



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

Ausführungsprojekt

Potenziamento Asse Ferroviario Monaco-Verona

# GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO

Progetto Esecutivo

## Sub-Baulos Hauptbauwerke Eisackunterquerung Sublotto di costruzione Opere Principali Sottoattraversamento Isarco

<b>Fachbereich</b> 06 – Bauwerksplanung				<b>Settore</b> 06-Progettazione delle opere						
<b>Dokumentenart</b> 01 - Allgemeine Dokumente				<b>Tema</b> 01 - Documenti generali						
<b>Dokumentenart</b> Technischer Bericht				<b>Tipo documento</b> Relazione tecnica						
<b>Titel</b> Baulicher Brandschutz - Vorgangsweise zum Lastfall Brand (passiver Brandschutz)				<b>Titolo</b> Protezione costruttiva all'incendio (passiva) – Procedimento per la verifica della resistenza al fuoco						
Ausführende Unternehmen / Imprese esecutrici		Beauftragte / Mandataria: <b>salini impregilo</b>		Bearbeitung des Dokuments / Elaborazione del documento		 <b>Giovanna Cassani</b> ORDINE INGEGNERI DI MILANO n. 20997 				
 Auftraggeber / Mandanti: <b>STRABAG</b> CONSORZIO COOPERATIVE COSTRUZIONI CCC Societa' cooperativa <b>COLLINI LAVORI S.p.A.</b>		Datum/Data 14.01.2016		Name/Nome M. Gatti						
Koordination Planung / Coordinamento progettazione		Planer / Beauftragte / Progettisti: Mandataria: <b>rpa</b>		Bearbeitet / Elaborato		14.01.2016				
 Ergänzung Sachmännische Dienstleistungen n° 4829 Integrazione prestazioni specialistiche Dott. Ing. Dino Bonadies  <b>GPingegneria</b> GESTIONE PROGETTI D'INGEGNERIA srl  		Geprüft / Verificato 14.01.2016 G. Cassani		Freigegeben / Autorizzato 14.01.2016 N. Meister 						
		Gesehen BBT / Visto BBT_RUP A. Lombardi		Massstab / Scala -						
Projekt-kilometer / Progressiva di progetto		von / da 54+015 bis / a 56+100 bei / al		Bau-kilometer / Chilometro opera		von / da 54+015 bis / a 56+100 bei / al				
Status Dokument / Stato documento										
Staat / Stato	Los / Lotto	Einheit / Unità	Nummer / Numero	Fachbereich / Settore	Thema / Tema	ID Numm. / Num. ID	Vertrag / Contratto	Nummer / Codice	Dok.art / Tipo doc.	Revision / Revisione
02	H71	AF	002	06	01	010.00	B0115	01585	RT5	01

Fachbereich:  
Thema:  
Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
Tema: Documenti generali  
Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

<b>Bearbeitungsstand Stato di elaborazione</b>			
Revision Revisione	Änderungen / Cambiamenti	Verantwortlicher Änderung Responsabile modifica	Datum Data
02			
01	Anmerkungen BBT vom 15.12.2015 / Osservazioni BBT del 15.12.2015	M.Gatti	14.01.2016
00	Erstversion Prima Versione	G.Bionda	06.08.2015

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	
<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>ALLGEMEINE EINORDNUNG</b>	
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO GENERALE</b> .....	<b>6</b>
2.1	DAS BAULOS "EISACKUNTERQUERUNG"	
2.1	IL LOTTO DI COSTRUZIONE "SOTTOATTRA-VERSAMENTO ISARCO".....	6
2.1.1	BAUWERKE ZUM SUB-BAULOS "VORBEREITUNGS-MAßNAHMEN EISACKUNTERQUERUNG"	
2.1.1	OPERE DEL SUBLOTTO "OPERE PROPEDEUTICHE SOTTOATTRAVERSAMENTO ISARCO".....	6
2.2	BAUWERKE DES SUB-BAULOSES "HAUPTWERKE EISACKUNTERQUERUNG"	
2.2	OPERE DEL SUBLOTTO "OPERE PRINCIPALI SOTTOATTRAVERSAMENTO ISARCO".....	6
2.3	BAUWERKE DES SUB-BAULOSES „HAUPTWERKE EISACKUNTERQUERUNG“, DIE NICHT BESTANDTEIL DER PLANUNG SIND	
2.3	OPERE DEL SUBLOTTO "OPERE PRINCIPALI SOTTOATTRAVERSAMENTO ISARCO" NON OGGETTO DI PROGETTAZIONE.....	10
<b>3</b>	<b>METHODIK UND LEISTUNGSSTUFEN IM TUNNEL</b>	
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA E LIVELLO DI PRESTAZIONE IN GALLERIA</b> .....	<b>12</b>
3.1	METHODIK	
3.1	METODOLOGIA.....	12
3.2	LEISTUNGSSTUFEN IN GESCHLOSSENER BAUWEISE	
3.2	LIVELLI DI PRESTAZIONE PER METODO DI COSTRUZIONE IN NATURALE.....	12
3.2.1	Leistungsstufe 0 (entspricht Stufe 3 von NTC 2008)	
3.2.1	Livello di prestazione 0 (corrispondente al livello 3 delle norme NTC 2008).....	12
3.2.2	Leistungsstufe 1 (entspricht Stufe 4 von NTC 2008)	
3.2.2	Livello di prestazione 1 (corrispondente al livello 4 delle norme NTC 2008).....	12
3.2.3	Leistungsstufe 2 (entspricht Stufe 5 von NTC 2008)	
3.2.3	Livello di prestazione 2 (corrispondente al livello 5 delle norme NTC 2008).....	13
3.2.4	Leistungsstufe 2 (entspricht Stufe 5 von NTC 2008)	
3.2.4	Copriferro.....	13
<b>4</b>	<b>NACHWEISE ZUM LASTFALL BRAND</b>	
<b>4</b>	<b>VERIFICHE AL FUOCO</b> .....	<b>15</b>
4.1	KOMBINIERTE THERMISCH-MECHANISCHE ANALYSE – FLAC 7.0	
4.1	ANALISI ACCOPPIATA TERMO-MECCANICA – FLAC 7.0.....	18
4.2	KOMBINIERTE THERMISCH-MECHANISCHE ANALYSE – SAP2000	
4.2	ANALISI ACCOPPIATA TERMO-MECCANICA – SAP2000.....	19
4.3	MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN BEI WÄRME	

4.3	PROPRIETÀ MECCANICHE A CALDO .....	20
4.4	THERMISCHE EIGENSCHAFTEN	
4.4	PROPRIETÀ TERMICHE .....	30
4.5	WÄRMEÜBERTRAGUNGSMODELL	
4.5	MODELLO DI TRASMISSIONE DEL CALORE .....	34
4.6	BERECHNUNGSPHASEN	
4.6	FASI DI CALCOLO .....	35
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE</b>	
<b>5</b>	<b>SINTESI DEI RISULTATI.....</b>	<b>37</b>
5.1	QUERSCHNITT N2-TP-4,9	
5.1	SEZIONE N2-TP-4,9 – ANALISI STRUTTURALE .....	38
5.1.1	Temperaturverteilung	
5.1.1	Distribuzione di temperatura.....	38
5.1.2	Entwicklung des Elastizitätsmoduls	
5.1.2	Evoluzione del modulo elastico .....	41
5.1.3	Entwicklung der Festigkeitsparameter des Betons	
5.1.3	Evoluzione parametri di resistenza del calcestruzzo .....	43
5.1.4	Spannungs- und Verformungszustände	
5.1.4	Stati tensionali e deformativi.....	45
5.1.5	Wirkungen in den Auskleidungen	
5.1.5	Azioni nei rivestimenti.....	49
5.2	NACHWEISE AN QUERSCHNITTEN BEI WÄRME	
5.2	VERIFICHE SEZIONALI DOMINIO A CALDO .....	51
5.2.1	Berechnungssoftware: RAF 10.0 (AZTEC INFORMATICA©)	
5.2.1	Programma di calcolo: RAF 10.0 (AZTEC INFORMATICA©) .....	51
5.2.2	Berechnungs- und Nachweisverfahren	
5.2.2	Procedura di calcolo e verifica.....	52
5.2.3	Thermische Eigenschaften der Werkstoffe	
5.2.3	Caratteristiche termiche dei materiali .....	52
5.3	BERECHNUNGSMODELL, RANDBEDINGUNGEN UND ERGEBNISSE DES NACHWEISES	
5.3	MODELLO DI CALCOLO, CONDIZIONI AL CONTORNO E RISULTATI DELLA VERIFICA.....	55
5.3.1	Sezione tipo N2-TP-4,9	
5.3.1	Sezione tipo N2-TP-4,9 .....	56
5.4	ANALISI IN PRESENZA DI SPALLING	
5.4	ANALISI IN PRESENZA DI SPALLING .....	59

## 6 VERZEICHNISSE

<b>6 ELENCHI .....</b>	<b>60</b>
6.1 ABBILDUNGSVERZEICHNIS	
6.1 ELENCO DELLE ILLUSTRAZIONI.....	60
6.2 BIBLIOGRAFIE UND QUELLEN	
6.2 BIBLIOGRAFIA E FONTI .....	64
6.2.1 Dokumente der Ausschreibungsplanung	
6.2.1 Documenti del progetto esecutivo .....	64
6.2.2 Normen und Richtlinien	
6.2.2 Normativa e Linee Guida.....	64

Fachbereich:  
Thema:  
Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
Tema: Documenti generali  
Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

## 1 EINLEITUNG

Das Baulos "Eisackunterquerung" bildet den südlichsten Teil des Brenner Basistunnels vor der Einfahrt in den Bahnhof Franzensfeste und liegt ca. 1 km nördlich von Franzensfeste, in der Ortschaft Oberau in der Provinz Bozen.

Das Baulos umfasst im Wesentlichen die unterirdischen Rohbauarbeiten und die Außenarbeiten, welche im Arbeitsplan 2010 und nachfolgenden Aktualisierungen des Brenner Basistunnels angegeben sind.

Die geplanten Arbeiten bilden daher "ein nicht funktionstechnisches Baulos", das zum Gesamtprojekt Brenner-Basistunnel angehört.

Die Projekt- und funktionalen Anforderungen der geplanten Bauwerke entsprechen jenen des Einreichprojektes des Brenner Basistunnels, das von den zuständigen Behörden genehmigt worden ist.

Die geplanten Bauwerke umfassen ferner die im Zuge der diversen Genehmigungsverfahren erteilten Auflagen, die Optimierungen, die detaillierte Beschreibung der im Rahmen der grenzüberschreitenden Regelplanung erarbeiteten Standards sowie die Ergebnisse der im Zeitraum 2010-2011 durchgeführten zusätzlichen Bohrkampagnen und danach im Jahr 2015 der vorbereitenden Maßnahme zur Erstellung des Ausführungsprojekts, mit besonderer Bezugnahme auf die Aktualisierung des hydrogeologischen Modells.

Festgelegte Schnittstellen und Baustandards erlauben die Einbindung von Infrastrukturen und Anlagen der unterschiedlichen Baulose nach dem Brenner-Basistunnel-Arbeitsplan, zu dem das Baulos "Eisackunterquerung" gehört.

Das Baulos "Eisackunterquerung" ist wiederum in die 2 folgenden Sub-Baulose unterteilt:

- Sub-Baulos "Vorbereitungsmaßnahmen Eisack-Unterquerung", wozu der Ausführungsplan erarbeitet worden ist
- Sub-Baulos "Hauptbauwerke Eisackunterquerung", das Gegenstand des vorliegenden Ausführungsplans ist.

## 1 INTRODUZIONE

Il lotto di costruzione "Sottoattraversamento Isarco", costituisce la parte estrema meridionale della Galleria di Base del Brennero prima dell'accesso nella stazione di Fortezza, ed è ubicato ca. 1 Km a nord dell'abitato di Fortezza, in località Prà di Sopra, in Provincia di Bolzano.

Il lotto di costruzione comprende essenzialmente le opere civili grezze in sotterraneo e le opere esterne individuate dal programma lavori 2010 e successivi aggiornamenti della Galleria di Base del Brennero.

Le opere progettate costituiscono pertanto un "lotto costruttivo non funzionale" facente parte del progetto complessivo della Galleria di Base del Brennero.

I requisiti di progetto e funzionali delle opere progettate rispondono a quelli del progetto definitivo della Galleria di Base del Brennero che ha ottenuto l'approvazione da parte delle autorità competenti.

Le opere progettate inoltre recepiscono le prescrizioni impartite nel corso dei diversi iter autorizzativi, le ottimizzazioni e le specificazioni di standard elaborati nell'ambito della progettazione guida transfrontaliera, nonché i risultati delle campagne geognostiche integrative effettuate negli anni 2010-2011, e successivamente nel 2015 propedeutica alla predisposizione del progetto esecutivo, con particolare riferimento all'aggiornamento del modello idrogeologico.

Le interfacce e gli standard di costruzione definiti consentono l'integrazione delle infrastrutture e delle dotazioni impiantistiche dei diversi lotti di costruzione previsti dal programma lavori della Galleria di base del Brennero, tra i quali è compreso il lotto di costruzione "Sottoattraversamento Isarco".

Il lotto di costruzione "Sottoattraversamento Isarco" è suddiviso a sua volta nei 2 seguenti sublotti:

- sottolotto di costruzione "Opere propedeutiche Sottoattraversamento Isarco", del quale è stato elaborato il progetto esecutivo;
- sottolotto "Opere principali Sottoattraversamento Isarco" oggetto del presente progetto esecutivo.

Fachbereich:  
Thema:  
Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
Tema: Documenti generali  
Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

## 2 ALLGEMEINE EINORDNUNG

### 2.1 DAS BAULOS "EISACKUNTERQUERUNG"

Die Lage der durch die Arbeiten betroffenen Bereiche sowie die Baulosabgrenzungen können den Projektplänen entnommen werden, auf die hiermit verwiesen wird.

Zur Standortermittlung wird festgehalten, dass die in den Planungsunterlagen verwendete Haupttunnelkilometrierung mit der der Gesamtwerke übereinstimmt, wobei für den Ost-Tunnel (Gleis 1) der Innsbrucker Bahnhof maßgebend ist, während sich die Verbindungstunnelkilometrierungen auf die jeweiligen Entzweigungspunkte der Verbindungstunneltrassen der Haupttunnel beziehen.

#### 2.1.1 BAUWERKE ZUM SUB-BAULOS "VORBEREITUNGS-MAßNAHMEN EISACKUNTERQUERUNG"

Die Bauwerke des Sub-Bauloses "Vorbereitende Bauwerke Eisackunterquerung", die kein Bestandteil des betreffenden Ausführungsprojektes sind, umfassen im Wesentlichen:

- Variante zur Brenner Staatsstraße Nr. 12 von km 490 + 500 bis km 491 + 500, einschl. einer neuen Brücke über dem Weißenbach, wobei die überschrittenen Unterdienststellen verlegt und eine Zufahrt zum Baustellenbereich fertiggestellt werden müssen
- Eisackbrücke
- Brenner Eisenbahnunterquerung bei km 200 + 400
- Verkehrswege innerhalb der Baustelle

#### 2.2 BAUWERKE DES SUB-BAULOS "HAUPTWERKE EISACKUNTERQUERUNG"

Die Arbeiten zum Sub-Baulos "Hauptbauwerke Eisackunterquerung", welche zum Einreichprojekt gehören, bestehen im Wesentlichen aus:

## 2 INQUADRAMENTO GENERALE

### 2.1 IL LOTTO DI COSTRUZIONE "SOTTOATTRAVERSAMENTO ISARCO"

L'ubicazione delle aree interessate dai lavori ed i limiti del lotto di costruzione sono rilevabili negli elaborati progettuali ai quali si rimanda.

Ai fini della localizzazione delle opere, si stabilisce che la progressivazione delle gallerie principali utilizzata nei documenti delle progettazioni è quella generale dell'Opera, riferita per la galleria Est (binario dispari) alla stazione di Innsbruck, mentre la progressivazione delle interconnessioni sono riferite al loro punto di sfioro dei tracciati delle interconnessioni da quelle delle gallerie principali.

#### 2.1.1 OPERE DEL SUBLOTTO "OPERE PROPEDEUTICHE SOTTOATTRAVERSAMENTO ISARCO"

Le opere del sublotto "Opere propedeutiche Sottoattraversamento Isarco", le quali non fanno parte del progetto esecutivo in oggetto, consistono essenzialmente in:

- Variante alla S.S.12 del Brennero dal km 490 + 500 al km 491 + 500, compreso un nuovo ponte sul Rio Bianco, con spostamento dei sottoservizi interferiti e realizzazione di un accesso all'area di cantiere;
- Ponte sull'Isarco;
- Sottopasso alla linea ferroviaria del Brennero, al km 200 + 400;
- Viabilità interna di cantiere.

#### 2.2 OPERE DEL SUBLOTTO "OPERE PRINCIPALI SOTTOATTRAVERSAMENTO ISARCO"

Le opere del sublotto "Opere principali Sottoattraversamento Isarco", che fanno parte del progetto esecutivo, consistono essenzialmente in:

## Haupttunnel

### 1. Abschnitt

- Ost-Haupttunnel – Gleis 1 – (Abschnitt in bergmännischer Bauweise)  
von km 54+015.00 (Los-Anfang) bis km 54+600.67 wovon:
  - von km 54+015.00 bis km 54+465.00 in zweigleisiger bergmännischer Bauweise (Vortrieb und Innenschale)
  - von km 54+465.00 bis km 54+600.67 in zweigleisigem Abzweigtunnel in bergmännischer Bauweise (Vortrieb und Innenschale)
- West-Haupttunnel – Gleis 2 - (Abschnitt in bergmännischer Bauweise) von km 54+042.00 (Los-Anfang) bis km 54+598.85 wovon:
  - von km 54+042.00 bis km 54+440.00 im zweigleisigen Tunnel in bergmännischer Bauweise (Vortrieb und Innenschale)
  - von km 54+440.00 bis km 54+598.85 im zweigleisigen Abzweigtunnel in bergmännischer Bauweise (Vortrieb und Innenschale)

### 2. Abschnitt (Eisackunterquerung)

- Ost-Haupttunnel – Gleis 1 – (Abschnitt in bergmännischer Bauweise)  
von km 54+600.67 bis km 54+700.77 (einschl. Tunnelzutrittschächte) im eingleisigen Tunnel in bergmännischer Bauweise (Vortrieb und Innenschale)
- West-Haupttunnel– Gleis 2 – (Abschnitt in bergmännischer Bauweise)  
von km 54+598.85 bis km 54+711.07 (einschl. Tunnelzutrittschächte) im eingleisigen Tunnel in bergmännischer Bauweise (Vortrieb und Innenschale)

### 3. Abschnitt

- Ost-Haupttunnel – Gleis 1 - (Abschnitt in bergmännischer Bauweise)  
von km 54+700.77 bis km 54+968.00 im eingleisigen Tunnel in bergmännischer Bauweise (Vortrieb und Innenschale)
- West-Haupttunnel- Gleis 2 – (Abschnitt in bergmännischer Bauweise)

## Gallerie principali

### 1° tratto

- Galleria principale est – binario dispari - (tratto in galleria naturale)  
da pk 54+015.00 (inizio lotto) a pk 54+600.67 di cui:
  - da pk 54+015.00 a pk 54+465.00 in galleria naturale a doppio binario (scavo e rivestimento definitivo)
  - da pk 54+465.00 a pk 54+600.67 in galleria naturale di diramazione a doppio binario (scavo e rivestimento definitivo)
- Galleria principale ovest – binario pari - (tratto in galleria naturale) da pk 54+042.00 (inizio lotto) a pk 54+598.85 di cui:
  - da pk 54+042.00 a pk 54+440.00 in galleria naturale a doppio binario (scavo e rivestimento definitivo)
  - da pk 54+440.00 a pk 54+598.85 in galleria naturale di diramazione a doppio binario (scavo e rivestimento definitivo)

### 2° tratto (Attraversamento Fiume Isarco)

- Galleria principale est – binario dispari – (tratto galleria naturale)  
da pk 54+600.67 a pk 54+700.77 (compresi pozzi di accesso alle gallerie) in galleria naturale a singolo binario (scavo e rivestimento definitivo)
- Galleria principale ovest – binario pari – (tratto galleria naturale)  
da pk 54+598.85 a pk 54+711.07 (compresi pozzi di accesso alle gallerie) in galleria naturale a singolo binario (scavo e rivestimento definitivo)

### 3° tratto

- Galleria principale est – binario dispari - (tratto in galleria naturale)  
da pk 54+700.77 a pk 54+968.00 in galleria naturale a singolo binario (scavo e rivestimento definitivo)
- Galleria principale ovest - binario pari – (tratto in galleria naturale)



Fachbereich:

Thema:

Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere

Tema: Documenti generali

Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

von km 54+711.07 bis km 54+889.00 im eingleisigen Tunnel in bergmännischer Bauweise (Vortrieb und Innenschale)

da pk 54+711.07 a pk 54+889.00 in galleria naturale a singolo binario (scavo e rivestimento definitivo)

#### 4. Abschnitt

- Ost-Haupttunnel – Gleis 1 - (Abschnitt in offener Bauweise)

von km 54+968.00 bis km 55+060.00 im eingleisigen Tunnel in offener Bauweise (Vortrieb und Rohbau)

- West-Haupttunnel- Gleis 2 – (Abschnitt in offener Bauweise)

von km 54+889.00 bis km 55+018.00 im eingleisigen Tunnel in offener Bauweise (Vortrieb und Rohbau)

#### 4° tratto

- Galleria principale est – binario dispari - (tratto in galleria artificiale)

da pk 54+968.00 a pk 55+060.00 in galleria artificiale a singolo binario (scavo e opera grezza)

- Galleria principale ovest - binario pari – (tratto in galleria artificiale)

da pk 54+889.00 a pk 55+018.00 in galleria artificiale a singolo binario (scavo e opera grezza)

#### 5. Abschnitt

- Ost-Haupttunnel – Gleis 1 - (Abschnitt in bergmännischer Bauweise)

von km 55+060.00 bis km 56+100.00 (Los-Ende) wovon:

- von km 55+060.00 bis km 55+485.00 im eingleisigen Tunnel in bergmännischer Bauweise (Vortrieb und Innenschale)
- von km 55+485.00 bis km 56+100.00 im zweigleisigen Tunnel in bergmännischer Bauweise (Vortrieb und Innenschale)

*Hinweis: Der Tunnelvortrieb endet im Fels. Portalbauwerke sind nicht Gegenstand dieses Loses.*

- West-Haupttunnel – Gleis 2 - (Abschnitt in bergmännischer Bauweise)

von km 55+018.00 bis km 56+190.00 (Los-Ende), davon:

- von km 55+018.00 bis km 55+549.00 im eingleisigen Tunnel in bergmännischer Bauweise (Vortrieb und Innenschale)
- von km 55+549.00 bis km 56+190.00 im zweigleisigen Tunnel in bergmännischer Bauweise (Vortrieb und Innenschale)

*Hinweis: Der Tunnelvortrieb endet im Fels. Die Portalbauwerke sind nicht Gegenstand dieses Loses.*

#### 5° tratto

- Galleria principale est – binario dispari - (tratto in galleria naturale)

da pk 55+060.00 a pk 56+100.00 (fine lotto) di cui:

- da pk 55+060.00 a pk 55+485.00 in galleria naturale a singolo binario(scavo e rivestimento definitivo)
- da pk 55+485.00 a pk 56+100.00 in galleria naturale a doppio binario (scavo e rivestimento definitivo)

*Avvertenza: Lo scavo della galleria termina in roccia; le opere di portale non sono oggetto del lotto.*

- Galleria principale ovest – binario pari - (tratto in galleria naturale)

da pk 55+018.00 a pk 56+190.00 (fine lotto) di cui:

- da pk 55+018.00 a pk 55+549.00 in galleria naturale a singolo binario (scavo e rivestimento definitivo)
- da pk 55+549.00 a pk 56+190.00 in galleria naturale a doppio binario (scavo e rivestimento definitivo)

*Avvertenza: Lo scavo della galleria termina in roccia; le opere di portale non sono oggetto del lotto.*

### Verbindungstunnel

- Verbindungstunnel Ost – Gleis 1  
“Abzweigabschnitt vom Haupttunnel zum Losende”  
von km 1+971.44 (km 54+600.67 Ost-Haupttunnel – Gleis 1) bis km 2+684.41wovon:
  - von km 1+971.44 bis km 2+069.97 (einschl. Tunnelzutrittschächte) in bergmännischer Bauweise eingleisige Eisackunterquerung (Vortrieb und Innenschale)
  - von km 2+069.97 bis km 2+270.00 im eingleisigen Tunnel in offener Bauweise (Vortrieb und Rohbau)
  - von km 2+270.00 bis km 2+525.00 Eingleisiger Bahnkörper in Wannenbauwerk (Vortrieb und Bauarbeiten)
  - von km 2+525.00 bis km 2+684.41Bahnkörper in Dammlage / im Einschnitt (Vortrieb und Bauarbeiten)
- West-Verbindungstunnel– Gleis 2  
“Abzweigabschnitt vom Haupttunnel zum Los-Ende”  
von km 1+693.13 (km 54+598.85 West-Haupttunnel– Gleis 2) bis km 2+550.00 wovon:
  - von km 1+693.13 bis km 1+795.86 (einschl. Tunnelzutrittschächte) in bergmännischer Bauweise eingleisige Eisackunterquerung (Vortrieb und Innenschale)
  - von km 1+795.86 bis km 2+550.00 im eingleisigen Tunnel in bergmännischer Bauweise (Vortrieb und Innenschale)

*Hinweis: Der Tunnelvortrieb endet in Fels. Die Portalwerke sind nicht Gegenstand dieses Loses.*

### Verlagerung der historischen FS-Eisenbahntrasse

- von km 199+935 ca. bis km 200+900 ca. (Gleis 2) der vorhandenen Eisenbahntrasse Verona Brenner über eine Länge von m 965 ca. (Fertigstellung der neuen Fahrbahnbreite und Rüstung, Inbetriebnahme).

### Klein- und Nebenbauwerke

Dieses Baulos umfaßt die folgenden Kleinbauwerke:

- Schächte und Notausgänge (Vortrieb und Innenschale).

### Interconnessioni

- Interconnessione est – binario dispari  
“tratto di diramazione dalla galleria principale fine lotto”  
da pk 1+971.44 (pk 54+600.67 Galleria principale est – binario dispari) a pk 2+684.41di cui:
  - da pk 1+971.44 a pk 2+069.97 (compresi pozzi di accesso alle gallerie) in galleria naturale attraversamento Isarco a singolo binario (scavo e rivestimento definitivo)
  - da pk 2+069.97a pk 2+270.00 in galleria artificiale a singolo binario (scavo e opera grezza)
  - da pk 2+270.00 a pk 2+525.00 Corpo stradale ferroviario a binario singolo con scavo “a vascone” (scavo e opere civili)
  - da pk 2+525.00 a pk 2+684.41Corpo stradale ferroviario in rilevato/trincea (scavo e opere civili)
- Interconnessione ovest – binario pari  
“tratto di diramazione dalla galleria principale – fine lotto”  
da pk 1+693.13 (pk 54+598.85 Galleria principale ovest – binario pari) a pk 2+550.00 di cui:
  - da pk 1+693.13 a pk 1+795.86 (compresi pozzi di accesso alle gallerie) in gallerianaturale attraversamento Isarco a singolo binario (scavo e rivestimento definitivo)
  - da pk 1+795.86 a pk 2+550.00 in galleria naturale a binario singolo (scavo e rivestimento definitivo)

*Avvertenza: Lo scavo della galleria termina in roccia; le opere di portale non sono oggetto del lotto.*

### Spostamento linea storica FS

- da pk 199+935 ca. a pk 200+900 ca. (binario pari) della linea ferroviaria esistente Verona Brennero, per una lunghezza di m 965 ca. (realizzazione della nuova sede ferroviaria e attrezzaggio, messa in esercizio).

### Opere minori e accessorie

Sono comprese nel lotto di costruzione le seguenti opere minori:

- pozzi e uscite di emergenza (scavo e rivestimento definitivo)

Fachbereich:

Thema:

Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere

Tema: Documenti generali

Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

- Querverbindungsgänge (Vortrieb und Innenschale)
- zusätzliche Bauwerke am Abschnitt der verlagerten FS-Eisenbahnstrecke
- Sicherheitsmaßnahmen gegen Steinschlag über der historischen Eisenbahntrasse von ca. km 199+000 bis ca. km 200+265
- Umwelt-Instandsetzungsmaßnahmen und endgültige Bereinigung des Eisack-Flusses sowie der durch die Arbeiten betroffenen Bereiche.
- Zufahrtsstraßen zum Rettungsplatz beim Verbindungsportal 2 bis km 0+275 ca.
- cunicoli trasversali di collegamento (scavo e rivestimento definitivo)
- opere complementari in corrispondenza del tratto di linea FS spostata
- interventi di messa in sicurezza contro la caduta massi sopra la linea storica da ca. km 199+000 a ca. km 200+265
- interventi di ripristino ambientale e sistemazione finale del fiume Isarco e delle aree interessate dai lavori
- viabilità di accesso alla zona di soccorso presso il portale interconnessione pari fino alla pk 0+275 ca.

Weiterer Bestandteil des Sub-Bauprojektes ist die Fertigstellung aller Nebenarbeiten bzw. solcher von kleinem Umfang, welche im betreffenden Bereich der Maßnahmen liegen, deren Ausführung sich zur vollständigen Werkfertigstellung als erforderlich und/oder zweckmäßig erweist.

Costituiscono inoltre parte integrante del progetto del sublotto di costruzione, la realizzazione di tutte le opere accessorie e di piccole dimensioni che ricadono nel tratto oggetto dell'intervento, la cui realizzazione risulta necessaria e/o funzionale alla compiuta esecuzione delle opere.

### 2.3 BAUWERKE DES SUB-BAULOSES „HAUPTWERKE EISACKUNTERQUERUNG“, DIE NICHT BESTANDTEIL DER PLANUNG SIND

### 2.3 OPERE DEL SUBLOTTO “OPERE PRINCIPALI SOTTOATTRAVERSAMENTO ISARCO” NON OGGETTO DI PROGETTAZIONE

Die folgenden Bauwerke und Anlagen sind in vorliegender Planung nicht enthalten:

Le seguenti opere ed impianti sono escluse dalla presente progettazione:

- **Bahnanlagen** zur Versorgung der Haupttunnel und der Verbindungstunnel, im Wesentlichen bestehend aus:
  - Fahrbahn
  - Erschütterungsschutzmaßnahmen
  - Anlagen für das Bahnstromsystem und die Energieversorgung
  - Fernmelde- und Überwachungssysteme
  - Steuerungs- und Sicherungssysteme
  - Maschinentechnische Anlagen (wie im Einreichprojekt 2008 angegeben)
  - Anlage zur Überwachung der Baustelle und der Positionierung der Personen.
- **Portalbauwerke der beiden Haupttunnel Ost und West** (Gleis 1 und 2) und die ersten Strecken dieser Tunnel laut den zuvor festgelegten Los-Begrenzungen.
- **Impianti ferroviari** a servizio delle gallerie principali e delle interconnessioni costituiti essenzialmente da:
  - sovrastruttura
  - interventi per la mitigazione dalle vibrazioni
  - impianti di trazione elettrica e approvvigionamento energetico
  - sistemi di telecomunicazione e sorveglianza
  - sistemi di comando/controllo
  - impianti meccanici (come definiti nel progetto definitivo 2008)
  - impianto di sorveglianza cantiere e localizzazione delle persone.
- **Opere di portale delle due gallerie principali est ed ovest** (binari dispari e pari) e i tratti iniziali delle medesime gallerie, secondo i limiti di lotto precedentemente definiti.

Fachbereich:

Thema:

Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere

Tema: Documenti generali

**Contenuto documento:** Protezione costruttiva all'incendio

- **Portalbauwerke des Verbindungstunnels Gleis 2** und der erste Abschnitt dieses Tunnels laut zuvor festgelegter Los-Begrenzung.
- **Bauwerke am Verbindungsportal Gleis 1** und die zugehörigen Zufahrtsstraßen von km 0+275 ca. bis km 0+400 ca. und am Rückhaltebecken Holer Graben.
- Bauwerke in bezug auf den **Bahnhofsbereich von Franzensfeste**.
- **Rückhaltebecken Holer Graben und Hohewand** mit zugehörigen Zufahrtsstraßen.
- **Opere di portale della galleria d'interconnessione pari** ed il tratto iniziale della medesima galleria, secondo il limite di lotto precedentemente definito.
- **Opere presso il portale d'interconnessione pari** e la relativa viabilità di accesso dalla pk 0+275 ca. alla pk 0+400 ca. ed al Bacino di ritenuta Holer Graben.
- Opere riferite all'ambito della **stazione di Fortezza**.
- **Bacini di ritenuta Holer Graben e Hohewand** e la relativa viabilità di accesso.

### 3 METHODIK UND LEISTUNGSSTUFEN IM TUNNEL

#### 3.1 METHODIK

Die Leistungsstufe beschreibt die zugarantierende Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit im Brand-fall, so wie sie im Absatz 3.6 in den NTC 2008 definiert wurden. Dabei sind die Einflussfaktoren wie die Stabilität des Baugrunds (Gebirges), die Grundwasserhältnisse und der Einfluss eines Bauwerkversagens auf die Oberfläche und dessen Auswirkung auf Infrastruktur an der Oberfläche für die Zuordnung der verschiedenen Niveaus relevant.

Somit werden in Abhängigkeit der Randbedingungen in Anlehnung an die Leistungsstufen von NTC 2008 3 Leistungsstufen definiert. Auf Basis dieser definierten Leistungsstufen können in weiterer Folge die Bemessung und die allfälligen Zusatzmaßnahmen definiert werden.

#### 3.2 LEISTUNGSSTUFEN IN GESCHLOSSENER BAUWEISE

##### 3.2.1 Leistungsstufe 0 (entspricht Stufe 3 von NTC 2008)

- Bereich/Abschnitt: Tunnel im standfesten Gebirge mit unbewehrter Innenschale
- Anforderung: Für die Innenschale ist der GZT (Grenzzustand der Tragfähigkeit) für den Lastfall Brand ohne Berücksichtigung der Außenschale bzw. des verbesserten Bodens nachzuweisen. Die Tragfähigkeit der Innenschale ist während des Brands zu gewährleisten. Die Stabilität des Hohlraums nach dem Brandereignis ist durch den standfesten Fels gewährleistet.

- Bauliche Maßnahmen:

- Monofile Polypropylen-Fasern (PP-Fasern, 2 kg/m<sup>3</sup>) als Zusatzstoff im Beton

##### 3.2.2 Leistungsstufe 1 (entspricht Stufe 4 von NTC 2008)

- Bereich/Abschnitt: Tunnel im nicht standfesten Gebirge (Störungszonen) und Bereich der Unterquerung des Haupttunnels Gleis 1 und 2

### 3 METODOLOGIA E LIVELLO DI PRESTAZIONE IN GALLERIA

#### 3.1 METODOLOGIA

Il livello di prestazione descrive la stabilità e idoneità all'uso da garantire in caso di incendio, così come definito nel par. 3.6 delle NTC 2008. Rilevanti al fine della classificazione dei vari livelli sono fattori d'influenza, quali la stabilità del terreno di costruzione (ammasso), il comportamento della falda acquifera e l'effetto sulla superficie di un guasto dell'opera e le relative conseguenze su infrastrutture in superficie.

Ciò premesso, in considerazione delle condizioni quadro e in riferimento ai livelli delle citate norme tecniche NTC 2008, vengono definiti 3 livelli di prestazione. Sulla base di questi livelli di prestazione, è poi possibile stabilire il dimensionamento e gli eventuali addizionali.

#### 3.2 LIVELLI DI PRESTAZIONE PER METODO DI COSTRUZIONE IN NATURALE

##### 3.2.1 Livello di prestazione 0 (corrispondente al livello 3 delle norme NTC 2008)

- Area/tratto: opera galleria in roccia stabile, con rivestimento definitivo non armato
- Requisiti: verifica del limite della capacità di carico per il rivestimento definitivo per il carico d'incendio, senza considerare, rispettivamente, il rivestimento di prima fase e miglioramento del terreno. Si dovrà garantire la capacità portante del rivestimento definitivo durante l'incendio. La stabilità del cavo dopo l'incendio è garantita dalle condizioni di stabilità dell'ammasso roccioso.

- Interventi costruttivi:

- Fibre in polipropilene monofilo (fibre PP, 2 kg/m<sup>3</sup>) come additivo nel calcestruzzo

##### 3.2.2 Livello di prestazione 1 (corrispondente al livello 4 delle norme NTC 2008)

- Area/tratto: opera galleria in roccia non stabile (zone di faglia), e zona del sottoattraversamento della galleria principale, binario di spari e binario pari, sotto la galleria

Fachbereich:  
Thema:  
Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
Tema: Documenti generali  
Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

unterVerbindungstunnel Nord Gleis 2

• Anforderung: Der GZT ist für den Lastfall Brand ohne Berücksichtigung der Außen-schale bzw. des verbesserten Bodens nachzuweisen. Die Standsicherheit nach dem Brandereignis ist zu gewährleisten.

• Bauliche Maßnahmen:

• Fibre in polipropilene monofilo (fibre PP, 2 kg/m<sup>3</sup>) come additivo nel calcestruzzo e rivestimento definitivo armato

• Strato di armatura in intradosso, costituito da rete zincata (φ3/75x75), a ulteriore protezione dell'armatura principale così da evitarne la perdita di stabilità nel caso dell'incendio.

### 3.2.3 Leistungsstufe 2 (entspricht Stufe 5 von NTC 2008)

• Bereich/Abschnitt: Tunnel im Lockergestein und im nicht standfesten Festgestein mit der Gefahr einer Flutung durch Grundwasser oder den überlagerten Fluss (Eisack).

• Anforderung: Der GZT ist für den Lastfall Brand und den Lastfall nach dem Brand nachzuweisen. Zusätzlich sind die Dichtigkeit und die Standsicherheit nach dem Brandereignis auf Grund der oben angeführten Gefährdung zu gewährleisten.

• Bauliche Maßnahmen:

• PP-Fasern (2 kg/m<sup>3</sup>)

• Bewehrte Innenschale

• Strato di armatura in intradosso, costituito da rete zincata (φ3/75x75 mm), a ulteriore protezione dell'armatura principale così da evitarne la perdita di stabilità nel caso dell'incendio.

### 3.2.4 Leistungsstufe 2 (entspricht Stufe 5 von NTC 2008)

Laut dem Dokument der Regelplanung D0616-03008 "Innenschalenbeton" ist eine Mindestbetondeckung von 50 mm anzusetzen.

Al fine di garantire un'adeguata resistenza al fuoco e per impedire una rottura dell'armatura per effetto del calore viene adottato in intradosso un copriferro di 80 mm.

d'interconnessione nord, binario pari.

• Requisiti: La verifica del limite della capacità di carico per il carico d'incendio non tiene conto, rispettivamente, del rivestimento di prima fase e del miglioramento del terreno. Garantire la stabilità dopo l'incendio.

• Interventi costruttivi:

• Fibre in polipropilene monofilo (fibre PP, 2 kg/m<sup>3</sup>) come additivo nel calcestruzzo e rivestimento definitivo armato

• Strato di armatura in intradosso, costituito da rete zincata (φ3/75x75 mm), a ulteriore protezione dell'armatura principale così da evitarne la perdita di stabilità nel caso dell'incendio.

### 3.2.3 Livello di prestazione 2 (corrispondente al livello 5 delle norme NTC 2008)

• Area/tratto: galleria in materiale sciolto e in roccia non stabile, con pericolo di inondazione da parte della falda o del fiume sovrastante (Isarco).

• Requisiti: Verifica del limite della capacità di carico, rispettivamente, per il caso di carico incendio e dopo l'incendio. Dato il pericolo sopra esposto, devono inoltre essere garantite l'impermeabilità e la stabilità dopo l'incendio.

• Interventi costruttivi:

• Fibre PP (2 kg/m<sup>3</sup>)

• rivestimento definitivo armato

• Strato di armatura in intradosso, costituito da rete zincata (φ3/75x75 mm), a ulteriore protezione dell'armatura principale così da evitarne la perdita di stabilità nel caso dell'incendio.

### 3.2.4 Copriferro

In ottemperanza al documento della progettazione di sistema D0616-III-01-TB-03008 „Rivestimento definitivo“, il copriferro minimo richiesto è di 50 mm.

Al fine di garantire un'adeguata resistenza al fuoco e per impedire una rottura dell'armatura per effetto del calore viene adottato in intradosso un copriferro di 80 mm.

Fachbereich:

Thema:

**Dokumenteninhalt:**

Settore: 06-Progettazione delle opere

Tema: Documenti generali

**Contenuto documento:** Protezione costruttiva all'incendio

Inoltre in conformità alla direttiva BBT, a partire da un copriferro > 50 mm, è richiesta la posa di un'armatura a rete, in acciaio inox, come sopra descritto, il cui copriferro minimo richiesto è pari a 2 cm.

Diese wird zur Aufnahme der Ringzugspannungen aus der Verbundwirkung und den Zugspannungen zufolge Frühschwindens konstruktiv eingesetzt.

Inoltre in conformità alla direttiva BBT, a partire da un copriferro > 50 mm, è richiesta la posa di un'armatura a rete, in acciaio inox, come sopra descritto, il cui copriferro minimo richiesto è pari a 2 cm.

L'armatura a rete serve a ricevere le tensioni di trazione sull'anello, derivanti dall'aderenza e dalle tensioni di trazione in seguito a ritiro precoce.

#### 4 NACHWEISE ZUM LASTFALL BRAND

Bei der Durchführung der Nachweise zum Lastfall Brand wurden die inneren Auswirkungen auf die Innenschalen des betreffenden Tunnels im Brandfall (Warmbeanspruchung) und die Hitzebeständigkeit der verwendeten Werkstoffe in Betracht gezogen. Zur Erfassung des richtigen Beanspruchungszustands bediente man sich der Berechnungssoftware FLAC 7.0, von ItascaConsulting entwickelt, und der SAP2000 v15.1, von Computers and Structures entwickelt, während für die anschließenden „Warmprüfungen“ der Querschnitte die Software RAF 10.0 von Aztec Informatica © verwendet wurde. Die Arbeit gliederte sich in die beiden nachfolgend beschriebenen Phasen.

##### PHASE 1 – Entwicklung der numerischen Modellierungen im Brandfall

Von den Belastungsbedingungen in kaltem Zustand ausgehend wurden numerische Simulationen zu den Differenzen entwickelt, um den auf die Innenschalen einwirkenden Belastungszustand zu erfassen, im Einklang mit zwei verschiedenen Brandkurven: „EUREKA“ und „RWS“.

Die Kurve RWS entspricht den Punkten [2] und [3] der einschlägigen Rechtsvorschrift, mit einer auf 120 Minuten begrenzten Dauer des Thermoprogramms, während die Kurve EUREKA dem Punkt [5] entspricht, mit einer Branddauer von 170 Minuten einschl. Abkühlungsphase.

#### 4 VERIFICHE AL FUOCO

Le verifiche al fuoco sono state condotte in modo da tenere in conto dell'effetto delle coazioni interne agenti sui rivestimenti definitivi della galleria in oggetto in caso di incendio (sollecitazioni “a caldo”) e della resistenza “a caldo” dei materiali impiegati. Per poter cogliere il corretto stato sollecitativo si è ricorso all'ausilio del software di calcolo FLAC 7.0, prodotto da ItascaConsulting, e di SAP2000 v15.1, prodotto da Computers and Structures, mentre per le successive verifiche sezionali “a caldo” è stato utilizzato il software RAF 10.0 sviluppato dalla Aztec Informatica ©. Il lavoro è stato articolato in due fasi nel seguito descritte.

##### FASE 1 – Sviluppo delle modellazioni numeriche in caso di incendio

Partendo dalle condizione di carico “a freddo”, sono state sviluppate simulazioni numeriche alle differenze finite al fine di cogliere lo stato di sollecitazione agente sui rivestimenti definitivi in accordo con due differenti curve di incendio: “EUREKA” ed “RWS”.

La curva RWS risulta in conformità ai punti [2] e [3] della normativa di riferimento con durata del programma termico limitato a 120 minuti, mentre la curva EUREKA risulta in conformità al punto [5] con durata dell'incendio, compresa la fase di raffreddamento, di 170 minuti.

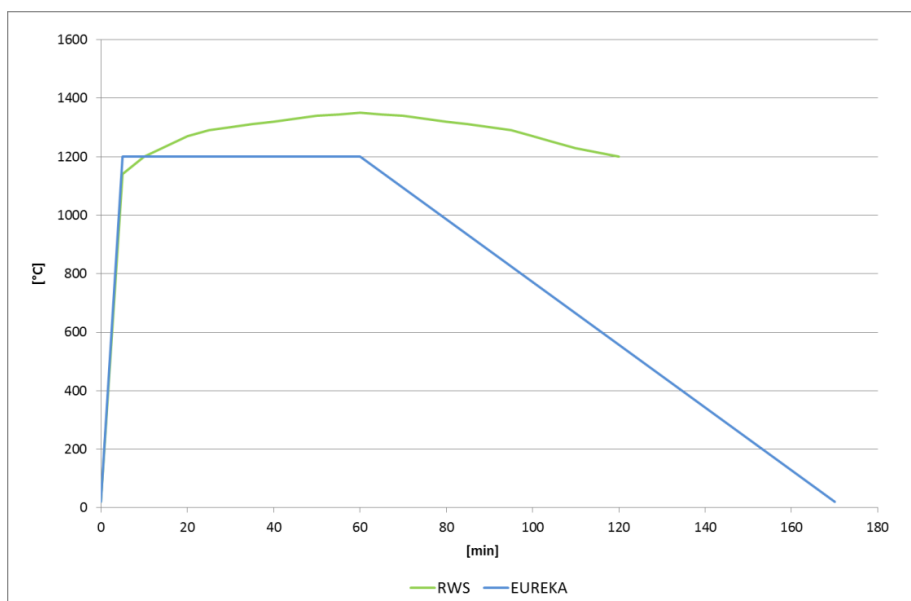


Abbildung 1: Vergleich der Brandkurven

Illustrazione 1: Comparazione fra le curve d'incendio



Fachbereich:  
Thema:  
Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
Tema: Documenti generali  
Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

Die erste berücksichtigte Kurve bezieht sich auf die Brandkurve RWS, die in der Norm UNI 11076 „Prüfverfahren zur Beurteilung des Verhaltens von Schutzvorrichtung an den Decken von Untertagewerken im Brandfall“ definiert wird. Diese Kurve wurde in Holland vom Rijkswaterstaat und vom Brandforschungszentrum (TNO/EFFECTIS) erstellt, die sie als Kurve eines durch Kohlenwasserstoffe ausgelösten Brands eines 45000-Liter-Erdöltanks im Innern eines Tunnels beschrieben. Sie ist durch eine schnelle Temperatursteigerung bis zu 1200 °C in 10 Minuten, einem Maximum von 1350 °C nach 60 Minuten und einen Rückgang auf 1200 °C nach 120 Minuten gekennzeichnet. In diesem Fall bezieht sich die verwendete Brandlast nur auf den Zustand der 120 Min., der in den durchgeführten Studien als der kritischste beurteilt wird.

La prima curva considerata fa riferimento alla curva di incendio RWS definita nella UNI 11076 “Modalità di prova per la valutazione del comportamento di protettivi applicati a soffitti di opere sotterranee in condizioni di incendio”. Tale curva è stata redatta in Olanda dal Rijkswaterstaat e dal centro per le ricerche sul fuoco (TNO/EFFECTIS) che l'hanno descritta come curva di incendio da idrocarburi di un serbatoio di 45000 litri di petrolio all'interno di una galleria. Essa è caratterizzata da un rapido incremento delle temperature fino ai 1200°C a 10 minuti, un massimo di 1350 °C a 60 minuti e un ritorno a 1200°C a 120 minuti. In questo caso il carico di incendio utilizzato è relativo unicamente alla condizione dei 120minuti, condizione valutata come la più critica negli studi effettuati.

Time [min]	Temperature [°C]
0	20
5	1140
10	1200
15	1235
20	1270
25	1290
30	1300
35	1312
40	1320
45	1330
50	1340
55	1345
60	1350
65	1345
70	1340
75	1330
80	1320
85	1312
90	1300
95	1290
100	1270
105	1250
110	1230
115	1215
120	1200

Abbildung 2: Zeitabhängige Temperaturwerte nach der Kurve RWS

Illustrazione 2: Valori della temperatura in funzione del tempo secondo la curva RWS

Die Kurve EUREKA, wie in den Vorschriften der T.S.I.

La curva EUREKA, così come indicato nelle normative

Fachbereich:  
Thema:  
Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
Tema: Documenti generali  
Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

(Entscheidung 2008/163/EG) angegeben, weist einen ersten Abschnitt bis zur Zeit  $T = 5$  auf, in dem die Temperatur linear bis auf  $1200^{\circ}\text{C}$  ansteigt, gefolgt von einer zweiten Phase mit konstanter Temperatur bis zur Zeit  $T = 60$  Minuten, und schließlich einen dritten absteigenden Abschnitt, der nach 170 Minuten  $20^{\circ}\text{C}$  erreicht. In Abhängigkeit des beschriebenen Verlaufs wurden die Analysen in Bezug auf die folgenden zeitlichen Steps durchgeführt:

- RWS: 5, 60, 120 Minuten;
- EUREKA: 5, 60, 120, 170 Minuten.

Die durchgeführten Nachweise stimmen mit den zuvor beschriebenen Lastfallkombinationen überein.

#### PHASE 2 – Warmprüfungen an den einzelnen Querschnitten

Die Ergebnisse der vorhergehenden Analysen werden mit der Software RAF 10.0 von Aztec Informatica © überprüft, um die Feuerbeständigkeit der Elemente in Stahlbeton zu berechnen, da sie es gestattet, den Effekt einer Brandkurve, die auf die Seiten eines allgemeinen Stahlbetonquerschnitts einwirkt, zu analysieren. Die Wärmediffusion im Innern des Werkstoffs wird durch eine nichtlineare Analyse nach der Finite-Elemente-Methode bewertet, wobei die Erscheinungen von Leitung, Konvektion und Strahlung berücksichtigt werden. In einer ersten Phase bewertet das Programm die Wärmeverteilung für verschiedene vom Benutzer bestimmte zeitliche Steps. Danach bewertet RAF 10.0 die Beständigkeit des Querschnitts in den verschiedenen zeitlichen Intervallen, wobei die Verminderung der mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe in Betracht gezogen wird. Auf diese Weise kann die Verringerung des Beständigkeitsbereichs M-N berechnet werden. Das Programm ermöglicht die Entwicklung der Modellierung mit beiden zuvor beschriebenen Kurven, die tabellarisch eingegeben werden.

S.T.I. (direttiva 2008/163/EG), presenta un primo tratto fino al tempo  $T = 5$  minuti in cui la temperatura cresce linearmente fino a raggiungere i  $1200^{\circ}\text{C}$ , seguito da una seconda fase a temperatura costante fino al tempo  $T = 60$  minuti ed infine da un terzo tratto discendente che raggiunge i  $20^{\circ}\text{C}$  a 170 minuti. In funzione dell'andamento descritto, le analisi sono state condotte relativamente ai seguenti step temporali:

- RWS: 5, 60, 120 minuti;
- EUREKA: 5, 60, 120, 170 minuti.

Le verifiche condotte sono in conformità con quanto descritto nelle combinazioni di carico descritte in precedenza.

#### FASE2 – Verifiche sezionali “a caldo”

I risultati delle analisi precedenti vengono verificati mediante il programma RAF 10.0 prodotto dalla Aztec Informatica © per calcolare la resistenza al fuoco degli elementi in c.a. in quanto permette di analizzare l'effetto di una curva d'incendio agente sui lati di una generica sezione in calcestruzzo. La diffusione del calore all'interno del materiale è valutata attraverso una analisi non lineare agli elementi finiti considerando i fenomeni di conduzione, convezione ed irraggiamento. Durante una prima fase il programma valuta la distribuzione del calore per differenti step temporali definiti dall'utente. Successivamente RAF 10.0 valuta la resistenza della sezione nei vari intervalli di tempo considerando la riduzione delle proprietà meccaniche dei materiali. In questo modo è possibile calcolare la riduzione del dominio di resistenza M-N. Il programma permette lo sviluppo della modellazione con entrambe le curve precedentemente presentate, le quali vengono inserite per via tabellare.

#### 4.1 KOMBINIERTE THERMISCH-MECHANISCHE ANALYSE – FLAC 7.0

Die Bewertung der Belastungen, die in der Innenschale des der Hitzewirkung eines Brands ausgesetzten Tunnels entstehen, wurde mit einem spezifischen Ansatz angegangen, der die kombinierte Verwendung von thermischer und mechanischer Analyse vorsieht. Dieses Vorgehen wurde mithilfe eines Berechnungscodes FLAC 7.0 entwickelt, der es gestattet, den Spannungs- und Verformungszustand des Tunnels nicht nur aufgrund der den lithostatischen Spannungen und den Kräften aus der Grabung entsprechenden statischen Belastungen, sondern auch aufgrund der Entwicklung der durch die Temperaturänderung im Innern der Konstruktion verursachten Wärmeausdehnungen und der Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe zu bestimmen.

Die Darstellung des mechanischen Verhaltens des Betons basierte auf einem Modell mit Bruch nach Tresca; dem Werkstoff wurde ein Reibungswinkel gleich Null und eine der Hälfte seiner Grenzbeständigkeit bei einer gegebenen Temperatur entsprechende Kohäsion auferlegt. Die Wahl wurde so vorgenommen, dass sich die Beanspruchungen beim Steigen der Temperatur dort, wo die Zunahme der Belastung nicht mit der Wärmebeständigkeit des Materials vereinbar ist, innerhalb des Querschnitts verteilen können, bis sie eine zum Zweck der Stabilität des Bauwerks annehmbare Konfiguration annehmen. Auf diese Weise kann im Voraus vermieden werden, was bei Verwendung eines vollkommen linearen Modells geschehen könnte, dass nämlich während des Fortschreitens der Erscheinung in einigen Teilen der Konstruktion in einem bestimmten Zeitabstand eine Überschreitung der mechanischen Eigenschaften des Betons erreicht wird. Ferner ist zu berücksichtigen, dass das numerische Modell so eingestellt wurde, dass die mechanischen Parameter nach der Abnahme während des Abkühlungsprozesses nicht wiederhergestellt werden. Das Erreichen einer Endkonfiguration bei der Berechnung mit für annehmbar gehaltenen Verformungen garantiert daher implizit, dass die Konstruktion in dem untersuchten Zeitraum in der Lage ist, der Brandbelastung zu widerstehen.

Was die Verbindung von Beanspruchungen und Verformungen betrifft, wurde ein linearer Verlauf und

#### 4.1 ANALISI ACCOPPIATA TERMO-MECCANICA – FLAC 7.0

La valutazione delle sollecitazioni che nascono nel rivestimento definitivo della galleria soggetta all'azione termica di un incendio è stata affrontata per mezzo di uno specifico approccio che ha visto l'uso accoppiato di un'analisi termica e un'analisi meccanica. Tale procedimento è stato sviluppato per mezzo del codice di calcolo FLAC 7.0, il quale ha permesso di determinare lo stato tensionale e deformativo della galleria non solo per la presenza dei carichi statici corrispondenti alle tensioni litostatiche ed alle forze derivanti dallo scavo, ma anche per lo sviluppo delle dilatazioni termiche e del decadimento delle caratteristiche meccaniche dei materiali causate dalla variazione della temperatura all'interno della struttura stessa.

La rappresentazione del comportamento meccanico del calcestruzzo è stata basata su un modello avente rottura alla Tresca, imponendo al materiale un angolo di attrito nullo ed una coesione pari a metà della resistenza ultima dello stesso ad una data temperatura. La scelta è stata effettuata in modo che all'aumentare della temperatura, laddove localmente l'incremento di sollecitazione non fosse compatibile con la resistenza del materiale "a caldo", gli sforzi possano redistribuirsi all'interno della sezione fino ad assumere una configurazione accettabile ai fini della stabilità dell'opera. In tale modo è possibile evitare a priori quello che potrebbe avvenire impiegando un modello perfettamente lineare, ovvero che durante l'evoluzione del fenomeno in talune parti della struttura ad un dato intervallo temporale si arrivi ad un superamento delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo. Si consideri inoltre che il modello numerico è stato impostato in maniera tale che i parametri meccanici, una volta decaduti, non si ristabiliscano durante il processo di raffreddamento. Il raggiungimento di una configurazione finale nel calcolo con deformazioni ritenute accettabili garantisce quindi in maniera implicita che durante l'arco temporale oggetto di analisi la struttura sia in grado di resistere alla sollecitazione di incendio.

Per quanto riguarda il legame sforzi deformazioni si è considerato un andamento lineare impiegando il modulo

Fachbereich:  
Thema:  
Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
Tema: Documenti generali  
Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

der Elastizitätsmodul als Sekante für Beton Ec berücksichtigt. Diese Größe ist in Zeit und Raum variabel (entlang des Querschnitts in radialer Richtung) aufgrund der Temperaturentwicklung in der Auskleidung. Das Gesetz der Verminderung dieses im Berechnungscode FLAC eingestellten mechanischen Parameters wird nachfolgend im Einzelnen beschrieben.

elastico secante del calcestruzzo Ec. Tale grandezza risulta variabile nel tempo e nello spazio (lungo la sezione in direzione radiale) a causa dell'evoluzione della temperatura nel rivestimento stesso. La legge di decadimento di tale parametro meccanico, impostata nel codice di calcolo FLAC, verrà descritta in dettaglio nel seguito.

Was schließlich die Modellierung der thermischen Wirkung betrifft, wurde dem Rand für den dem Feuer ausgesetzten Teil der Konstruktion eine spezifische Bedingung zugewiesen. An der Innenfläche des Tunnels (Innenkante) wurde die Brandkurve zugewiesen, die als ausschließlich auf die direkt dem Feuer ausgesetzten Bereichen des Tunnels einwirkend betrachtet werden. Im Bereich der Außenkante der Auskleidung und dort, wo der Brand die Konstruktion nicht direkt berühren kann (wie am Sohlgewölbe, aufgrund der vorhandenen Füllung), wird der Temperatur der konstante Wert  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  zugewiesen.

Infine, per ciò che concerne la modellazione dell'azione termica, è stata assegnata una specifica condizione al contorno per la parte di struttura esposta al fuoco. Sulla superficie interna della galleria (intradosso) è stata assegnata la curva d'incendio considerata agente esclusivamente sulle zone di galleria direttamente esposte al fuoco. Nella zona di estradosso del rivestimento e laddove l'incendio non può lambire direttamente la struttura (come in arco rovescio, a causa della presenza del riempimento), la temperatura è assegnata al valore costante di  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 4.2 KOMBINIERTE THERMISCH-MECHANISCHE ANALYSE – SAP2000

#### 4.2 ANALISI ACCOPPIATA TERMO-MECCANICA – SAP2000

Die Berechnungsmodelle für die Planung der Vortriebsquerschnitte mit Sicherung vom Bodenniveau wurden mit SAP2000 ausgeführt. Für die Analyse des Spannungszustands im Brandfall wurden finite Plattenelemente verwendet, die die Verwendung der Nichtlinearität im Verhalten des Materials und die Bestimmung spezifischer Temperaturen im Innern jedes finiten Plattenelements gestatten.

Alcuni modelli di calcolo sono stati eseguiti con SAP2000, ad esempio per il progetto delle sezioni di avanzamento con consolidamenti eseguiti in jet-grouting da piano campagna. Per l'analisi dello stato tensionale in condizioni di incendio sono stati utilizzati elementi finiti di piastra che permettono l'utilizzo di non linearità nel comportamento del materiale e la definizione di temperature specifiche all'interno di ciascun elemento finito.

Diese Funktionen eignen sich für die Planung von Querschnitten, die Belastungen durch Brand ausgesetzt sind. Die Nichtlinearität des Materials ermöglicht die manuelle Festlegung der Beständigkeits- und Verformbarkeitsparameter des Betons für verschiedene Betriebstemperaturen entsprechend den Angaben der Rechtsvorschrift. Analog dazu wurden die Betriebstemperaturen für jedes finite Plattenelement auf der Grundlage der isothermischen Kurven, die für einen allgemeinen Betonquerschnitt gewonnen wurden, der den beiden zuvor erwähnten planmäßigen Brandkurven für die Zeiten 60 min, 120 min und 170 min unterliegt

Tali funzionalità si adattano al progetto di sezioni soggette al carico da incendio. Le non linearità del materiale permettono di definire manualmente, in accordo alle indicazioni della normativa, i parametri di resistenza e di deformabilità del calcestruzzo per diverse temperature di esercizio. In modo analogo sono state definite le temperature di esercizio per ciascun elemento finito di piastra in base alle curve isoterme ricavate per una sezione generica di calcestruzzo soggetta alle due curve di incendio di progetto, richiamate in precedenza, per i tempi 60 min, 120 min e 170 min.

4.3 MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN BEI WÄRME

Was die mechanischen Eigenschaften bei Wärme betrifft, wird auf die Absätze 3.2.2 und 3.2.3 der Norm DIN EN 1992-1-2 (2005) Bezug genommen. In den untenstehenden Tabellen und Abbildungen sind die Werte der wichtigsten mechanischen Parameter von Stampfbeton und Stahl angeführt, in Abhängigkeit von der Temperaturänderung des Werkstoffs.

- **Beton (Gesteinskörnungen)**

Was die mechanischen Eigenschaften des Betons betrifft, wurde auf den Typ mit Normalgewicht mit Gesteinskörnungen Bezug genommen.

4.3 PROPRIETÀ MECCANICHE A CALDO

Per quanto riguarda le proprietà meccaniche a caldo dei materiali, si fa riferimento ai paragrafi 3.2.2 e 3.2.3 dell'UNI EN 1992-1-2 (2005). Nelle tabelle e figure sottostanti sono riportati i valori dei più importanti parametri meccanici del calcestruzzo compresso e dell'acciaio, in funzione della variazione della temperatura del materiale stesso.

- **Calcestruzzo (aggregati silicei)**

Per quanto concerne le proprietà meccaniche del calcestruzzo, è stato fatto riferimento alla tipologia a peso normale con aggregati di tipo silicei.

Concrete temp.θ	Aggregati silicei		
	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
[°C]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4
20	1.00	0.0025	0.0200
100	1.00	0.0040	0.0225
200	0.95	0.0055	0.0250
300	0.85	0.0070	0.0275
400	0.75	0.0100	0.0300
500	0.60	0.0150	0.0325
600	0.45	0.0250	0.0350
700	0.30	0.0250	0.0375
800	0.15	0.0250	0.0400
900	0.08	0.0250	0.0425
1000	0.04	0.0250	0.0450
1100	0.01	0.0250	0.0475
1200	0.00	-	-

Abbildung 3: Eigenschaften des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur

Was die Bewertung des Elastizitätsmoduls des Betons  $E_{c,\theta}$  betrifft, der ebenfalls je nach Temperatur veränderlich ist, wurde auf die konstitutive Verbindung Bezug genommen, die in derselben Rechtsvorschrift genannt und in der folgenden Abbildung dargestellt ist:

Illustrazione 3: Caratteristiche del calcestruzzo in funzione della temperatura

Per ciò che concerne la valutazione del modulo elastico del calcestruzzo  $E_{c,\theta}$ , anch'esso variabile in funzione della temperatura, si è fatto riferimento al legame costitutivo presentato nella stessa normativa e illustrato nella figura seguente:

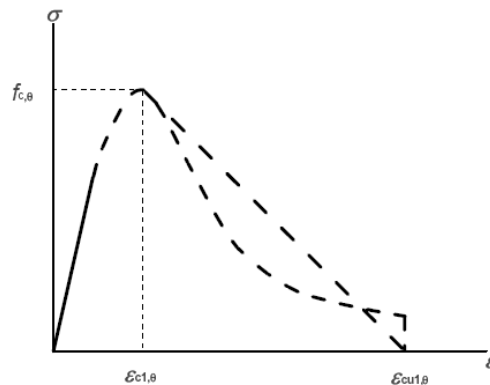


Abbildung 4: Verbindung Spannung-Verformung des Betons bei hohen Temperaturen

Illustrazione 4: Legame tensioni-deformazioni del calcestruzzo ad elevate temperature

Bei den nachfolgend erläuterten „Warmanalysen“ wurde der Elastizitätsmodul als Sekante berücksichtigt, der mit Bezug auf die zuvor dargestellte konstitutive Verbindung als Verhältnis zwischen der Spitzenbeständigkeit und der damit verbundenen Verformung für einen zugewiesenen Temperaturwert bestimmt wird:

Nelle analisi “a caldo”, illustrate nel seguito, è stato considerato il modulo elastico “secante” determinato, con riferimento al legame costitutivo illustrato precedentemente, come il rapporto tra la resistenza di picco e la deformazione associata, per un assegnato valore della temperatura:

$$E_{c,\theta} = f_{c,\theta} / \epsilon_{c1,\theta}$$

In den folgenden Abbildungen ist der Verlauf der Elastizitätsmodul als Sekante je nach Temperatur wiedergegeben.

Nelle figure seguenti sono riportati gli andamenti dei moduli elastici secanti in funzione della temperatura.

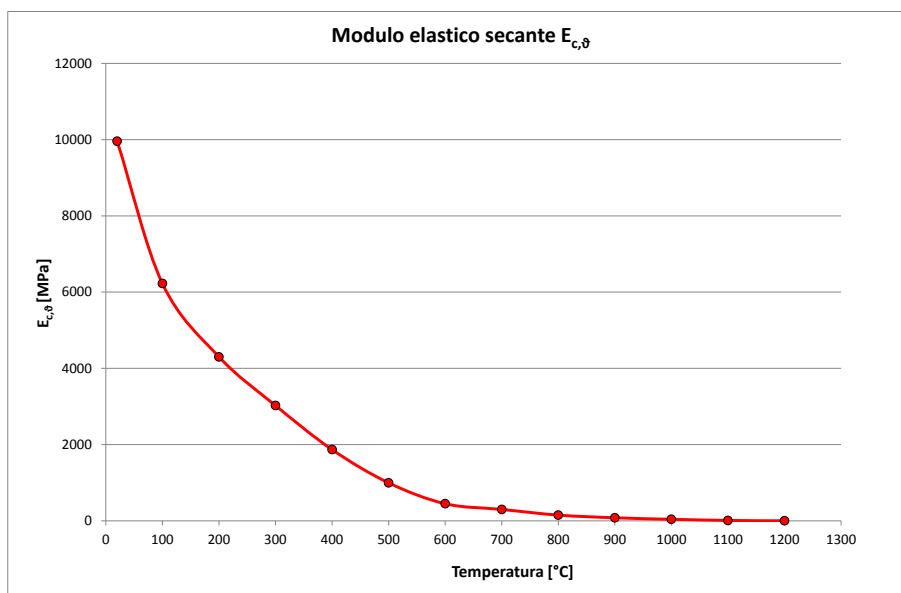


Abbildung 5: Änderung des Elastizitätsmoduls als Sekante je nach Temperatur (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 5: Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
--------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------

$E_{c,\theta}$ [MPa]	7677.5	5304	3729	2303	1228	553	369	184	98	49	12	0
-------------------------	--------	------	------	------	------	-----	-----	-----	----	----	----	---

Abbildung 6: Änderung des Elastizitätsmoduls als Sekante je nach Temperatur (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 6: Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

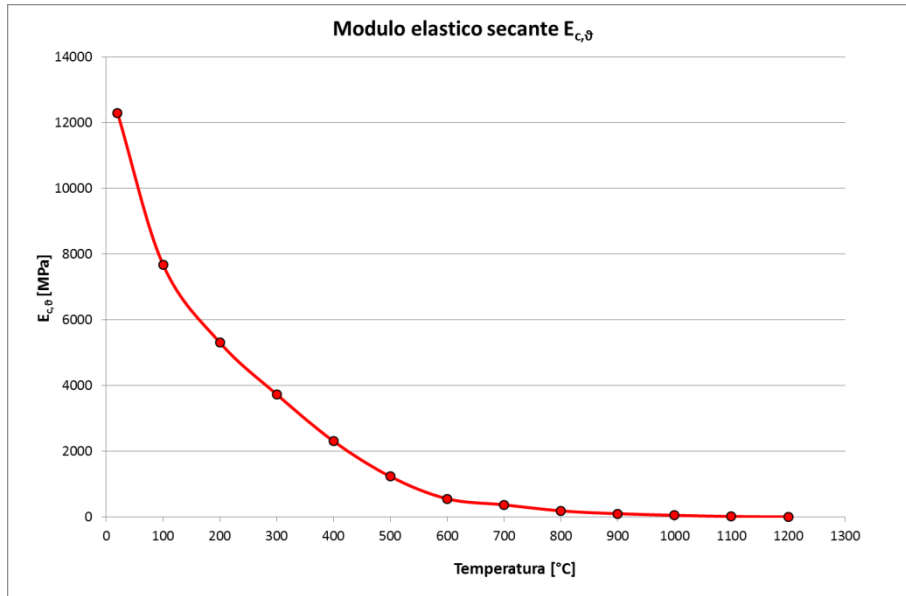


Abbildung 7: Änderung des Elastizitätsmoduls als Sekante je nach Temperatur (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 7: Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$E_{c,\theta}$ [MPa]	7677.5	5304	3729	2303	1228	553	369	184	98	49	12	0

Abbildung 8: Änderung des Elastizitätsmoduls als Sekante je nach Temperatur (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 8: Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

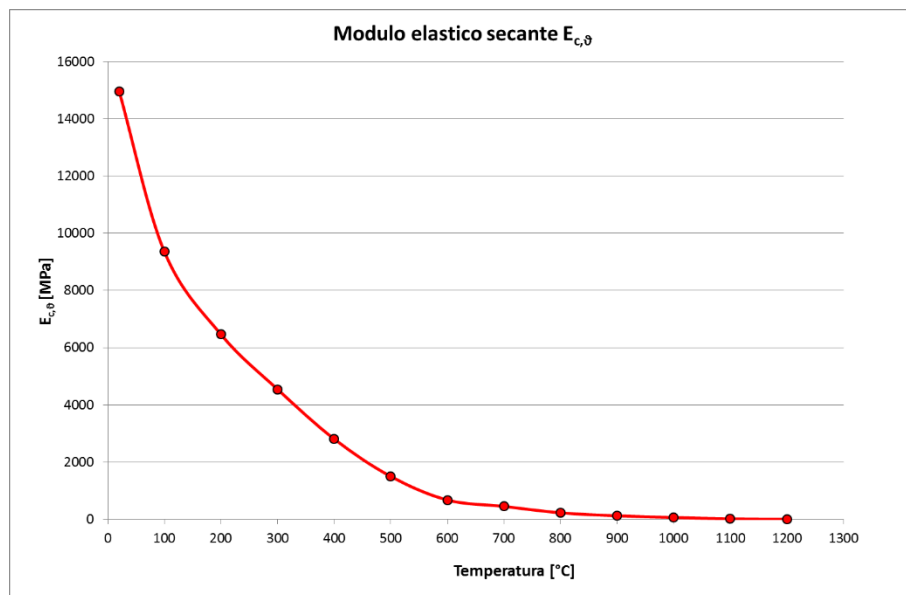


Abbildung 9: Änderung des Elastizitätsmoduls als Sekante je nach Temperatur (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 9: Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

Fachbereich:  
 Thema:  
 Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
 Tema: Documenti generali  
 Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

nach Temperatur (Rck = 45 MPa)

funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$E_{c,\vartheta}$ [MPa]	9350	6460	4541	2805	1496	673	449	224	120	60	15	0

Abbildung 10: Änderung des Elastizitätsmoduls als Sekante je nach Temperatur (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 10: Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Wie zuvor beschrieben, beruht das mechanische Verhalten des Betons auf einem Modell mit Bruch nach Tresca; dem Werkstoff wurde ein Reibungswinkel gleich Null und eine der Hälfte seiner Grenzbeständigkeit bei einer gegebenen Temperatur entsprechende Kohäsion auferlegt. Die im Modell verwendete Kohäsion ergibt sich daher aus der folgenden Kurve.

Come descritto in precedenza il comportamento meccanico del calcestruzzo è stata basata su un modello avente rottura alla Tresca, imponendo al materiale un angolo di attrito nullo ed una coesione pari a metà della resistenza ultima dello stesso ad una data temperatura. La coesione impiegata nel modello di calcolo risulta pertanto dalla seguente curva.

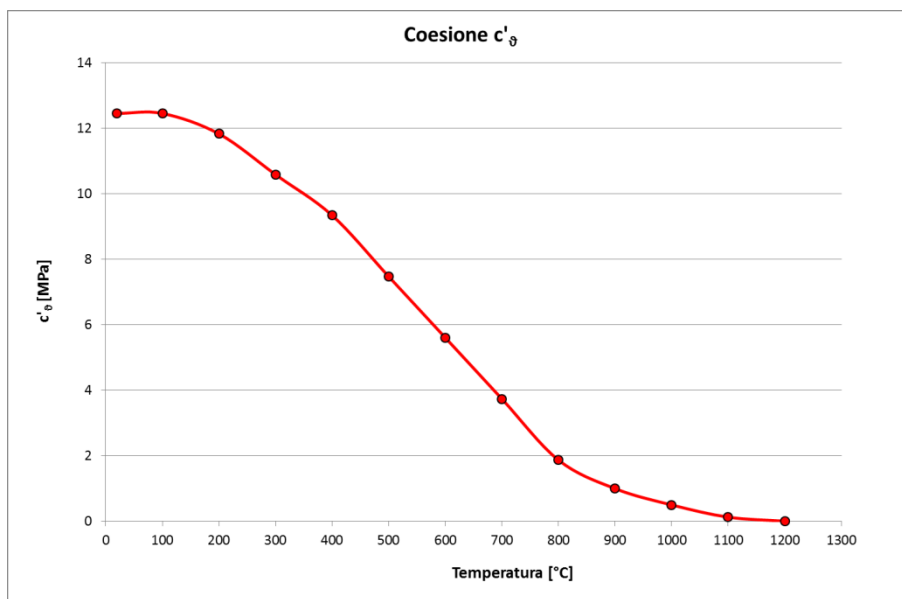


Abbildung 11: Änderung der Kohäsion je nach Temperatur (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 11: Variazione della coesione in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$c'_{\vartheta}$ [MPa]	12.45	11.83	10.58	9.34	7.47	5.60	3.74	1.87	1.00	0.50	0.12	0

Abbildung 12: Änderung der Kohäsion  $c'$  je nach Temperatur (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 12: Variazione della coesione  $c'$  in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)



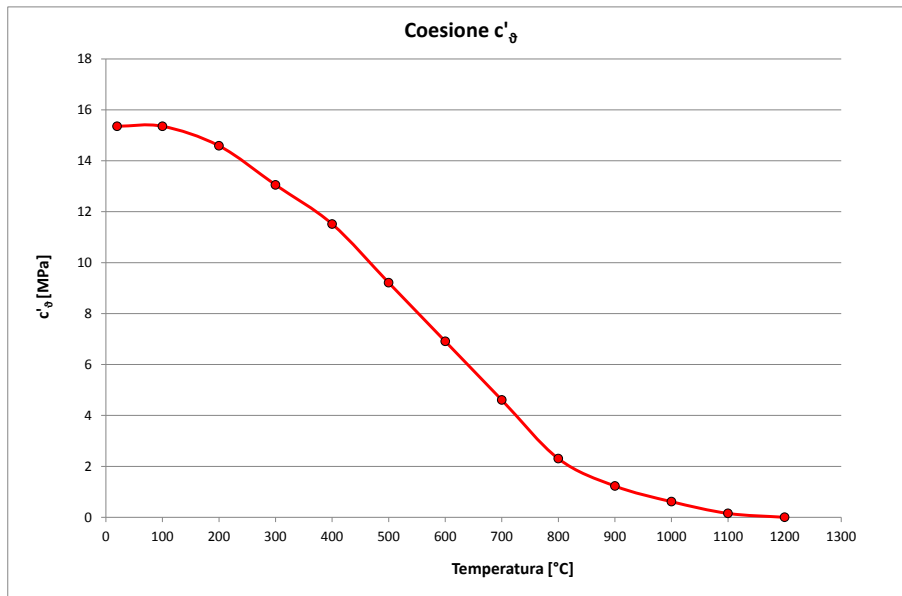


Abbildung 13: Änderung der Kohäsion je nach Temperatur (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 13: Variazione della coesione in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$c'_{\theta}$ [MPa]	15.36	14.59	13.05	11.52	9.21	6.91	4.61	2.30	1.23	0.61	0.15	0

Abbildung 14: Änderung der Kohäsion  $c'$  je nach Temperatur (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 14: Variazione della coesione  $c'$  in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

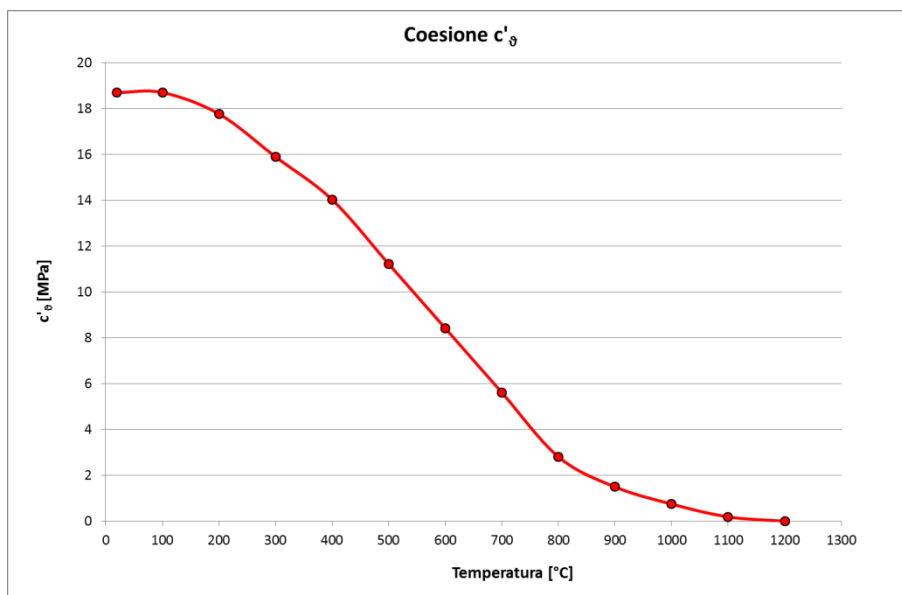


Abbildung 15: Änderung der Kohäsion je nach Temperatur (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 15: Variazione della coesione in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Fachbereich:  
 Thema:  
 Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
 Tema: Documenti generali  
 Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$c'_{\vartheta}$ [MPa]	18.70	17.77	15.90	14.03	11.22	8.42	5.61	2.81	1.50	0.75	0.19	0

Abbildung 16: Änderung der Kohäsion  $c'$  je nach Temperatur (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 16: Variazione della coesione  $c'$  in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Daraus folgt, dass die Druckfestigkeit des Betons  $f_{ck}$  ebenfalls in Abhängigkeit von der Temperatur gemäß der folgenden Kurve veränderlich ist.

Ne consegue che la resistenza a compressione del calcestruzzo  $f_{c,k}$  risulta anch'essa variabile in funzione della temperatura secondo la seguente curva.

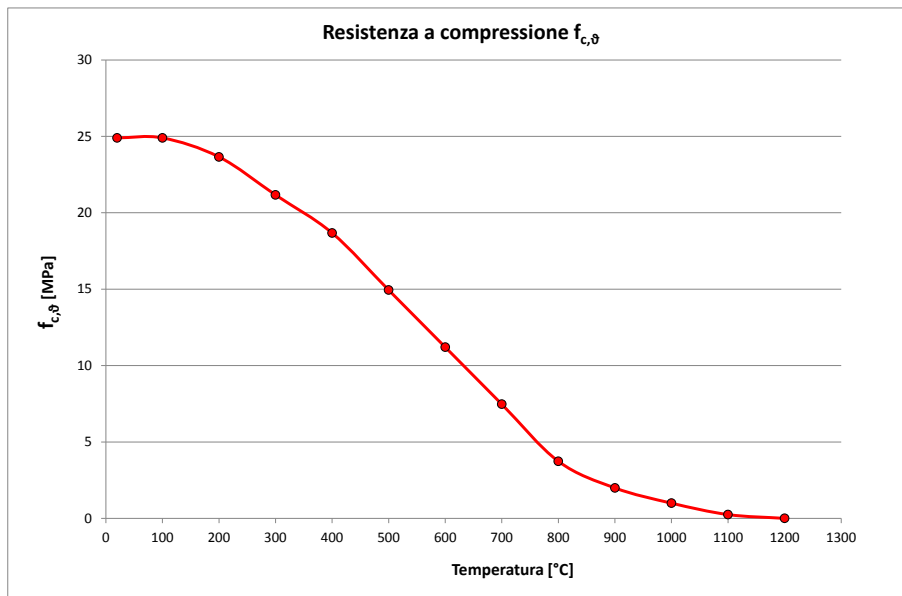


Abbildung 17: Änderung der Druckfestigkeit je nach Temperatur (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 17: Variazione della resistenza a compressione in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

Beton Rck=30 MPa;  $f_{ck}$ =24.9 MPa:

Calcestruzzo Rck=30 MPa;  $f_{c,k}$ =24.9 MPa:

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$f_{c,\theta}$ [MPa]	24.90	23.66	21.17	18.68	14.94	11.21	7.47	3.74	1.99	1.00	0.25	0.00

Abbildung 18: Beständigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 18: Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

Fachbereich:  
 Thema:  
 Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
 Tema: Documenti generali  
 Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

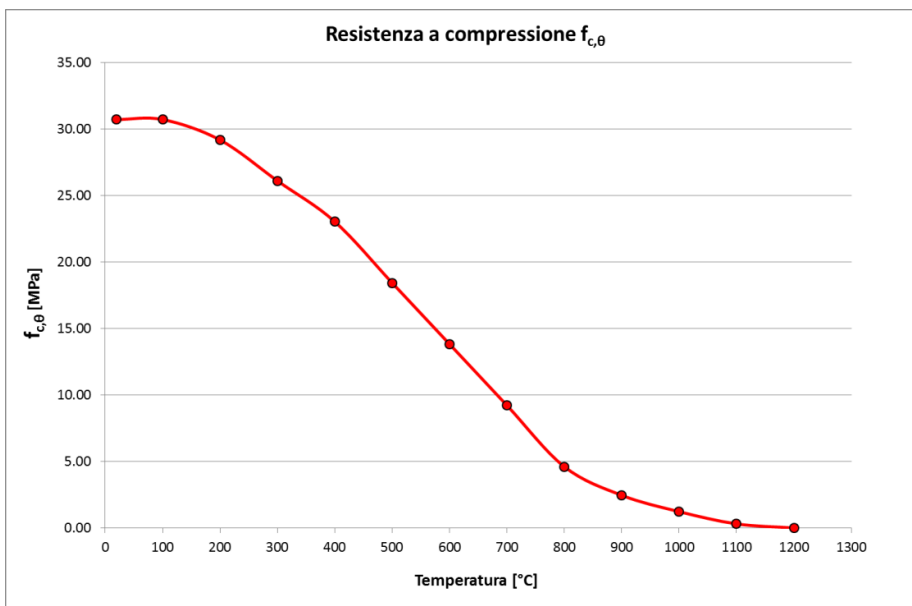


Abbildung 19: Änderung der Druckfestigkeit je nach Temperatur (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 19: Variazione della resistenza a compressione in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

Beton Rck=37 MPa; fck=30.71 MPa:

Calcestruzzo Rck=37 MPa; fck=30.71 MPa:

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
f <sub>c,θ</sub> [MPa]	30.71	29.17	26.10	23.03	18.43	13.82	9.21	4.61	2.46	1.23	0.31	0.00

Abbildung 20: Beständigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 20: Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

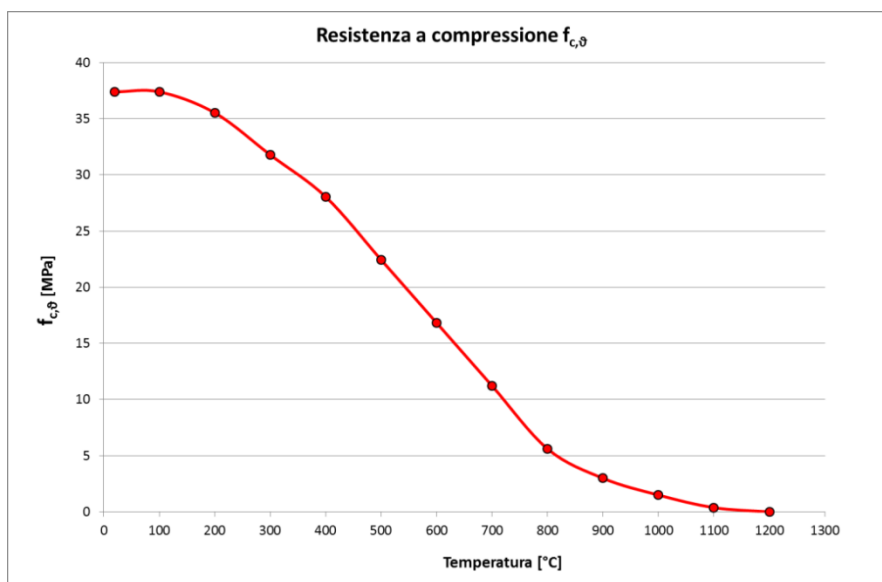


Abbildung 21: Änderung der Druckfestigkeit je nach Temperatur (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 21: Variazione della resistenza a compressione in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Beton Rck=45 MPa; fck=37.4 MPa:

Calcestruzzo Rck=45 MPa; fck=37.4 MPa:

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$f_{c,\theta}$ [MPa]	37.40	35.53	31.79	28.05	22.44	16.83	11.22	5.61	2.99	1.50	0.37	0.00

Abbildung 22: Beständigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 22: Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Schließlich wurde für die Bereiche der Auskleidung, die eine Temperatursteigerung erleiden, aufgrund der Zugfestigkeit des Werkstoffs die lineare Verringerung dieses Werts im Intervall von 100 bis 600 °C angewandt, wie in der folgenden Abbildung gezeigt ist, während der Beton bei diesen letzten Wert überschreitenden Temperaturen keine Zugfestigkeit bietet.

Infine, per le zone del rivestimento che subiscono un incremento di temperatura, per la resistenza a trazione del materiale si è utilizzata la riduzione lineare di tale valore nell'intervallo tra 100 e 600 °C, come indicato nella successiva figura, mentre per temperature superiori a quest'ultimo valore il calcestruzzo non offre alcuna resistenza a trazione.

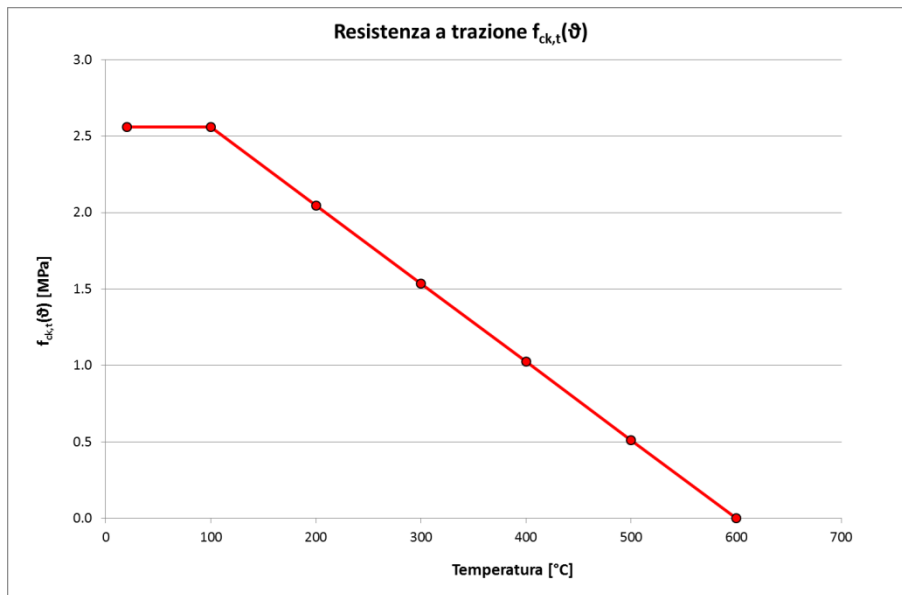


Abbildung 23: Änderung der Zugfestigkeit je nach Temperatur (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 23: Variazione della resistenza a trazione in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$f_{c,\theta}$ [MPa]	2.558	2.046	1.535	1.023	0.512	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 24: Beständigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 24: Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

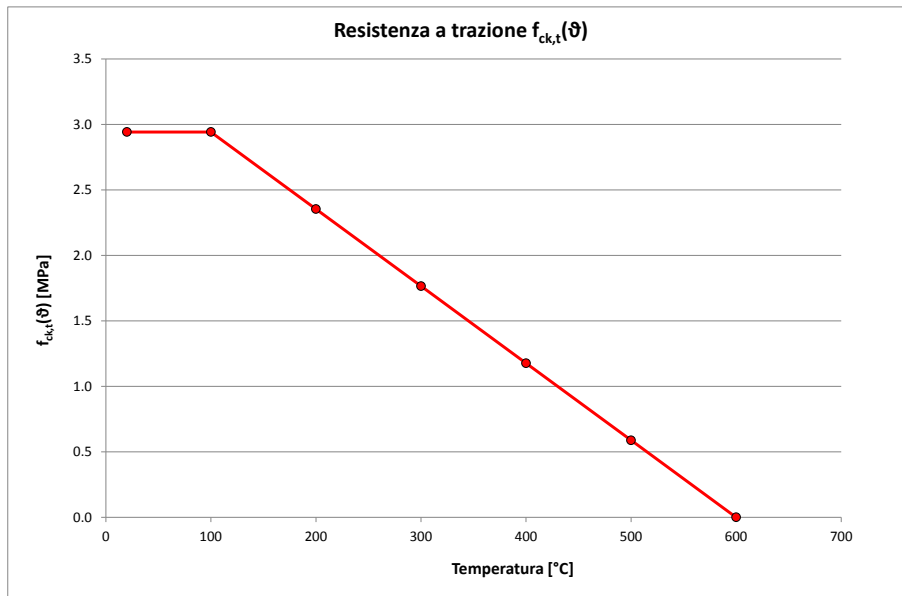


Abbildung 25: Änderung der Zugfestigkeit je nach Temperatur (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 25: Variazione della resistenza a trazione in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
f <sub>c,θ</sub> [MPa]	2.942	2.354	1.765	1.177	0.588	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 26: Beständigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 26: Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

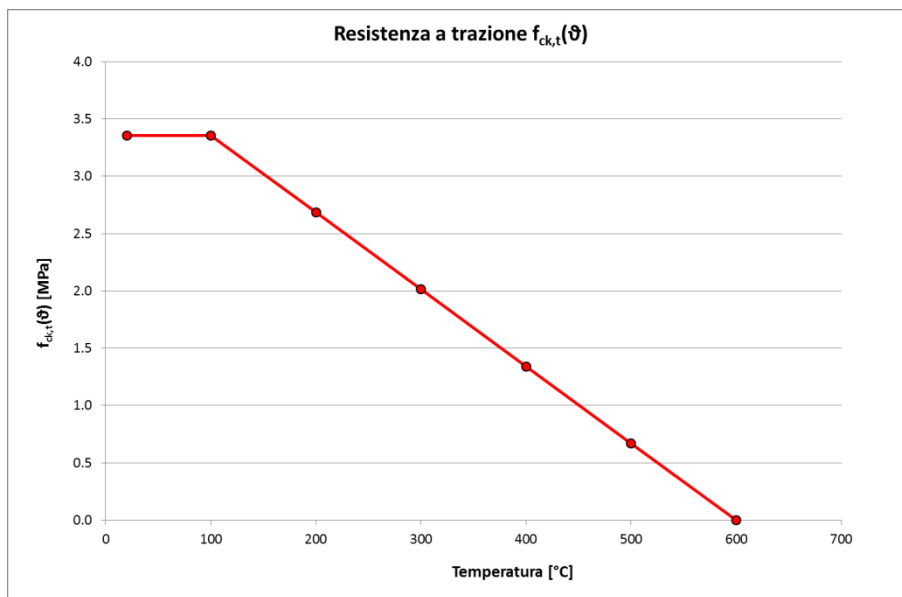


Abbildung 27: Änderung der Zugfestigkeit je nach Temperatur (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 27: Variazione della resistenza a trazione in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Fachbereich:  
 Thema:  
 Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
 Tema: Documenti generali  
 Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$f_{c,\theta}$ [MPa]	3.355	2.684	2.013	1.342	0.671	0	0	0	0	0	0	0

Abbildung 28: Beständigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 28: Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Schließlich ist zu berücksichtigen, dass die Verminderung der mechanischen Parameter mit Bezug auf die bis zum berücksichtigten Zeitpunkt erreichte Höchsttemperatur modelliert wurde. Auf diese Weise ist garantiert, dass, falls während der Entwicklung der Brandkurve eine Verringerung der Temperatur für den Werkstoff eintritt, nicht gleichzeitig auch die mechanischen Eigenschaften wiederhergestellt werden.

Si consideri infine che il decadimento dei parametri meccanici è stato modellato con riferimento alla temperatura massima raggiunta fino all'istante temporale considerato. In tale maniera si garantisce che, laddove si verifichi una diminuzione di temperatura per il materiale durante l'evoluzione della curva di incendio, non si verifichi contestualmente un ripristino delle caratteristiche meccaniche.

- **Bewehrungsstahl**

- **Acciaio per armatura**

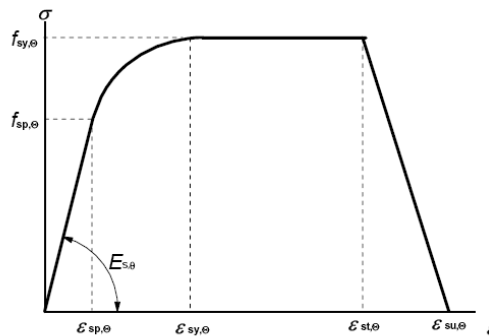
Die Änderung der mechanischen Eigenschaften je nach Temperatur hängen von der Art des Stahls und der Verarbeitungsart ab. Mit Bezugnahme auf Absatz 3.2.3 der EN 1992-1-2 und unter Berücksichtigung eines warmgewalzten Stahls vom Typ N ist in der folgenden Abbildung die konstitutive Verbindung des Werkstoffs dargestellt, während die Reduzierungsverhältnisse des Elastizitätsmoduls, der Proportionalitätsgrenze und der maximalen Festigkeit in der folgenden Tabelle angegeben sind.

La variazione delle caratteristiche meccaniche dell'acciaio in funzione della temperatura dipendono dal tipo di acciaio e dal tipo di lavorazione. Facendo riferimento al paragrafo 3.2.3 dell'EN 1992-1-2 e considerando un acciaio di tipo N laminato a caldo, nella figura seguente è illustrato il legame costitutivo del materiale mentre i rapporti riduttivi del modulo di elasticità, del limite di proporzionalità e della resistenza massima sono presentati nella seguente tabella:

Steel Temperature $\theta$ [°C]	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
	hot rolled	cold worked	hot rolled	cold worked	hot rolled	cold worked
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Abbildung 29: Eigenschaften des Stahls je nach Temperatur

Illustrazione 29: Caratteristiche dell'acciaio in funzione della temperatura



Range	Stress $\sigma(\theta)$	Tangent modulus
$\epsilon \leq \epsilon_{sp,\theta}$	$\epsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\epsilon_{sp,\theta} \leq \epsilon \leq \epsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon)^2]^{0.5}$	$\frac{b(\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon)}{a[a^2 - (\epsilon - \epsilon_{sp,\theta})^2]^{0.5}}$
$\epsilon_{sy,\theta} \leq \epsilon \leq \epsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	0
$\epsilon_{st,\theta} \leq \epsilon \leq \epsilon_{su,\theta}$	$f_{sy,\theta} [1 - (\epsilon - \epsilon_{st,\theta}) / (\epsilon_{su,\theta} - \epsilon_{st,\theta})]$	-
$\epsilon = \epsilon_{su,\theta}$	0,00	-
Parameter *)	$\epsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta}$ $\epsilon_{sy,\theta} = 0,02$ $\epsilon_{st,\theta} = 0,15$ $\epsilon_{su,\theta} = 0,20$ Class A reinforcement: $\epsilon_{st,\theta} = 0,05$ $\epsilon_{su,\theta} = 0,10$	
Functions	$a^2 = (\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon_{sp,\theta})(\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon_{sp,\theta} + c/E_{s,\theta})$ $b^2 = c (\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon_{sp,\theta}) E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\epsilon_{sy,\theta} - \epsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$	

Abbildung 30: Verbindung Spannungen-Verformungen im Stahl

Illustrazione 30: Legame tensioni-deformazioni nell'acciaio

#### 4.4 THERMISCHE EIGENSCHAFTEN

#### 4.4 PROPRIETÀ TERMICHE

Sowohl zur Durchführung der thermisch-mechanischen Analysen als auch für die Warmprüfung der Querschnitte mussten die mechanischen und thermischen Eigenschaften, die die Wärmeübertragung innerhalb des Querschnitts bestimmen, definiert werden. Das Vorhandensein der gewöhnlichen Bewehrungen innerhalb des Stahlbeton-Querschnitts des Tunnels wurde für die Bewertung der thermischen Kartierung nicht berücksichtigt. Daher sind nachfolgend die Gesetze der Änderung in Abhängigkeit von der Temperatur in Bezug auf „Wärmeleitfähigkeit“, „spezifische Wärme“, „Dichte“ und „Wärmeausdehnungskoeffizient“ nur bezüglich des Betons mit Gesteinskörnungen mit Bezug auf Absatz 3.3 der Norm DIN EN 1992-1-2 (2005) angeführt:

Sia per l'esecuzione dell'analisi termo-meccanica che per la verifica sezionale a caldo, si è reso necessario definire le proprietà meccaniche e termiche che governano la propagazione del calore all'interno della sezione. La presenza delle armature ordinarie all'interno della sezione in c.a. della galleria è stata trascurata ai fini della valutazione della mappatura termica. Di seguito, quindi, sono riportate le leggi di variazione, in funzione della temperatura, della "conducibilità termica", del "calore specifico", "densità" e "coefficiente di espansione termica", relative al solo calcestruzzo con aggregati silicei con riferimento al paragrafo 3.3 dell'UNI EN 1992-1-2 (2005):

- **Wärmeleitfähigkeit**

- **Conducibilità termica**

Die Kurve der Änderung der Wärmeleitfähigkeit wurde unter Beachtung der Angaben der Rechtsvorschrift bestimmt, die eine obere und eine untere Grenzkurve vorsieht, wie in der folgenden Abbildung dargestellt ist.

La curva di variazione della conducibilità termica è stata definita nel rispetto delle indicazioni della normativa, la quale prevede una curva limite superiore ed una curva limite inferiore, così come riportato nella figura seguente.

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 (\theta/100) + 0,0107 (\theta/100)^2 \text{ W/m K} \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 (\theta/100) + 0,0057 (\theta/100)^2 \text{ W/m K} \quad \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

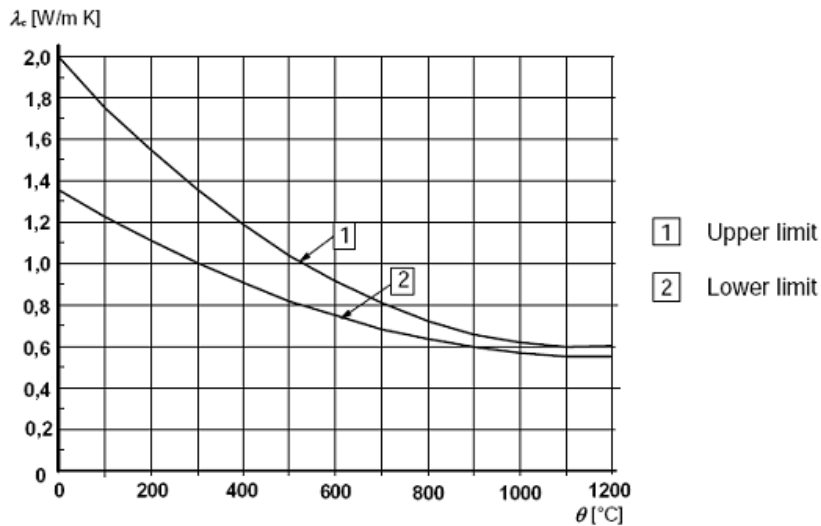


Abbildung 31: Gesetz der Änderung der Wärmeleitfähigkeit laut Rechtsvorschrift

Illustrazione 31: Legge di variazione della conducibilità termica secondo normativa

T [°C]	0	200	400	600	800	1000	1200
$\lambda_c$ [W/mK]	1.61	1.29	1.04	0.84	0.69	0.61	0.57

Abbildung 32: Werte der planmäßigen Wärmeleitfähigkeit

Illustrazione 32: Valori della conducibilità termica di progetto

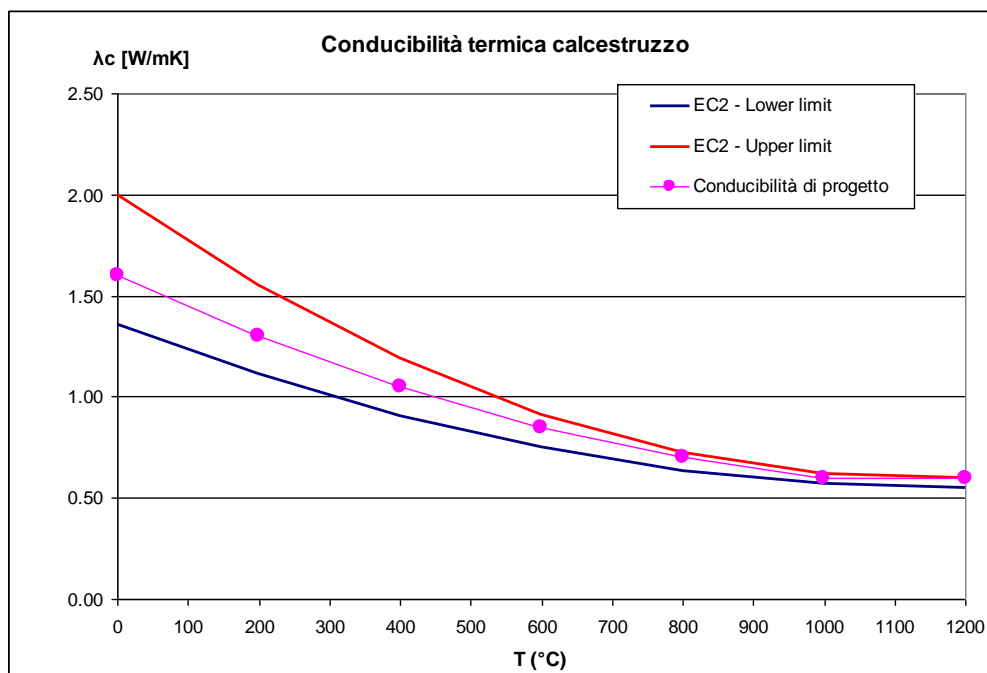


Abbildung 33: Planmäßige Wärmeleitfähigkeit

Illustrazione 33: Conducibilità termica di progetto



• **Spezifische Wärme**

Das Gesetz der Änderung der spezifischen Wärme in Abhängigkeit von der Temperatur ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Nach der Rechtsvorschrift nimmt diese Größe bei steigender Temperatur zu.

• **Calore specifico**

La legge di variazione del calore specifico in funzione della temperatura è riportata nella figura seguente. Secondo la normativa, tale grandezza risulta crescente all'aumentare della temperatura.

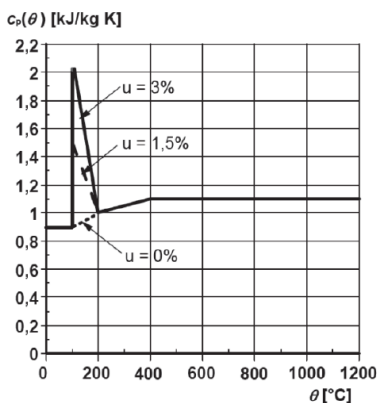


Abbildung 34: Spezifische Wärme des Betons mit Gesteinskörnung in Abhängigkeit von der Temperatur  $c_p(\theta)$  (Feuchtigkeit  $u = 0$  Gew.-% wird angewandt)

Illustrazione 34: calore specifico del calcestruzzo, con additivo siliceo  $c_p(\theta)$  in funzione della temperatura (umidità  $u = 0$  Gew.-% viene applicata)

$$\begin{aligned}
 c_p(\theta) &= 900 \text{ (J/kg K)} & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C} \\
 c_p(\theta) &= 900 + (\theta - 100) \text{ (J/kg K)} & \text{for } 100^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C} \\
 c_p(\theta) &= 1000 + (\theta - 200)/2 \text{ (J/kg K)} & \text{for } 200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C} \\
 c_p(\theta) &= 1100 \text{ (J/kg K)} & \text{for } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

Abbildung 35: Gesetz der Änderung der spezifischen Wärme laut Rechtsvorschrift

Illustrazione 35: Legge di variazione del calore specifico secondo normativa

T [°C]	20	100	101	115	200	300	1200
$c_p$ [J/kg K]	900	900	901	915	1000	1050	1100

Abbildung 36: Werte der planmäßigen spezifischen Wärme

Illustrazione 36: Valori del calore specifico di progetto

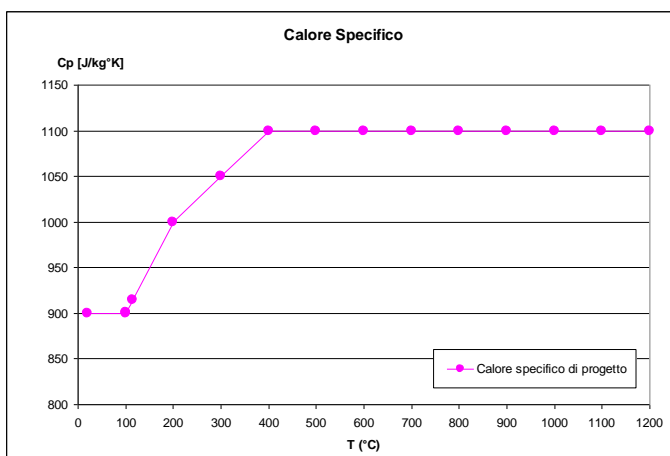


Abbildung 37: Planmäßige spezifische Wärme

Illustrazione 37: Calore specifico di progetto

• **Dichte**

• **Densità**

Fachbereich:  
 Thema:  
 Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
 Tema: Documenti generali  
 Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

Die Dichte des Betons erleidet eine Verminderung bei steigender Temperatur und nachfolgend ist das betreffende Gesetz der Änderung laut Rechtsvorschrift angeführt:

La densità del calcestruzzo subisce una diminuzione all'aumentare della temperatura e di seguito è riportata la relativa legge di variazione fornita dalla normativa:

$$\begin{aligned} \rho(\theta) &= \rho(20^\circ\text{C}) && \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 115^\circ\text{C} \\ \rho(\theta) &= \rho(20^\circ\text{C}) \cdot (1 - 0,02(\theta - 115)/85) && \text{for } 115^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C} \\ \rho(\theta) &= \rho(20^\circ\text{C}) \cdot (0,98 - 0,03(\theta - 200)/200) && \text{for } 200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C} \\ \rho(\theta) &= \rho(20^\circ\text{C}) \cdot (0,95 - 0,07(\theta - 400)/800) && \text{for } 400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Abbildung 38: Gesetz der Änderung der Dichte laut Rechtsvorschrift

Illustrazione 38: Legge di variazione della densità secondo normativa

• **Wärmeausdehnungskoeffizient**

• **Coefficiente di espansione termica**

Das Gesetz der Änderung des Wärmeausdehnungskoeffizienten hängt von der Art der Betonzuschlagstoffe ab. Die Rechtsvorschrift liefert die Veränderlichkeit der thermischen Verformung  $\epsilon_c(T)$  im Verhältnis zur Temperatur mit Bezug auf eine Anfangslänge bei 20 °C. Von dieser Größe kann auf den Wärmeausdehnungskoeffizienten zurückgegangen werden:

La legge di variazione del coefficiente di espansione termica dipende dal tipo di aggregati che costituiscono il calcestruzzo. La normativa fornisce la variabilità, rispetto alla temperatura, della deformazione termica  $\epsilon_c(T)$  con riferimento ad una lunghezza iniziale a 20°C. Da tale grandezza è possibile risalire al coefficiente di espansione termica come:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{1}{\Delta T} = \frac{\epsilon_c(T)}{\Delta T}$$

Siliceous aggregates:

$$\begin{aligned} \epsilon_c(\theta) &= -1,8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6}\theta + 2,3 \times 10^{-11}\theta^3 && \text{for } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700^\circ\text{C} \\ \epsilon_c(\theta) &= 14 \times 10^{-3} && \text{for } 700^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{aligned}$$

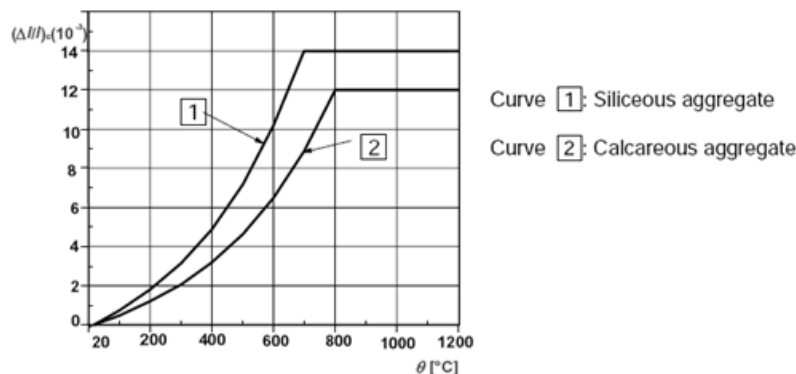


Abbildung 39: Gesetz der Änderung der thermischen Verformung laut Rechtsvorschrift

Illustrazione 39: Legge di variazione della deformazione termica secondo normativa

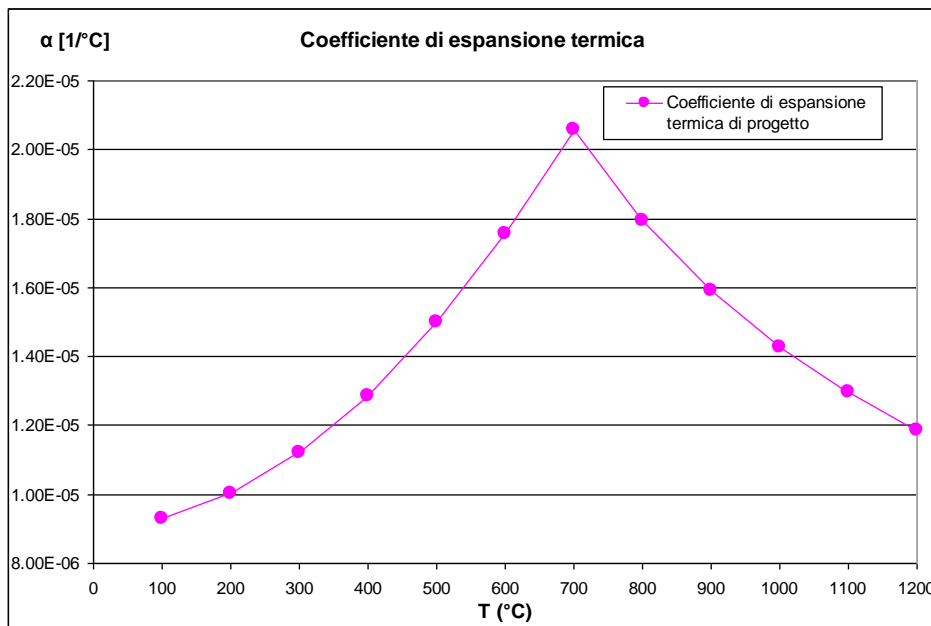


Abbildung 40: Planmäßiger Wärmeausdehnungskoeffizient

Illustrazione 40: Coefficiente di espansione termica di progetto

T [°C]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$\epsilon_c$	7.43E-04	1.80E-03	3.14E-03	4.89E-03	7.20E-03	1.02E-02	1.40E-02	1.40E-02	1.40E-02	1.40E-02	1.40E-02	1.40E-02
$\alpha$ [1/°C]	9.29E-06	1.00E-05	1.12E-05	1.29E-05	1.50E-05	1.76E-05	2.06E-05	1.79E-05	1.59E-05	1.43E-05	1.30E-05	1.19E-05

Abbildung 41: Werte der thermischen Verformung und des Koeffizienten  $\alpha$  für Beton mit Gesteinskörnung.

Illustrazione 41: Valori della deformazione termica e del coefficiente alfa per calcestruzzi silicei

#### 4.5 WÄRMEÜBERTRAGUNGSMODELL

Die Wärmeübertragung innerhalb des Strukturquerschnitts ist leitend und dieses Phänomen unterliegt der Fourier-Gleichung, die die Temperaturänderung (unbekannte Größe des Problems) in Raum und Zeit bestimmt. Unter Annahme einer Wärmeerzeugung im Innern des fertigen Volumens gleich Null und unter Betrachtung des Problems in nur zwei Dimensionen, ergibt sich:

#### 4.5 MODELLO DI TRASMISSIONE DEL CALORE

La propagazione del calore all'interno della sezione strutturale è del tipo conduttivo e matematicamente tale fenomeno è governato dall'equazione di Fourier, che definisce la variazione nello spazio e nel tempo della temperatura (incognita del problema). Assumendo una generazione di calore all'interno del volume finito pari a zero e considerando il problema in due sole dimensioni, si ha:

$$\lambda_c \cdot \left( \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, t)}{\partial y^2} \right) = \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t}$$

Hierbei sind:

Dove:

T die Temperatur, t die Zeit,  $\lambda_c$  die Wärmeleitfähigkeit,  $\rho$  die Volumenmasse,  $c_p$  die spezifische Wärme (wie bereits beschrieben, sind diese letzteren thermischen

T è la temperatura, t è il tempo,  $\lambda_c$  è la conducibilità termica,  $\rho$  è la massa volumica e  $c_p$  è il calore specifico (come già descritto precedentemente, quest'ultimi

Fachbereich:  
Thema:  
Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
Tema: Documenti generali  
Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

Parameter ebenfalls im Laufe der Zeit je nach erreichter Temperatur veränderlich).

parametri termici risultano variabili anch'essi nel tempo, in funzione della temperatura raggiunta).

Mit der Raumbedingung:

Con la condizione spaziale:

$$T(x,y, t=0) = T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T(x,y, t=0) = T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Mit der Zeitbedingung:

Con la condizione temporale:

$$\text{div}(\lambda_c \cdot \text{grad}T)_n = h_{net}$$

Der durch Konvektion und Abstrahlung auf eine Oberfläche, die mit dem Gas in Berührung steht, übertragene Nettowärmefluss  $h_{net}$  ergibt sich aus der folgenden Relation:

Il flusso di calore netto  $h_{net}$  trasmesso per convezione e irraggiamento su una superficie a contatto con il gas è dato dalla relazione:

$$h_{net} = \alpha_c \cdot (T_g - T_m) + \Phi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_g + 273)^4 - (T_m + 273)^4]$$

Hierbei sind:

Dove:

$\alpha_c$  der angewandte Koeffizient des Wärmeaustauschs durch Konvektion gleich  $25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C})$ ,  $T_m$  die Gastemperatur,  $T_g$  die Temperatur der ausgesetzten Oberfläche,  $\Phi$  der angewandte Konfigurationsfaktor gleich  $1,0$ ,  $\varepsilon$  der sich ergebende angewandte Remissionskoeffizient gleich  $0,8$  und  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante gleich  $5,7 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}^4)$ .

$\alpha_c$  è il coefficiente di scambio di calore per convezione assunto pari  $25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C})$ ,  $T_m$  è la temperatura del gas mentre  $T_g$  è la temperatura della superficie esposta,  $\Phi$  è il fattore di configurazione assunto pari a  $1,0$ ,  $\varepsilon$  è il coefficiente di remissività risultante assunto pari a  $0,8$  e  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann pari a  $5,7 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}^4)$ .

Bei den durchgeführten numerischen Analysen wurde die der zugewiesenen Brandkurve entsprechende Temperatur der Innenfläche der Auskleidung des Tunnels angewandt.

Nelle analisi numeriche effettuate la temperatura della superficie interna del rivestimento della galleria è stata assunta pari a quella della curva di incendio assegnata.

#### 4.6 BERECHNUNGSPHASEN

#### 4.6 FASI DI CALCOLO

Bei der thermisch-mechanischen Analyse wird von den Spannungs- und Verformungsbedingungen ausgegangen, die am Ende der Analysen bei Kälte (Zeit  $t=0$ ) erhalten wurden und zu denen die Auswirkungen des Vorhandenseins der Füllung im Sohlgewölbe und der Oberleitungslasten addiert werden, die in der Beschreibung der Lastfallkombinationen in den jeweiligen Berechnungsberichten im Einzelnen definiert sind. Im Einzelnen wird die gekoppelte Berechnung in Abhängigkeit von der Zeit der Temperaturverteilung und des Spannungs- und Verformungszustands in der Auskleidung und im Boden vorgenommen. Die

L'analisi termo-meccanica, viene effettuata partendo dalle condizioni tenso-deformative ottenute al termine dell'analisi "a freddo" (tempo  $t=0$ ) a cui sono stati sommati gli effetti della presenza del riempimento in arco rovescio e dei carichi delle catenarie, definiti dettagliatamente nella descrizione delle combinazioni di carico nelle rispettive relazioni di calcolo. Nel dettaglio viene effettuato il calcolo accoppiato in funzione del tempo della distribuzione delle temperature e dello stato tenso-deformativo nel rivestimento e nel terreno. Il calcolo del transitorio termo-meccanico è stato effettuato mediante un algoritmo di integrazione nel

Fachbereich:

Thema:

**Dokumenteninhalt:**

Berechnung des thermischen und mechanischen instationären Zustands erfolgte mithilfe eines völlig expliziten Integrationsalgorithmus für die zeitliche Entwicklung in Bezug auf die Gleichungen, auf denen das mechanische Problem und das Wärmeübertragungsproblem beruhen. Die thermisch-mechanische Koppelung wird von den Funktionen regiert, die die Abhängigkeit der Dichte des Betons, des Elastizitätsmoduls, der Kohäsion, der Zugfestigkeit, des Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha$ , der Änderung der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärme des Betons von der Temperatur ausdrücken. Im Laufe der thermisch-mechanischen Analyse, die für zwei bedeutsame Querschnitte und getrennt für die beiden Brandkurven (EUREKA ed RWS) verlief, wurde die komplette „Speicherung“ des Zustand des Modells für die folgenden Zeiten vorgenommen: 5, 60, 120 und 170 Minuten für die Kurve EUREKA und 10, 60 und 120 Minuten für die Kurve RWS.

Settore: 06-Progettazione delle opere

Tema: Documenti generali

**Contenuto documento:** Protezione costruttiva all'incendio

tempo, di tipo totalmente esplicito, delle equazioni che governano il problema meccanico e il problema di propagazione termica. L'accoppiamento termo-meccanico è governato dalle funzioni che esprimono la dipendenza della densità del calcestruzzo, del modulo elastico, della coesione, della resistenza a trazione, del coefficiente di espansione termica  $\alpha$ , della variazione della conduttività termica e del calore specifico del calcestruzzo in funzione della temperatura. Nel corso dell'analisi termo-meccanica, sviluppata per due sezioni significative e distintamente per le due curve d'incendio (EUREKA ed RWS) è stato eseguito il "salvataggio" completo dello stato del modello per i seguenti tempi: 5, 60, 120 e 170 minuti per la curva EUREKA e 10, 60 e 120 minuti per la curva RWS.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Die Ergebnisse, die für jeden durch Implementierung sind in den jeweiligen Berechnungsberichten enthalten.

Als Beispiel sind die Ergebnisse solcher Analysen des Regelquerschnitts N2-TP-4,9 angeführt. Sie wurden mit Bezug auf den ersten gegrabenen Tunnel beurteilt, der in den Analysen als der rechte Tunnel erscheint und unter der Autobahn liegt. Im Einzelnen werden die Ergebnisse der Outputs der Berechnungen mit Bezug auf die Zeiten von 60, 120 und 170 Minuten für die Kurve EUREKA und auf die Zeiten von 60 und 120 Minuten für die Kurve RWS gezeigt und es wird der Verlauf der Temperatur, des Verformbarkeitsmoduls, der Kohäsion und des Zugs im Beton aufgezeigt. Wie in den vorherigen Kapiteln erwähnt, geht die Simulation von der Analyse bei Kälte aus. Zu dieser Bedingung wird das Vorhandensein des Füllbetons im Sohlgewölbe und der Oberleitungen hinzugerechnet. Das Berechnungsgitter wurde unter Anwendung einer „Aspect-Ratio“ modelliert, die an der Innenkante des Tunnels erhöht wurde, um eine bessere Wärmeausbreitung und eine bessere Spannungsverteilung in den Bereichen, an denen die thermische Last angelegt wird, d.h. wo die Konstruktion starken Temperaturschwankungen ausgesetzt ist.

## 5 SINTESI DEI RISULTATI

I risultati ottenuti per ciascuna sezione analizzata sono forniti nelle relative relazioni di calcolo.

Nel seguito, a titolo di esempio per meglio comprendere le modalità di analisi, sono riportati i risultati di tali analisi della sezione tipo N2-TP-4,9 valutati con riferimento alla prima galleria scavata, che nelle analisi risulta essere la galleria di destra sita al di sotto dell'impronta autostradale. Nel dettaglio saranno mostrati i risultati degli output di calcolo con riferimento a tempi pari a 60, 120 e 170 minuti con riferimento alla curva EUREKA e ai tempi 60 e 120 minuti per la curva RWS, mostrando l'andamento della temperatura, del modulo di deformabilità, della coesione e della trazione nel calcestruzzo. Come detto nei capitoli precedenti la simulazione parte dall'analisi "a freddo". A tale condizione viene sommata la presenza del calcestruzzo di riempimento in arco rovescio e delle catenarie. La mesh di calcolo è stata modellata adottando un "aspect-ratio" incrementato in corrispondenza dell'intradosso della galleria così da permettere una migliore diffusione termica e una migliore distribuzione delle tensioni in corrispondenza delle zone in cui viene applicato il carico termico, ovvero quella in cui la struttura è soggetta a delle forti variazioni di temperatura.

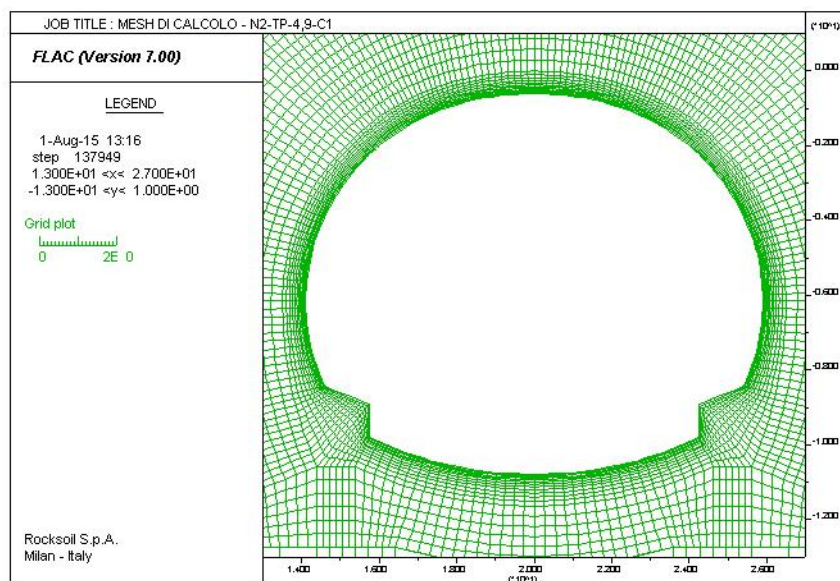


Abbildung 42: Berechnungsgitter

Illustrazione 42: Mesh di calcolo

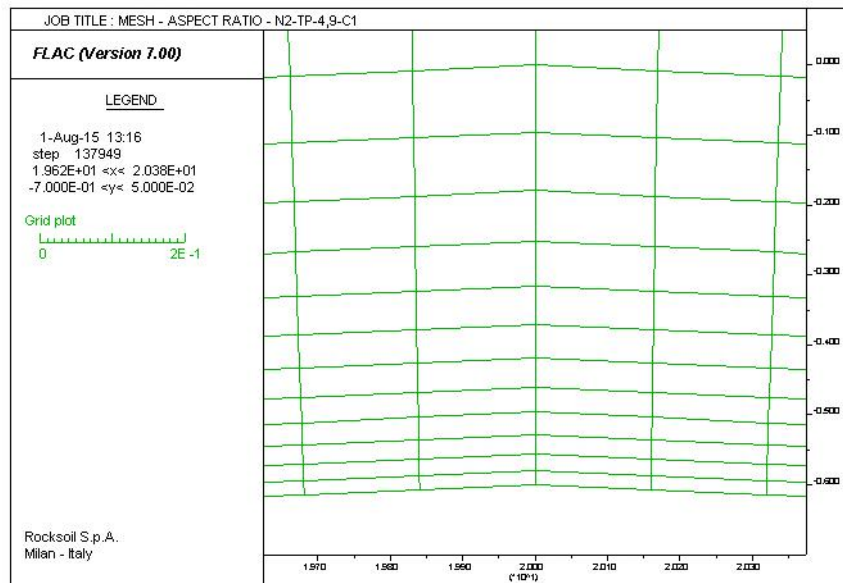


Abbildung 43: Berechnungsgitter – Aspect Ratio Innenkante der Gewölbesteine

Die Analysen wurden für die vorstehend beschriebenen Brandzeiten durchgeführt. Nach den erhaltenen Ergebnissen wurden die Beanspruchungen für die beiden in Betracht gezogenen Kurven EUREKA (Beanspruchungen für die Zeiten von 60, 120 und 170 Minuten) und RWS (Beanspruchungen für die Zeit von 120 Minuten) extrapoliert. Die Nachweise erfolgten an den drei am meisten beanspruchten Querschnitten an der Kalotte, an der linken und an der rechten Ulme des Tunnels.

Illustrazione 43: Mesh di calcolo – Aspect ratio intradosso concii

Le analisi sono state condotte per i tempi di incendio descritti in precedenza. A valle dei risultati ottenuti sono state estrapolate le sollecitazioni per le due curve considerate: EUREKA (sollecitazioni per i tempi di 60, 120 e 170 minuti) ed RWS (sollecitazioni per il tempo di 120 minuti). Le verifiche sono state effettuate in corrispondenza delle tre sezioni più sollecitate in calotta, piedritto sinistro e piedritto destro della galleria.

## 5.1 QUERSCHNITT N2-TP-4,9

Werden nachfolgend die grafischen Ausgaben der für den Querschnitt N2-TP-4,9 durchgeführten Analysen wiedergegeben, um das Verhalten der dem Lastfall Brand ausgesetzten Auskleidungen zu beobachten. Diese Analysen wurden für die langfristige Bedingung, in der das Vorhandensein von Grundwasser angenommen wird, durchgeführt.

### 5.1.1 Temperaturverteilung

In den folgenden Abbildungen ist der Temperaturverlauf in der Stärke der Tunnelauskleidung dargestellt (Kontrollquerschnitt am Scheitel der Kalotte für alle Analysen), mit den Zeiten von 60 – 120 – 170 Minuten für die Brandkurve EUREKA und den Zeiten 60 – 120 Minuten für die Kurve RWS. Bei beiden Wärmeeinwirkungen im Bereich der direkt dem Feuer

## 5.1 SEZIONE N2-TP-4,9 – ANALISI STRUTTURALE

Nel seguito vengono riportati gli output delle analisi termiche effettuate per la sezione N2-TP-4,9 al fine di osservare il comportamento dei rivestimenti soggetti al carico da incendio. Tali analisi, sono state effettuate per la condizione di lungo termine in cui si ipotizza la presenza di falda.

### 5.1.1 Distribuzione di temperatura

Nelle seguenti figure è rappresentato l'andamento della temperatura nello spessore del rivestimento della galleria (sezione di controllo in chiave calotta per tutte le analisi) ai tempi di 60 – 120 – 170 minuti, per la curva d'incendio EUREKA e al tempo 60 – 120 minuti per la curva RWS. Per entrambe le azioni termiche, nella zona di intradosso direttamente esposta al fuoco, la

Fachbereich:  
 Thema:  
 Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
 Tema: Documenti generali  
 Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

ausgesetzten Innenkante ist die Temperatur nach 120 Minuten niedriger als die, die nach 60 Minuten erreicht ist, entsprechend dem Verlauf der Brandkurven, die – wie in den vorhergehenden Kapiteln gezeigt – einen abnehmenden Verlauf haben, nachdem die Schwelle von 60 Minuten überschritten wurde (diese Auswirkung erscheint mit größerer Intensität bei der Kurve EUREKA, in der ein deutlicher Temperaturabfall in den Knoten der Innenkante zu bemerken ist). Diese Erscheinung ist jedoch nur auf die äußerste Schicht des Querschnitts beschränkt und man kann bemerken, dass die Temperatur im Innern des Querschnitts einer im Laufe der Zeit ansteigenden Entwicklung unterliegt, auch nachdem die Schwelle der 60 Minuten überschritten wurde (diese Auswirkung erscheint mit größerer Intensität bei der Kurve RWS). Im Besonderen beobachtet man, dass die Temperatur bei ca. 25 % der Stärke des Querschnitts, außer wenigen Zentimetern des Bereichs der Innenkante, von 60 bis zu 120 Minuten ein Ansteigen erfährt. Ferner beobachtet man im Allgemeinen, dass für die Zeit von 120 Minuten sowohl bei der Kurve EUREKA als auch bei der Kurve RWS ein Streifen in ca. 15 cm Abstand von der Innenkante eine Temperatur von 200 °C oder höher erreicht. Schließlich beobachtet man nach 170 Minuten, wie erwartet, bei der Kurve EUREKA eine allgemeine Abnahme der Temperatur der Innenkantenschichten infolge der längeren Abkühlung.

temperatura a 120 minuti risulta inferiore a quella che si raggiunge a 60 minuti, coerentemente con l'andamento delle curve d'incendio, le quali hanno, come mostrato nei capitoli precedenti, uno sviluppo decrescente superata la soglia dei 60 minuti (questo effetto si manifesta con maggiore intensità con la curva EUREKA, in cui si nota un netto decadimento della temperatura nei nodi dell'intradosso). Tale fenomeno risulta limitato, però, al solo strato più esterno della sezione, infatti si può notare come all'interno della sezione la temperatura subisca una evoluzione crescente nel tempo anche superata la soglia dei 60 minuti (questo effetto si manifesta con maggiore intensità con la curva RWS). In particolare si osserva che per circa il 25 % dello spessore della sezione, tranne pochi centimetri nella zona d'intradosso, la temperatura da 60 a 120 minuti subisce un incremento. Si osserva inoltre in generale come, al tempo di 120 minuti sia per la curva EUREKA che per la curva RWS, una fascia di circa 15 cm dall'intradosso raggiunge una temperatura maggiore o uguale a 200°C. Infine a 170 minuti, come da attese, si osserva per la curva EUREKA una generale diminuzione della temperatura degli strati di intradosso a seguito del prolungato raffreddamento.

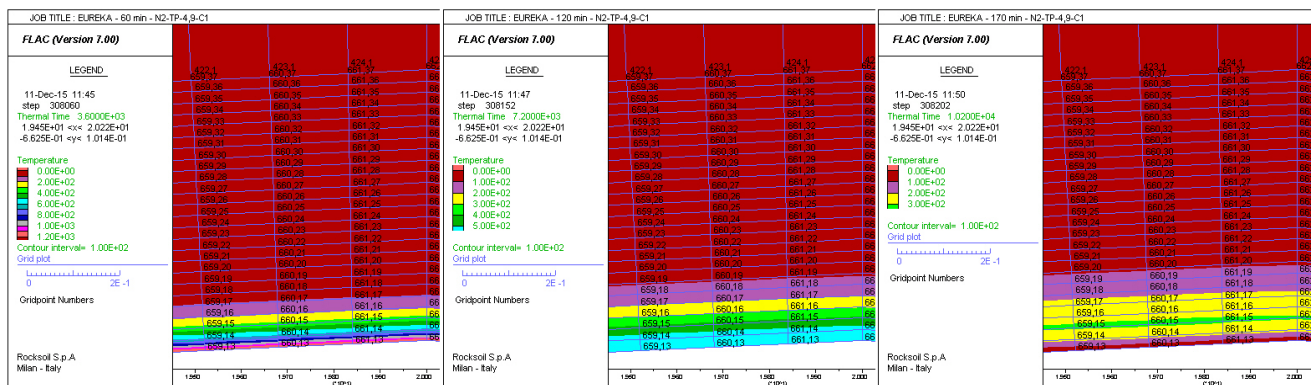


Abbildung 44: Temperaturverteilung in der Auskleidung – Kurve EUREKA

Illustrazione 44: Distribuzione della temperatura del rivestimento – Curva EUREKA



Fachbereich:  
 Thema:  
 Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
 Tema: Documenti generali  
 Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

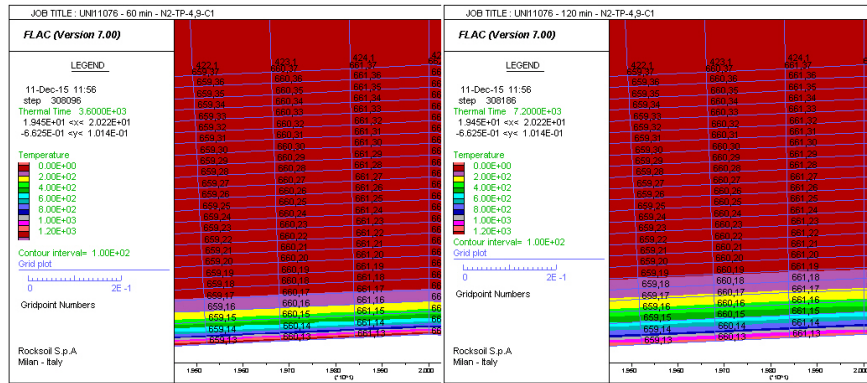


Abbildung 45: Temperaturverteilung in der Auskleidung – Kurve RWS

Illustrazione 45: Distribuzione della temperatura del rivestimento – Curva RWS

Im folgenden Bild wird der Temperaturverlauf in der Auskleidung je nach vergangener Zeit [sec] gezeigt; im Einzelnen wird die Kurve für jeden Knoten des Gitters in Entsprechung des Scheitels der Kalotte wiedergegeben, wie im folgenden Bild gezeigt ist (Gridpoints 1-24).

Nella seguente immagine viene riportata l'evoluzione della temperatura nel rivestimento in funzione del tempo [sec]; nel dettaglio viene riportata la curva per ogni nodo della mesh in corrispondenza della chiave calotta, come indicato (grid points 1-12) nella seguente immagine.

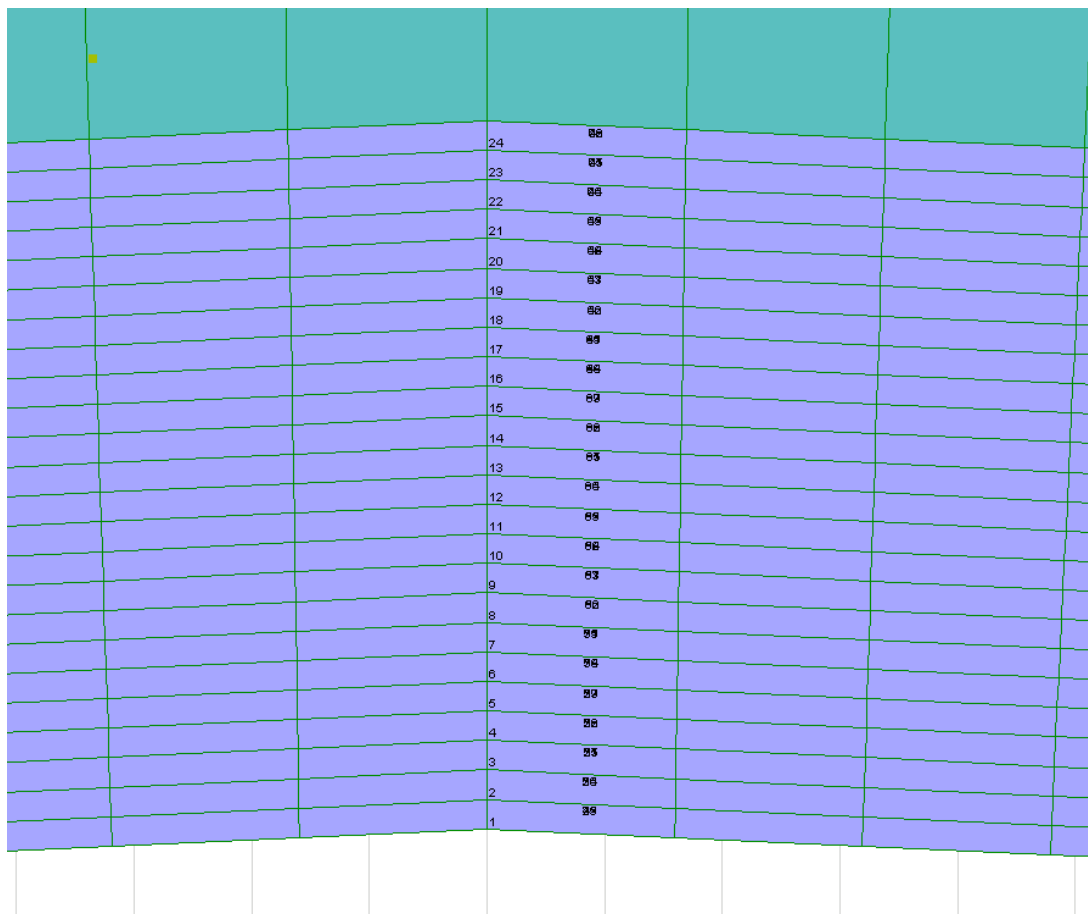


Abbildung 46: Querschnitt der Bewertung des Temperaturverlaufs

Illustrazione 46: Sezione di valutazione dell'evoluzione della temperatura

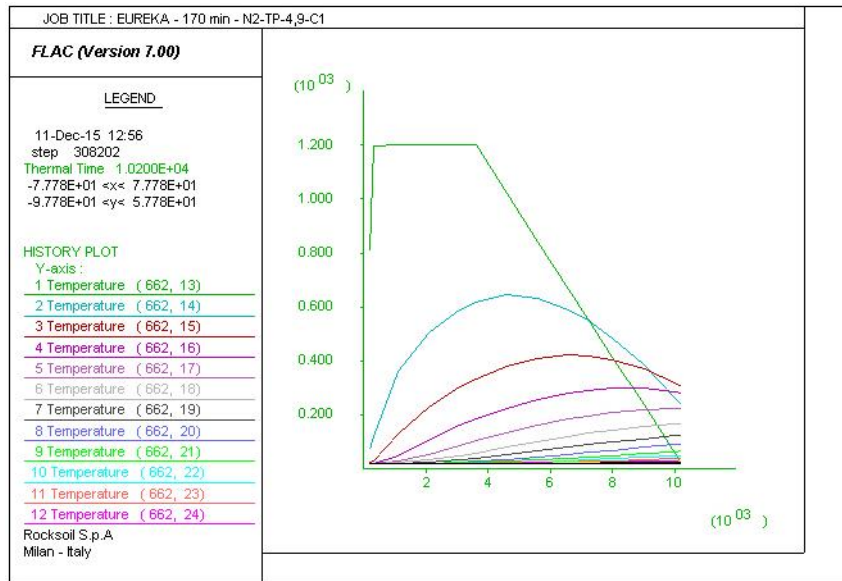


Abbildung 47: Temperaturverlauf in der Auskleidung – Kurve EUREKA

Illustrazione 47: Evoluzione della temperatura nel rivestimento – Curva EUREKA

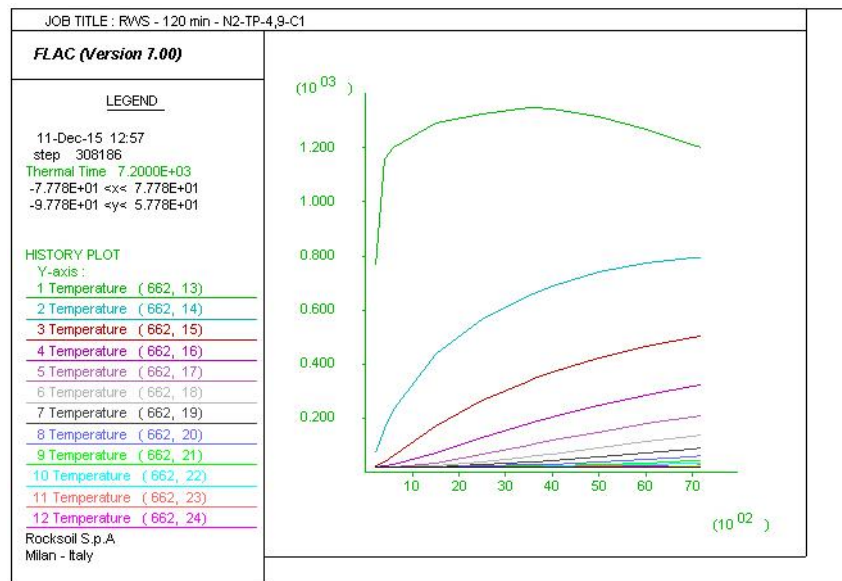


Abbildung 48: Temperaturverlauf in der Auskleidung – Kurve RWS

Illustrazione 48: Evoluzione della temperatura nel rivestimento – Curva RWS

5.1.2 **Entwicklung des Elastizitätsmoduls**

In den folgenden Abbildungen ist der Verlauf des Kompressionsmoduls, auch Bulk Modulus genannt, dargestellt, da FLAC bei den Analysen dieses Modul bei der Modellierung der Materialien verwendet. Die Moduls sind an das folgende Gesetz gebunden und der Verlauf mit der Temperatur ist derselbe.

5.1.2 **Evoluzione del modulo elastico**

Nelle seguenti figure è rappresentato l'andamento del modulo di compressibilità detto anche di bulk in quanto FLAC nelle analisi utilizza tale modulo nella modellazione dei materiali. I moduli sono legati dalle seguente legge e l'andamento con la temperatura risulta il medesimo.

Fachbereich:  
 Thema:  
 Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
 Tema: Documenti generali  
 Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

In den folgenden Abbildungen ist der Verlauf des Kompressionsmoduls in der Stärke der Tunnelauskleidung (Kontrollquerschnitt am Scheitel der Kalotte für alle Analysen) nach den Zeiten 60 – 120 – 170 Minuten für die Kurve EUREKA und den Zeiten 60 – 120 Minuten für die Kurve RWS. Aus den Ergebnissen der Analyse kann man seine Entwicklung innerhalb des Querschnitts feststellen, da sie mit dem Temperaturverlauf zusammenhängt. Die Abnahme des Kompressionsmoduls spiegelt die Temperaturänderung im Querschnitt zu den verschiedenen berücksichtigten Zeitpunkten wider: Das Ansteigen der Temperatur bewirkt eine Verminderung des Moduls und betrifft am Ende des Lastverlaufs einen Streifen Beton im Abstand von ca. 20-25 cm von der Innenkante.

Nelle seguenti figure è rappresentato l'andamento del modulo di bulk nello spessore del rivestimento della galleria (sezione di controllo in chiave calotta per tutte le analisi) ai tempi di 60 – 120 – 170 minuti, per la curva EUREKA e ai tempi 60 – 120 minuti per la curva RWS. Dai risultati dell'analisi si può constatare la sua evoluzione all'interno della sezione, essendo questo funzione dell'andamento della temperatura. Il decadimento del modulo di bulk rispecchia la variazione della temperatura nella sezione nei diversi istanti temporali considerati: l'aumento della temperatura nel tempo comporta una diminuzione del modulo interessando, al termine del percorso di carico, una fascia di calcestruzzo di circa 20-25 cm dall'intradosso.

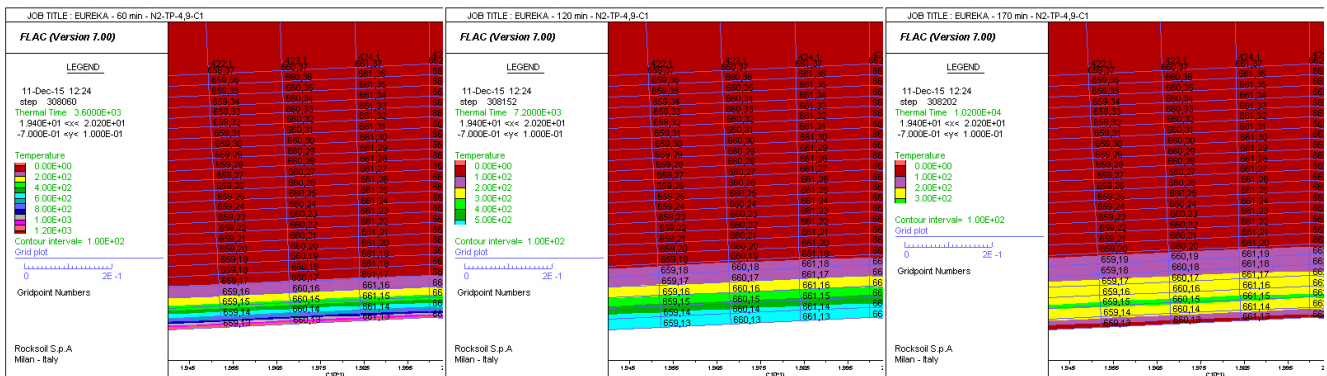


Abbildung 49: Entwicklung des Bulk Modulus im Querschnitt – Kurve EUREKA

Illustrazione 49: Evoluzione del bulk modulus nella sezione – Curva EUREKA

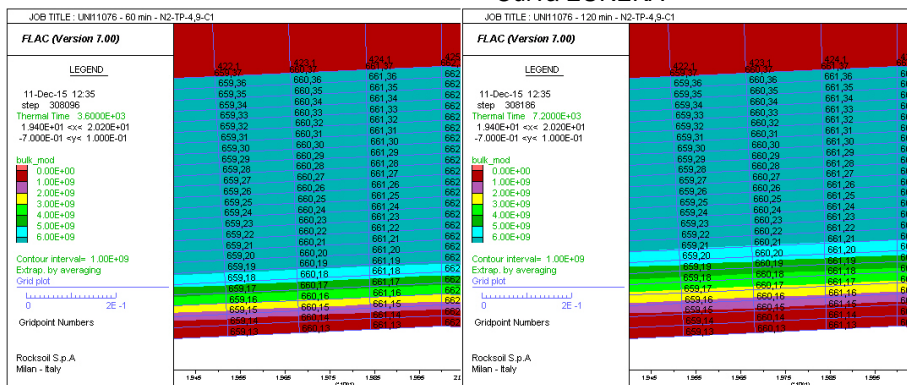


Abbildung 50: Entwicklung des Bulk Modulus im Querschnitt – Kurve UNI1076

Illustrazione 50: Evoluzione del bulk modulus nella sezione – Curva UNI1076

In der folgenden Abbildung ist die Entwicklung des Bulk Modulus in der Auskleidung in Abhängigkeit von der Zeit [sec] gezeigt; im Einzelnen wird die Kurve für jeden Bereich des Gitters, dem Scheitel der Kalotte entsprechend, dargestellt.

Nella seguente immagine viene riportata l'evoluzione della del modulo di bulk nel rivestimento in funzione del tempo [sec]; nel dettaglio viene riportata la curva per ogni zona della mesh in corrispondenza della chiave calotta.

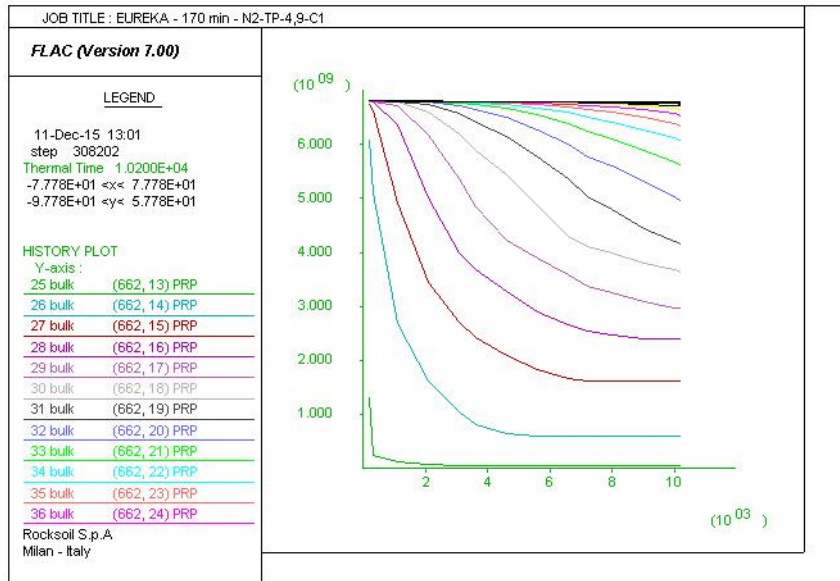


Abbildung 51: Entwicklung des Bulk Modulus in der Auskleidung – Kurve EUREKA

Illustrazione 51: Evoluzione del bulk modulus nel rivestimento – Curva EUREKA

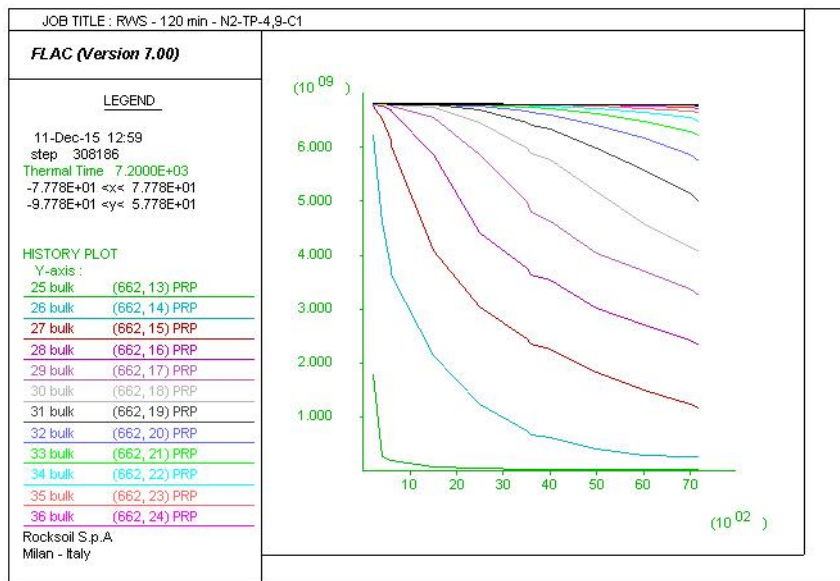


Abbildung 52: Entwicklung des Bulk Modulus in der Auskleidung – Kurve RWS

Illustrazione 52: Evoluzione del bulk modulus nel rivestimento – Curva RWS

### 5.1.3 Entwicklung der Festigkeitsparameter des Betons

Gemäß den Gesetzen der Abnahme der Festigkeitsparameter des Betons sind nachfolgend Abbildungen gezeigt, in denen die Entwicklung der Kohäsion und der Zugfestigkeit derjenigen Schichten dargestellt ist, die Temperaturänderungen über 100 °C unterliegen, und zwar am Scheitel der Kalotte des Tunnels entlang des zuvor für die Berechnung des

### 5.1.3 Evoluzione parametri di resistenza del calcestruzzo

In accordo con le leggi di decadimento dei parametri di resistenza del calcestruzzo, si riportano nel seguito le figure in cui viene presentata l'evoluzione della coesione e della resistenza a trazione degli strati soggetti a variazioni termiche superiori a 100 °C in corrispondenza della chiave calotta galleria lungo la sezione identificata in precedenza per la valutazione dell'evoluzione di

Fachbereich:  
 Thema:  
 Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
 Tema: Documenti generali  
 Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

Verlaufs von Temperatur und Kompressionsmodul ermittelten Querschnitts. Die Abnahme entspricht den Angaben der Rechtsvorschrift und beweist die richtige Modellierung des Lastfalls Brand im Tunnel.

temperatura e modulo di compressibilità. Il decadimento è conforme con quanto descritto in normativa a riprova della corretta modellazione delle condizioni di incendio in galleria.

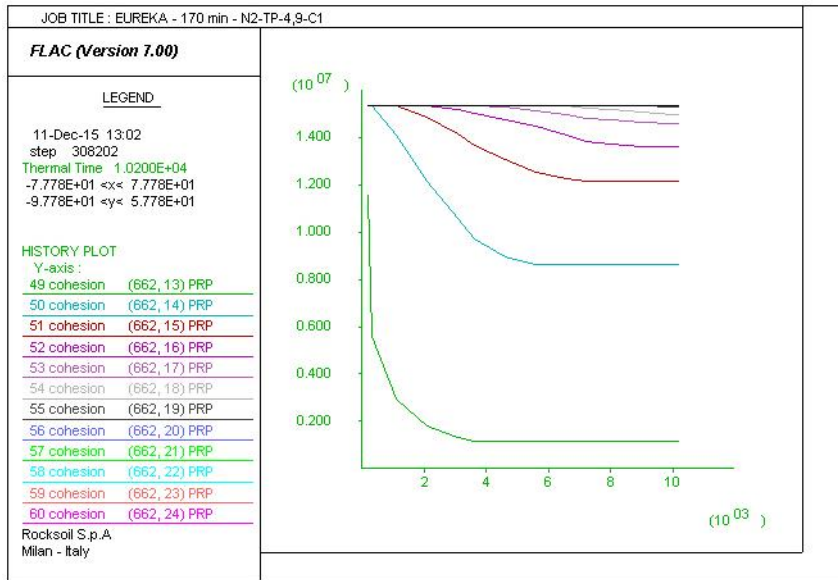


Abbildung 53: Entwicklung der Kohäsion in der Auskleidung – Kurve EUREKA

Illustrazione 53: Evoluzione della coesione nel rivestimento – Curva EUREKA

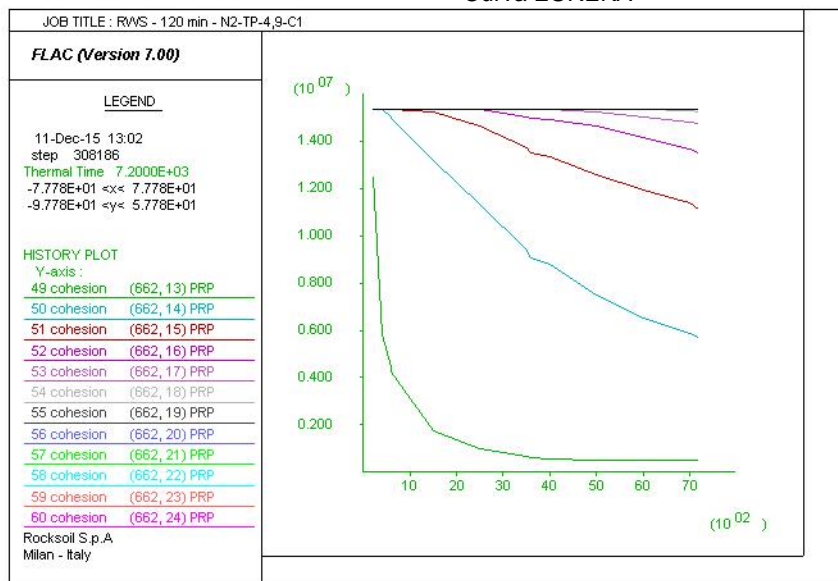


Abbildung 54: Entwicklung der Kohäsion in der Auskleidung – Kurve RWS – N2

Illustrazione 54: Evoluzione della coesione nel rivestimento – Curva RWS

Fachbereich:  
 Thema:  
 Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
 Tema: Documenti generali  
 Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

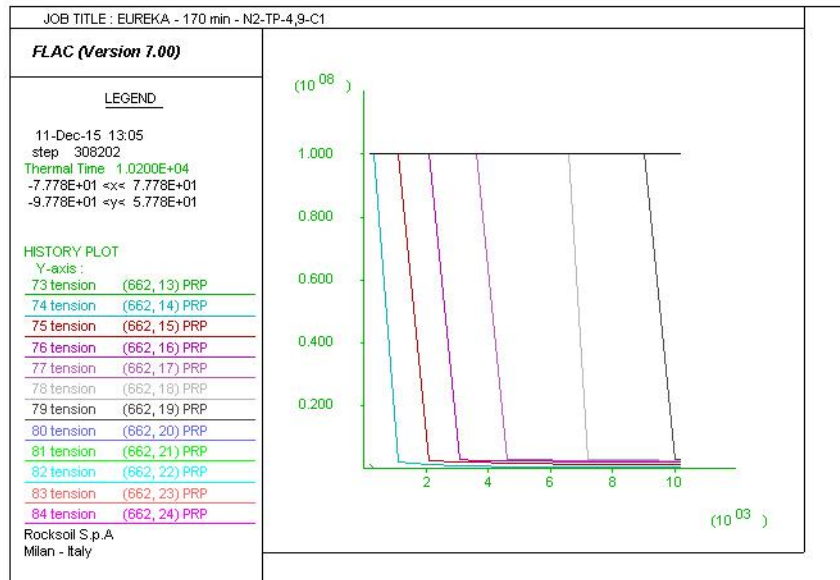


Abbildung 55: Entwicklung der Zugfestigkeit in der Auskleidung – Kurve EUREKA

Illustrazione 55: Evoluzione della resistenza a trazione nel rivestimento – Curva EUREKA

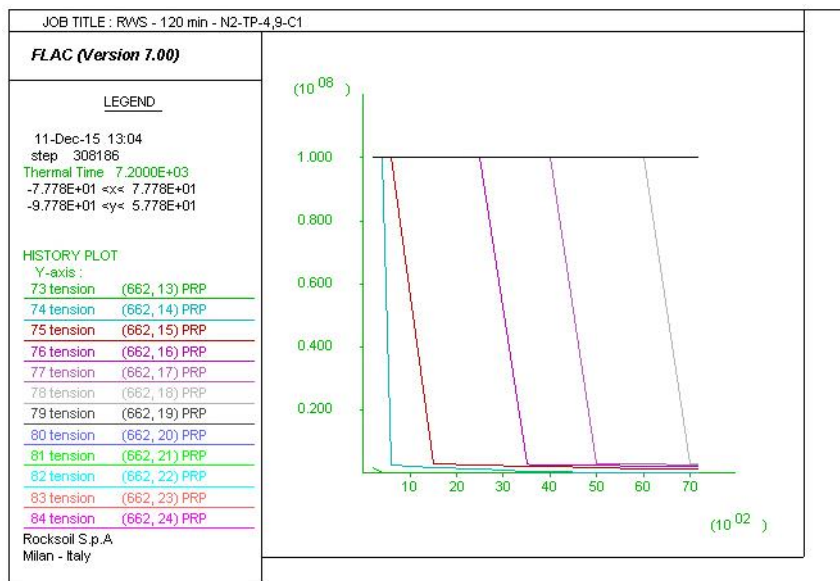


Abbildung 56: Entwicklung der Zugfestigkeit in der Auskleidung – Kurve RWS

Illustrazione 56: Evoluzione resistenza a trazione nel rivestimento – Curva RWS

#### 5.1.4 Spannungs- und Verformungszustände

#### 5.1.4 Stati tensionali e deformativi

In den folgenden Abbildungen sind die Spannungszustände der Auskleidung entsprechend des Zeitpunkts von 170 Minuten für die Kurve EUREKA und 120 Minuten für die Kurve RWS gezeigt. Im Einzelnen werden die vom Berechnungscode FLAC gelieferten grafischen Ausgaben gezeigt, in denen die Hauptspannungen  $\sigma_1$  (Kompression oder Zug) dargestellt sind, die gewöhnlich einen normalen Verlauf

Nelle seguenti figure sono presentati gli stati tensionali del rivestimento in corrispondenza dell'istante di tempo di 170 minuti per la curva EUREKA e all'istante di tempo di 120 per la curva RWS. Nel dettaglio sono riportati gli output grafici forniti dal codice di calcolo FLAC, in cui sono rappresentate le tensioni principali  $\sigma_1$  (di compressione e trazione), le quali hanno generalmente un andamento normale alla sezione trasversale del

Fachbereich:  
Thema:  
Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
Tema: Documenti generali  
Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

am Querschnitt der Auskleidung aufzeigen. In allen Rechenquerschnitten bewirkt die Wärmewirkung eine wesentliche Änderung des Spannungszustands im Vergleich zu den Betriebsbedingungen bei Kälte. Aufgrund der thermischen Verformungen und der Entwicklung des Elastizitätsmoduls im Querschnitt erhält man für die gesamte dem Feuer ausgesetzte Auskleidung im Bereich der Außenkante bedeutende Zugspannungen. Diese besondere Erscheinung ist der Auswirkung der Wärmeausdehnung zuzuschreiben, die in Bezug auf die gegensätzliche Einwirkung, die vom Boden ausgeht, vorherrschend ist. Die besonderen Überlagerungsbedingungen des Tunnels gestatten es nicht, jene notwendige Einschließung zu garantieren, die die Entwicklung von Zugspannungen in jenem Teil des Querschnitts begrenzen kann.

Ferner beobachtet man, dass die Wärmeentwicklung im Allgemeinen eine Neuverteilung der Kompressionskräfte in den ersten Schichten an der Innenkante bewirkt, die sowohl auf die Wärmewirkung als auch auf die Verminderung der mechanischen Eigenschaften des Materials zurückzuführen sind. Dieser Verlauf des Spannungstensors ist entlang des gesamten dem Feuer ausgesetzten Bogens der Auskleidung zu beobachten, während im Bereich des Sohlgewölbes, wo die Verfüllung vorhanden ist und die Brandkurve nicht direkt angewandt wird, der Spannungszustand qualitativ derselbe bleibt wie in der Phase vor dem Brand. Was den Verformungszustand betrifft, kann der Effekt der Wärmewirkung auf die Konstruktion erfasst werden: Die Verformungen liegen im Allgemeinen im Millimeterbereich (die Verschiebungen am Ende der statischen Phasen wurden nullgestellt, um nur die Verformungen aufgrund der Brandlast zu erfassen), unter Ausschluss der ersten Schicht an der Innenkante (Stärke ca. 2.0 cm), wo Beanspruchungen vorliegen, die zur Plastifikation des Materials und folglich zu dessen Festigkeitsverlust führen: Das Berechnungsprogramm wurde so eingestellt, dass die Spannungen annulliert werden.

Die nachfolgend verwendete Konvention ist folgende:

- Kompression: negative Spannungen in Blau
- Zug: positive Spannungen in Rot

rivestimento. In tutte le sezioni di calcolo, l'azione termica comporta una sostanziale variazione dello stato tensionale rispetto alle condizioni a freddo d'esercizio. A causa delle deformazioni termiche e dell'evoluzione del modulo elastico nella sezione, per tutto il rivestimento esposto al fuoco si ottiene, nella zona di estradosso, una riduzione delle azioni di compressione. Tale particolare fenomeno è da ascrivere all'effetto dell'espansione termica combinata alle azioni geostatiche dovute alla copertura della galleria che nei casi analizzati consentono di garantire quel necessario confinamento capace di limitare lo svilupparsi di tensioni di trazione in tale parte della sezione. Al contrario lo sviluppo del calore comporta generalmente una redistribuzione degli sforzi di compressione nei primi strati in intradosso, dovuti sia all'azione termica sia alla diminuzione delle caratteristiche meccaniche del materiale. Tale andamento del tensore degli sforzi si osserva lungo tutto l'arco del rivestimento esposto al fuoco mentre, nella zona dell'arco rovescio, dove è presente il riempimento e non è applicata direttamente la curva di incendio, lo stato tensionale rimane qualitativamente simile a quello della fase di pre incendio. Per ciò che concerne lo stato deformativo, si può cogliere l'effetto dell'azione termica sulla struttura: le deformazioni risultano generalmente di ordine millimetrico (si sono azzerati gli spostamenti al termine delle fasi statiche al fine di cogliere unicamente le deformazioni dovute al carico di incendio) ad esclusione del primo strato in intradosso (spessore 2.0 cm circa) dove si hanno sollecitazioni tali da plasticizzare il materiale con conseguente perdita di resistenza degli stessi: il programma di calcolo è stato impostato in modo tale che le tensioni siano annullate.

La convenzione utilizzata nel seguito è la seguente:

- compressione: tensioni negative di colore blu
- trazione: tensioni positive di colore rosso

Fachbereich:  
 Thema:  
 Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
 Tema: Documenti generali  
 Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

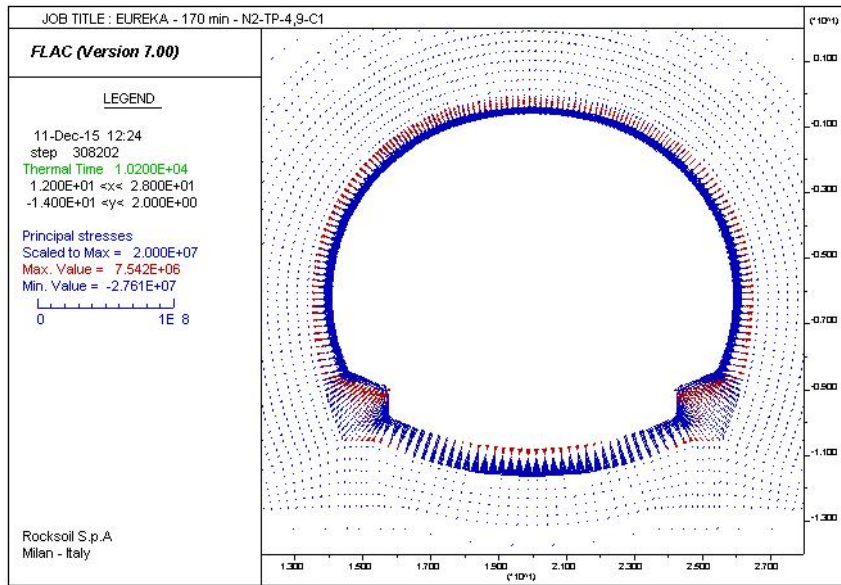


Abbildung 57: Spannungszustand – Kurve EUREKA – t = 170 min

Illustrazione 57: Stato tensionale – Curva EUREKA – t = 170 min

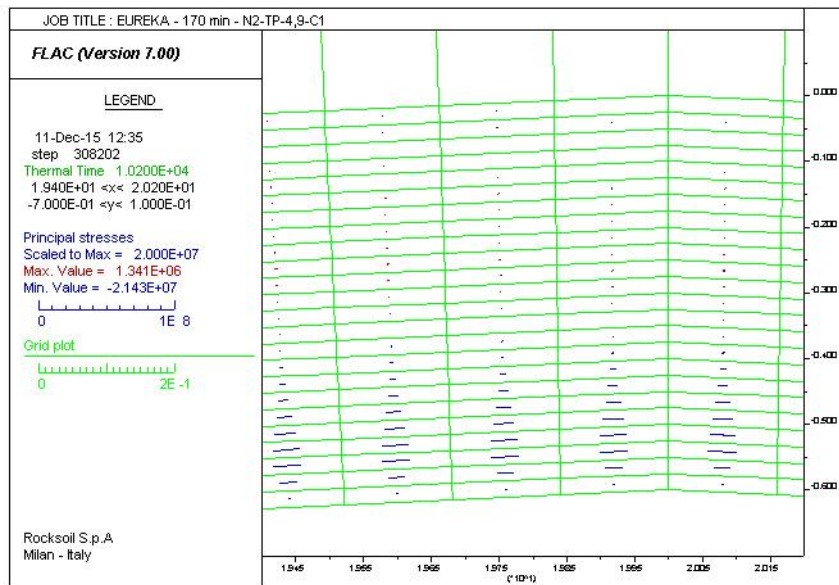


Abbildung 58: Spannungszustand – Kurve EUREKA – t = 170 min

Illustrazione 58: Stato tensionale – Curva EUREKA – t = 170 min



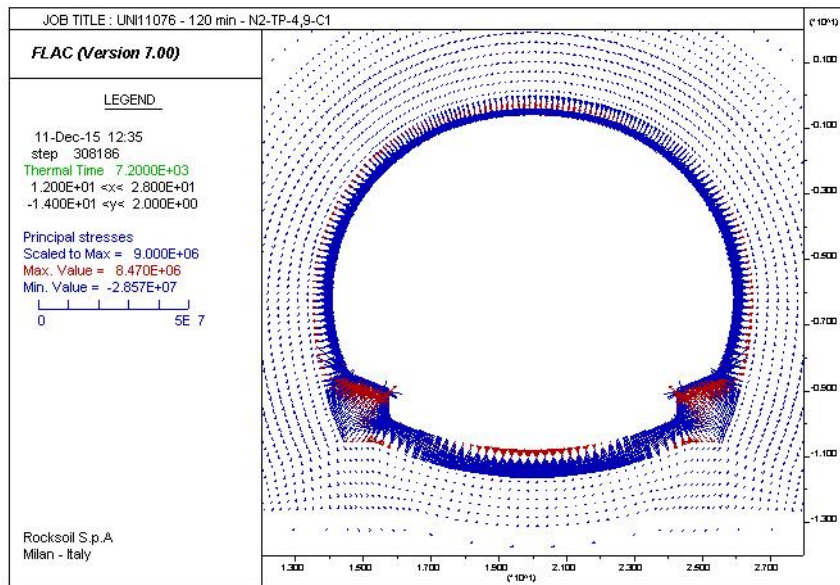


Abbildung 59: Spannungszustand – Kurve RWS – t = 120 min      Illustrazione 59: Stato tensionale – Curva RWS – t = 120 min

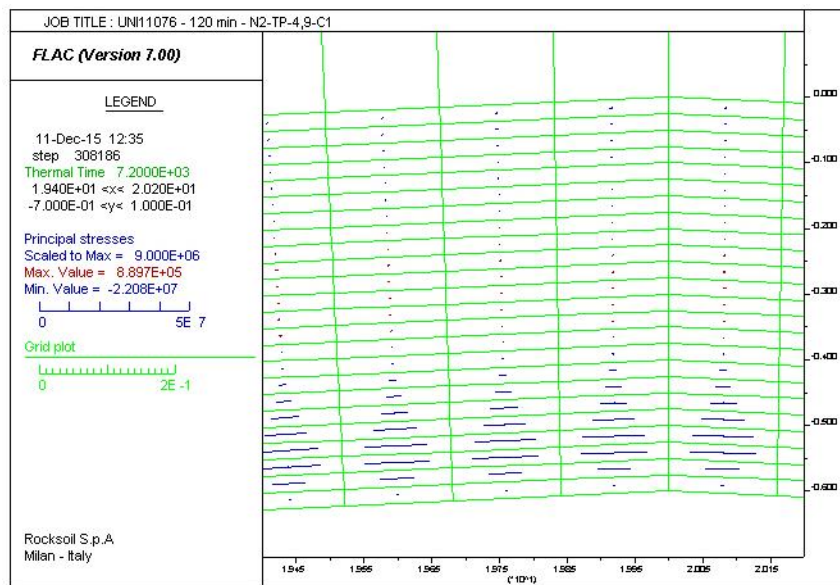


Abbildung 60: Spannungszustand – Kurve RWS – t = 120 min      Illustrazione 60: Stato tensionale – Curva RWS – t = 120 min

In der folgenden Abbildung wird ein Vergleich zwischen dem Spannungszustand im Querschnitt zu den Zeitpunkten von 60, 120 und 170 Minuten für die Kurve EUREKA und den Zeitpunkten von 60 und 120 Minuten für die Kurve RWS geliefert. Es ist zu bemerken, dass die schwerste Bedingung immer die langfristige ist.

Nella seguente immagine viene fornito un confronto tra lo stato tensionale nella sezione agli istanti di tempo 60, 120 e 170 minuti per la curva EUREKA e agli istanti di tempo 60 e 120 minuti per la curva RWS. Si osserva che la condizione più gravosa risulta sempre quella a lungo termine.

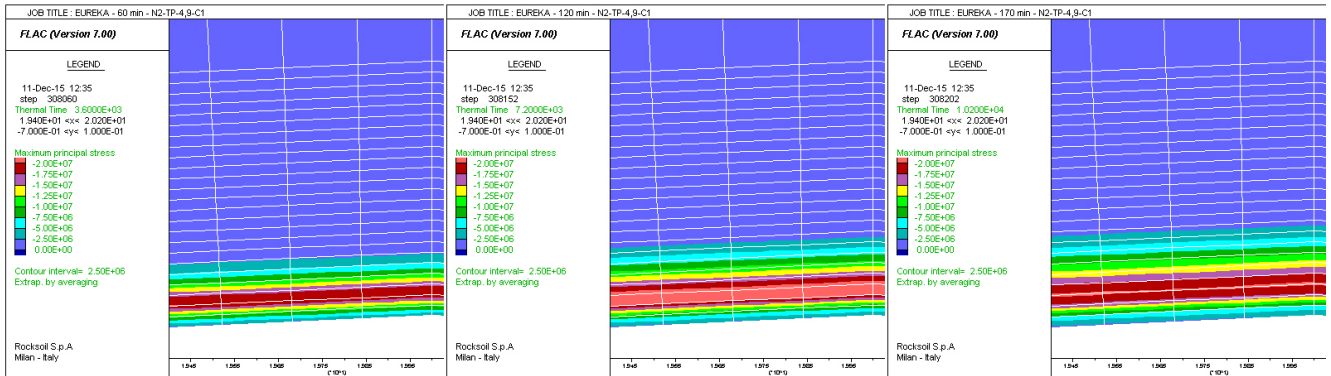


Abbildung 61: Sigma 1 – Kurve EUREKA

Illustrazione 61: Sigma 1 – Curva EUREKA

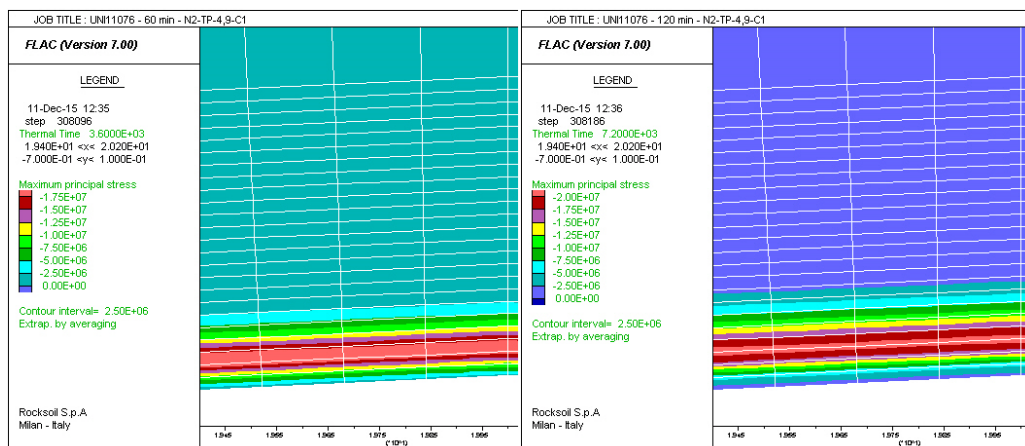


Abbildung 62: Sigma 1 – Kurve RWS

Illustrazione 62: Sigma 1 – Curva RWS

### 5.1.5 Wirkungen in den Auskleidungen

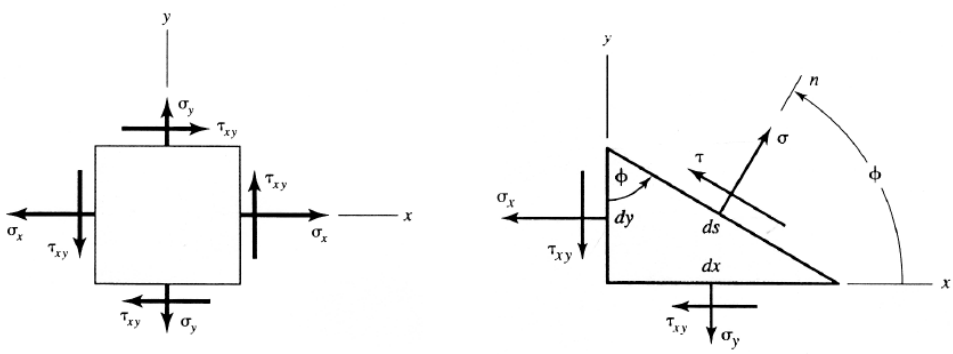
Die Auskleidungen des Regelquerschnitts N2-TP-4,6, N2-TP-4,9 und N2-TP-6,0 werden auf der Grundlage ihrer tatsächlichen Geometrie mittels viereckiger Gitterelemente modelliert. Die Verwendung viereckiger Elemente zur Simulation der Auskleidungen geben die inneren Wirkungen M, N, T nicht direkt wieder, die von den Spannungen  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  e  $\sigma_{xy}$  ausgehend nach dem Mohrschen Spannungskreis gewonnen werden müssen. Damit ist es möglich, den Spannungszustand an jedem Knoten des Gitters, das die Auskleidungen simuliert, mittels der Normal- und Tangentialkomponenten vollständig zu bestimmen, welches auch immer die Neigung der den Knoten enthaltenden Fläche ist. Bei einem ebenen Spannungszustand wird bewiesen, dass die Kenntnis der auf zwei senkrecht zueinander stehende Ebenen einwirkenden Spannungen ausreicht, um den Spannungszustand an jeder beliebigen Oberfläche, die den in Betracht gezogenen Punkt passiert, zu erfahren. Mit den

### 5.1.5 Azioni nei rivestimenti

I rivestimenti della sezione tipo N2-TP-4,9 sono modellati in base alla loro reale geometria tramite elementi quadrangolari di mesh. L'utilizzo di elementi quadrangolari per la simulazione dei rivestimenti non restituisce direttamente le azioni interne M, N, T, le quali devono essere ricavate a partire dalle tensioni  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  e  $\sigma_{xy}$  secondo il metodo di trasformazione delle tensioni tramite cerchio di Mohr. Risulta così possibile definire completamente lo stato tensionale in ogni nodo della griglia che simula i rivestimenti, per mezzo delle sue componenti normali e tangenziali, qualunque sia l'inclinazione della superficie che contiene il nodo stesso. Per uno stato piano di tensione, si dimostra che la conoscenza delle tensioni agenti su due piani mutuamente perpendicolari è sufficiente per conoscere lo stato tensionale su qualunque superficie passante per il punto considerato. Tramite le equazioni di trasformazione per uno strato piano di tensione è possibile ricavare le tensioni  $\sigma$  e  $\tau$  necessarie per il

Umwandlungsgleichungen für eine ebene Spannungsschicht können die Spannungen  $\sigma$  und  $\tau$  erhalten werden, die zur Berechnung der inneren Wirkungen erforderlich sind.

$$\begin{cases} \sigma = \left( \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) + \left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \cos 2\phi + \tau_{xy} \sin 2\phi \\ \tau = - \left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \sin 2\phi + \tau_{xy} \cos 2\phi \end{cases}$$



Nach Berechnung der Werte  $\sigma_n$  und  $\tau_n$  für jeden Querschnitt können durch deren Integration die innere Wirkung N und die Schnittwirkung T und folglich das Moment M erhalten werden. Die auf diese Weise durchgeführte Modellierung der Auskleidungen gestattet es, die einzelnen Rechenquerschnitte nach der in den betreffenden Gerüstplänen bestimmten tatsächlichen Geometrie zu überprüfen. Die damit erhaltenen Werte der inneren Wirkungen werden im folgenden Kapitel überprüft. Es werden „Warmprüfungen“ vorgenommen, d.h. es werden die Festigkeitseigenschaften der Materialien bei Temperaturänderungen berücksichtigt.

Ricavati i valori di  $\sigma_n$  e  $\tau_n$  per ogni sezione, tramite l'integrazione delle stesse è possibile ottenere l'azione interna N e l'azione di taglio T e di conseguenza il momento M. La modellazione dei rivestimenti così condotta permette di verificare le singole sezioni di calcolo secondo la reale geometria definita nelle relative tavole di carpenteria. I valori delle azioni interne così ottenuti verranno verificati nel capitolo seguente effettuando verifiche "a caldo", ovvero tenendo in conto delle caratteristiche resistenti dei materiali al variare della temperatura.

Es wird darauf hingewiesen, dass das Anlegen der Wärmelast zu einer Umkehrung der Vorzeichen der Momente führte, die die Außenkante der Konstruktion in allen Bereichen spannen, die der von der Brandkurve gegebenen direkten Wirkung ausgesetzt sind. Bei den Vorzeichen wird die folgende Konvention angewandt:

Si noti come l'applicazione del carico termico abbia comportato un'inversione di segno dei momenti, che risultano tendere l'estradosso della struttura in tutte le zone soggette all'azione diretta data dalle curve di incendio. Si applicherà nei segni la seguente convenzione:

- Axiale Kompressionswirkungen: negative Vorzeichen
- Biegemomente, die die Außenkante spannen: positive Vorzeichen
- Azioni assiali di compressione: negative
- Momenti flettenti che tendono l'estradosso: positivi

## 5.2 NACHWEISE AN QUERSCHNITTEN BEI WÄRME

Die Querschnittsanalyse für den Lastfall Brand wird als außergewöhnlich definiert: In Übereinstimmung mit den einschlägigen Rechtsvorschriften werden die aus den numerischen Modellierungen gewonnenen Wirkungen nicht durch einen multiplikativen Faktor verstärkt und der Nachweis erfolgt nur in Bezug auf den Grenzzustand der Tragfähigkeit. Dieser Nachweis ist erfüllt, wenn der Sicherheitskoeffizient größer ist als die Einheit. Es wird darauf hingewiesen, dass die Sicherheitskoeffizienten, die die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe betreffen, im Lastfall Brand Einheitswert annehmen.

### 5.2.1 Berechnungssoftware: RAF 10.0 (AZTEC INFORMATICA©)

Die von Aztec Informatica © entwickelte Software RAF 10.0 wurde verwendet, um die Feuerbeständigkeit der Elemente aus Stahlbeton zu berechnen, da sie es ermöglicht, den Effekt einer auf die Seiten eines allgemeinen Querschnitts einwirkenden Brandkurve zu analysieren. Die Wärmediffusion innerhalb des Querschnitts wird durch eine nichtlineare Analyse nach der Finite-Elemente-Methode unter Berücksichtigung von Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung bewertet. In einer ersten Phase bewertet das Programm die Wärmeverteilung für verschiedene vom Benutzer bestimmte zeitliche Steps. Danach bewertet RAF 10.0 die Beständigkeit des Querschnitts in den verschiedenen zeitlichen Intervallen, wobei die Verminderung der mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe in Betracht gezogen wird. Auf diese Weise kann die Verringerung des Beständigkeitsbereichs M-N berechnet werden. Es können sowohl die von Eurocodice angebotenen Brandkurven als auch die vom Benutzer nach Punkten bestimmten Kurven verwendet werden. Es ist ebenfalls möglich, verschiedene Kurven zu verwenden, was die Abnahme der mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe, die spezifische Wärme und die Leitfähigkeit der Werkstoffe in Abhängigkeit von der Temperatur betrifft. In der grafischen Ausgabe wird die Temperaturverteilung für jedes Zeitintervall gezeigt. Das Programm bewertet den Bereich des Grenzzustands der Tragfähigkeit und bewertet den Sicherheitsfaktor in Bezug auf die für den Rechenquerschnitt auferlegten Berechnungen.

## 5.2 VERIFICHE SEZIONALI DOMINIO A CALDO

L'analisi sezionale in condizioni di incendio è definita come eccezionale: in accordo alle normative di riferimento, le azioni ricavate dalle modellazioni numeriche non sono amplificate per alcun coefficiente moltiplicativo e la verifica è condotta nei riguardi del solo Stato Limite Ultimo. Tale verifica è soddisfatta se il coefficiente di sicurezza è maggiore dell'unità. Si precisa che, come indicato nelle Normative di riferimento, i coefficienti di sicurezza relativi alle caratteristiche meccaniche dei materiali assumono valore unitario nelle condizioni di incendio.

### 5.2.1 Programma di calcolo: RAF 10.0 (AZTEC INFORMATICA©)

Il programma RAF 10.0 prodotto dalla Aztec Informatica © è stato impiegato per calcolare la resistenza al fuoco degli elementi in c.a. in quanto permette di analizzare l'effetto di una curva d'incendio agente sui lati di una generica sezione. La diffusione del calore all'interno della sezione è valutata attraverso una analisi non lineare agli elementi finiti considerando i fenomeni di conduzione, convezione ed irraggiamento. Durante una prima fase il programma valuta la distribuzione del calore per differenti step temporali definiti dall'utente. Successivamente RAF 10.0 valuta la resistenza della sezione nei vari intervalli di tempo considerando la riduzione delle proprietà meccaniche dei materiali. In questo modo è possibile calcolare la riduzione del dominio di resistenza M-N. È possibile utilizzare sia le curve d'incendio proposte dall'Eurocodice che curve definite per punti dall'utente. Allo stesso modo è possibile impiegare curve differenti per quanto riguarda il decadimento delle proprietà meccaniche dei materiali, il calore specifico e la conduttività dei materiali in funzione della temperatura. In output viene mostrata la distribuzione della temperatura per ogni intervallo temporale. Il programma valuta il dominio di resistenza ultimo valutando il fattore di sicurezza rispetto alle azioni di calcolo imposte per la sezione di calcolo.

### 5.2.2 Berechnungs- und Nachweisverfahren

Die numerische Analyse mit FLAC für den Lastfall Brand ermöglichte es, den bei diesem außergewöhnlichen Umstand vorhandenen Spannungszustand zu berechnen. Diese Ergebnisse in Bezug auf  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  e  $\sigma_{xy}$  wurden integriert, um die elementaren Belastungen zu erhalten, die in den Bereich bei Wärme eingesetzt werden. Mit diesen Werten konnte danach unter Verwendung von RAF die Berechnung der Sicherheitskoeffizienten für jeden Lastfall Brand, der durch verschiedene Expositionscurven und -zeiten bestimmt wird, vorgenommen werden.

### 5.2.2 Procedura di calcolo e verifica

L'analisi numerica con FLAC, in condizioni di incendio, ha permesso di ricavare lo stato tensionale presente per tale condizione eccezionale. Tali risultati, in termini di  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  e  $\sigma_{xy}$ , sono stati integrati al fine di ottenere le sollecitazioni elementari da inserire nel dominio a caldo. Con tali valori è stato in seguito possibile l'utilizzo di RAF e il calcolo dei coefficienti di sicurezza per ciascuna condizione di incendio, definita da curve e tempi di esposizione differenti.

### 5.2.3 Thermische Eigenschaften der Werkstoffe

In den folgenden Abbildungen werden die thermischen Eigenschaften und die Faktoren der Verminderung der mechanischen Eigenschaften, die in der durchgeführten Analyse verwendet wurden, dargestellt.

### 5.2.3 Caratteristiche termiche dei materiali

Nelle successive figure verranno riportate le caratteristiche termiche e i fattori di riduzione delle proprietà meccaniche utilizzati nelle analisi condotte.

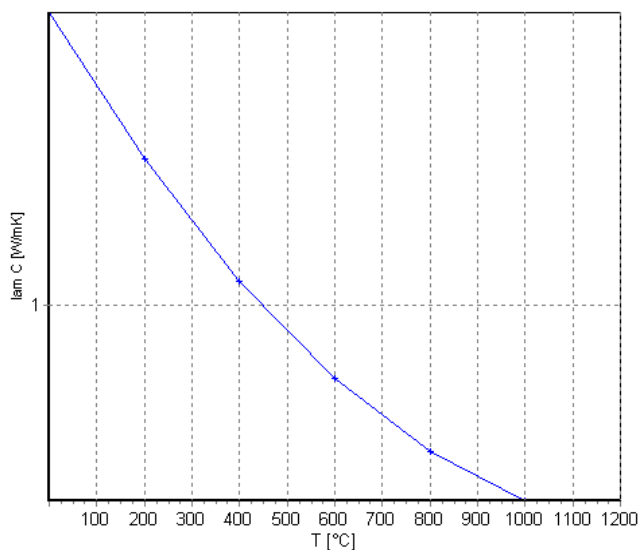


Abbildung 63: Wärmeleitfähigkeit des Betons (EN 1992-1-2 Abs. 3.4 – Abb. 3.7)

Illustrazione 63: Conduttività termica del calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.4 – fig.3.7)

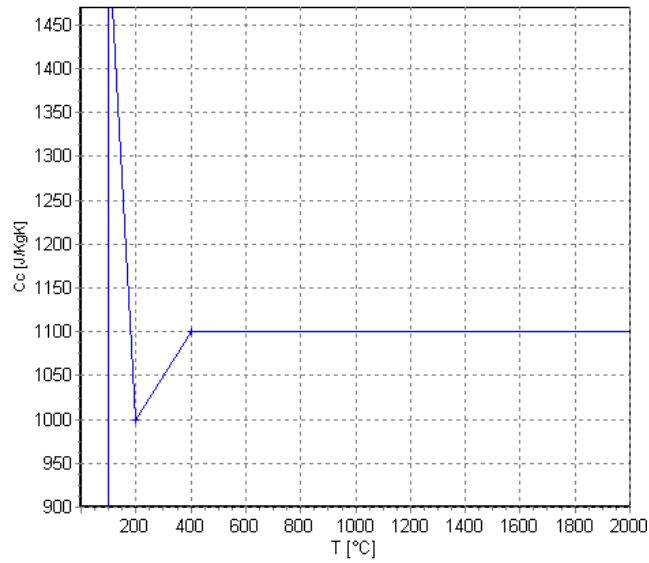


Abbildung 64: Spezifische Wärme für Beton (EN 1992-1-2 Abs. 3.3.2 – Abb. 3.6a)

Illustrazione 64: Calore specifico per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.3.2 – fig.3.6a)

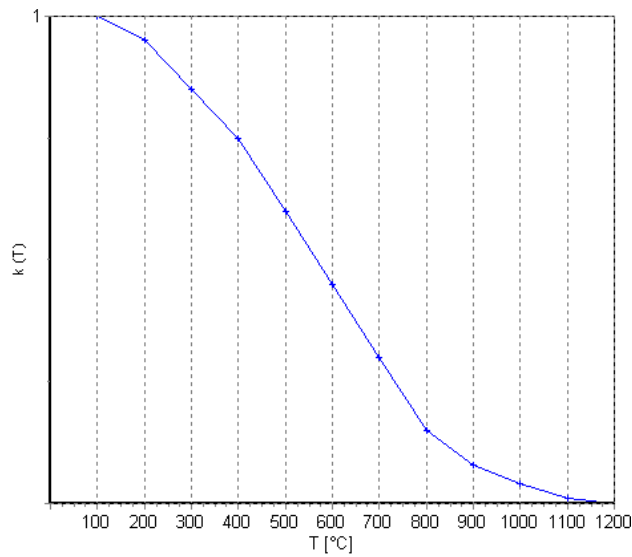


Abbildung 65: Faktor der Verringerung des Festigkeitswerts fck für Beton (EN 1992-1-2 Abs. 4.2.4.2 – Abb. 4.1)

Illustrazione 65: Fattore di riduzione del valore di resistenza fckper il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.4.2.4.2 – fig.4.1)

Fachbereich:  
Thema:  
Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
Tema: Documenti generali  
Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

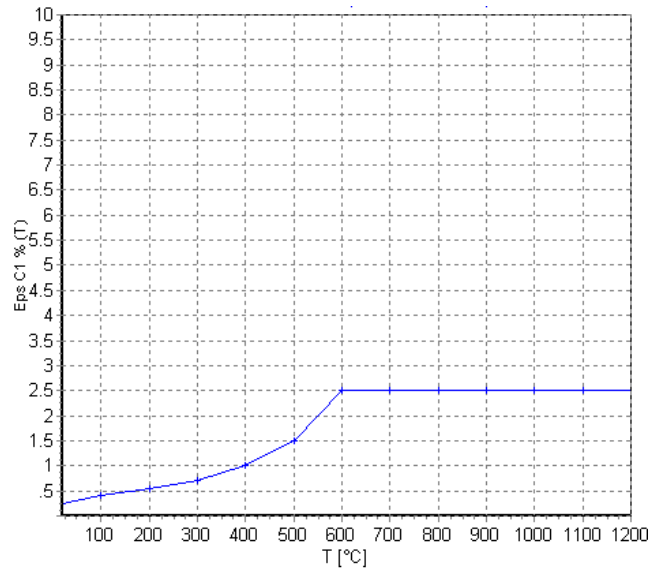


Abbildung 66: Faktor der Verringerung des Festigkeitswerts  $\epsilon_{c1}$  für Beton (EN 1992-1-2 Abs. 3.2.2.1 – Tab. 3.1)

Illustrazione 66: Fattore di riduzione del valore di  $\epsilon_{c1}$  per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

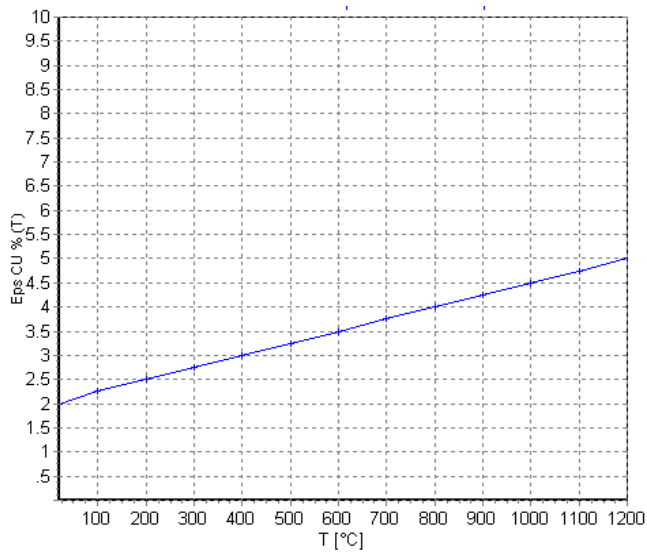


Abbildung 67: Faktor der Verringerung des Wertes  $\epsilon_{cu}$  für Beton (EN 1992-1-2 Abs. 3.2.2.1 – Tab. 3.1)

Illustrazione 67: Fattore di riduzione del valore di  $\epsilon_{cu}$  per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

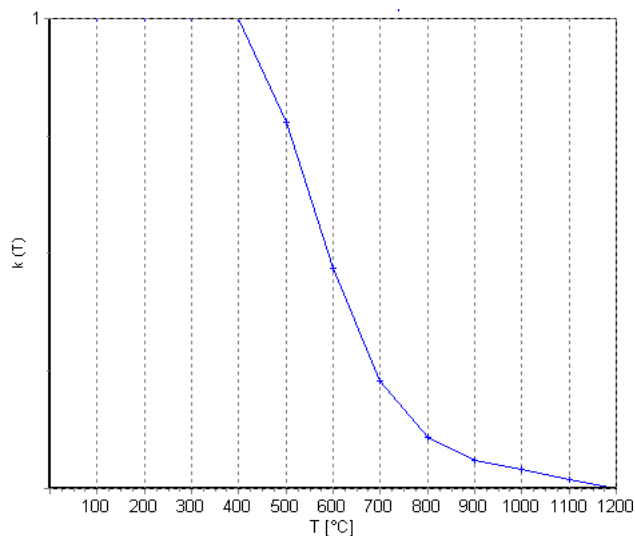


Abbildung 68: Faktor der Verringerung des Festigkeitswerts  $f_{yk}$  für Bewehrungsstäbe (EN 1992-1-2 Abs. 4.2.4.3 – Abb. 4.2.a)

Illustrazione 68: Fattore di riduzione del valore di resistenza  $f_{yk}$  per le barre d'armatura (EN 1992-1-2 p.4.2.4.3 – fig.4.2a)

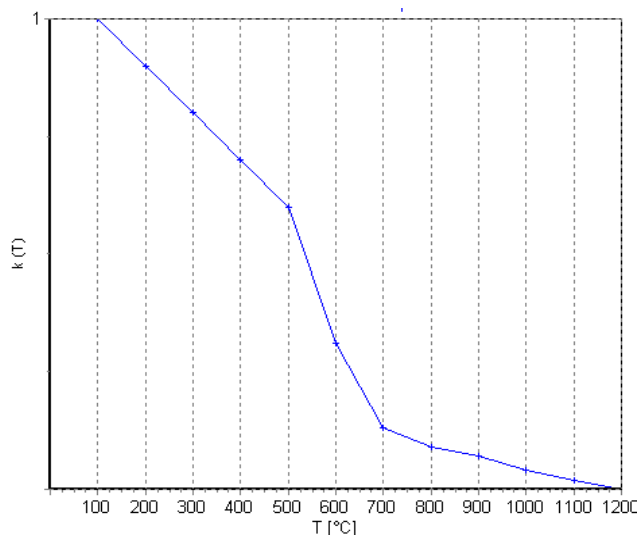


Abbildung 69: Faktor der Verringerung des Wertes des Elastizitätsmoduls für Bewehrungsstäbe (EN 1992-1-2 Abs. 3.2.3 – Tab. 3.2.a)

Illustrazione 69: Fattore di riduzione del valore del modulo elastico per le barre d'armatura (EN 1992-1-2 p.3.2.3 – tab.3.2.a)

### 5.3 BERECHNUNGSMODELL, RANDBEDINGUNGEN UND ERGEBNISSE DES NACHWEISES

### 5.3 MODELLO DI CALCOLO, CONDIZIONI AL CONTORNO E RISULTATI DELLA VERIFICA

Zur Simulation der Exposition eines Querschnitts bei einem Brand im Tunnel mit dem Programm nach der Finite-Elemente-Methode wurden spezifische Randbedingungen auferlegt:

Per simulare attraverso il programma a elementi finiti l'esposizione di una sezione a un incendio in galleria, sono state imposte specifiche condizioni al contorno:

- Untere Seite: Wärmeaustausch, Konvektion und Strahlung, wobei als Einfluss die Brandkurve (RWS

- Lato inferiore: scambio, convezione e irraggiamento considerando agente la curva



Fachbereich:  
Thema:  
Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
Tema: Documenti generali  
Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

oder EUREKA je nach Analysen) betrachtet wird.

d'incendio (RWS o EUREKA a seconda delle analisi)

- Rechte Seite: Kein Wärmefluss
- Linke Seite: Kein Wärmefluss
- Obere Seite: Wärmeaustausch unter Berücksichtigung einer Kontaktumgebung mit gleichmäßiger Temperatur von 20 °C.

- Lato destro: Nessun flusso di calore
- Lato sinistro: Nessun flusso di calore
- Lato superiore: Scambio termico considerando un ambiente di contatto a temperatura uniforme pari a 20°.

### 5.3.1 Sezione tipo N2-TP-4,9

Si riportano i risultati delle verifiche sezionali a caldo per la sezione di chiave calotta per la sezione tipo N2 TP 4.9. La sezione di calcestruzzo è stata modellata utilizzando elementi finiti triangolari a sei nodi. L'armatura è costituita da barre  $\phi 20$  passo 20 sia all'intradosso che all'estradosso della sezione. Data la presenza delle rete metallica la verifica è stata eseguita non considerando i primi 2 cm di calcestruzzo esposti direttamente all'incendio: tale procedura è cautelativa e tiene in conto eventuali fenomeni di spalling superficiale. I risultati, oltre che per via tabellare, sono forniti in maniera grafica da RAF 10.0. Si osserva come la distribuzione delle temperature nel momento più sfavorevole sia stratificata in maniera uniforme (in quanto il flusso di calore è nullo attraverso i lati verticali) con valori di temperatura piuttosto elevati unicamente nella zona inferiore della sezione per una altezza di circa 15-20 cm, mentre a partire da tale quota i valori rimangono pressoché costanti. In accordo alle analisi numeriche svolte per questo caso specifico, si è osservato che le condizioni più critiche per la verifica della sezione si hanno per la curva EUREKA dopo 170 min. Nel seguito si riportano le isoterme nella sezione oggetto di analisi per la curva EUREKA in tale istante

### 5.3.1 Sezione tipo N2-TP-4,9

Si riportano i risultati delle verifiche sezionali a caldo per la sezione di chiave calotta per la sezione tipo N2 TP 4.9. La sezione di calcestruzzo è stata modellata utilizzando elementi finiti triangolari a sei nodi. L'armatura è costituita da barre  $\phi 20$  passo 20 sia all'intradosso che all'estradosso della sezione. Data la presenza delle rete metallica la verifica è stata eseguita non considerando i primi 2 cm di calcestruzzo esposti direttamente all'incendio: tale procedura è cautelativa e tiene in conto eventuali fenomeni di spalling superficiale. I risultati, oltre che per via tabellare, sono forniti in maniera grafica da RAF 10.0. Si osserva come la distribuzione delle temperature nel momento più sfavorevole sia stratificata in maniera uniforme (in quanto il flusso di calore è nullo attraverso i lati verticali) con valori di temperatura piuttosto elevati unicamente nella zona inferiore della sezione per una altezza di circa 15-20 cm, mentre a partire da tale quota i valori rimangono pressoché costanti. In accordo alle analisi numeriche svolte per questo caso specifico, si è osservato che le condizioni più critiche per la verifica della sezione si hanno per la curva EUREKA dopo 170 min. Nel seguito si riportano le isoterme nella sezione oggetto di analisi per la curva EUREKA in tale istante.

Fachbereich:  
 Thema:  
 Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
 Tema: Documenti generali  
 Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

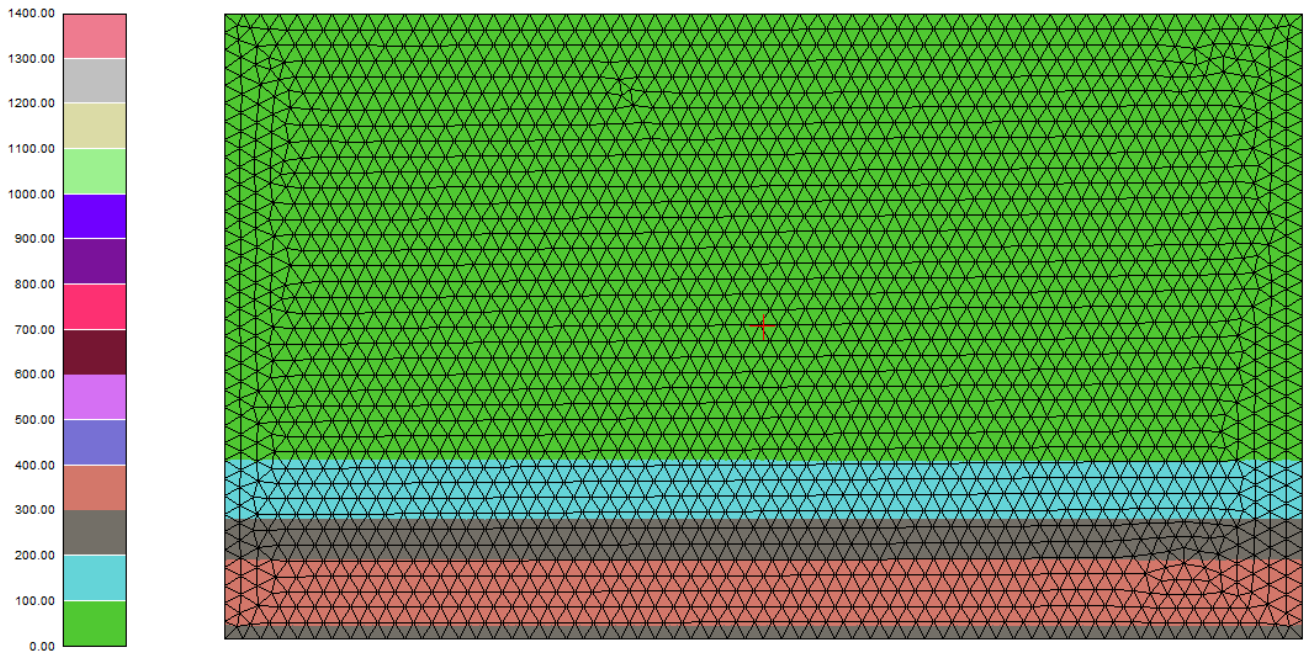


Abbildung 70: Temperaturverteilung innerhalb des Querschnitts (T=170 min Kurve EUREKA)

Illustrazione 70: Distribuzione della temperatura all'interno della sezione (T=170 min curva EUREKA)

In accordo ai risultati dell'analisi FLAC, tale sezione è soggetta alle seguenti azioni di compressione e momento flettente. L'azione assiale è di compressione se negativa mentre un momento flettente positivo tende le fibre all'estradosso della sezione (lato controterra). Le verifiche sono condotte in corrispondenza della calotta e della sezione di piedritto più gravosa.

In accordo ai risultati dell'analisi FLAC, tale sezione è soggetta alle seguenti azioni di compressione e momento flettente. L'azione assiale è di compressione se negativa mentre un momento flettente positivo tende le fibre all'estradosso della sezione (lato controterra). Le verifiche sono condotte in corrispondenza della calotta e della sezione di piedritto più gravosa.

	Curva incendio	Tempo [min]	indice	h [m]	N [kN]	M [kNm]	V [kN]
CALOTTA	EUREKA	60	668	0.60	-2112	-282	11
		120	668	0.60	-2176	-456	13
		170	668	0.60	-2227	-489	14
	UNI 11076	120	668	0.60	-2171	-406	17

	Curva incendio	Tempo [min]	indice	h [m]	N [kN]	M [kNm]	V [kN]
CALOTTA	EUREKA	60	709	0.59	-3009	-470	-71
		120	706	0.60	-3034	-616	-14
		170	710	0.60	-3074	-650	-55
	UNI 11076	120	710	0.60	-3058	-567	-58

	Curva incendio	Tempo [min]	indice	h [m]	N [kN]	M [kNm]	V [kN]
<b>PIEDRITTO DX</b>	EUREKA	60	723	0.60	-2952	-446	357
		120	723	0.60	-2995	-589	423
		170	723	0.60	-3011	-625	422
	UNI 11076	120	723	0.60	-2993	-543	443

	Curva incendio	Tempo [min]	indice	h [m]	N [kN]	M [kNm]	V [kN]
<b>PIEDRITTO DX</b>	EUREKA	60	733	0.82	-2781	-680	-142
		120	733	0.82	-2839	-837	-115
		170	733	0.82	-2865	-880	-98
	UNI 11076	120	733	0.82	-2848	-799	-114

	Curva incendio	Tempo [min]	indice	h [m]	N [kN]	M [kNm]	V [kN]
<b>PIEDRITTO SX</b>	EUREKA	60	601	0.61	-2984	-444	4
		120	600	0.60	-2971	-592	75
		170	600	0.60	-2998	-629	85
	UNI 11076	120	600	0.60	-2971	-544	79

	Curva incendio	Tempo [min]	indice	h [m]	N [kN]	M [kNm]	V [kN]
<b>PIEDRITTO SX</b>	EUREKA	60	590	0.82	-2822	-725	170
		120	590	0.82	-2852	-887	145
		170	590	0.82	-2880	-928	124
	UNI 11076	120	590	0.82	-2862	-846	144

Die Prüfsoftware RAF ermöglicht die Berechnung des Sicherheitskoeffizienten beim Grenzzustand der Tragfähigkeit des Querschnitts, der der Brandkurve und den planmäßigen inneren Wirkungen ausgesetzt ist. Für die als am kritischsten festgestellten Prüfbedingungen werden nachfolgend die berechneten Sicherheitskoeffizienten angeführt.

Il programma di verifica RAF permette di calcolare il coefficiente di sicurezza allo Stato Limite Ultimo della sezione soggetta alla curva di incendio e alle azioni interne di progetto. Per le condizioni di verifica individuate come le più critiche si riportano nel seguito i coefficienti di sicurezza calcolati.

**Querschnitt am Scheitel der Kalotte**

**Sezione in chiave calotta**

EUREKA t = 170 min: SF = 1.41 > 1.0

**Abschnitt linke Seitenwand**

**Sezione piedritto sinistro**

EUREKA t = 170 min: SF = 1.45 > 1.0

Die Sicherheitskoeffizienten beim Grenzzustand der Tragfähigkeit sind höher als die Einheit und die Nachweise sind daher erfüllt.

I coefficienti di sicurezza allo Stato Limite Ultimo sono maggiori dell'unità e le verifiche sono quindi soddisfatte.

Die erwähnte Berechnung deckt den spezifischen Fall des Querschnitts der Kalotte für den Regelquerschnitt N2 TP 4.9 ab und wird als Beispiel verstanden: Die Ergebnisse der Nachweise bei Wärme wurden in jedem Berechnungsbericht für jeden charakteristischen Querschnitt des Tunnels wiedergegeben.

Il calcolo richiamato copre il caso specifico della sezione di calotta per la sezione tipo N2 TP 4.9 e si intende da esempio: i risultati delle verifiche a caldo sono stati riportati in ciascuna relazione di calcolo per ogni sezione caratteristica della galleria.

#### 5.4 ANALISI IN PRESENZA DI SPALLING

Le procedure fino ad ora descritte per la verifica dei rivestimenti durante l'incendio sono da ritenersi cautelative in quanto le analisi strutturali vengono condotte con riferimento all'intera rigidità sezionale (ovvero senza considerare possibili fenomeni di spalling del calcestruzzo di intradosso durante l'evento di incendio), mentre la verifica sezionale ha preso in conto una riduzione di 2 cm della sezione resistenza nell'ipotesi di espulsione del copriferro della rete zincata. Con tale procedura si è provveduto alle verifiche al fuoco delle opere in progetto.

Per alcune opere in sotterraneo, laddove si avevano ridotti fattori di sicurezza nelle verifiche al fuoco, si è inoltre studiato nelle analisi il fenomeno dello spalling durante la fase di incendio: in questo caso sia l'analisi strutturale, per la determinazione delle sollecitazioni agenti, sia la verifica sezionale, per la determinazione dei fattori di sicurezza, sono state condotte considerando una riduzione della sezione in c.a. di 10 cm in calotta (fino a circa 15 cm in corrispondenza dei piedritti). Si è cioè ipotizzato il possibile distacco, dopo dieci minuti di incendio, di porzioni di cls in intradosso della galleria ben oltre la rete zincata di protezione, predisposta a progetto, fino addirittura a superare il copriferro dell'armatura principale, posta a 8 cm dall'intradosso della carpenteria.

Tale approccio è stato eseguito per le sezioni tipo S1-TP-IS in corrispondenza del sottoattraversamento del fiume Isarco e per la sezione tipo S1-TP-C1 in detrito a sud del fiume Isarco; anche in questa condizione, le verifiche statiche, riportate in dettaglio rispettivamente nelle relazioni "02-H71-AF-002-06-06-002.00-B0115-01931-RT2" e "02-H71-AF-002-06-05-006.00-B0115-01345-RT2", sono risultate soddisfatte.

#### 5.4 ANALISI IN PRESENZA DI SPALLING

Le procedure fino ad ora descritte per la verifica dei rivestimenti durante l'incendio sono da ritenersi cautelative in quanto le analisi strutturali vengono condotte con riferimento all'intera rigidità sezionale (ovvero senza considerare possibili fenomeni di spalling del calcestruzzo di intradosso durante l'evento di incendio), mentre la verifica sezionale ha preso in conto una riduzione di 2 cm della sezione resistenza nell'ipotesi di espulsione del copriferro della rete zincata. Con tale procedura si è provveduto alle verifiche al fuoco delle opere in progetto.

Per alcune opere in sotterraneo, laddove si avevano ridotti fattori di sicurezza nelle verifiche al fuoco, si è inoltre studiato nelle analisi il fenomeno dello spalling durante la fase di incendio: in questo caso sia l'analisi strutturale, per la determinazione delle sollecitazioni agenti, sia la verifica sezionale, per la determinazione dei fattori di sicurezza, sono state condotte considerando una riduzione della sezione in c.a. di 10 cm in calotta (fino a circa 15 cm in corrispondenza dei piedritti). Si è cioè ipotizzato il possibile distacco, dopo 10 minuti di incendio, di porzioni di cls in intradosso della galleria ben oltre la rete zincata di protezione, predisposta a progetto, fino addirittura a superare il copriferro dell'armatura principale, posta a 8 cm dall'intradosso della carpenteria.

Tale approccio è stato eseguito per le sezioni tipo S1-TP-IS in corrispondenza del sottoattraversamento del fiume Isarco e per la sezione tipo S1-TP-C1 in detrito a sud del fiume Isarco; anche in questa condizione, le verifiche statiche, riportate in dettaglio rispettivamente nelle relazioni "02-H71-AF-002-06-06-002.00-B0115-01931-RT2" e "02-H71-AF-002-06-05-006.00-B0115-01345-RT2", sono risultate soddisfatte.

## 6 VERZEICHNISSE

### 6.1 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Vergleich der Brandkurven

Abbildung 2: Zeitabhängige Temperaturwerte nach der Kurve RWS

Abbildung 3: Eigenschaften des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur

Abbildung 4: Verbindung Spannung-Verformung des Betons bei hohen Temperaturen

Abbildung 5: Änderung des Elastizitätsmoduls als Sekante je nach Temperatur (Rck = 30 MPa)

Abbildung 6: Änderung des Elastizitätsmoduls als Sekante je nach Temperatur (Rck = 30 MPa)

Abbildung 7: Änderung des Elastizitätsmoduls als Sekante je nach Temperatur (Rck = 37 MPa)

Abbildung 8: Änderung des Elastizitätsmoduls als Sekante je nach Temperatur (Rck = 37 MPa)

Abbildung 9: Änderung des Elastizitätsmoduls als Sekante je nach Temperatur (Rck = 45 MPa)

Abbildung 10: Änderung des Elastizitätsmoduls als Sekante je nach Temperatur (Rck = 45 MPa)

Abbildung 11: Änderung der Kohäsion je nach Temperatur (Rck = 30 MPa)

Abbildung 12: Änderung der Kohäsion  $c'$  je nach Temperatur (Rck = 30 MPa)

Abbildung 13: Änderung der Kohäsion je nach Temperatur (Rck = 37 MPa)

Abbildung 14: Änderung der Kohäsion  $c'$  je nach Temperatur (Rck = 37 MPa)

Abbildung 15: Änderung der Kohäsion je nach Temperatur (Rck = 45 MPa)

Abbildung 16: Änderung der Kohäsion  $c'$  je nach Temperatur (Rck = 45 MPa)

Abbildung 17: Änderung der Druckfestigkeit je nach

## 6 ELENCHI

### 6.1 ELENCO DELLE ILLUSTRAZIONI

Illustrazione 1: Comparazione fra le curve d'incendio

Illustrazione 2: Valori della temperatura in funzione del tempo secondo la curva RWS

Illustrazione 3: Caratteristiche del calcestruzzo in funzione della temperatura

Illustrazione 4: Legame tensioni-deformazioni del calcestruzzo ad elevate temperature

Illustrazione 5: Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 6: Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 7: Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 8: Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 9: Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 10: Variazione del modulo elastico secante in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 11: Variazione della coesione in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 12: Variazione della coesione  $c'$  in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 13: Variazione della coesione in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 14: Variazione della coesione  $c'$  in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 15: Variazione della coesione in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 16: Variazione della coesione  $c'$  in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 17: Variazione della resistenza a

Fachbereich:

Thema:

Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere

Tema: Documenti generali

**Contenuto documento:** Protezione costruttiva all'incendio

Temperatur (Rck = 30 MPa)

compressione in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

Abbildung 18: Beständigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 18: Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

Abbildung 19: Änderung der Druckfestigkeit je nach Temperatur (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 19: Variazione della resistenza a compressione in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

Abbildung 20: Beständigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 20: Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

Abbildung 21: Änderung der Druckfestigkeit je nach Temperatur (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 21: Variazione della resistenza a compressione in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Abbildung 22: Beständigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 22: Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Abbildung 23: Änderung der Zugfestigkeit je nach Temperatur (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 23: Variazione della resistenza a trazione in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

Abbildung 24: Beständigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur (Rck = 30 MPa)

Illustrazione 24: Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura (Rck = 30 MPa)

Abbildung 25: Änderung der Zugfestigkeit je nach Temperatur (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 25: Variazione della resistenza a trazione in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

Abbildung 26: Beständigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur (Rck = 37 MPa)

Illustrazione 26: Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura (Rck = 37 MPa)

Abbildung 27: Änderung der Zugfestigkeit je nach Temperatur (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 27: Variazione della resistenza a trazione in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Abbildung 28: Beständigkeit des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur (Rck = 45 MPa)

Illustrazione 28: Resistenza del calcestruzzo in funzione della temperatura (Rck = 45 MPa)

Abbildung 29: Eigenschaften des Stahls je nach Temperatur

Illustrazione 29: Caratteristiche dell'acciaio in funzione della temperatura

Abbildung 30: Verbindung Spannungen-Verformungen im Stahl

Illustrazione 30: Legame tensioni-deformazioni nell'acciaio

Abbildung 31: Gesetz der Änderung der Wärmeleitfähigkeit laut Rechtsvorschrift

Illustrazione 31: Legge di variazione della conducibilità termica secondo normativa

Abbildung 32: Werte der planmäßigen Wärmeleitfähigkeit

Illustrazione 32: Valori della conducibilità termica di progetto

Abbildung 33: Planmäßige Wärmeleitfähigkeit

Illustrazione 33: Conducibilità termica di progetto

Fachbereich:  
Thema:

Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere

Tema: Documenti generali

Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

Abbildung 34: Spezifische Wärme des Betons mit Gesteinskörnung in Abhängigkeit von der Temperatur $c_p(\theta)$ (Feuchtigkeit $u = 0$ Gew.-% wird angewandt)	Illustrazione 34: calore specifico del calcestruzzo, con additivo siliceo $c_p(\theta)$ in funzione della temperatura (umidità $u = 0$ Gew.-% viene applicata)
Abbildung 35: Gesetz der Änderung der spezifischen Wärme laut Rechtsvorschrift	Illustrazione 35: Legge di variazione del calore specifico secondo normativa
Abbildung 36: Werte der planmäßigen spezifischen Wärme	Illustrazione 36: Valori del calore specifico di progetto
Abbildung 37: Planmäßige spezifische Wärme	Illustrazione 37: Calore specifico di progetto
Abbildung 38: Gesetz der Änderung der Dichte laut Rechtsvorschrift	Illustrazione 38: Legge di variazione della densità secondo normativa
Abbildung 39: Gesetz der Änderung der thermischen Verformung laut Rechtsvorschrift	Illustrazione 39: Legge di variazione della deformazione termica secondo normativa
Abbildung 40: Planmäßiger Wärmeausdehnungskoeffizient	Illustrazione 40: Coefficiente di espansione termica di progetto
Abbildung 41: Werte der thermischen Verformung und des Koeffizienten $\alpha$ für Beton mit Gesteinskörnung.	Illustrazione 41: Valori della deformazione termica e del coefficiente alfa per calcestruzzi silicei
Abbildung 42: Berechnungsgitter	Illustrazione 42: Mesh di calcolo
Abbildung 43: Berechnungsgitter – Aspect Ratio Innenkante der Gewölbesteine	Illustrazione 43: Mesh di calcolo – Aspect ratio intradosso conci
Abbildung 44: Temperaturverteilung in der Auskleidung – Kurve EUREKA	Illustrazione 44: Distribuzione della temperatura del rivestimento – Curva EUREKA
Abbildung 45: Temperaturverteilung in der Auskleidung – Kurve RWS	Illustrazione 45: Distribuzione della temperatura del rivestimento – Curva RWS
Abbildung 46: Querschnitt der Bewertung des Temperaturverlaufs	Illustrazione 46: Sezione di valutazione dell'evoluzione della temperatura
Abbildung 47: Temperaturverlauf in der Auskleidung – Kurve EUREKA	Illustrazione 47: Evoluzione della temperatura nel rivestimento – Curva EUREKA
Abbildung 48: Temperaturverlauf in der Auskleidung – Kurve RWS	Illustrazione 48: Evoluzione della temperatura nel rivestimento – Curva RWS
Abbildung 49: Entwicklung des Bulk Modulus im Querschnitt – Kurve EUREKA	Illustrazione 49: Evoluzione del bulk modulus nella sezione – Curva EUREKA
Abbildung 50: Entwicklung des Bulk Modulus im Querschnitt – Kurve UNI11076	Illustrazione 50: Evoluzione del bulk modulus nella sezione – Curva UNI11076
Abbildung 51: Entwicklung des Bulk Modulus in der	Illustrazione 51: Evoluzione del bulk modulus nel

Fachbereich:

Thema:

Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere

Tema: Documenti generali

Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

Auskleidung – Kurve EUREKA

rivestimento – Curva EUREKA

Abbildung 52: Entwicklung des Bulk Modulus in der Auskleidung – Kurve RWS

Illustrazione 52: Evoluzione del bulk modulus nel rivestimento – Curva RWS

Abbildung 53: Entwicklung der Kohäsion in der Auskleidung – Kurve EUREKA

Illustrazione 53: Evoluzione della coesione nel rivestimento – Curva EUREKA

Abbildung 54: Entwicklung der Kohäsion in der Auskleidung – Kurve RWS – N2

Illustrazione 54: Evoluzione della coesione nel rivestimento – Curva RWS

Abbildung 55: Entwicklung der Zugfestigkeit in der Auskleidung – Kurve EUREKA

Illustrazione 55: Evoluzione della resistenza a trazione nel rivestimento – Curva EUREKA

Abbildung 56: Entwicklung der Zugfestigkeit in der Auskleidung – Kurve RWS

Illustrazione 56: Evoluzione resistenza a trazione nel rivestimento – Curva RWS

Abbildung 57: Spannungszustand – Kurve EUREKA – t = 170 min

Illustrazione 57: Stato tensionale – Curva EUREKA – t = 170 min

Abbildung 58: Spannungszustand – Kurve EUREKA – t = 170 min

Illustrazione 58: Stato tensionale – Curva EUREKA – t = 170 min

Abbildung 59: Spannungszustand – Kurve RWS – t = 120 min

Illustrazione 59: Stato tensionale – Curva RWS – t = 120 min

Abbildung 60: Spannungszustand – Kurve RWS – t = 120 min

Illustrazione 60: Stato tensionale – Curva RWS – t = 120 min

Abbildung 61: Sigma 1 – Kurve EUREKA

Illustrazione 61: Sigma 1 – Curva EUREKA

Abbildung 62: Sigma 1 – Kurve RWS

Illustrazione 62: Sigma 1 – Curva RWS

Abbildung 63: Wärmeleitfähigkeit des Betons (EN 1992-1-2 Abs. 3.4 – Abb. 3.7)

Illustrazione 63: Conduttività termica del calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.4 – fig.3.7)

Abbildung 64: Spezifische Wärme für Beton (EN 1992-1-2 Abs. 3.3.2 – Abb. 3.6a)

Illustrazione 64: Calore specifico per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.3.2 – fig.3.6a)

Abbildung 65: Faktor der Verringerung des Festigkeitswerts  $f_{ck}$  für Beton (EN 1992-1-2 Abs. 4.2.4.2 – Abb. 4.1)

Illustrazione 65: Fattore di riduzione del valore di resistenza  $f_{ck}$  per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.4.2.4.2 – fig.4.1)

Abbildung 66: Faktor der Verringerung des Festigkeitswerts  $\epsilon_{c1}$  für Beton (EN 1992-1-2 Abs. 3.2.2.1 – Tab. 3.1)

Illustrazione 66: Fattore di riduzione del valore di  $\epsilon_{c1}$  per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

Abbildung 67: Faktor der Verringerung des Wertes  $\epsilon_{cu}$  für Beton (EN 1992-1-2 Abs. 3.2.2.1 – Tab. 3.1)

Illustrazione 67: Fattore di riduzione del valore di  $\epsilon_{cu}$  per il calcestruzzo (EN 1992-1-2 p.3.2.2.1 – tab.3.1)

Abbildung 68: Faktor der Verringerung des Festigkeitswerts  $f_{yk}$  für Bewehrungsstäbe (EN 1992-1-2

Illustrazione 68: Fattore di riduzione del valore di resistenza  $f_{yk}$  per le barre d'armatura (EN 1992-1-2



Fachbereich:  
Thema:  
Dokumenteninhalt:

Settore: 06-Progettazione delle opere  
Tema: Documenti generali  
Contenuto documento: Protezione costruttiva all'incendio

Abs. 4.2.4.3 – Abb. 4.2a)

p.4.2.4.3 – fig.4.2a)

Abbildung 69: Faktor der Verringerung des Wertes des Elastizitätsmoduls für Bewehrungsstäbe (EN 1992-1-2 Abs. 3.2.3 – Tab. 3.2.a)

Illustrazione 69: Fattore di riduzione del valore del modulo elastico per le barre d'armatura (EN 1992-1-2 p.3.2.3 – tab.3.2.a)

Abbildung 70: Temperaturverteilung innerhalb des Querschnitts (T=170 min Kurve EUREKA)

Illustrazione 70: Distribuzione della temperatura all'interno della sezione (T=170 min curva EUREKA)

## 6.2 BIBLIOGRAFIE UND QUELLEN

## 6.2 BIBLIOGRAFIA E FONTI

### 6.2.1 Dokumente der Ausschreibungsplanung

### 6.2.1 Documenti del progetto esecutivo

1. 02-H71-AF-002-06-01-010.00-B0115-01585-RT5-00, „Baulicher Brandschutz - Vorgangsweise zum Lastfall Brand (passiver Brandschutz)“
2. 02-H71-AF-002-03-01-002.00-B0115-01315-RT3-00 „Bericht Geotechnik“
3. D0118-00064 „Aerodynamik – Klima – Lüftung“
4. 02-H71-AF-002-06-05-013.00-B0115-01352-RT5-00 „Linee guida per l'applicazione degli interventi di sostegno“
5. 02-H71-AF-002-06-05-949.00-B115-01917-5Z0-00 „Elenco dei tipi di calcestruzzo e dei materiali da costruzione“

1. 02-H71-AF-002-06-01-010.00-B0115-01585-RT5-00 “Protezione costruttiva all'incendio - Procedimento per la verifica della resistenza al fuoco (protezione all'incendio passiva)”
2. 02-H71-AF-002-03-01-002.00-B0115-01315-RT3-00 “ Relazione geotecnica“
3. D0118-00064 „Aerodinamica – clima – ventilazione“.
4. 02-H71-AF-002-06-05-013.00-B0115-01352-RT5-00 „Linee guida per l'applicazione degli interventi di sostegno“
5. 02-H71-AF-002-06-05-949.00-B115-01917-5Z0-00 “Elenco dei tipi di calcestruzzo e dei materiali da costruzione”

### 6.2.2 Normen und Richtlinien

### 6.2.2 Normativa e Linee Guida

- NTC 2008
- UNI EN 1991-1-1
- UNI EN 1991-1-2
- UNI EN 1991-1-3
- UNI EN 1991-1-4
- UNI EN 1991-1-5
- UNI EN 1992-1
- UNI EN 1992-2
- EN 206-1
- EN 1997-1
- EN 1998-1
- D.M. 28/10/2005
- STI 2008/217/CE INF

- NTC 2008
- UNI EN 1991-1-1
- UNI EN 1991-1-2
- UNI EN 1991-1-3
- UNI EN 1991-1-4
- UNI EN 1991-1-5
- UNI EN 1992-1
- UNI EN 1992-2
- EN 206-1
- EN 1997-1
- EN 1998-1
- D.M. 28/10/2005
- STI 2008/217/CE INF