	OK	OK		
C07	SLE01	Max	-63.98	0.00	1.41	0.00	-0.62	0.00	0.50	-0.113	-0.143	0.50	-0.113	-0.143	OK	OK		
C07	SLE01	Max	-66.15	0.00	3.71	0.00	-1.70	0.00	0.50	-0.092	-0.173	0.50	-0.092	-0.173	OK	OK		
C08	SLE01	Max	-61.86	0.00	-0.10	0.00	-0.13	0.00	0.50	-0.121	-0.127	0.50	-0.121	-0.127	OK	OK		
C08	SLE01	Max	-63.79	0.00	2.40	0.00	-0.62	0.00	0.50	-0.113	-0.142	0.50	-0.113	-0.142	OK	OK		
C09	SLE01	Max	-60.12	0.00	-1.13	0.00	-0.04	0.00	0.50	-0.119	-0.121	0.50	-0.119	-0.121	OK	OK		
C09	SLE01	Max	-61.79	0.00	1.56	0.00	-0.13	0.00	0.50	-0.120	-0.127	0.50	-0.120	-0.127	OK	OK		
C10	SLE01	Max	-58.74	0.00	-1.74	0.00	-0.18	0.00	0.50	-0.113	-0.122	0.50	-0.113	-0.122	OK	OK		
C10	SLE01	Max	-60.12	0.00	1.10	0.00	-0.04	0.00	0.50	-0.119	-0.121	0.50	-0.119	-0.121	OK	OK		
C11	SLE01	Max	-57.68	0.00	-2.02	0.00	-0.41	0.00	0.50	-0.106	-0.125	0.50	-0.106	-0.125	OK	OK		
C11	SLE01	Max	-58.78	0.00	0.94	0.00	-0.18	0.00	0.50	-0.113	-0.122	0.50	-0.113	-0.122	OK	OK		
C12	SLE01	Max	-56.95	0.00	-2.05	0.00	-0.63	0.00	0.50	-0.099	-0.129	0.50	-0.099	-0.129	OK	OK		
C12	SLE01	Max	-57.73	0.00	1.01	0.00	-0.41	0.00	0.50	-0.116	-0.125	0.50	-0.116	-0.125	OK	OK		
C13	SLE01	Max	-56.51	0.00	-1.91	0.00	-0.77	0.00	0.50	-0.094	-0.132	0.50	-0.094	-0.132	OK	OK		
C13	SLE01	Max	-56.99	0.00	1.21	0.00	-0.63	0.00	0.50	-0.099	-0.129	0.50	-0.099	-0.129	OK	OK		
C14	SLE01	Max	-56.37	0.00	-1.67	0.00	-0.81	0.00	0.50	-0.093	-0.132	0.50	-0.093	-0.132	OK	OK		
C14	SLE01	Max	-56.53	0.00	1.49	0.00	-0.77	0.00	0.50	-0.094	-0.132	0.50	-0.094	-0.132	OK	OK		
C15	SLE01	Max	-56.37	0.00	-1.77	0.00	-0.81	0.00	0.50	-0.093	-0.132	0.50	-0.093	-0.132	OK	OK		
C15	SLE01	Max	-56.53	0.00	1.39	0.00	-0.73	0.00	0.50	-0.096	-0.131	0.50	-0.096	-0.131	OK	OK		
C16	SLE01	Max	-56.50	0.00	-2.02	0.00	-0.73	0.00	0.50	-0.095	-0.131	0.50	-0.095	-0.131	OK	OK		
C16	SLE01	Max	-56.97	0.00	1.11	0.00	-0.54	0.00	0.50	-0.101	-0.127	0.50	-0.101	-0.127	OK	OK		
C17	SLE01	Max	-56.92	0.00	-2.15	0.00	-0.54	0.00	0.50	-0.101	-0.127	0.50	-0.101	-0.127	OK	OK		
C17	SLE01	Max	-57.71	0.00	0.91	0.00	-0.28	0.00	0.50	-0.109	-0.122	0.50	-0.109	-0.122	OK	OK		
C18	SLE01	Max	-57.65	0.00	-2.10	0.00	-0.28	0.00	0.50	-0.109	-0.122	0.50	-0.109	-0.122	OK	OK		
C18	SLE01	Max	-58.74	0.00	0.87	0.00	-0.42	0.00	0.50	-0.117	-0.118	0.50	-0.117	-0.118	OK	OK		
C19	SLE01	Max	-58.70	0.00	-1.79	0.00	-0.02	0.00	0.50	-0.117	-0.118	0.50	-0.117	-0.118	OK	OK		
C19	SLE01	Max	-60.08	0.00	1.05	0.00	0.13	0.00	0.50	-0.123	-0.117	0.50	-0.123	-0.117	OK	OK		
C20	SLE01	Max	-60.08	0.00	-1.11	0.00	0.13	0.00	0.50	-0.123	-0.117	0.50	-0.123	-0.117	OK	OK		
C20	SLE01	Max	-61.75	0.00	1.57	0.00	0.04	0.00	0.50	-0.124	-0.123	0.50	-0.124	-0.123	OK	OK		
C21	SLE01	Max	-61.83	0.00	0.01	0.00	0.09	0.00	0.50	-0.125	-0.123	0.50	-0.125	-0.123	OK	OK		
C21	SLE01	Max	-63.76	0.00	2.51	0.00	-0.49	0.00	0.50	-0.116	-0.139	0.50	-0.116	-0.139	OK	OK		
C22	SLE01	Max	-63.97	0.00	1.66	0.00	-0.49	0.00	0.50	-0.116	-0.140	0.50	-0.116	-0.140	OK	OK		
C22	SLE01	Max	-66.14	0.00	3.96	0.00	-1.68	0.00	0.50	-0.092	-0.173	0.50	-0.092	-0.173	OK	OK		
C23	SLE01	Max	-66.55	0.00	2.84	0.00	-1.68	0.00	0.50	-0.093	-0.173	0.50	-0.093	-0.173	OK	OK		
C23	SLE01	Max	-68.82	0.00	4.76	0.00	-3.18	0.00	0.50	-0.061	-0.214	0.50	-0.061	-0.214	OK	OK		
C24	SLE01	Max	-69.33	0.00	3.56	0.00	-3.18	0.00	0.50	-0.062	-0.215	0.50	-0.062	-0.215	OK	OK		
C24	SLE01	Max	-71.81	0.00	5.19	0.00	-4.91	0.00	0.50	-0.026	-0.261	0.50	-0.026	-0.261	OK	OK		
C25	SLE01	Max	-72.41	0.00	4.51	0.00	-4.91	0.00	0.51	-0.029	-0.255	0.51	-0.029	-0.255	OK	OK		
C25	SLE01	Max	-75.16	0.00	5.86	0.00	-6.96	0.00	0.51	0.013	-0.308	0.51	0.013	-0.308	OK	OK		
C26	SLE01	Max	-75.85	0.00	5.47	0.00	-6.96	0.00	0.53	0.006	-0.292	0.53	0.006	-0.292	OK	OK		
C26	SLE01	Max	-78.94	0.00	6.53	0.00	-9.33	0.00	0.53	0.050	-0.348	0.53	0.050	-0.348	OK	OK		
C27	SLE01	Max	-79.72	0.00	6.12	0.00	-9.33	0.00	0.55	0.040	-0.330	0.55	0.040	-0.330	OK	OK		
C27	SLE01	Max	-83.30	0.00	6.86	0.00	-11.90	0.00	0.55	0.085	-0.387	0.55	0.085	-0.387	OK	OK		
C28	SLE01	Max	-83.99	0.00	6.09	0.00	-11.90	0.00	0.58	0.067	-0.357	0.58	0.067	-0.357	OK	OK		
C28	SLE01	Max	-87.83	0.00	6.42	0.00	-14.38	0.00	0.58	0.105	-0.408	0.58	0.105	-0.408	OK	OK		
F01	SLE01	Max	-66.00	0.00	-33.02	0.00	-5.69	0.00	0.63	-0.019	-0.191	0.63	-0.019	-0.191	OK	OK		
F01	SLE01	Max	-68.08	0.00	-37.30	0.00	11.91	0.00	0.63	-0.288	0.072	0.63	-0.288	0.072	OK	OK		
F02	SLE01	Max	-67.02	0.00	6.89	0.00	11.91	0.00	0.63	-0.286	0.074	0.63	-0.286	0.074	OK	OK		
F02	SLE01	Max	-69.31	0.00	1.19	0.00	9.80	0.00	0.63	-0.258	0.098	0.63	-0.258	0.098	OK	OK		
F03	SLE01	Max	-69.92	0.00	16.28	0.00	9.80	0.00	0.63	-0.259	0.037	0.63	-0.259	0.037	OK	OK		
F03	SLE01	Max	-72.36	0.00	8.77	0.00	3.47	0.00	0.63	-0.167	-0.062	0.63	-0.167	-0.062	OK	OK		
F04	SLE01	Max	-73.14	0.00	13.69	0.00	3.47	0.00	0.63	-0.169	-0.064	0.63	-0.169	-0.064	OK	OK		
F04	SLE01	Max	-75.38	0.00	4.69	0.00	-1.19	0.00	0.63	-0.102	-0.138	0.63	-0.102	-0.138	OK	OK		
F05	SLE01	Max	-75.87	0.00	9.44	0.00	-1.19	0.00	0.63	-0.102	-0.138	0.63	-0.102	-0.138	OK	OK		
F05	SLE01	Max	-77.65	0.00	-0.74	0.00	-3.41	0.00	0.63	-0.072	-0.175	0.63	-0.072	-0.175	OK	OK		
F06	SLE01	Max	-77.87	0.00	6.89	0.00	-3.41	0.00	0.63	-0.072	-0.175	0.63	-0.072	-0.175	OK	OK		
F06	SLE01	Max	-79.03	0.00	-4.14	0.00	-4.12	0.00	0.63	-0.063	-0.188	0.63	-0.063	-0.188	OK	OK		
F07	SLE01	Max	-79.09	0.00	5.96	0.00	-4.12	0.00	0.63	-0.063	-0.188	0.63	-0.063	-0.188	OK	OK		
F07	SLE01	Max	-79.49	0.00	-5.50	0.00	-4.24	0.00	0.63	-0.062	-0.190	0.63	-0.062	-0.190	OK	OK		
F08	SLE01	Max	-79.09	0.00	5.95	0.00	-4.13	0.00	0.63	-0.063	-0.188	0.63	-0.063	-0.188	OK	OK		
F08	SLE01	Max	-79.49	0.00	-5.51	0.00	-4.24	0.00	0.63	-0.062	-0.190	0.63	-0.062	-0.190	OK	OK		
F09	SLE01	Max	-77.87	0.00	6.87	0.00	-3.42	0.00	0.63	-0.072	-0.175	0.63	-0.072	-0.175	OK	OK		
F09	SLE01	Max	-79.03	0.00	-4.15	0.00	-4.13	0.00	0.63	-0.063	-0.188	0.63	-0.063	-0.188	OK	OK		
F10	SLE01	Max	-75.87	0.00	9.44	0.00	-1.20	0.00	0.63	-0.102	-0.139	0.63	-0.102	-0.139	OK	OK		
F10	SLE01	Max	-77.66	0.00	-0.74	0.00	-3.42	0.00	0.63	-0.072	-0.175	0.63	-0.072	-0.175	OK	OK		
F11	SLE01	Max	-73.14	0.00	13.73	0.00	3.48	0.00	0.63									

TABLE: Element Forces - Frames										Positive le trazioni			VERIFICHE SLE			
Frame	OutputCase	StepType	P		V3		V2		T	M3	M2	h	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$ \sigma_{max}  < f_{tk}$	$\sigma_{max} < f_{tk}$
Text1	Text	Text	KN	KN	KN	KN-n	KN-n	KN-n	KN-n	KN-n	KN-n	[m]	[MPa]	[MPa]	[ ]	[ ]
C01	SLE02	Max	-41.56	0.00	-0.16	0.00	-24.99	0.00	0.58	0.374	-0.517				OK	OK
C01	SLE02	Max	-45.40	0.00	0.18	0.00	-25.00	0.00	0.58	0.368	-0.524				OK	OK
C02	SLE02	Max	-37.89	0.00	2.47	0.00	-23.87	0.00	0.55	0.405	-0.542				OK	OK
C02	SLE02	Max	-41.37	0.00	3.21	0.00	-24.99	0.00	0.55	0.421	-0.571				OK	OK
C03	SLE02	Max	-34.22	0.00	5.94	0.00	-21.31	0.00	0.53	0.391	-0.520				OK	OK
C03	SLE02	Max	-37.31	0.00	7.00	0.00	-23.87	0.00	0.53	0.439	-0.580				OK	OK
C04	SLE02	Max	-30.49	0.00	8.73	0.00	-17.59	0.00	0.51	0.346	-0.466				OK	OK
C04	SLE02	Max	-33.24	0.00	10.08	0.00	-21.31	0.00	0.51	0.426	-0.557				OK	OK
C05	SLE02	Max	-26.71	0.00	10.77	0.00	-13.01	0.00	0.50	0.259	-0.366				OK	OK
C05	SLE02	Max	-29.19	0.00	12.40	0.00	-17.59	0.00	0.50	0.364	-0.481				OK	OK
C06	SLE02	Max	-22.92	0.00	12.05	0.00	-7.87	0.00	0.50	0.143	-0.235				OK	OK
C06	SLE02	Max	-25.19	0.00	13.96	0.00	-13.01	0.00	0.50	0.262	-0.363				OK	OK
C07	SLE02	Max	-19.26	0.00	12.23	0.00	-2.23	0.00	0.50	0.015	-0.092				OK	OK
C07	SLE02	Max	-21.43	0.00	14.53	0.00	-7.87	0.00	0.50	0.146	-0.232				OK	OK
C08	SLE02	Max	-16.00	0.00	11.61	0.00	3.19	0.00	0.50	-0.109	0.045				OK	OK
C08	SLE02	Max	-17.93	0.00	14.11	0.00	-2.23	0.00	0.50	0.018	-0.089				OK	OK
C09	SLE02	Max	-13.08	0.00	10.48	0.00	8.17	0.00	0.50	-0.222	0.170				OK	OK
C09	SLE02	Max	-14.75	0.00	13.16	0.00	3.19	0.00	0.50	-0.106	0.047				OK	OK
C10	SLE02	Max	-10.57	0.00	8.90	0.00	12.52	0.00	0.50	-0.322	0.279				OK	OK
C10	SLE02	Max	-11.96	0.00	11.74	0.00	8.17	0.00	0.50	-0.220	0.172				OK	OK
C11	SLE02	Max	-8.53	0.00	6.96	0.00	16.08	0.00	0.50	-0.403	0.369				OK	OK
C11	SLE02	Max	-9.62	0.00	9.92	0.00	12.52	0.00	0.50	-0.320	0.281				OK	OK
C12	SLE02	Max	-7.00	0.00	4.72	0.00	18.72	0.00	0.50	-0.463	0.435				OK	OK
C12	SLE02	Max	-7.78	0.00	7.78	0.00	16.08	0.00	0.50	-0.403	0.370				OK	OK
C13	SLE02	Max	-6.01	0.00	2.28	0.00	20.33	0.00	0.50	-0.500	0.476				OK	OK
C13	SLE02	Max	-6.48	0.00	5.40	0.00	18.72	0.00	0.50	-0.462	0.436				OK	OK
C14	SLE02	Max	-5.59	0.00	-0.28	0.00	20.88	0.00	0.50	-0.512	0.490				OK	OK
C14	SLE02	Max	-5.75	0.00	2.87	0.00	20.33	0.00	0.50	-0.500	0.477				OK	OK
C15	SLE02	Max	-5.59	0.00	-0.28	0.00	20.88	0.00	0.50	-0.512	0.490				OK	OK
C15	SLE02	Max	-5.75	0.00	2.87	0.00	20.33	0.00	0.50	-0.500	0.477				OK	OK
C16	SLE02	Max	-6.01	0.00	2.28	0.00	20.33	0.00	0.50	-0.500	0.476				OK	OK
C16	SLE02	Max	-6.48	0.00	5.40	0.00	18.72	0.00	0.50	-0.462	0.436				OK	OK
C17	SLE02	Max	-7.00	0.00	4.72	0.00	18.72	0.00	0.50	-0.463	0.435				OK	OK
C17	SLE02	Max	-7.78	0.00	7.78	0.00	16.08	0.00	0.50	-0.401	0.370				OK	OK
C18	SLE02	Max	-8.53	0.00	6.96	0.00	16.08	0.00	0.50	-0.403	0.369				OK	OK
C18	SLE02	Max	-9.62	0.00	9.92	0.00	12.52	0.00	0.50	-0.320	0.281				OK	OK
C19	SLE02	Max	-10.57	0.00	8.90	0.00	12.52	0.00	0.50	-0.322	0.279				OK	OK
C19	SLE02	Max	-11.96	0.00	11.74	0.00	8.17	0.00	0.50	-0.220	0.172				OK	OK
C20	SLE02	Max	-13.08	0.00	10.48	0.00	8.17	0.00	0.50	-0.222	0.170				OK	OK
C20	SLE02	Max	-14.75	0.00	13.16	0.00	3.19	0.00	0.50	-0.106	0.047				OK	OK
C21	SLE02	Max	-16.00	0.00	11.61	0.00	3.19	0.00	0.50	-0.109	0.045				OK	OK
C21	SLE02	Max	-17.93	0.00	14.11	0.00	-2.23	0.00	0.50	0.018	-0.089				OK	OK
C22	SLE02	Max	-19.26	0.00	12.23	0.00	-2.23	0.00	0.50	0.015	-0.092				OK	OK
C22	SLE02	Max	-21.43	0.00	14.53	0.00	-7.87	0.00	0.50	0.146	-0.232				OK	OK
C23	SLE02	Max	-22.92	0.00	12.05	0.00	-7.87	0.00	0.50	0.143	-0.235				OK	OK
C23	SLE02	Max	-25.19	0.00	13.96	0.00	-13.01	0.00	0.50	0.262	-0.363				OK	OK
C24	SLE02	Max	-26.71	0.00	10.77	0.00	-13.01	0.00	0.50	0.259	-0.366				OK	OK
C24	SLE02	Max	-29.19	0.00	12.40	0.00	-17.59	0.00	0.50	0.364	-0.481				OK	OK
C25	SLE02	Max	-30.49	0.00	8.73	0.00	-17.59	0.00	0.51	0.346	-0.466				OK	OK
C25	SLE02	Max	-33.24	0.00	10.08	0.00	-21.31	0.00	0.51	0.426	-0.557				OK	OK
C26	SLE02	Max	-34.22	0.00	5.94	0.00	-21.31	0.00	0.53	0.391	-0.520				OK	OK
C26	SLE02	Max	-37.31	0.00	7.00	0.00	-23.87	0.00	0.53	0.439	-0.580				OK	OK
C27	SLE02	Max	-37.89	0.00	2.47	0.00	-23.87	0.00	0.55	0.405	-0.542				OK	OK
C27	SLE02	Max	-41.37	0.00	3.21	0.00	-24.99	0.00	0.55	0.421	-0.571				OK	OK
C28	SLE02	Max	-41.56	0.00	-0.16	0.00	-24.99	0.00	0.58	0.374	-0.517				OK	OK
C28	SLE02	Max	-45.40	0.00	0.18	0.00	-25.00	0.00	0.58	0.368	-0.524				OK	OK
F01	SLE02	Max	2.56	0.00	10.76	0.00	4.84	0.00	0.63	-0.069	0.077				OK	OK
F01	SLE02	Max	0.48	0.00	6.48	0.00	0.49	0.00	0.63	-0.007	0.008				OK	OK
F02	SLE02	Max	0.02	0.00	6.50	0.00	0.49	0.00	0.63	-0.007	0.007				OK	OK
F02	SLE02	Max	-2.27	0.00	0.80	0.00	-1.42	0.00	0.63	0.018	-0.025				OK	OK
F03	SLE02	Max	-2.32	0.00	0.64	0.00	-1.42	0.00	0.63	0.018	-0.025				OK	OK
F03	SLE02	Max	-4.75	0.00	-6.87	0.00	0.08	0.00	0.63	-0.009	-0.006				OK	OK
F04	SLE02	Max	-4.53	0.00	0.29	0.00	0.08	0.00	0.63	-0.008	-0.006				OK	OK
F04	SLE02	Max	-6.76	0.00	-8.71	0.00	2.14	0.00	0.63	-0.043	0.022				OK	OK
F05	SLE02	Max	-6.54	0.00	2.37	0.00	2.14	0.00	0.63	-0.043	0.022				OK	OK
F05	SLE02	Max	-8.33	0.00	-7.82	0.00	3.47	0.00	0.63	-0.066	0.039				OK	OK
F06	SLE02	Max	-8.21	0.00	4.29	0.00	3.47	0.00	0.63	-0.066	0.039				OK	OK
F06	SLE02	Max	-9.37	0.00	-6.74	0.00	4.06	0.00	0.63	-0.076	0.047				OK	OK
F07	SLE02	Max	-9.32	0.00	5.41	0.00	4.06	0.00	0.63	-0.076	0.047				OK	OK
F07	SLE02	Max	-9.72	0.00	-6.05	0.00	4.22	0.00	0.63	-0.079	0.048				OK	OK
F08	SLE02	Max	-9.32	0.00	5.41	0.00	4.06	0.00	0.63	-0.076	0.047				OK	OK
F08	SLE02	Max	-9.72	0.00	-6.05	0.00	4.22	0.00	0.63	-0.079	0.048				OK	OK
F09	SLE02	Max	-8.21	0.00	4.29	0.00	3.47	0.00	0.63	-0.066	0.039				OK	OK
F09	SLE02	Max	-9.37	0.00	-6.74	0.00	4.06	0.00	0.63	-0.076	0.047				OK	OK
F10	SLE02	Max	-6.54	0.00	2.37	0.00	2.14	0.00	0.63	-0.043	0.022				OK	OK
F10	SLE02	Max	-8.33	0.00	-7.82	0.00	3.47	0.00	0.63	-0.066	0.039				OK	OK
F11	SLE02	Max	-4.53	0.00	0.29	0.00	0.08	0.00	0.63	-0.008	-0.006				OK	OK
F11	SLE02	Max	-6.76	0.00	-8.71	0.00	2.14	0.00	0.63	-0.043	0.022				OK	OK
F12	SLE02	Max	-2.32	0.00	0.64	0.00	-1.42	0.00	0.63	0.018	-0.025				OK	OK
F12	SLE02	Max	-4.75	0.00	-6.87	0.00	0.08	0.00	0.63	-0.009	-0.006				OK	OK
F13	SLE02	Max	0.02	0.00	6.50	0.00	0.49	0.00	0.63	-0.007	0.007				OK	OK
F13	SLE02	Max	-2.27	0.00	0.80	0.00	-1.42	0.00	0.63	0.018	-0.025				OK	OK
F14	SLE02	Max	2.56	0.00	10.76	0.00	4.84	0.00	0.63	-0.069	0.077				OK	OK
F14	SLE02	Max	0.48	0.00	6.48	0.00	0.49	0.00	0.63	-0.007	0.008				OK	OK
R01	SLE02	Max	-45.23	0.00	-2.97	0.00	-25.00	0.00	0.62	0.317	-0.463				OK	OK
R01	SLE02	Max	-49.48	0.00	-3.12	0.00	-23.79	0.00	0.62	0.292	-0.451				OK	OK
R02	SLE02	Max	-48.86	0.00	-6.87	0.00	-23.79	0.00	0.66	0.254	-0.402				OK	OK
R02	SLE02	Max	-53.45	0.00	-7.60	0.00	-20.93	0.00	0.66	0.207	-0.369				OK	OK
R03	SLE02	Max	-52.21	0.00	-12.62	0.00	-20.93	0.00	0.71	0.176	-0.323				OK	OK
R03	SLE02	Max	-56.68	0.00												



Forme / OutputCase / (StyleType)			P	V3	V2	T	M3	M2	VERIFICA DELLA SEZIONE NON ARMATA CONSIDERANDO $\rho = 0$													VERIFICA DELLA SEZIONE NON ARMATA CONSIDERANDO $\rho$ E CALCESTRUZZO RESISTENTE A TRAZIONE $F_{ct}$															
								Positive in compressione						Positive in trazione							Positive in compressione						Positive in trazione										
Text	Text	Text	EN	EN	EN	EN	EN	EN	$\rho$ [m <sup>2</sup> ]	$\rho_{min}$ [%]	$\rho_{max}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	$\rho_{lim}$ [%]	
Forme	OutputCase	StyleType	P	V3	V2	T	M3	M2	h	s	$\sigma_{smax}$ [MPa]	$\sigma_{smid}$ [MPa]	$\sigma_{smin}$ [MPa]	$\sigma_{smid}$ [MPa]	$\sigma_{smin}$ [MPa]	$\sigma_{smid}$ [MPa]	$\sigma_{smin}$ [MPa]	$\sigma_{smid}$ [MPa]	$\sigma_{smin}$ [MPa]	$\sigma_{smid}$ [MPa]	$\sigma_{smin}$ [MPa]	$\sigma_{smid}$ [MPa]	$\sigma_{smin}$ [MPa]	$\sigma_{smid}$ [MPa]	$\sigma_{smin}$ [MPa]	$\sigma_{smid}$ [MPa]	$\sigma_{smin}$ [MPa]	$\sigma_{smid}$ [MPa]	$\sigma_{smin}$ [MPa]	$\sigma_{smid}$ [MPa]	$\sigma_{smin}$ [MPa]	$\sigma_{smid}$ [MPa]	$\sigma_{smin}$ [MPa]	$\sigma_{smid}$ [MPa]			
C01	SLL025	Max	-14.48	0.00	0.00	-14.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
C02	SLL025	Max	-14.42	0.00	0.00	-14.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
C03	SLL025	Max	-14.48	0.00	0.00	-14.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C04	SLL025	Max	-8.20	0.00	0.00	-8.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C05	SLL025	Max	-17.38	0.00	0.00	-17.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00







