



D I P L O M A R B E I T

Simulation des Strukturverhaltens unterschiedlicher Tunnelquerschnitte unter Brandbelastung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen
Grades eines Diplom-Ingenieurs

unter der Anleitung von

Dipl.-Ing. Dr. techn. **Matthias Zeiml**
Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen
Fakultät für Bauingenieurwesen
Technische Universität Wien

Dipl.-Ing. Dr. techn. **Thomas Ring**
Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen
Fakultät für Bauingenieurwesen
Technische Universität Wien

und

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. DDr. h.c. **Josef Eberhardsteiner**
Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen
Fakultät für Bauingenieurwesen
Technische Universität Wien

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Stefan Dallinger

Matr.Nr.: 04 56 012
Rauscherstraße 9/16
A - 1200 Wien

Wien, 23. Oktober 2013

Danksagung

In den folgenden Zeilen möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mir bei der Erstellung dieser Diplomarbeit geholfen haben.

Vorab möchte ich mich herzlich bei meiner Familie bedanken, die mir das Studium des Bauingenieurwesens ermöglicht hat und damit einen großen Anteil zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen hat.

Desweiteren möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Matthias Zeiml dafür bedanken, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat dieses Thema zu bearbeiten und mich zu jeder Zeit mit seiner hervorragenden Betreuung unterstützte.

Besonderen Dank möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Ring aussprechen, welcher mir bei der Bearbeitung der Aufgabenstellungen und bei der Lösungsfindung durch sein fachliches Wissen mit Rat und Tat zur Seite stand.

Natürlich möchte ich mich auch sehr herzlich bei meiner Lebensgefährtin und meinen Freunden und all jenen die hier nicht namentlich erwähnt wurden dafür bedanken, dass sie mir immer hilfreich zur Seite standen.

Abstract

As the past has already shown, fire incidents happened several times in tunnels, for example in the Mont-Blanc Tunnel in 1999. To investigate or to predict the effect of such serious thermal loads on a reinforced concrete tunnel sections suitable simulation models are required.

This master thesis shows the numerical investigation of underground structures made of reinforced concrete subjected to fire loading. Three different types of tunnel cross-sections under a three hours fire load were simulated: a rectangular cross-section, a arched cross section and a circular cross-section. The simulation of the circular cross-section includes four different static systems. In order to perform a realistic simulation, an asymmetric mechanical load was considered. To perform a comparison between the different structures, the main attention was paid to the internal forces (bending moments, axial forces) and deformations. The numerical investigations comprise three different model assumptions.

The used model assumptions are:

- linear-elastic material behaviour considering an equivalent temperature distribution
- non-linear, elasto-plastic material behaviour considering an equivalent temperature distribution
- non-linear, elasto-plastic material behaviour considering a non-linear temperature distribution

Furthermore, the material parameters and their temperature-dependent evolution were taken from two different policies (ÖNORM EN 1992-1-2 [1] and CEB [2]). The results showed that the stiffness of the cross sections was significantly reduced by using non-linear material behaviour (i.e., limitation of stresses by the respective temperature-dependent strength). In this way, the internal forces (bending moments, axial forces) decreased and the deformations increased significantly compared to the linear simulation without the limitation of stresses. In order to carry out an economic design of underground structures also for the bad case "fire", such realistic non-linear simulations are essential.

Kurzfassung

Wie die Vergangenheit gezeigt hat, kommt es immer wieder zu Bränden in Tunneln, wie zum Beispiel im Mont-Blanc Tunnel im Jahre (1999). Um die Auswirkungen solch einer gravierenden thermischen Belastung auf einen Tunnelquerschnitt aus Stahlbeton zu untersuchen bzw. zu prognostizieren, werden geeignete Simulationsmodelle benötigt.

In dieser Arbeit wird das Verhalten unterirdischer Hohlraumbauten aus Stahlbeton unter Brandbelastung numerisch untersucht. Es werden drei unterschiedliche Tunnelquerschnitte behandelt und einer 3-stündigen Brandbelastung ausgesetzt. Zu den behandelten Querschnitten zählen ein Rechteckquerschnitt, ein Gewölbequerschnitt und ein Kreisquerschnitt. Bei der Simulation des Kreisquerschnitts werden außerdem vier unterschiedliche statische Systeme untersucht. Um eine möglichst realistische Simulation durchführen zu können, wird eine asymmetrische mechanische Belastung angesetzt. Zum Vergleich zwischen den unterschiedlichen Strukturen wird das Hauptaugenmerk in dieser Arbeit auf die Schnittgrößen (Biegemomente, Normalkräfte) und Verformungen gelegt. Es werden Simulationen mit drei unterschiedlichen Modellannahmen durchgeführt.

Die angesetzten Modellannahmen sind:

- linear-elastisches Materialverhalten unter Berücksichtigung einer äquivalenten Temperaturverteilung
- nichtlineares, elasto-plastisches Materialverhalten unter Berücksichtigung einer äquivalenten Temperaturverteilung
- nichtlineares, elasto-plastisches Materialverhalten unter Berücksichtigung einer nicht-linearen Temperaturverteilung

Desweiteren werden die Materialparameter und deren temperaturabhängige Entwicklung aus zwei unterschiedlichen Richtlinien entnommen und die Ergebnisse verglichen (ÖNORM EN 1992-1-2 [1] und CEB [2]).

Es zeigte sich vor allem, dass die Steifigkeit der Querschnitte durch die Berücksichtigung eines nichtlinearen Materialverhaltens (d.h. eine Begrenzung der Spannungen mit temperaturabhängigen Festigkeiten) verringert wurde. Dadurch sanken im Unterschied zur linearen Simulation ohne die Begrenzung der Spannungen die Schnittgrößen (Biegemomente, Normalkräfte) und es stiegen die Verformungen stark an. Um in der Praxis eine wirtschaftliche Bemessung auch im Brandfall zu gewährleisten, sind solch realitätsnahe, nichtlineare Simulationen unumgänglich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Simulationsgrundlagen	3
2.1	Verwendete Programme	3
2.2	Struktureller Aufbau der Systeme	3
2.3	Belastung	3
2.4	Tunnelquerschnitte und deren Belastung	5
2.4.1	Rechteckquerschnitt	5
2.4.2	Gewölbequerschnitt	7
2.4.3	Kreisquerschnitt	10
2.5	Outputparameter für den Vergleich	13
3	Modellannahmen	14
3.1	Allgemeines	14
3.2	Thermische Analyse	14
3.3	Materialmodelle	15
3.3.1	Lineare Simulation (linear-elastisches Materialverhalten mit äquivalenter Temperatur)	15
3.3.2	Zwischenschritt (nichtlineares, elasto-plastisches Materialverhalten mit äquivalenter Temperatur)	16
3.3.3	Nichtlineare Simulation (nichtlineares, elasto-plastisches Materialverhalten mit nichtlinearer Temperaturverteilung)	17
4	Ergebnisse	19
4.1	Rechteckquerschnitt	19
4.1.1	Lineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB	19
4.1.2	Zwischenschritt nach EC 2-1-2 und CEB	23
4.1.3	Nichtlineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB	26
4.2	Gewölbequerschnitt	30
4.2.1	Lineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB	30
4.2.2	Zwischenschritt nach EC 2-1-2 und CEB	33
4.2.3	Nichtlineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB	36
4.3	Kreisquerschnitt Fall 1	39
4.3.1	Lineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB	39
4.3.2	Zwischenschritt nach EC 2-1-2 und CEB	43
4.3.3	Nichtlineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB	46
4.4	Kreisquerschnitt Fall 2	47

4.4.1	Lineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB	47
4.4.2	Zwischenschritt nach EC 2-1-2 und CEB	50
4.4.3	Nichtlineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB	53
4.5	Kreisquerschnitt Fall 3	56
4.5.1	Lineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB	56
4.5.2	Zwischenschritt nach EC 2-1-2 und CEB	60
4.5.3	Nichtlineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB	64
4.6	Kreisquerschnitt Fall 4 (unbewehrt)	67
4.6.1	Lineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB	67
4.6.2	Zwischenschritt nach EC 2-1-2 und CEB	71
4.6.3	Nichtlineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB	74
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	77

Kapitel 1

Einleitung

In der Ingenieurpraxis werden zur Berechnung von Schalen größtenteils Berechnungsprogramme auf Basis der Finite-Elemente-Methode verwendet, die vorwiegend nur linear-elastisches Materialverhalten berücksichtigen. Dies ist in der Regel auch ausreichend genau. Im Brandfall können hingegen komplexere Berechnungen unter Berücksichtigung von nicht-linearem Materialverhalten notwendig sein, da nur so eine realitätsnahe Beschreibung des Strukturverhaltens unter thermischer Belastung möglich ist. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die Tragsicherheit von Tunnelschalen in offener und geschlossener Bauweise unter Brandbelastung untersucht und die Ergebnisse unter Zugrundelegung unterschiedlicher Modellansätze verglichen:

- linear-elastisches Materialverhalten unter äquivalenter Temperatureinwirkung
- plastisches Materialverhalten unter äquivalenter Temperatureinwirkung und
- plastisches Materialverhalten unter nichtlinearer Temperatureinwirkung

Es wurde ein zweigleisiger Rechteckquerschnitt, ein zweigleisiger Gewölbequerschnitt sowie ein eingleisiger Kreisquerschnitt betrachtet. Zudem wurden die verwendeten Materialparameter und ihre temperaturabhängige Entwicklung aus zwei unterschiedlichen Regelwerken entnommen:

1. ÖNORM EN 1992-1-2. Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Österreichisches Normungsinstitut, 2010 [1] (in weiterer Folge als EC 2-1-2 bezeichnet).
2. CEB 208. Fire Design of Concrete Structures, Bulletin d'Information No. 208, Comite Euro-International du Beton (CEB), Lausanne, 1991 [2].

Die Auswirkungen von Abplatzungen auf das Strukturverhalten der Querschnitte wurden in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Im Zuge der Berechnung wurde zuerst eine

Kaltbemessung gemäß ÖNORM EN 1992-1-1 [3] durchgeführt, die mittels linear-elastischen Ansatzes unter Berücksichtigung der für den Traglastfall maßgebenden Lastfallkombinationen gemäß ÖNORM EN 1990 [4] auf die erforderliche Bewehrung führte. In weiterer Folge wurde mit der entsprechenden Bewehrungsanordnung das Strukturverhalten unter thermischer Belastung simuliert. In Kapitel 2 wird der strukturelle Aufbau der simulierten Tunnelquerschnitte und die Belastung beschrieben. Kapitel 3 enthält die verwendeten thermischen Materialparameter und die unterschiedlichen Materialmodelle (siehe [9] [11] [12] für weiterführende Informationen). In Kapitel 4 wird auf die Ergebnisse der Simulationen näher eingegangen mit Hinweis auf vorangegangene numerische Studien ([11] [13] [14]). In Kapitel 5 werden die wichtigsten Schlussfolgerungen zusammengefasst.

Simulationsgrundlagen

2.1 Verwendete Programme

Grundsätzlich wurde für die Berechnungen das FE-Programm MARC Mentat 2005 verwendet [15]. Für die Berücksichtigung von linear-elastischem beziehungsweise ideal-plastischem Materialverhalten und der nichtlinearen Temperatureinwirkung wurden Subroutinen mit dem Programm Fortran77 erstellt.

2.2 Struktureller Aufbau der Systeme

Es wurden drei unterschiedliche Tunnelquerschnitte simuliert, und zwar jeweils ein Abschnitt mit einer Länge von 1,0 m. Die Diskretisierung der Schalen erfolgte mit 4-Knoten-elementen des Marc-Element-Typs 75 [7]. Durch die Einteilung jedes Elements in 105 einzelne Schichten kann das Materialverhalten unter Berücksichtigung der Temperaturverteilung über die Tiefe genau definiert werden [7].

Da die mechanische Belastung der Querschnitte asymmetrisch ist, war keine Ausnutzung der Symmetrie des Tunnelquerschnitts möglich. Daher wurde jeweils der gesamte Querschnitt modelliert. Eine Bettung des Querschnitts mit Hilfe von sogenannten „GAP-Elements“ [7] wurde nur auf Druck angesetzt, unter Zug kam es zu einem Ausfall der Bettung, d.h. der jeweiligen Feder. Die mechanische Belastung des Querschnitts wurde an den Knoten des jeweiligen Elements angesetzt.

2.3 Belastung

Aufgrund der Berücksichtigung von Nichtlinearitäten war das Superpositionsprinzip bei der Berechnung nicht zulässig. Um die Einhüllende der Schnittgrößen zu erhalten, wurde eine außergewöhnliche Lastfallkombination gemäß ÖNORM EN 1990 [4] angesetzt und die

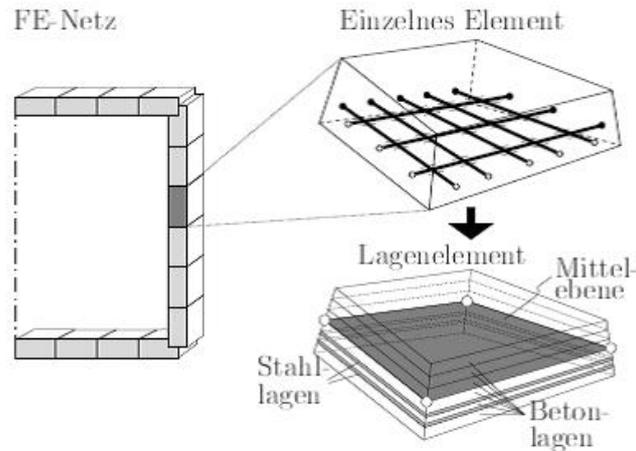


Abbildung 2.1: Aufbau eines finiten Schalenelements [8]

Lasten mit den entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten berücksichtigt (siehe Gleichung 2.1).

$$L_d = \sum G_{k,j} + \sum (E_{k,j} + W_{k,j}) + \sum (\psi_{2,i} Q_{k,i}) + A_d \quad (2.1)$$

- Eigengewicht (G_k)

Das Eigengewicht wurde mit einem spezifischen Gewicht von Beton von $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ berücksichtigt

- Erddruck (E_k)

Der horizontale Erddruck wurde in Abhängigkeit der Querschnittsabmessungen linear veränderlich über die Höhe berücksichtigt und setzte sich aus einem symmetrischen und einem asymmetrischen Anteil zusammen. Die vertikale Erdauflast war für den Rechteckquerschnitt konstant über die Querschnittsbreite. Für den Gewölbe- und Kreisquerschnitt wurde die Erdauflast inklusive Zwickellasten berücksichtigt.

- Grundwasser inklusive Auftrieb (W_k)

Der horizontale Wasserdruck wurde unter Berücksichtigung des jeweiligen Grundwasserstands berücksichtigt. Der Auftrieb wurde konstant über die Querschnittsbreite und in Abhängigkeit der Einbindetiefe des Querschnitts in das Grundwasser angesetzt.

- Verkehrslast auf den Tunnel (Q_k)

Die horizontale und vertikale Belastung zufolge Verkehr wurde konstant angesetzt.

- Brandlast (A_d)

Die Brandlast zur Berücksichtigung eines Tunnelbrandes wurde entweder mittels der sogenannten äquivalenten Temperatur oder der direkt aus der Brandbelastung resul-

tierenden nichtlinearen Temperaturverteilung über die Querschnittsdicke berücksichtigt. In Abbildung 2.2 ist die zeitliche Entwicklung der angesetzten Temperaturkurve dargestellt.

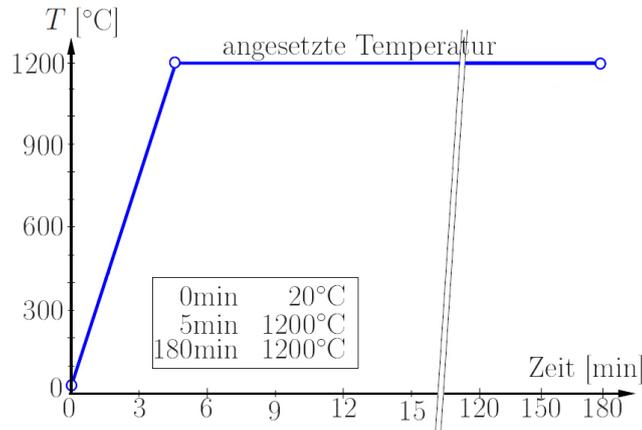


Abbildung 2.2: Temperaturentwicklung über die Zeit

2.4 Tunnelquerschnitte und deren Belastung

2.4.1 Rechteckquerschnitt

Der untersuchte, zweigleisige Tunnel mit Rechteckquerschnitt ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Für Beton wurde C25/30/BS1A und als Bewehrungsstahl wurde BSt 550/M verwendet. Die Seitenwände des Tunnels wiesen eine konstante Dicke von 68 cm auf, die Bodenplatte ist von 64 cm Regeldicke auf 90 cm im Randbereich gevoutet. Die Decke ist von 70 cm Regeldicke auf 85 cm im Eckbereich gevoutet.

Querschnitt Q	Dicke [cm]	Bewehrungsgehalt innen [cm ² /m]	Bewehrungsgehalt außen [cm ² /m]
1	70	39	24
2	85	39	40
3	68	30	50
4	68	10	30
5	68	10	38
6	90	21	31
7	64	21	10

Tabelle 2.1: Querschnittseinteilung und Bewehrungsgehalte für den Rechteckquerschnitt

Die erforderliche Bewehrung wurde für den gegebenen Querschnitt vorab unter Ansatz von linear-elastischem Materialverhalten gemäß ÖNORM EN 1992-1-1 [3] ermittelt. In Tabelle 2.1 sind die Werte der in erster Lage liegenden Bewehrung in Umfangsrichtung ersichtlich. Die Betondeckung betrug an der Innen- und Außenseite der Schale jeweils 6,0 cm. Für die

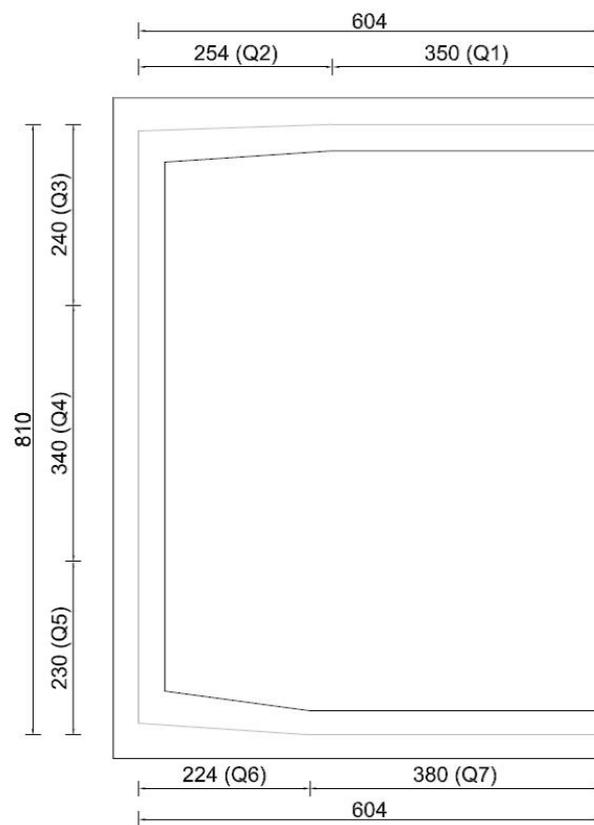


Abbildung 2.3: Querschnittabmessungen für den Rechteckquerschnitt (linke Hälfte des Querschnitts dargestellt)

zweite Lage der Bewehrung in Tunnellängsrichtung ergab sich die erforderliche Mindestbewehrung gemäß ÖNORM EN 1992-1-1 [3] zu $10,40 \text{ cm}^2/\text{m}$. In Abbildung 2.4 werden das statische System und die Belastung des Querschnitts dargestellt.

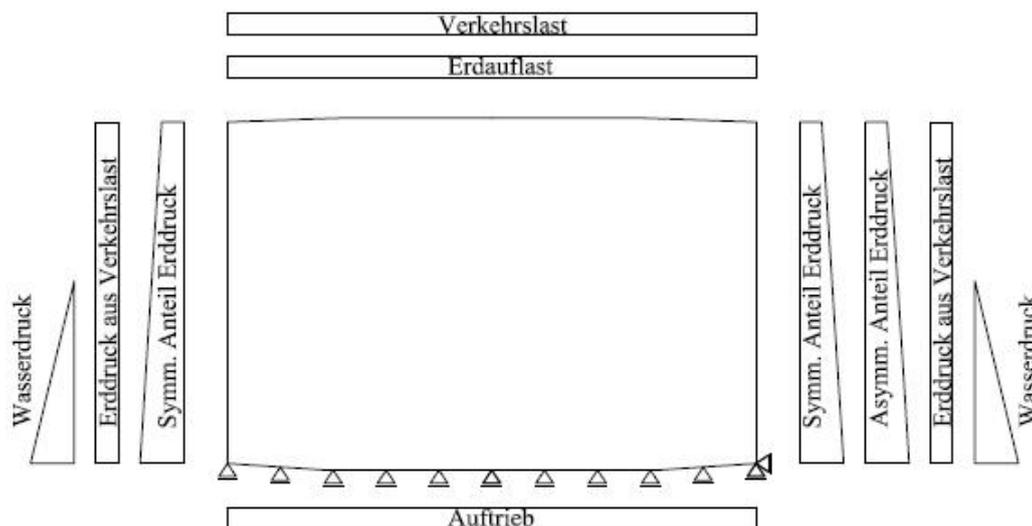


Abbildung 2.4: Statisches System und Belastung für den Rechteckquerschnitt

Wie in Abbildung 2.4 ersichtlich, wurde die Bodenplatte des Tunnelquerschnitts vertikal unverschieblich gelagert. Damit der Querschnitt auch horizontal in seiner Lage blieb, wurde in der rechten unteren Ecke ein horizontal unverschiebliches Auflager eingefügt. Die angesetzte mechanische Belastung entspricht einer Überdeckung von circa 1,5 m und ist in Tabelle 2.2 aufgelistet.

	Belastung	Faktor $\psi_{2,i}$	vertikale Belastung [kN/m ²]	Horizontale Belastung [kN/m ²]	
				oben	unten
Oben	Erdauflast	1,0	36,8	-	-
	Verkehrslast	0,5	22,0	-	-
Unten	Auftrieb	1,0	42,0	-	-
Links	Symm. Anteil Erddruck	1,0	-	8,56	65,18
	Wasserdruck	1,0	-	0,00	42,00
	Erddruck aus Verkehrsl.	0,5	-	9,12	9,12
Rechts	Symm. Anteil Erddruck	1,0	-	10,50	79,98
	Asymm. Anteil Erddruck	1,0	-	2,10	16,00
	Wasserdruck	1,0	-	0,00	42,00
	Erddruck aus Verkehrsl.	0,5	-	11,00	11,00

Tabelle 2.2: mechanische Belastung für den Rechteckquerschnitt

2.4.2 Gewölbequerschnitt

Der zweite untersuchte Querschnittstyp weist einen zweigleisigen Gewölbequerschnitt mit den Abmessungen gemäß Abbildung 2.5 auf. Für Beton beziehungsweise Bewehrung wurde wiederum C25/30/BS1A beziehungsweise BSt 550/M verwendet. Das Gewölbe sowie die

Wände wiesen eine Dicke von 60 cm auf, die Bodenplatte war von 60 cm Regeldicke auf 73 cm im Randbereich gevoutet. Die Bewehrung für den Gewölbequerschnitt wurde unter den gleichen Voraussetzungen wie für den Rechteckquerschnitt ermittelt. Tabelle 2.3 zeigt die Bewehrungsführung in Umfangsrichtung (erste Lage). In Tunnellängsrichtung betrug die erforderliche Mindestbewehrung $7,80 \text{ cm}^2/\text{m}$. Die Betondeckung betrug in den Wänden und im Gewölbe innen und außen jeweils 6 cm. In der Bodenplatte betrug die Betondeckung innen und außen jeweils 4 cm.

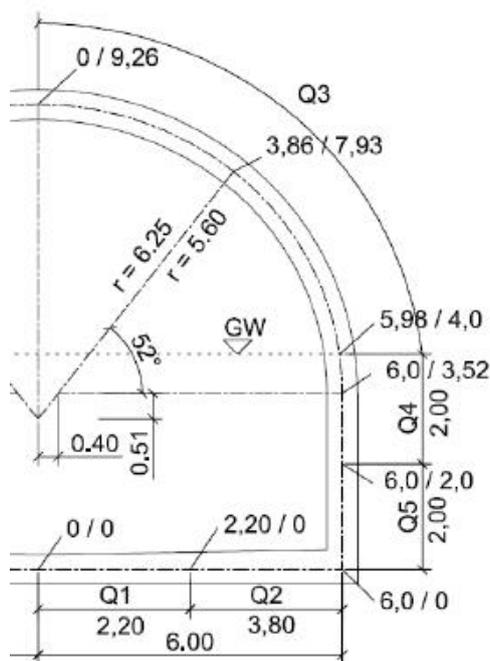


Abbildung 2.5: Querschnittsabmessungen für den Gewölbequerschnitt (rechte Hälfte des Querschnitts dargestellt)

Querschnitt Q	Dicke [cm]	Bewehrungsgehalt innen [cm^2/m]	Bewehrungsgehalt außen [cm^2/m]
1	60	24	10
2	70	24	42
3	60	20	17
4	60	13	17
5	60	13	42

Tabelle 2.3: Querschnittseinteilung und Bewehrungsgehalte für den Gewölbequerschnitt

In Abbildung 2.6 sind das statische System und die Belastung des Gewölbequerschnitts dargestellt. Die Bodenplatte des Querschnitts wurde wiederum vertikal unverschieblich und die rechte Ecke zusätzlich horizontal unverschieblich gelagert. Die angesetzte mechanische Belastung, die wiederum einer Überschüttung von circa 1,5 m entspricht, wird in Tabelle 2.4 dargestellt.

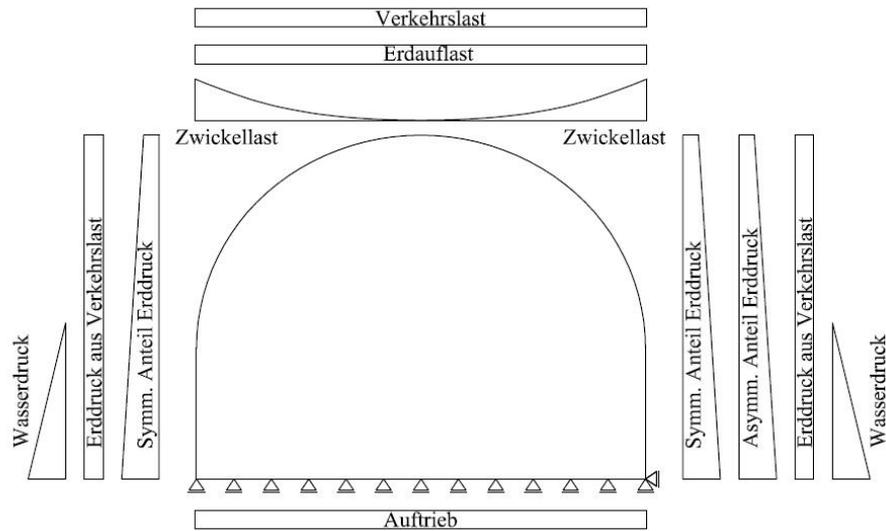


Abbildung 2.6: Statisches System und Belastung für den Gewölbequerschnitt

	Belastung	Faktor $\psi_{2,i}$	vertikale Belastung [kN/m ²]	Horizontale Belastung [kN/m ²]	
				oben	unten
Oben	Erdauflast	1,0	36,8	-	-
	Zwickellast	0,5	120,0	-	-
	Verkehrslast	0,5	22,0	-	-
Unten	Auftrieb	1,0	42,0	-	-
Links	Symm. Anteil Erddruck	1,0	-	8,56	65,18
	Wasserdruck	1,0	-	0,00	42,00
	Erddruck aus Verkehrsl.	0,5	-	9,12	9,12
Rechts	Symm. Anteil Erddruck	1,0	-	10,5	79,98
	Asymm. Anteil Erddruck	1,0	-	2,10	16,00
	Wasserdruck	1,0	-	0,00	42,00
	Erddruck aus Verkehrsl.	0,5	-	11,00	11,00

Tabelle 2.4: mechanische Belastung für den Gewölbequerschnitt

2.4.3 Kreisquerschnitt

Der dritte Querschnittstyp weist einen eingleisigen Kreisquerschnitt auf. Auch hier wurde für Beton C25/30/BS1A verwendet und für den Bewehrungsstahl BSt 550/M. Der Kreisquerschnitt wies eine konstante Dicke von 40 cm auf. Die Bewehrung der ersten Lage in Umfangsrichtung betrug $28,49 \text{ cm}^2/\text{m}$, in Tunnellängsrichtung wurde die Mindestbewehrung von $4,55 \text{ cm}^2/\text{m}$ angesetzt. Gemessen an der Querschnittsachse der Tunnelschale weist der Tunnel einen Durchmesser von 8,50 m auf (siehe Abbildung 2.7). Im Bereich der Sohle beträgt die Dicke einer zusätzlichen Bodenplatte maximal 120 cm (siehe Abbildung 2.7). In den drei folgenden Abschnitten wird auf die drei untersuchten statischen Systeme und deren Belastung näher eingegangen.

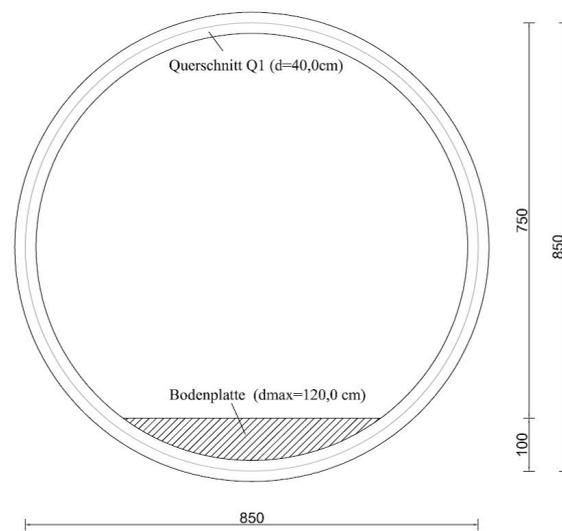


Abbildung 2.7: Querschnittsabmessungen Kreisquerschnitt

1. Kreisquerschnitt Fall 1:

Im ersten Fall wurde der Tunnelquerschnitt als Kreisbogen simuliert, wobei im Auflagerbereich eine Einspannung angesetzt wurde. Der Auflagerbereich wurde auf Höhe der Oberkante der Bodenplatte angenommen. Abbildung 2.8 stellt das statische System und die Belastung dar. Die mechanische Belastung entspricht wiederum einer Überdeckung von circa 1,5 m und wird in Tabelle 2.5 gezeigt.

2. Kreisquerschnitt Fall 2

Im Unterschied zum ersten Fall wurde im zweiten Fall die Querschnittskontur als gebettet simuliert. Der Bettungsmodul wurde mit $55 \text{ MN}/\text{m}^3$ angesetzt. Wie schon in Kapitel 2.2 erwähnt, wurden für die Bettung sogenannte GAP-Elements [7] angesetzt, welche nur auf Druck wirken und bei Zug ausfallen. Zusätzlich zur Bettung wurde der Querschnitt im Auflagerbereich horizontal unverschieblich gelagert (siehe Abbildung 2.9). Die mechanische Belastung entspricht jener von Fall 1 (siehe Tabelle 2.5).

3. Kreisquerschnitt Fall 3

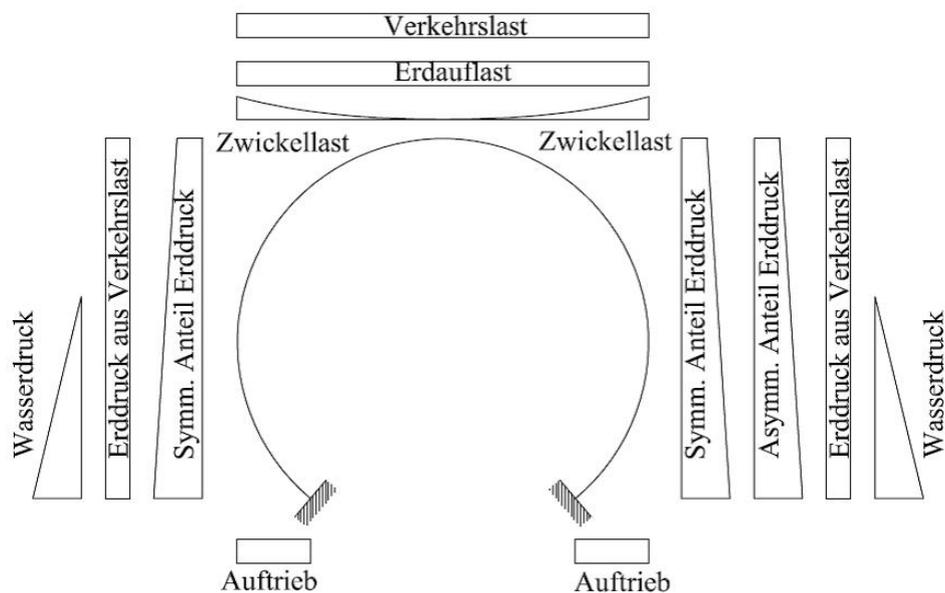


Abbildung 2.8: Statisches System und Belastung für den Kreisquerschnitt Fall 1

	Belastung	Faktor $\psi_{2,i}$	vertikale Belastung [kN/m ²]	Horizontale Belastung [kN/m ²]	
				oben	unten
Oben	Erdauflast	1,0	36,8	-	-
	Zwickellast	0,5	90,0	-	-
	Verkehrslast	0,5	22,0	-	-
Unten	Auftrieb	1,0	32,0	-	-
Links	Symm. Anteil Erddruck	1,0	-	8,56	65,18
	Wasserdruck	1,0	-	0,00	32,00
	Erddruck aus Verkehrsl.	0,5	-	9,12	9,12
Rechts	Symm. Anteil Erddruck	1,0	-	10,5	79,98
	Asymm. Anteil Erddruck	1,0	-	2,10	16,00
	Wasserdruck	1,0	-	0,00	32,00
	Erddruck aus Verkehrsl.	0,5	-	11,00	11,00

Tabelle 2.5: mechanische Belastung für den Kreisquerschnitt Fall 1

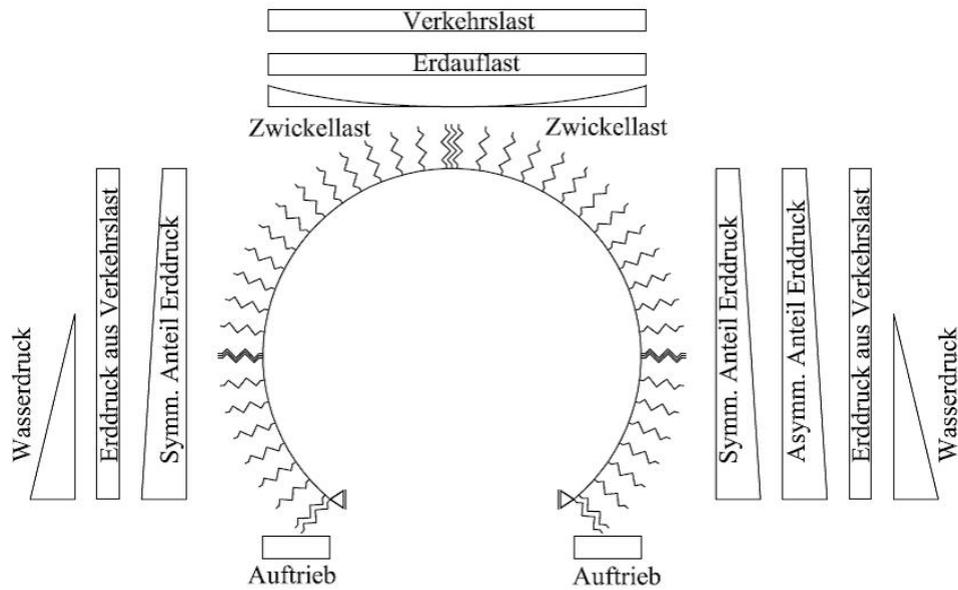


Abbildung 2.9: Statisches System und Belastung für den Kreisquerschnitt Fall 2

Im dritten Fall wurde der gesamte Kreisquerschnitt in der Simulation berücksichtigt und als gebettet angesetzt (Bettung: 55 MN/m^3). Um eine Rotation des Querschnitts um die eigene Achse zu verhindern, welche durch die asymmetrische Belastung hervorgerufen wurde, wurde zusätzlich eine horizontal auf Druck und Zug wirkende Feder (mit sehr kleiner Federsteifigkeit von $c = 10,0 \text{ kN/m}$) am Fußpunkt des Querschnitts angesetzt. In Abbildung 2.10 werden das statische System und die Belastung dargestellt.

Die mechanische Belastung wird in Tabelle 2.6 gezeigt. Der Auftrieb wurde vereinfachend als konstant über die Querschnittsbreite angesetzt.

	Belastung	Faktor $\psi_{2,i}$	vertikale Belastung [kN/m ²]	Horizontale Belastung [kN/m ²]	
				oben	unten
Oben	Erdauflast	1,0	36,8	-	-
	Zwickellast	0,5	90,0	-	-
	Verkehrslast	0,5	22,0	-	-
Unten	Auftrieb	1,0	32,0	-	-
Links	Symm. Anteil Erddruck	1,0	-	8,56	65,18
	Wasserdruck	1,0	-	0,00	42,00
	Erddruck aus Verkehrsl.	0,5	-	9,12	9,12
Rechts	Symm. Anteil Erddruck	1,0	-	10,5	79,98
	Asymm. Anteil Erddruck	1,0	-	2,10	16,00
	Wasserdruck	1,0	-	0,00	42,00
	Erddruck aus Verkehrsl.	0,5	-	11,00	11,00

Tabelle 2.6: mechanische Belastung für den Kreisquerschnitt Fall 3

Zusätzlich zur bewehrten Tunnelschale wurde für diesen Fall auch eine unbewehrte Tunnelinnenschale der geschlossenen Bauweise simuliert. Bei dieser Variante wurden

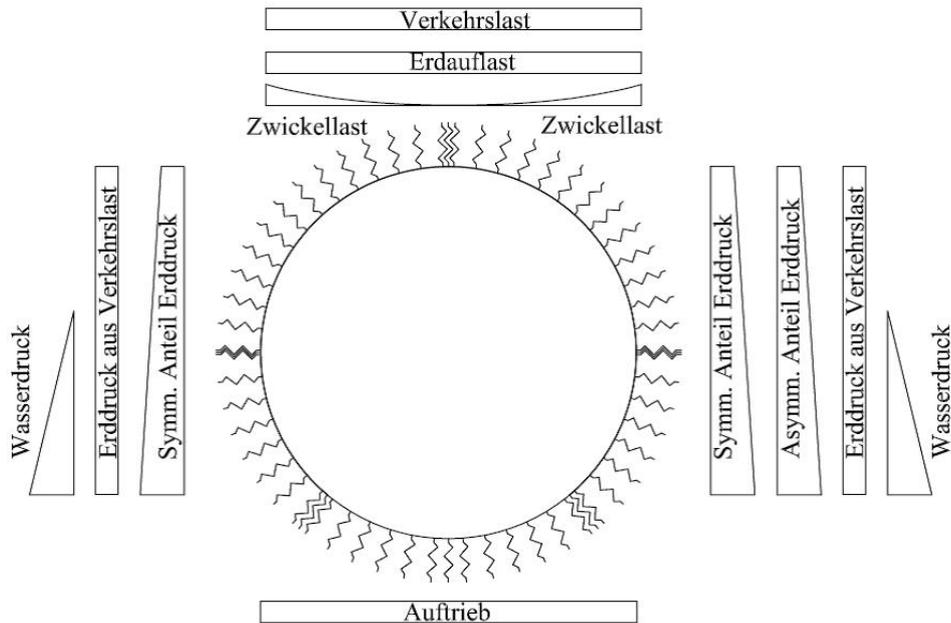


Abbildung 2.10: Statisches System und Belastung für den Kreisquerschnitt Fall 3

ausschließlich Eigengewicht und Wasserdruck berücksichtigt. Der horizontal wirkende Wasserdruck und der Auftrieb sind Tabelle 2.6 zu entnehmen.

2.5 Outputparameter für den Vergleich

Um die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen vergleichen zu können, wurden die folgenden Parameter ermittelt:

- Normalkraft N [kN]
- Biegemoment M [kNm]
- Verschiebungen u [mm]

Für den Vergleich wurden die jeweiligen Schnittgrößen und Verschiebungen für festgelegte Querschnittspunkte zum Zeitpunkt $t = 0$ min vor dem Aufbringen der Brandbelastung und während der Brandbelastung zu den Zeitpunkten $t = 20$ min, $t = 60$ min, $t = 120$ min und $t = 180$ min herangezogen:

- Rechteckquerschnitt: linke obere Rahmenecke und Feldmitte in der Decke, rechte unter Rahmenecke (Fußpunkt)
- Gewölbe- und Kreisquerschnitt: Scheitelpunkt, First, rechte untere Rahmenecke (Gewölbequerschnitt), rechter und linker Fußpunkt (offener Kreisquerschnitt) und unterer Fußpunkt (geschlossener Kreisquerschnitt)

Modellannahmen

3.1 Allgemeines

Bei einem Brand dringt die Wärmeenergie über die Betonoberfläche in das Bauteil ein. Dies führt zu Zwängen beziehungsweise Eigenspannungen in der Struktur. Zusätzlich werden auch die Druckfestigkeit und der E-Modul reduziert, wodurch sich die Nachgiebigkeit bzw. die Verformungen stark vergrößern. Wie bereits erwähnt, wurden im Rahmen der Simulation unterschiedliche Modellannahmen zur Berücksichtigung dieser Prozesse getroffen.

3.2 Thermische Analyse

Auf Basis der in Abschnitt 2.3 gezeigten Brandkurve wurden unter Ansatz der thermischen Parameter in Tabelle 3.1 die entsprechenden Temperatureindringkurven ermittelt.

Parameter [Einheit]	Wert	Anmerkung
Thermische Parameter Beton (bei Raumtemperatur):		
Wärmeleitfähigkeit λ_0 [W/mK]	1,33	gem. EN 1992-1-2 [1]
Dichte ρ_0 [kg/m ³]	2350,00	gem. EN 1992-1-2 [1]
Wärmekapazität c_0 [J/kgK]	900,00	gem. EN 1992-1-2 [1]
Wärmeübergangparameter:		
Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient α_c [W/ ² K]	25,00	gem. EN 1991-1-2 [6]
Emmissivität von Beton ε [1]	0,70	gem. EN 1992-1-2 [1]

Tabelle 3.1: thermische Parameter zur Simulation der Temperatureindringung in den Querschnitt (temperaturabhängiger Verlauf gem. angegebener Norm)

3.3 Materialmodelle

3.3.1 Lineare Simulation (linear-elastisches Materialverhalten mit äquivalenter Temperatur)

In der linearen Simulation wurde linear-elastisches Materialverhalten mit der sogenannten äquivalenten Temperatur (d.h. lineare Verteilung der Temperatur über den Querschnitt) angesetzt. Hierbei wurden die Temperatureindringkurven wie in der Folge beschrieben umgerechnet (siehe Abbildung 3.1).

Die thermische Dehnung der i -ten Schicht $\varepsilon_i^{th}(T_i)$ im Element wurde mit

$$\varepsilon_i^{th}(T_i) = \alpha_B(T_i - T_0) \quad (3.1)$$

berechnet. Hierbei ist $\alpha_B = 10^{-5} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ der Wärmeausdehnungskoeffizient für Beton, T_i ist die Temperatur in der i -ten Schicht und T_0 stellt die Raumtemperatur dar. Genauso wie die Dehnungen wurden auch die entsprechenden Spannungen für jede Schicht ermittelt:

$$\sigma_i(T_i) = E_{ci}(T_i)\varepsilon_i^{th}(T_i) \leq f_c(T_i). \quad (3.2)$$

In Gleichung 3.2, E_{ci} ist der temperaturabhängige E-Modul der i -ten Schicht und $f_c(T_i)$ ist die temperaturabhängige Festigkeit für Beton der i -ten Schicht. Bei Ansatz linear-elastischen Materialverhaltens sind die Spannungen im Beton und in der Bewehrung nicht begrenzt, weder im Druck- noch im Zugbereich (siehe Abbildung 3.2).

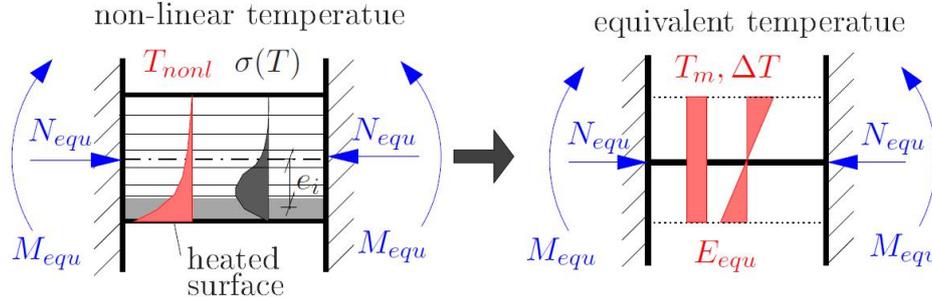


Abbildung 3.1: Berechnungsprinzip der äquivalenten Temperatur [9]

Die Ermittlung der Schnittgrößen N_{equ} und M_{equ} erfolgte über die Querschnittsflächen A_i der einzelnen Schichten und den Hebelsarm e_i zwischen der Schwerachse der jeweiligen Schichtachse und jener des gesamten Querschnitts. Somit ergab sich die Normalkraft N_{equ} [kN] zu

$$N_{equ} = \sum_{i=1}^n \sigma_i(T_i) A_i \quad (3.3)$$

und das Biegemoment M_{equ} [kNm] zu

$$M_{equ} = \sum_{i=1}^n \sigma_i(T_i) A_i e_i. \quad (3.4)$$

Der konstante Anteil der äquivalenten Temperatur ergab sich unter Berücksichtigung der Querschnittsfläche A [m²] des gesamten Elements, des Wärmeausdehnungskoeffizienten α_B [K⁻¹], des äquivalenten E-Moduls E_{equ} [MPa] und der Normalkraft N_{equ} [kN] zu

$$T_m = \frac{N_{equ}}{E_{equ}\alpha A}. \quad (3.5)$$

Genauso ließ sich der lineare Anteil der äquivalenten Temperatur ΔT über das Moment M_{equ} [kNm] und die Biegesteifigkeit $E_{equ}I$ [kNm²] ermitteln, wobei I [m⁴] das Flächenträgheitsmoment 2. Ordnung ist:

$$\Delta T = \frac{M_{equ}}{E_{equ}\alpha I}. \quad (3.6)$$

Der erwähnte äquivalente E-Modul E_{equ} [MPa] ergab sich in Abhängigkeit des für jede Schicht erhaltenen E-Moduls E_{ci} [MPa] zu

$$E_{equ} = \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci}(T_i)A_i}{A}. \quad (3.7)$$

Für die Simulation nach EC 2-1-2 [1] wurde die Druckfestigkeit des Betons gemäß ÖNORM EN 1992-1-2 [1] mit $f_{c0} = 25,0$ MPa und der E-Modul mit $E_{c0} = 15,0$ GPa bei Raumtemperatur festgelegt. Für die Simulation nach CEB [2] wurde der E-Modul mit $E_{c0} = 31,0$ GPa angesetzt. Zusätzlich wurden für Beton und Bewehrungsstahl konstante Wärmeausdehnungskoeffizienten verwendet ($\alpha_B = 1,0 \cdot 10^{-5}$ [K⁻¹], $\alpha_S = 1,2 \cdot 10^{-5}$ [K⁻¹]). Die ermittelten äquivalenten Temperaturen für jeden Zeitschritt und jeden Querschnittstyp wurden in das Simulationsmodell eingespielt. In der Simulation wurden dann die Spannungs-Dehnungsbeziehungen nach Abbildung 3.2 ohne Begrenzung mit der Festigkeit verwendet.

3.3.2 Zwischenschritt (nichtlineares, elasto-plastisches Materialverhalten mit äquivalenter Temperatur)

Im Zwischenschritt wurde nichtlineares, elasto-plastisches Materialverhalten berücksichtigt (siehe Abbildung 3.2). Für die Simulation der thermischen Belastung wurde jedoch wie bei der linearen Simulation die äquivalente Temperatur verwendet. Bei dieser Variante wurden die Spannungen im Beton und im Bewehrungsstahl gemäß ÖNORM EN 1992-1-2 [1] und CEB [2] mit der temperaturabhängigen Festigkeit begrenzt. Die Druckfestigkeit f_{c0} und der E-Modul E_{c0} wurden mit $f_{c0} = 25,0$ MPa und $E_{c0} = 15,0$ GPa bei Raumtemperatur festgelegt. Die Zugfestigkeit f_{t0} wurde mit $f_{t0} = 0,0$ MPa berücksichtigt. Für den Bewehrungsstahl wurde eine Fließspannung von $f_{y0} = 500,0$ MPa bei Raumtemperatur angesetzt. In Abbildung 3.2 sind die Spannungs-Dehnungsbeziehungen für elasto-plastisches Materialverhalten in Abhängigkeit der Temperatur für Beton im Druck- und im Zugbereich dargestellt.

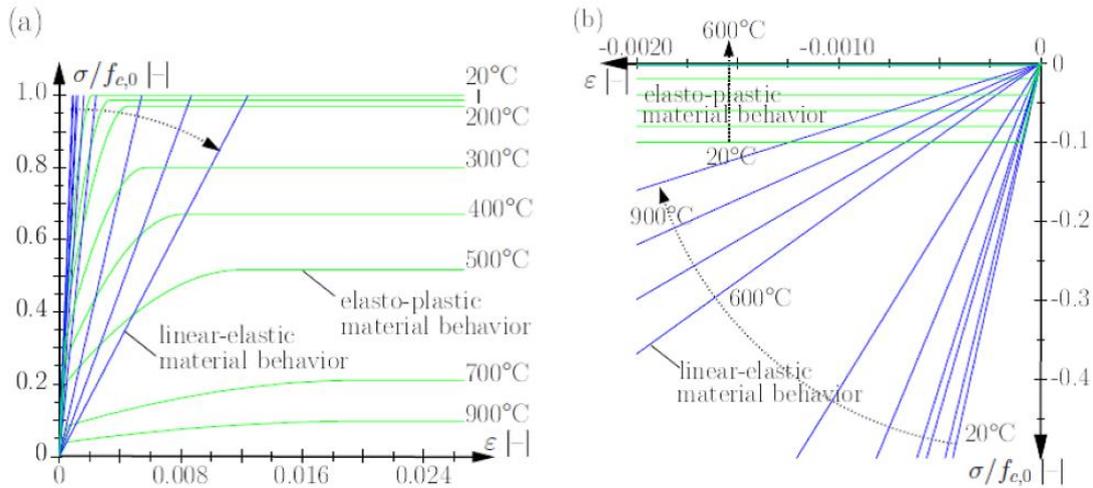


Abbildung 3.2: Materialverhalten von Beton: Spannungs- Dehnungsbeziehungen a) im Druckbereich und b) im Zugbereich (blau: linear-elastisch, grün: elasto-plastisch) [10]

Bei der Berücksichtigung von nichtlinearem, elasto-plastischem Materialverhalten werden wie schon erwähnt die Spannungen begrenzt. Dadurch wird auch die Steifigkeitsmatrix K abgemindert. Dies erfolgt über das Newton- Raphson Verfahren und über das 2D-Plastizitätsmodell für Beton [8] (Drucker-Prager-Kriterium im Druck und Rankine-Kriterium im Zugbereich, siehe Abbildung 3.3).

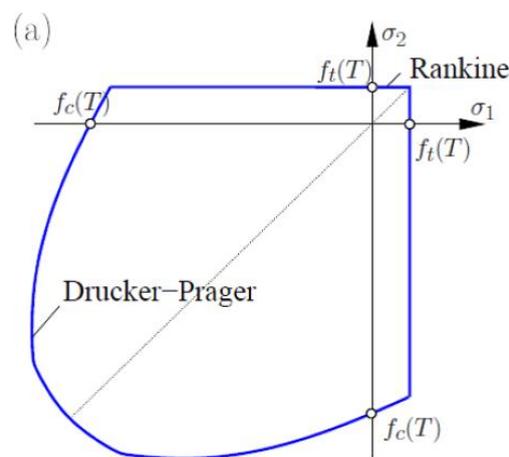


Abbildung 3.3: Materialverhalten von Beton: 2D-Plastizitätsmodell [8]

3.3.3 Nichtlineare Simulation (nichtlineares, elasto-plastisches Materialverhalten mit nichtlinearer Temperaturverteilung)

Bei der nichtlinearen Simulation wird wie schon im Zwischenschritt elasto-plastisches Materialverhalten (siehe Abbildung 3.2) berücksichtigt. Zusätzlich wird jedoch anstatt der äquivalenten Temperatur die nichtlineare Temperaturverteilung, die direkt aus der thermischen

Analyse entnommen wird, angesetzt (siehe Abschnitt 3.2). Die Materialparameter (Festigkeit und E-Modul) bei Raumtemperatur wurden wie in den vorigen Abschnitten erwähnt angesetzt. Abbildung 3.4 zeigt den Abfall der temperaturabhängigen Festigkeiten mit der Temperatur nach EC 2-1-2 [1] und CEB [2].

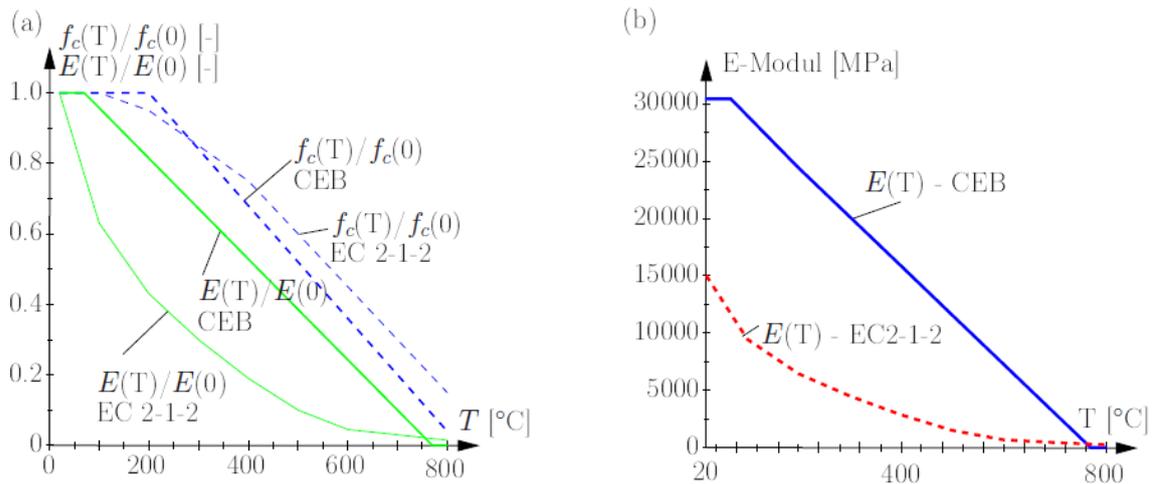


Abbildung 3.4: Temperaturabhängigkeit der Materialparameter nach EC 2-1-2 [1] und CEB [2]

Ergebnisse

4.1 Rechteckquerschnitt

4.1.1 Lineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB

Abbildung 4.1 stellt den Spannungsverlauf in der Decke in Feldmitte dar. Der lineare Verlauf der Spannungen folgt aus dem Ansatz des linear-elastischen Materialverhaltens und der äquivalenten Temperatur. Die Spannungsspitzen stellen die Zug- bzw. Druckspannungen im Bewehrungsstahl dar. Unmittelbar vor dem Zeitpunkt $t = 120$ min kommt es zu einem Umschlagen der Spannung. Aufgrund der thermisch bedingten Ausdehnung des Materials an der Oberfläche der Tunnelschale werden Druckspannungen im Querschnitt erzeugt. Dies führt zum Umschlagen der Zugspannungen in Druckspannungen und zur Vorzeichenänderung des Biegemomentes. Da die Spannungen in der linearen Simulation nicht begrenzt werden, kommt es zu einer kontinuierlichen Erhöhung der Spannungen mit der Zeit und zur Überschreitung der tatsächlichen Festigkeit. Es ist auch zu erkennen, dass die Zugfestigkeit zum Zeitpunkt $t = 0$ min an der Oberfläche überschritten wird und es in der Realität in Feldmitte vor Brandbeginn zur Rissbildung kommt.

In Abbildung 4.2 wird der Momentenverlauf zu unterschiedlichen Zeitpunkten dargestellt. Durch die asymmetrische mechanische Belastung tritt zum Zeitpunkt $t = 0$ min das maximale Biegemoment mit $M_{t=0} = -746$ kNm in der linken oberen Rahmenecke (Punkt 1) auf. Durch die thermische Belastung und die dadurch hervorgerufenen Zwänge steigt das negative Biegemoment hier deutlich an. Zum Zeitpunkt $t = 180$ min beträgt das Biegemoment bei der Berechnung nach EC 2-1-2 [1] $M_{t=180} = -1446$ kNm. Unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Materialparameter nach CEB [2] wächst das Biegemoment nach 180 Minuten sogar auf $M_{t=180} = -1950$ kNm an (siehe Tabelle 4.1). Dies ist auf die geringere Abminderung des E-Moduls nach CEB [2] zurückzuführen. In der Decke des Rechteckquerschnitts kommt es wie erwähnt zu einer Änderung des Vorzeichens des Biegemomentes. Generell führt die thermische Belastung zu einer Erhöhung der negativen Momente und einer Verringerung der positiven Momente. Auch in den Seitenwänden werden anfangs durch

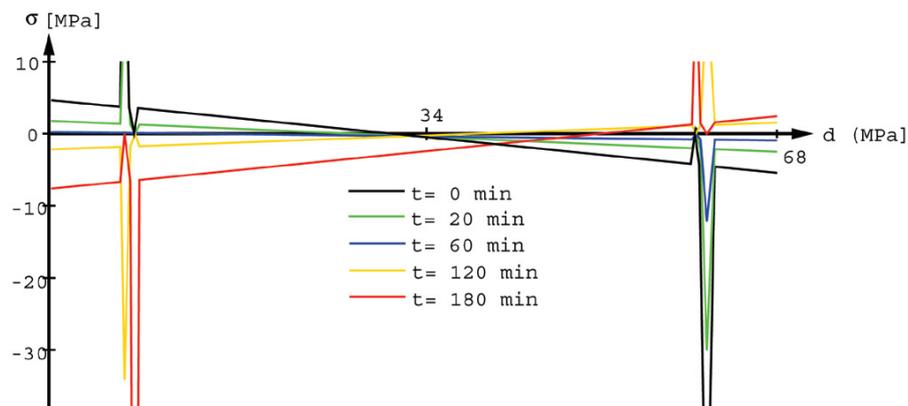


Abbildung 4.1: Spannungsverteilung für den Rechteckquerschnitt über die Querschnittsdicke an der Decke in Feldmitte nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

die mechanische Belastung im unteren Bereich teilweise positive Momente hervorgerufen. Mit fortschreitender Brandbelastung wechseln jedoch auch hier die Biegemomente in den negativen Bereich. An den Fußpunkten ist deutlich zu erkennen, dass diese nicht unmittelbar unter Temperatureinwirkung stehen. Hier zeigt sich, dass die Biegemomente nur in geringem Ausmaß ansteigen. Dies ist unabhängig vom angesetzten Materialmodell (EC 2-1-2 [1] oder CEB [2]). Nach CEB [2] sind die Biegemomente im Allgemeinen etwas höher als bei der Berücksichtigung der Materialeigenschaften nach EC 2-1-2 [1] (siehe Tabelle 4.1).

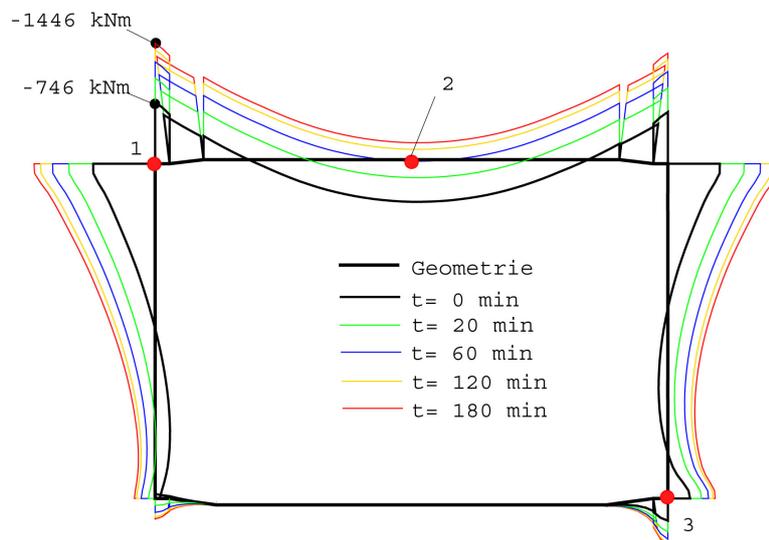


Abbildung 4.2: Momentenverlauf für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

Im Normalkraftverlauf (siehe Abbildung 4.3) zeigt sich, dass die Temperatureinwirkung nur einen sehr geringen Einfluss auf die Normalkraft hat. Da sich die mechanische Belastung

nicht verändert, bleiben die Normalkräfte in etwa gleich. Die Bodenplatte erfährt eine geringe Abnahme der Normalkraft mit fortschreitender Branddauer. In diesem Bereich reduziert sich bei der Simulation nach EC 2-1-2 [1] die Normalkraft von $N_{t=0} = -184 \text{ kN}$ auf $N_{t=180} = -160 \text{ kN}$ (Punkt 4). Dies basiert auf der Tatsache, dass die Bodenplatte keine thermische Belastung erfährt. In der Decke (Punkt 3) tritt genau der gegenteilige Effekt auf. Die Normalkraft steigt in diesem Bereich von $N_{t=0} = -241 \text{ kN}$ auf $N_{t=180} = -291 \text{ kN}$ an. Daraus lässt sich erkennen, dass die Dehnungen des Materials in der Decke durch die thermisch unbelastete Bodenplatte zurückgehalten werden. Unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Parameter nach CEB [2] stellt sich ein noch stärkerer Anstieg der Normalkraft ein, die Normalkraft wächst zum Zeitpunkt $t = 180 \text{ min}$ auf $N_{t=180} = -323 \text{ kN}$ an (siehe Tabelle 4.1). Dies ist wieder auf den höheren E-Modul zurückzuführen, wodurch sich die thermischen Zwangsspannungen stärker aufbauen können. In den Wänden lassen sich in den unterschiedlichen Zeitpunkten der thermischen Belastung kaum Unterschiede erkennen. Die größte Normalkraft tritt in der Wand am rechten Fußpunkt auf und beträgt zu jedem Zeitpunkt $N_{t=0} = -535 \text{ kN}$ (siehe Abbildung 4.3 und Tabelle 4.1).

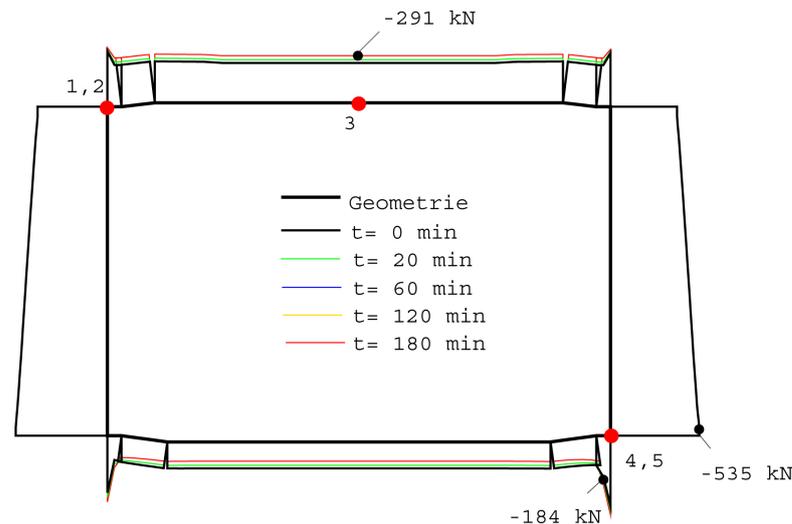


Abbildung 4.3: Normalkraftverlauf für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] der linearen Simulation

In Abbildung 4.4 werden die Verschiebungen des Querschnitts zu den entsprechenden Zeitpunkten dargestellt. Wie erwartet treten in Feldmitte der Decke (Punkt 2) aufgrund der mechanischen Beanspruchung und der Spannweite mit $L = 12,0 \text{ m}$ die größten vertikalen Verschiebungen auf. Zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ tritt bei der Berechnung nach EC 2-1-2 [1] eine vertikale Verschiebung von $v_{t=0} = -11,1 \text{ mm}$ auf. Da die Spannungen, wie schon erwähnt, bei der linearen Simulation nicht mit den Festigkeiten begrenzt werden, kommt es durch die thermischen Zwangsspannungen zu einem Anheben der Decke. Mit zunehmender Branddauer nehmen die Verschiebungen in Feldmitte weiter auf $v_{t=0} = -1,9 \text{ mm}$ ab und im Gegensatz dazu steigen die horizontalen Verschiebungen in der linken oberen Ecke (Punkt 2) an. Dieser Anstieg kommt durch die thermische Ausdehnung der Decke zustande. Da die Belastung des Querschnitts asymmetrisch ist, verlagert sich die Verschiebung auf die geringer belastete Seite. Im Allgemeinen treten bei der linearen Simulation

mit äquivalenter Temperatur sehr geringe Verformungen auf. Die gesammelten Ergebnisse für die lineare Simulation mit äquivalenter Temperatur werden in Tabelle 4.1 dargestellt.

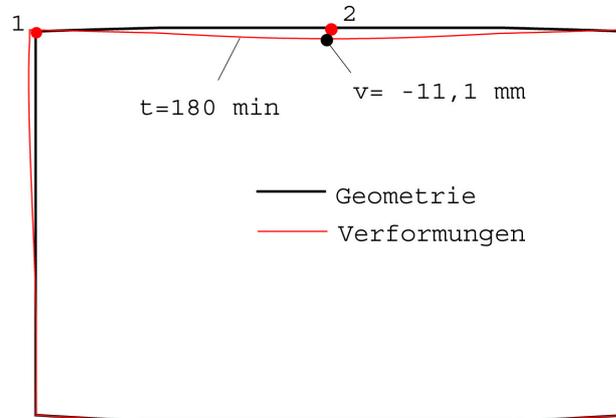


Abbildung 4.4: Verformungen für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] der linearen Simulation

	$t = 0 \text{ min}$	$t = 20 \text{ min}$		$t = 60 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$		$t = 180 \text{ min}$	
Biegemoment [kNm]:		EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Linke obere Ecke	-749	-1035	-1265	-1228	-1601	-1368	-1833	-1446	-1950
Decke Feldmitte	501	213	-18	187	-357	-122	-590	-201	-709
Rechter Fußpunkt	-267	-404	-535	-490	-694	-545	-789	-569	-826
Normalkraft [kN]:		EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Linke Ecke (Decke)	-253	-271	-284	-285	-307	-296	-324	-303	-334
Linke Wand oben	-417	-417	-417	-417	-417	-417	-417	-417	-417
Decke-Feldmitte	-241	-260	-272	-273	-295	-284	-312	-291	-323
Rechts unten Bodenpl.	-184	-177	-176	-171	-167	-165	-159	-160	-152
Fußpunkt rechts	-535	-535	-535	-535	-535	-535	-535	-535	-535
Verschiebungen [mm]:		EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Linke obere Ecke vert.	-0,3	0,0	0,2	0,5	0,7	0,8	1,1	1,2	1,5
Linke obere Ecke horiz.	-3,8	-4,3	-2,0	-4,7	-2,4	-5,2	-2,8	-5,6	-3,1
Decke-Feldmitte vert.	-11,1	-10,4	-5,1	-9,9	-4,3	-9,4	-3,6	-1,9	-3,1
Decke-Feldmitte horiz.	-2,9	-3,1	-1,7	-3,3	-1,8	-3,5	-1,9	-3,6	-2,0

Tabelle 4.1: Ergebnisse der linearen Simulation für den Rechteckquerschnitt

4.1.2 Zwischenschritt nach EC 2-1-2 und CEB

Im Zwischenschritt lässt sich in den Spannungsverläufen erkennen, dass hier die Betonspannungen nicht mehr linear verlaufen (siehe Abbildung 4.5). Durch die Berücksichtigung des plastischen Materialverhaltens weisen die Spannungen Knicke auf. Es zeigt sich deutlich, dass das Moment zu keinem Zeitpunkt negativ werden kann, da es nicht zum Umschlagen der Spannungen kommt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ ist an der Innenseite zu erkennen, dass sich keine Zugspannungen aufbauen, da diese begrenzt sind mit $f_t = 0$ MPa und an der Außenseite bauen sich Druckspannungen auf, wie im typischen Fall bei positivem Moment. Durch die thermische Einwirkung entstehen an der Innenseite der Tunnelschale Druckspannungen welche sich bis zu einer Tiefe von ca. 30 cm aufbauen. Hier entsteht der erste Knick im Spannungsverlauf. Der Zweite Knick wandert weiter nach außen, da sich an der Tunnelinnenseite die Druckspannungen durch die thermische Belastung erhöhen und an der Außenseite verringern. Durch die thermische Belastung werden außerdem die Zugspannungen im Bewehrungsstahl an der Deckeninnenseite und die Druckspannungen an der Deckenaußenseite verringert.

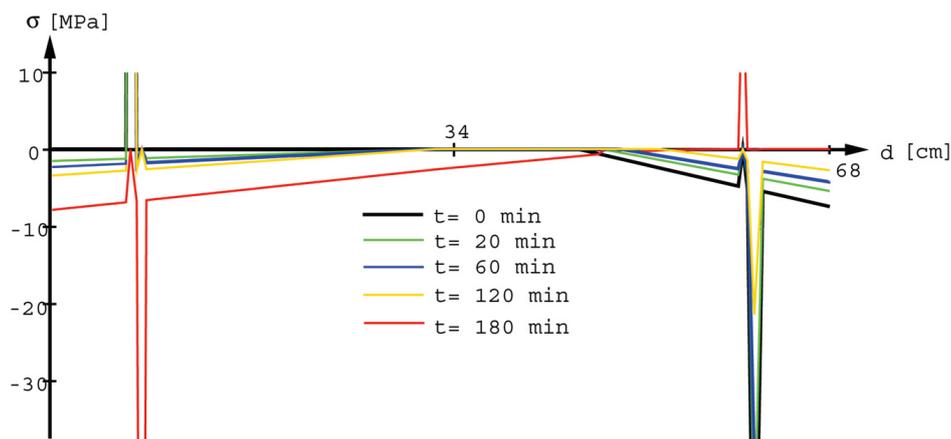


Abbildung 4.5: Spannungsverteilung für den Rechteckquerschnitt über die Querschnittsdi- cke an der Decke in Feldmitte nach EC 2-1-2 [1] im Zwischenschritt

Der Momentenverlauf in Abbildung 4.6 zeigt, dass sich die positiven Biegemomente im Feldbereich der Decke (Punkt 2) mit fortschreitender Brandbelastung stark verringern, es aber wie erwähnt zu keinem Vorzeichenwechsel kommt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ min ergibt sich ein Moment von $M_{t=0} = 478$ kNm. Zum Zeitpunkt $t = 180$ min beträgt das Biege- moment nur mehr $M_{t=180} = 84$ kNm unter Berücksichtigung des temperaturabhängigen Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1]. Da der E-Modul nach CEB [2] höher angesetzt wird, kann sich hier die Zwangsbeanspruchung stärker aufbauen und somit werden die positiven Momente stärker reduziert und die negativen Momente in den Rahmenecken stärker erhöht (siehe Tabelle 4.2). Der Zwischenschritt ergibt im Allgemeinen eine deutlich geringere Mo- mentenbeanspruchung als die lineare Simulation. Das betragsmäßig größte Moment tritt auch hier wieder in der linken oberen Ecke auf. Dies ist wieder auf die asymmetrische Be- lastung des Querschnitts zurückzuführen. Durch die Begrenzung der Spannungen mit den Festigkeiten steigen Biegemomente mit der Zeit in geringem Maße an.

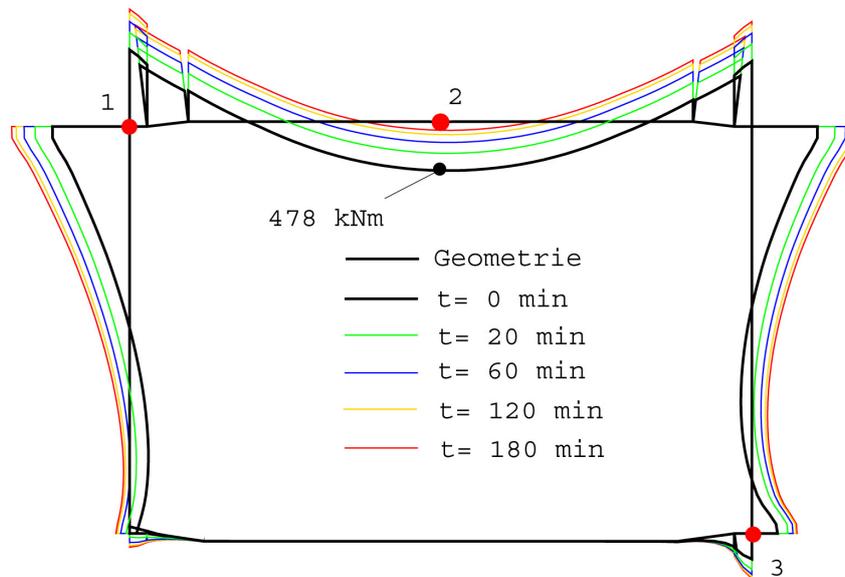


Abbildung 4.6: Momentenverlauf für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für den Zwischenschritt

Der Normalkraftverlauf zeigte kaum Unterschiede zu den unterschiedlichen Zeitpunkten (siehe Tabelle 4.2). Ein nennenswertes Ansteigen oder Abnehmen der Normalkraft war im Unterschied zur linearen Simulation weder in den Wänden noch in der Bodenplatte oder Decke zu erkennen. Einzig und allein die Randbereiche in der Bodenplatte ergaben geringfügige Unterschiede.

Wie auch schon in der linearen Simulation, kommt es in der Decke des Rechteckquerschnitts zur größten vertikalen Verschiebung (siehe Abbildung 4.8). Im Zwischenschritt sind jedoch die Verschiebungen deutlich größer (bis zu doppelt so groß). Dies ist auf die Begrenzung der Spannungen mit den zugehörigen Festigkeiten zurückzuführen. Durch die mechanische Beanspruchung tritt hier (Punkt 2) schon zum Zeitpunkt $t = 0$ min eine vertikale Verschiebung von $v_{t=0} = -22,9$ mm auf. Wie in Abbildung 4.8 und Tabelle 4.2 ersichtlich, wachsen die Verschiebungen bis zum Zeitpunkt $t = 120$ min auf $v_{t=0} = -25,6$ mm an und bleiben dann bis zum Zeitpunkt $t = 180$ min in etwa gleich. Die größte horizontale Verschiebung tritt an der linken oberen Ecke (Punkt 1) auf. Durch die Asymmetrie des Erddrucks auf die Seitenwände der Tunnelschale und durch den Steifigkeitsverlust in Abhängigkeit der Temperatur wächst hier die horizontale Verschiebung bis zu $t = 180$ min von $u_{t=0} = -7,8$ mm auf $u_{t=180} = -11,9$ mm an. Die hier beschriebenen Verschiebungen beziehen sich auf die Simulation nach EC 2-1-2 [1]. Die Ergebnisse der Simulation nach CEB [2] weichen nur geringfügig von den Ergebnissen nach EC 2-1-2 [1] ab. Im Allgemeinen sind die Verschiebungen geringer als bei der Simulation nach CEB [2]. Nur im Bereich der linken oberen Ecke sind die vertikalen Verschiebungen geringfügig höher (siehe Tabelle 4.2).

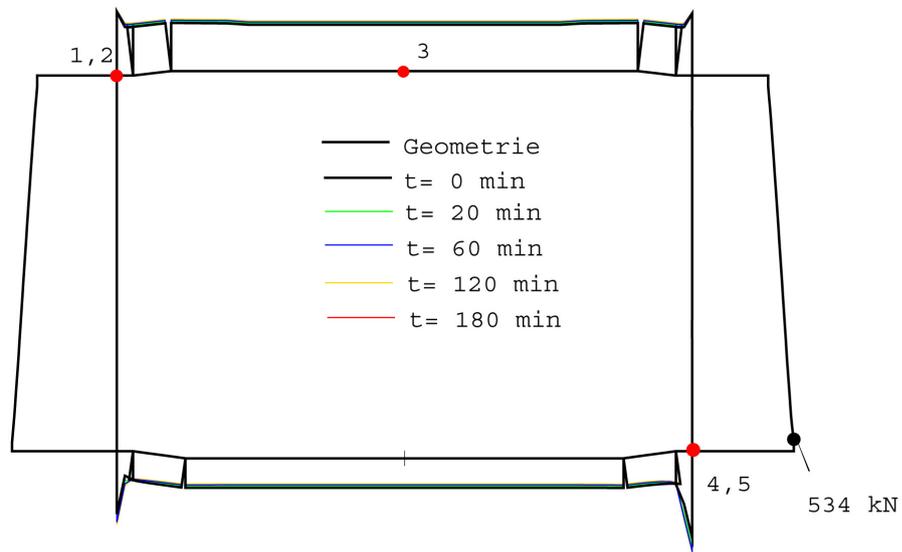


Abbildung 4.7: Normalkraftverlauf für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] im Zwischenschritt

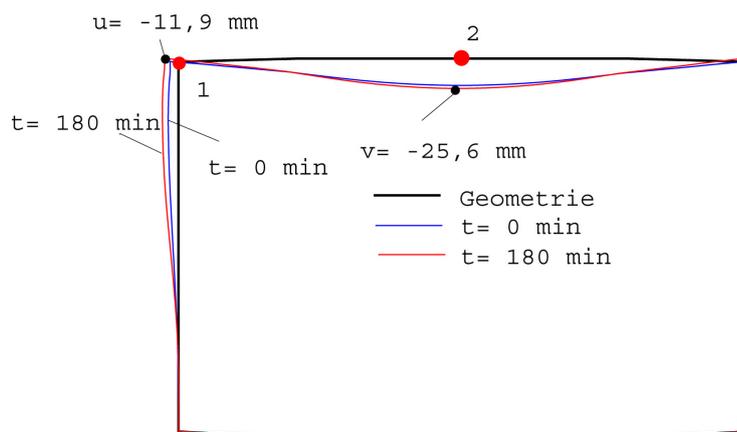


Abbildung 4.8: Verformungen für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] im Zwischenschritt

	$t = 0 \text{ min}$		$t = 20 \text{ min}$		$t = 60 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$		$t = 180 \text{ min}$	
	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Biegemoment [kNm]:										
Linke obere Ecke	-768	-768	-937	-977	-1044	-1095	-1121	-1171	-1165	-1210
Decke Feldmitte	478	475	309	267	203	153	127	79	84	41
Rechter Fußpunkt	-256	-254	-362	-406	-413	-459	-441	-484	-454	-495
Normalkraft [kN]:										
Linke Ecke (Decke)	-257	-258	-265	-265	-272	-272	-277	-278	-281	-281
Linke Wand oben	-416	-416	-416	-416	-417	417	417	-427	-417	-417
Decke-Feldmitte	-254	-246	-253	-253	-260	-260	-266	-266	-269	-269
Rechts unten Bodenpl.	-180	-180	-186	-194	-186	-195	-184	-192	-183	-191
Fußpunkt rechts	-534	-535	-535	-535	-535	-535	-534	-534	-534	-534
Verschiebungen [mm]:										
Linke obere Ecke vert.	0,3	0,6	1,1	1,6	1,8	2,4	2,5	3,1	3,0	3,6
Linke obere Ecke horiz.	-7,8	-6,0	-8,5	-8,0	-9,9	-9,5	-11,1	-10,6	-11,9	-11,4
Decke-Feldmitte vert.	-22,9	-18,9	-24,5	-21,1	-25,4	-22,1	-25,6	-22,2	-25,4	-22,1
Decke-Feldmitte horiz.	-5,8	-4,6	-6,8	-6,2	-7,6	-7,2	-8,4	-7,6	-8,8	-8,1

Tabelle 4.2: Ergebnisse für den Zwischenschritt bei der Simulation des Rechteckquerschnitts

4.1.3 Nichtlineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB

Abbildung 4.9 zeigt den Spannungsverlauf über die Dicke in der Decke in Feldmitte. Es ist zu erkennen, dass sich die Spannungen zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ identisch zu jenen des Zwischenschritts verhalten, was auf den Ansatz des selben nichtlinearen Materialverhaltens zurückzuführen ist. Nach Aufbringen der Brandlast entsteht eine sogenannte Spannungsglocke. Durch die temperaturabhängige Begrenzung der Spannungen kann der Beton erst in tieferen Regionen Druckspannungen aufnehmen, da durch die hohen Temperaturen an der Innenseite des Querschnitts die temperaturabhängigen Festigkeiten gegen null gehen. Durch die Temperaturbeanspruchung zeigt sich wie zuvor bei der linearen Simulation und beim Zwischenschritt, dass die positiven Momente abnehmen und die negativen Momente stark anwachsen. In Feldmitte kommt es zu einem Umschlagen der Biegemomente (siehe Abbildung 4.10) aufgrund der hohen Druckspannungen an der Innenseite, welche durch den thermischen Zwang hervorgerufen werden. Außerdem kommt es zu einer Abminderung der positiven Spannungen (Zugspannungen) im Bewehrungsstahl der unteren Lage. An der Außenseite des Querschnitts werden die negativen Spannungen (Druckspannungen) immer geringer, bis der Spannungsverlauf umschlägt.

Abbildung 4.10 zeigt den Verlauf der Biegemomente über den Tunnelquerschnitt zu unterschiedlichen Zeitpunkten. In der nichtlinearen Simulation zeigt sich, dass die Momentenbeanspruchung in den ersten 60 Minuten der Brandbelastung am stärksten ansteigt. Das Moment steigt später zwar noch an, jedoch in deutlich geringerem Ausmaß als zuvor. Zum Zeitpunkt $t = 120 \text{ min}$ stellt sich die höchste Momentenbeanspruchung ein. Unter Berücksichtigung der Parameter nach EC 2-1-2 [1] tritt das größte Biegemoment zum genannten Zeitpunkt mit $M_{t=120} = -1610 \text{ kNm}$ an der linken oberen Ecke (Punkt 1) auf. Anschließend kommt es durch den Abbau des thermischen Zwangs und durch die Umlagerung der Biegemomente in geringer belastete Bereiche zu einer geringen Abnahme des Biegemoments in der linken oberen Ecke. Im Gegensatz dazu steigt das Moment in der rechten unteren Ecke (Punkt 3) immer weiter an und beträgt nach 180 Minuten $M_{t=180} = -800 \text{ kNm}$. Zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ trat in diesem Bereich ein Biegemoment von $M_{t=0} = -463 \text{ kNm}$ auf (siehe auch Tabelle 4.3). Dieses Verhalten kann mit der Abnahme der Steifigkeit in den oberen Rahmenecken begründet werden, wodurch sich ein Teil der Momentenbeanspruchung der brandbelasteten Bereiche in die thermisch nicht belasteten Bereiche verlagert.

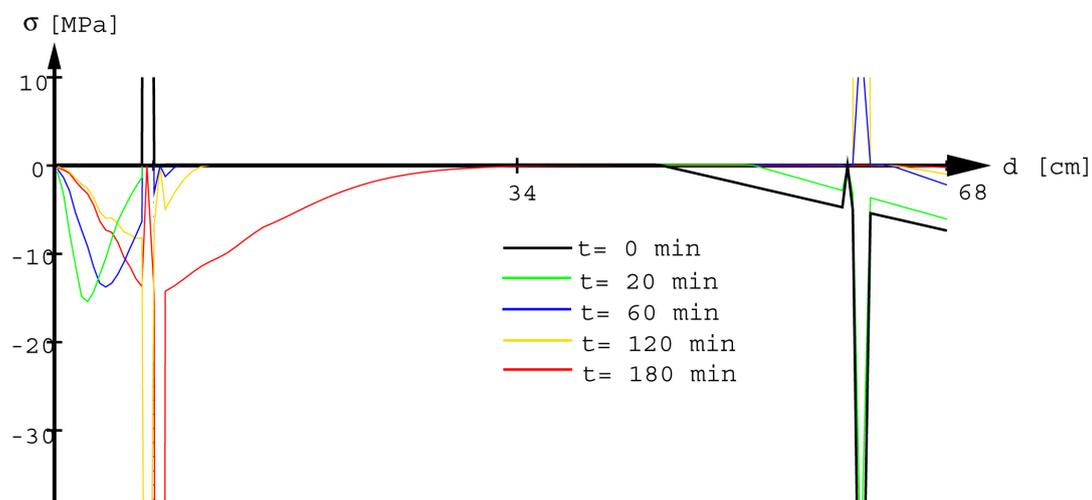


Abbildung 4.9: Spannungsverteilung für den Rechteckquerschnitt über die Querschnittsdicke nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

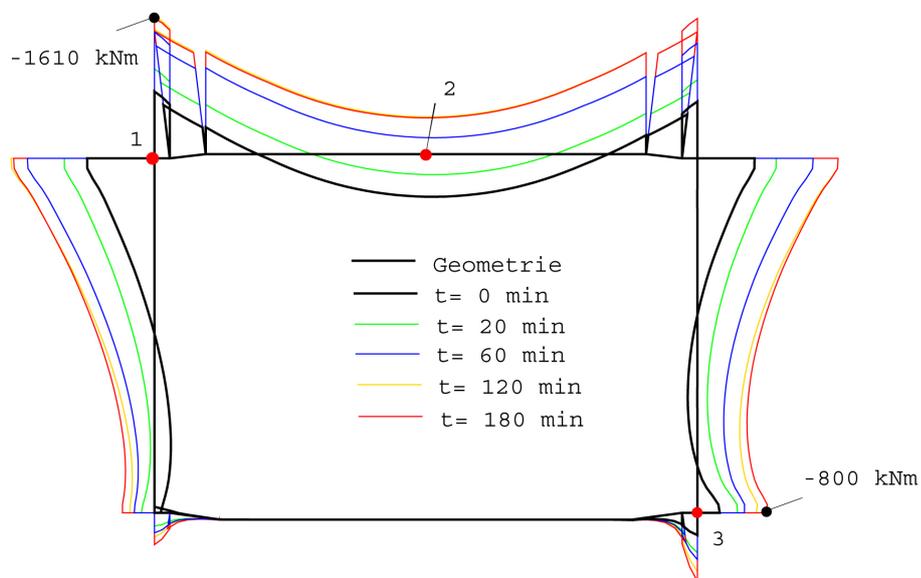


Abbildung 4.10: Momentenverlauf für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

Wie in Abbildung 4.11 zu sehen ist, zeigt die Normalkraftbeanspruchung des Querschnitts keine nennenswerten Veränderungen aufgrund der Brandbelastung. Die Seitenwände zeigen wie auch schon in der linearen Simulation und im Zwischenschritt keine Veränderung. Dies lässt sich wieder dadurch erklären, dass sich die mechanische Belastung mit der Zeit nicht ändert. Die Decke des Rechteckquerschnitts zeigt eine leichte Erhöhung der Normalkraft, welche durch die thermische Ausdehnung hervorgerufen wird. Diese Erhöhung bewirkt in der Bodenplatte eine Abminderung der Normalkraftbeanspruchung, da diese nicht thermisch belastet wird und sich deshalb nicht ausdehnt, sondern eher zurückhaltend wirkt.

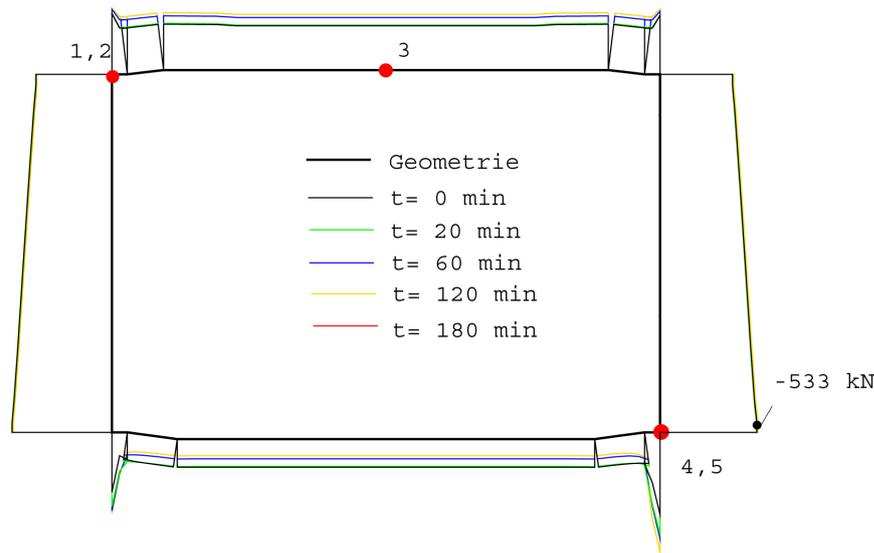


Abbildung 4.11: Normalkraftverlauf für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

Wie Abbildung 4.12 zeigt und auch schon in der linearen Simulation und im Zwischenschritt zu sehen war, kommt es in der linken oberen Ecke zur größten horizontalen Verschiebung. Wie auch die Biegemomente wachsen diese zwischen den Zeitpunkten $t = 60$ min und $t = 120$ min am stärksten an. Zu letzterem Zeitpunkt beträgt die horizontale Verschiebung der linken oberen Ecke (Punkt 1) bereits $u_{t=120} = -41,1$ mm ($u_{t=0} = -12,5$ mm) und steigt noch auf $u_{t=180} = -51,5$ mm an. In der Decke in Feldmitte (Punkt 2) kommt es zur größten vertikalen Verschiebung. Wie in Abbildung 4.12 zu sehen ist, kommt es nach dem Zeitpunkt $t = 120$ min nochmals zu einem starken Anstieg der Verformungen. Durch den hohen Steifigkeitsverlust in dieser Phase steigen die Verformungen stark an und es kommt zu einem deutlichen Durchhängen der Decke. Wie in Tabelle 4.3 ersichtlich ist, steigt die Verschiebung von $v_{t=120} = -35,8$ mm auf $v_{t=180} = -62,5$ mm an ($v_{t=0} = -28,2$ mm). Diese großen Verformungen können mit dem Fließen der Bewehrung begründet werden, wodurch es zur Ausbildung eines Fließgelenks kommt. Die linke obere Ecke bildet in diesem Fall das erste Fließgelenk, was sich an der Verformung des Querschnitts bei $t = 120$ min erkennen lässt. Durch die weitere Belastung des Querschnitts kommt es zu weiteren plastischen Verformungen und zu Schnittkraftumlagerungen, wodurch bei $t = 180$ min auch in der Feldmitte die Bewehrung zu Fließen beginnt und sich ein Fließgelenk bildet.

Bei Berücksichtigung der Parameter nach CEB [2] konnte die Berechnung nicht zu Ende geführt werden, da aufgrund der großen plastischen Verformungen ab $t = 60$ min keine Lösung mehr gefunden werden konnte. Dies könnte man als Versagen des Querschnitts unter der vorherrschenden thermischen Belastung deuten. In Tabelle 4-3 werden die Ergebnisse zu den ausgewählten Zeitpunkten unter Berücksichtigung des EC 2-1-2 [1] und der CEB [2] gegenübergestellt. Die Ergebnisse zum Zeitpunkt $t = 0$ min sind identisch mit jenen des Zwischenschritts und werden daher hier nicht mehr gezeigt (siehe Tabelle 4.3).

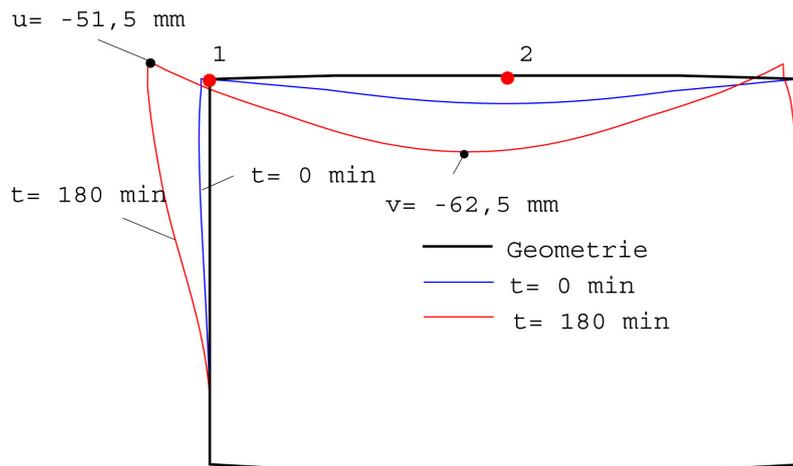


Abbildung 4.12: Verformungen für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die nicht-lineare Simulation

	$t = 20$ min		$t = 60$ min		$t = 120$ min		$t = 180$ min	
	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Biegemoment [kNm]:								
Linke obere Ecke	-1023	-1156	-1433	-1561	-1610	-	-1570	-
Decke Feldmitte	230	99	-183	-311	-417	-	-406	-
Rechter Fußpunkt	-463	-594	-544	-744	-685	-	-800	-
Normalkraft [kN]:								
Linke Ecke (Decke)	-261	-261	-303	-294	-320	-	-306	-
Linke Wand oben	-417	-418	-417	-417	-413	-	-416	-
Decke-Feldmitte	-249	-249	-291	-283	-309	-	-295	-
Rechts unten Bodenpl.	-202	-224	-171	-213	-171	-	-200	-
Fußpunkt rechts	-533	-534	-534	-534	-538	-	-544	-
Verschiebungen [mm]:								
Linke obere Ecke vert.	2,3	3,8	6,2	9,1	9,6	-	11,6	-
Linke obere Ecke horiz.	-12,5	-14,0	-19,9	-14,1	-41,1	-	-51,5	-
Decke-Feldmitte vert.	-28,2	-26,2	-27,9	-21,1	-35,8	-	-62,5	-
Decke-Feldmitte horiz.	-9,4	-10,3	-11,5	-21,8	-27,1	-	-33,7	-

Tabelle 4.3: Ergebnisse der nichtlinearen Simulation für den Rechteckquerschnitt

4.2 Gewölbequerschnitt

4.2.1 Lineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB

Abbildung 4.13 stellt den Spannungsverlauf im linken Scheitelpunkt des Gewölbequerschnitts dar. Zum Zeitpunkt $t = 0$ min ist zu erkennen, dass der Querschnitt noch fast zur Gänze überdrückt ist. Erst nach Aufbringen der Brandlast baut sich eine ausgeprägte Biegebeanspruchung auf, wodurch Zugspannungen auftreten. Weil die Spannungen bei der linearen Simulation nicht begrenzt werden, sind die temperaturabhängigen Festigkeiten des Betons schon bei einer Branddauer von $t = 20$ min im Zugbereich deutlich überschritten.

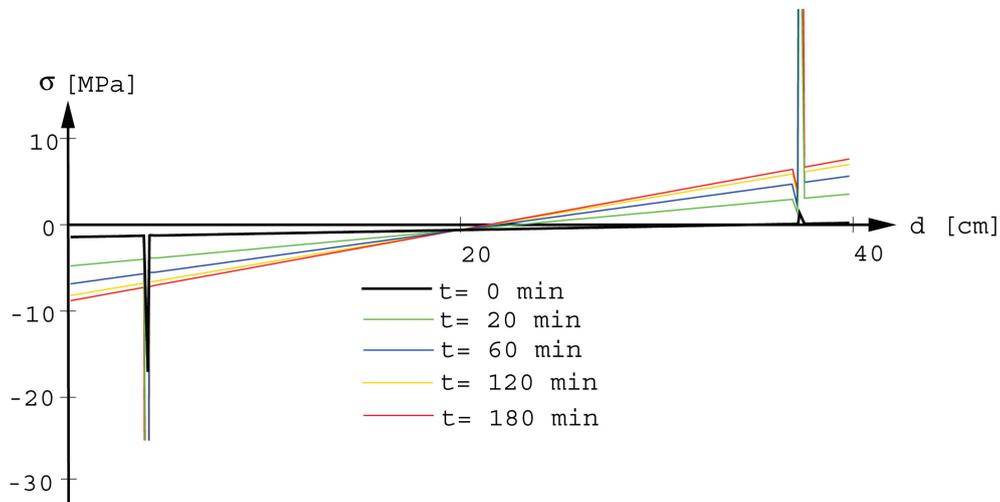


Abbildung 4.13: Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im linken Scheitelpunkt des Gewölbequerschnitts nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

Durch die asymmetrische mechanische Belastung kommt es am Scheitelpunkt auf der rechten Seite und am Fußpunkt auf der linken Seite des Querschnitts zum Zeitpunkt $t = 0$ min zu einer positiven Momentenbeanspruchung (siehe Abbildung 4.14). Das größte negative Moment zum Zeitpunkt $t = 0$ min befindet sich mit $M_{t=0} = -354$ kNm am rechten Fußpunkt (Punkt 4) des Querschnitts. Dieses Moment wirkt auch in der Bodenplatte, wobei es durch die starre Lagerung sehr schnell abnimmt. Durch die Brandbelastung steigen die Druckspannungen an der Tunnelinnenseite und damit die negativen Momente stark an. Zum Zeitpunkt $t = 180$ min beträgt das Biegemoment $M_{t=180} = -733$ kNm nach EC 2-1-2 [1]. Wie in Tabelle 4.4 ersichtlich ist, wird dieses Moment für die Brandbelastung nach CEB [2] schon zum Zeitpunkt $t = 60$ min überschritten (siehe Tabelle 4.4). Nach 180 min wächst das Moment in diesem Fall auf $M_{t=180} = -902$ kNm an.

Die Normalkraft beträgt aufgrund der mechanischen Belastung im rechten Fußpunkt (Punkt 5) $N_{t=0} = -614$ kN. Durch die Temperaturbeanspruchung bleibt der Normalkraftverlauf annähernd unverändert (siehe Abbildung 4.15). Die Normalkräfte für bestimmte Punkte des Querschnitts sind Tabelle 4.4 zu entnehmen.

Wie in Abbildung 4.16 ersichtlich ist, bleiben die Verformungen bei der linearen Simulation vergleichsweise klein. Die größten Verformungen des Gewölbequerschnitts zufolge Brand-

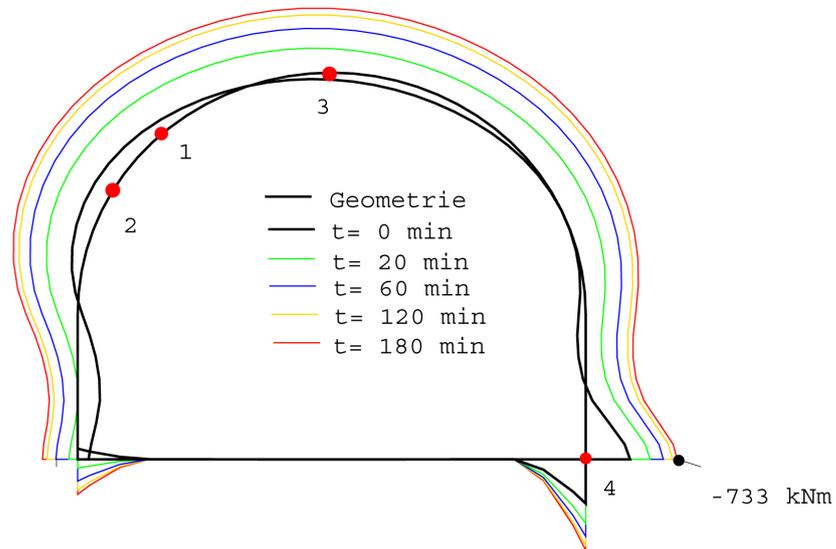


Abbildung 4.14: Momentenverlauf für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

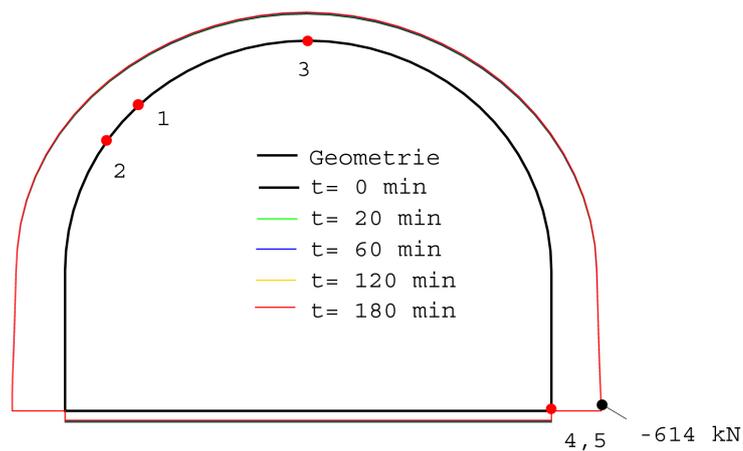


Abbildung 4.15: Normalkraftverlauf für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

belastung treten in der linken Schulter (Punkt 1) auf und betragen zum Zeitpunkt $t = 180$ min nach EC 2-1-2 [1] horizontal $u_{t=180} = -7,7$ mm und vertikal $v_{t=180} = 4,1$ mm. Die Verformungen bei der Simulation nach CEB [2] sind deutlich geringer (siehe Tabelle 4.4), da hier der E-Modul doppelt so groß ist wie bei der Simulation nach EC 2-1-2 [1].

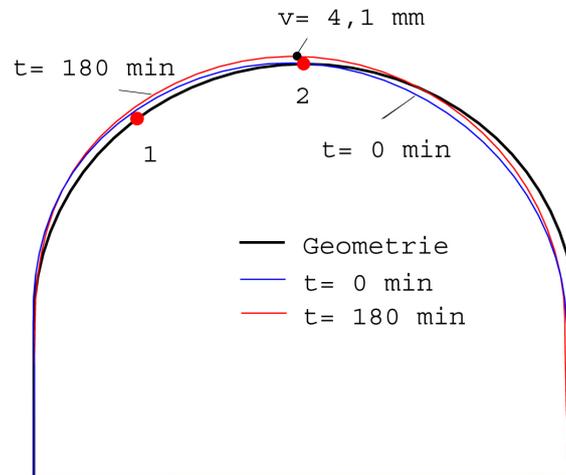


Abbildung 4.16: Verformungen für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

	$t = 0$ min	$t = 20$ min		$t = 60$ min		$t = 120$ min		$t = 180$ min	
Biegemoment [kNm]:		EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Linke Schulter	-93	-326	-491	-476	-728	-578	-869	-629	-921
Linke Schulter M_{max}	-154	-370	-522	-510	-742	-605	-872	-653	-919
Decke-Feldmitte	56	-191	-364	-350	-616	-475	-765	-511	-821
Fußpunkt rechts	-354	-515	-619	-621	-778	-695	-870	-733	-902
Normalkraft [kN]:		EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Linke Schulter	-427	-434	-440	-439	-448	-442	-453	-443	-455
Linke Schulter M_{max}	-535	-539	-543	-542	-548	-543	-550	-544	-552
Decke-Feldmitte	-331	-341	-348	-347	-358	-350	-365	-352	-367
Rechts unten Bodenpl.	-183	-129	-122	-123	-111	-119	-105	-117	-102
Fußpunkt rechts	-614	-614	-614	-614	-614	-614	-614	-614	-614
Verschiebungen [mm]:		EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Linke Schulter vert.	0,4	1,5	1,2	2,4	-2,0	3,4	2,8	4,1	3,4
Linke Schulter horiz.	-6,0	-6,4	-3,5	-6,8	-3,7	-7,3	-3,9	-7,7	-4,2
Decke-Feldmitte vert.	-1,7	-0,1	0,6	1,1	1,8	2,4	2,8	3,3	3,6
Decke-Feldmitte horiz.	-5,5	-5,7	-3,1	-5,9	-3,2	-6,2	-3,2	-6,3	-3,3

Tabelle 4.4: Ergebnisse der linearen Simulation für den Gewölbequerschnitt

4.2.2 Zwischenschritt nach EC 2-1-2 und CEB

Im Zwischenschritt ist bei der Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke in der linken Schulter (siehe Abbildung 4.17) deutlich zu erkennen, dass durch die Berücksichtigung des elasto-plastischen Materialverhaltens und der damit verbundenen Begrenzung der Spannungen durch die Festigkeit (insbesondere im Zugbereich) der Spannungsverlauf im Gegensatz zur linearen Simulation nicht linear ist. In Abbildung 4.17 ist ebenfalls deutlich zu sehen, dass sich bei der Simulation nach EC 2-1-2 [1] nur mehr im inneren Drittel der Querschnittsdicke Druckspannungen aufbauen, die Zugspannungen werden hier nur mehr vom Bewehrungsstahl aufgenommen, da die Zugfestigkeit für Beton gem. EC 2-1-2 [1] null gesetzt wurde. Bei der Berücksichtigung des Materialverhaltens nach CEB [2] stehen nur mehr die inneren 25 % des Querschnitts unter Druck.

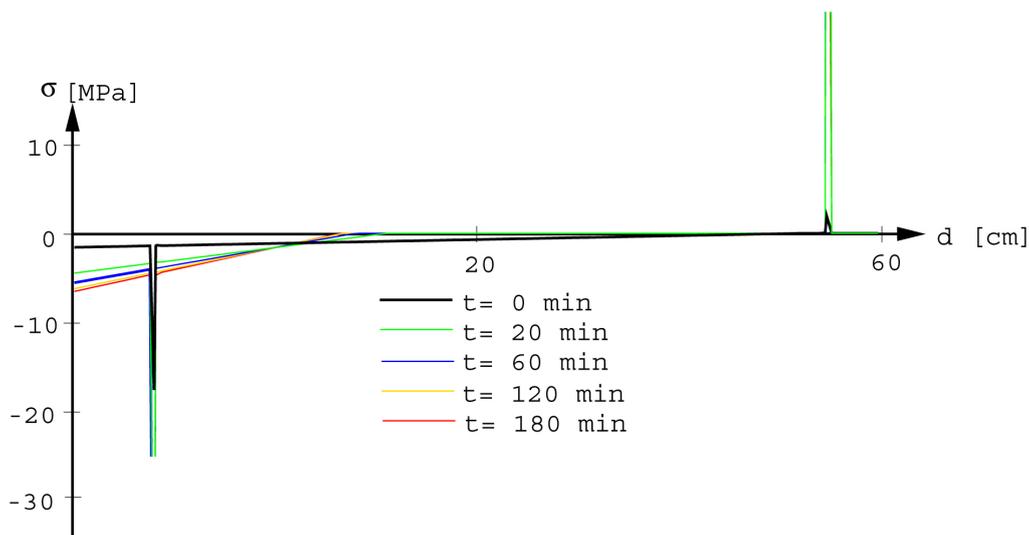


Abbildung 4.17: Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im linken Scheitelpunkt des Gewölbequerschnitts nach EC 2-1-2 [1] im Zwischenschritt

Wie bei der linearen Simulation kommt es auch im Zwischenschritt aufgrund der thermischen Beanspruchung zu einem Anwachsen der negativen Momente und zu einer Abnahme der positiven Momente bis zum Umschlagen in den negativen Bereich. In Abbildung 4.18 sieht man deutlich, dass sich die Momente aus den höher beanspruchten Querschnittsteilen in die Fußpunkte und in die linke Schulter verlagern. Im Vergleich zur linearen Simulation kann sich der thermische Zwang bei Berücksichtigung der Festigkeiten weniger stark ausbilden. Wie in Tabelle 4.5 ersichtlich, ist beim Vergleich des Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] und nach CEB [2] nur ein geringer Unterschied in der Momentenbeanspruchung zu erkennen.

Der Normalkraftverlauf weist wie schon in der linearen Simulation auch im Zwischenschritt kaum Veränderungen auf (siehe Abbildung 4.19). Im Unterschied dazu steigen jedoch die Verformungen mit zunehmender Branddauer stark an. Durch die Abnahme der Steifigkeit und aufgrund von plastischen Verformungen welche sich beim Erreichen der Festigkeiten einstellen, kommt es zu deutlich größeren Verschiebungen (siehe Abbildung 4.20), als bei der linearen Simulation. In der linken Schulter (Punkt 1) wachsen bei der Simulation

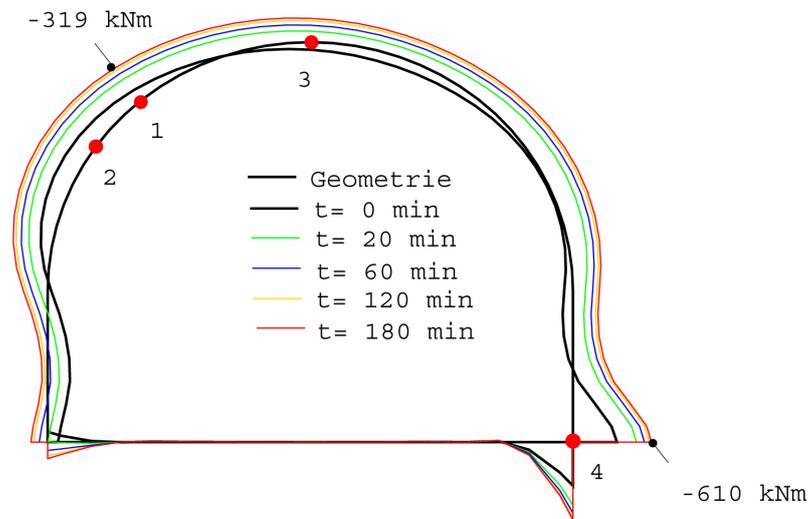


Abbildung 4.18: Momentenverlauf für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] im Zwischenschritt

nach EC 2-1-2 [1] die horizontalen Verschiebungen von $u_{t=0} = -8,7$ mm zum Zeitpunkt $t = 0$ min auf $u_{t=180} = -19,2$ mm zum Zeitpunkt $t = 180$ min an.

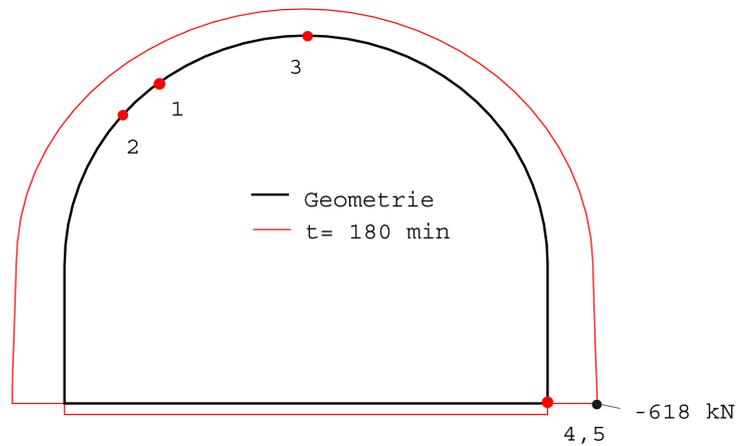


Abbildung 4.19: Normalkraftverlauf für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] im Zwischenschritt

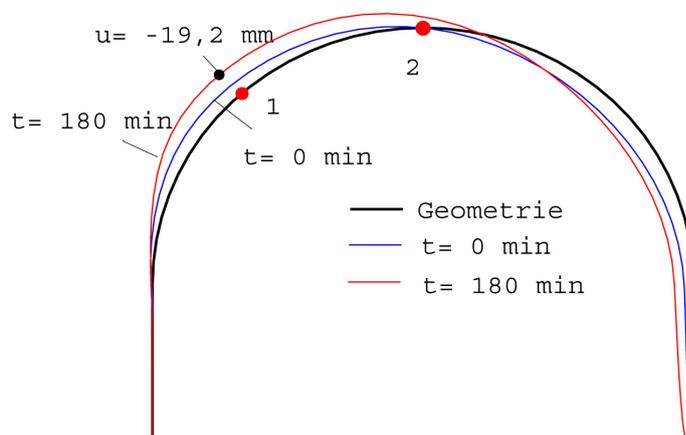


Abbildung 4.20: Verformungen für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] im Zwischenschritt

	$t = 0 \text{ min}$		$t = 20 \text{ min}$		$t = 60 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$		$t = 180 \text{ min}$	
	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Biegemoment [kNm]:										
Linke Schulter	-96	98	-211	-223	-261	-270	-298	-299	-319	-312
Linke Schulter M_{max}	-159	-161	-259	-272	-314	-325	-353	-357	-374	-370
Decke Feldmitte	58	60	-84	-100	-130	-139	-163	-163	-183	-175
Fußpunkt rechts	-341	-330	-493	-526	-555	-585	-592	-615	-610	-627
Normalkraft [kN]:										
Linke Schulter	-428	-429	-427	-425	-425	-424	-425	-423	-425	-423
Linke Schulter M_{max}	-536	-537	-532	-530	-531	-530	-532	-530	-532	-530
Decke-Feldmitte	-331	-332	-334	-333	-332	-330	-332	-329	-332	-329
Rechts unten Bodenpl.	-138	-138	-135	-136	-137	-139	-138	-140	-138	-140
Fußpunkt rechts	-612	-611	-618	-620	-618	-618	-617	-618	-617	-617
Verschiebungen [mm]:										
Linke Schulter vert.	0,5	0,3	3,3	3,3	4,9	4,8	6,3	5,9	7,4	6,7
Linke Schulter horiz.	-8,7	-5,8	-14,2	-11,7	-16,5	-14,0	-18,2	-15,5	-19,2	-16,3
Decke-Feldmitte vert.	-3,5	-2,6	2,5	1,6	-1,1	-0,4	0,3	0,7	1,4	1,5
Decke-Feldmitte horiz.	-7,2	-4,6	-11,6	-9,3	-13,1	-10,8	-14,2	-11,8	-14,8	-12,3

Tabelle 4.5: Ergebnisse des Zwischenschritts für den Gewölbequerschnitts

4.2.3 Nichtlineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB

Die Spannungsverteilung zeigt auch wie bei der nichtlinearen Simulation für den Rechteckquerschnitt, dass sich an der unmittelbar temperaturbeanspruchten Innenseite der Schale nur sehr geringe Druckspannungen aufbauen können, sondern durch die thermische Begrenzung der Festigkeiten gegen null gehen. Bei Berücksichtigung der nichtlinearen Temperatur zeigt sich jedoch im Unterschied zur linearen Simulation und zur Simulation im Zwischenschritt, dass sich die Spannungen erst in tieferen Regionen des Querschnitts aufbauen können. Dadurch bildet sich, wie auch schon bei der Simulation des Rechteckquerschnitts ersichtlich war, die sogenannte Spannungsglocke aus.

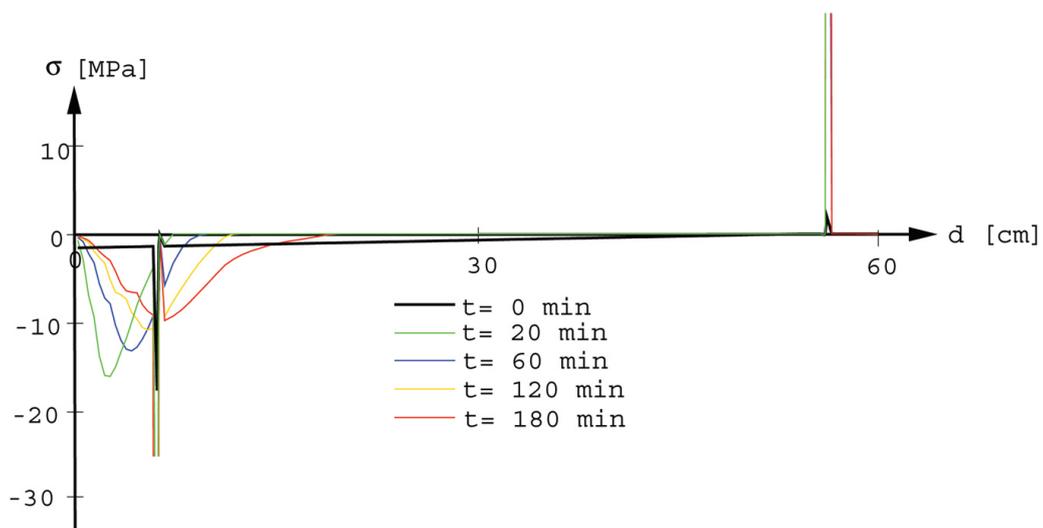


Abbildung 4.21: Spannungsverteilung für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

Das maximale Moment tritt wie bei der linearen Simulation und der Simulation im Zwischenschritt am rechten Fußpunkt (Punkt 4) auf (siehe Abbildung 4.22). Zum Zeitpunkt $t = 0$ min ist das Biegemoment identisch mit dem Ergebnis aus dem Zwischenschritt. Für die Simulation nach EC 2-1-2 [1] ergibt sich nach $t = 180$ min ein Biegemoment von $M_{t=180} = -904$ kNm. Wie Tabelle 4.6 zeigt, wird dieses Moment bei der Simulation unter Berücksichtigung des Materialverhaltens nach CEB [2] noch überschritten, weil sich die Momente aus den thermisch höher belasteten Bereichen in die geringer belasteten Bereiche verlagern. Tabelle 4.6 zeigt die größte Momentenbeanspruchung nach CEB [2] zum Zeitpunkt $t = 60$ min in der linken Schulter (Punkt 2). Mit fortschreitender Branddauer verringert sich hier das Moment, da die Bewehrung an der Tunnelaußenseite zu fließen beginnt. Der Vergleich mit der linear-elastischen Simulation zeigt deutlich, dass sich durch die Abminderung der Steifigkeit die thermischen Zwänge nicht so stark ausbilden können. Dies führt auch dazu, dass die Zunahme der Momentenbeanspruchung mit fortschreitender Branddauer abnimmt. Generell ergeben sich über den gesamten Querschnitt geringere Momente als bei der linear-elastischen Simulation. Lediglich im rechten Fußpunkt wird der Wert des Biegemoments in der linearen Simulation überschritten. Im Vergleich zum

Rechteckquerschnitt können sich die Momente beim Gewölbequerschnitt gleichmäßiger verteilen. Die thermisch induzierten Spannungen haben wie zuvor auch bei der nichtlinearen Simulation keinen Einfluss auf den Normalkraftverlauf (siehe Abbildung 4.23). Wie in Tabelle 4.6 ersichtlich ist, ergeben sich nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Zeitpunkten. Die exzentrische Spannungsverteilung erhöht demzufolge nur die Momentenbeanspruchung.

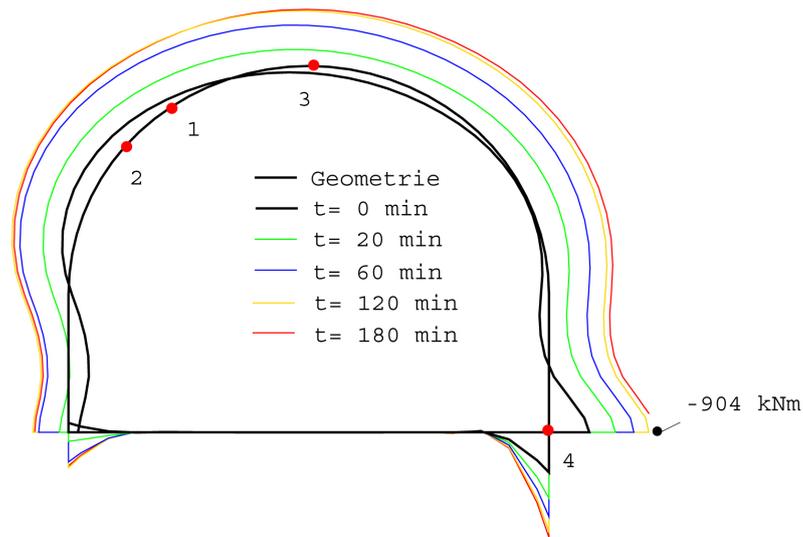


Abbildung 4.22: Momentenverlauf für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

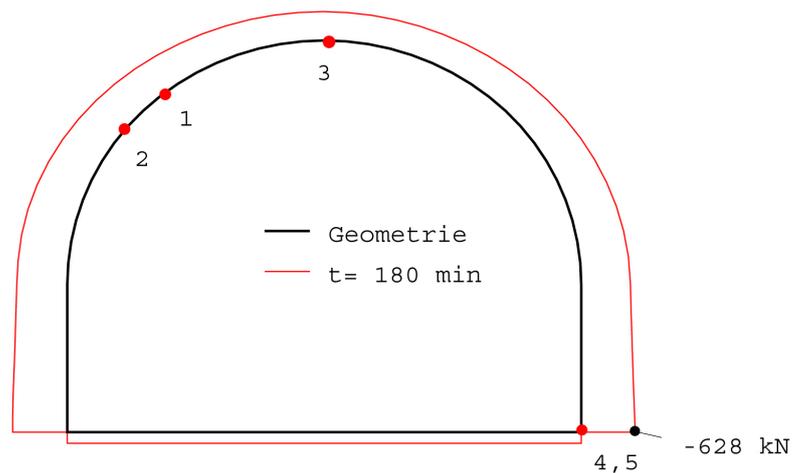


Abbildung 4.23: Normalkraftverlauf für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] der nichtlinearen Simulation

Am Auffälligsten sind bei der nichtlinearen Simulation die vergleichsweise großen Verschiebungen, welche sich mit der Zeit für den Gewölbequerschnitt einstellen. Die größte

Verschiebung tritt bei der Simulation nach CEB [2] in der linken Schulter auf. Die horizontale Verschiebung beträgt hier bereits nach 20 Minuten $u_{t=20} = -25,5$ mm, zum Zeitpunkt $t = 180$ min steigt die horizontale Verschiebung auf $u_{t=180} = -97,1$ mm an. Im Unterschied zu den vorangegangenen Ergebnissen der linearen Simulation und des Zwischenschritts liegen die Deformationen deutlich über den Ergebnissen nach EC 2-1-2 [1]. Wie in Abbildung 4.24 zu erkennen ist, weist die Biegelinie des Tunnelquerschnitts drei Knicke auf. Diese lassen sich als mögliche Fließbereiche deuten. Mit zunehmender Temperaturbeanspruchung und der damit einhergehenden Abminderung der Festigkeiten steigen an der Tunnelaußenseite die Zugspannungen im Bewehrungsstahl stark an, bis dieser möglicherweise zu fließen beginnt. Bei weiterer Steigerung der Brandbelastung kann der Bewehrungsstahl keine zusätzlichen Spannungen mehr aufnehmen, wodurch sich ein Teil der Zugspannungen auf die innere Bewehrung verlagert (Spannungsspitze wird positiv). Das Erreichen der Fließspannung (Festigkeit) der Bewehrung führt dazu, dass in diesem Punkt des Querschnitts eine erhöhte Rotationsfähigkeit vorhanden ist. Die numerischen Ergebnisse zeigen, dass eine kinematische Kette (d.h. Versagen des gesamten Querschnitts) bei dieser Simulation nicht erreicht wird, da die Simulation weder abbricht, noch die Verformungen unrealistisch groß werden. Daher könnte die Belastung noch weiter gesteigert werden.

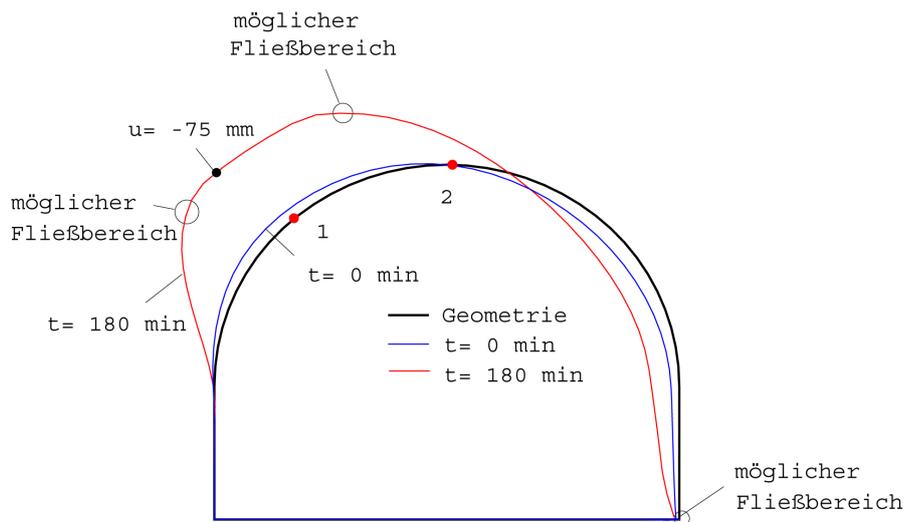


Abbildung 4.24: Verformungen für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die nicht-lineare Simulation

In Tabelle 4.6 werden die Ergebnisse der nichtlinearen Simulation unter Berücksichtigung der thermischen Parameter nach EC 2-1-2 [1] und nach CEB [2] tabellarisch dargestellt. Da zum Zeitpunkt $t = 0$ min die Ergebnisse identisch sind zu jenen aus dem Zwischenschritt (siehe Tabelle 4.6), werden sie hier nicht mehr angeführt.

	$t = 20$ min		$t = 60$ min		$t = 120$ min		$t = 180$ min	
	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Biegemoment [kNm]:								
Linke Schulter	-270	-343	-475	-560	-566	-560	-558	-551
Linke Schulter M_{max}	-324	-405	-524	-613	-600	-601	-585	-592
Decke-Feldmitte	-137	-201	-341	-427	-462	-466	-475	-457
Fußpunkt rechts	-565	-658	-724	-846	-852	-969	-904	-962
Normalkraft [kN]:								
Linke Schulter	-425	-423	-429	-426	-428	-418	-424	-418
Linke Schulter M_{max}	-531	-530	-535	-532	-531	-522	-525	-521
Decke-Feldmitte	-332	-328	-336	-333	-339	-331	-339	-330
Rechts unten Bodenpl.	-138	-142	-134	-137	-130	-139	-131	-139
Fußpunkt rechts	-618	-617	-616	-617	-623	-628	-628	-628
Verschiebungen [mm]:								
Linke Schulter vert.	6,1	9,0	15,8	20,3	23,6	34,7	34,2	43,2
Linke Schulter horiz.	-21,9	-25,5	-31,8	-36,3	-51,7	-72,4	-75,0	-97,1
Decke-Feldmitte vert.	-2,2	0,2	8,7	12,4	12,0	1,2	5,6	-13,6
Decke-Feldmitte horiz.	-17,4	-19,4	-23,2	-25,1	-36,0	-47,8	-51,9	-57,5

Tabelle 4.6: Ergebnisse der nichtlinearen Simulation für den Gewölbequerschnitt

4.3 Kreisquerschnitt Fall 1

Wie in Kapitel 2.4.3 ausgeführt, stellt Fall 1 den ungebetteten offenen Kreisquerschnitt mit Fußpunkteinspannung dar.

4.3.1 Lineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB

In Abbildung 4.25 ist der Spannungsverlauf über die Querschnittsdicke für den Kreisquerschnitt Fall 1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass es durch den thermisch induzierten Zwang bereits zum Zeitpunkt $t = 20$ min zu einem Vorzeichenwechsel im Spannungsverlauf kommt. Auch für den Kreisquerschnitt ist das thermische Verhalten stark vom Elastizitätsmodul abhängig. Im Vergleich zur Simulation nach EC 2-1-2 [1] ergeben sich durch die Berücksichtigung der temperaturabhängigen Materialparameter nach CEB [2] deutlich größere Spannungen (siehe Schnittgrößen in Tabelle 4.7). Die größten Druck- und Zugspannungen treten bei der linearen Simulation nach EC 2-1-2 [1] zum Zeitpunkt $t = 120$ min auf, anschließend kommt es zu einer geringen Reduktion, da sich die Spannungen in geringer belastete Bereiche umlagern.

Der Momentenverlauf nach EC 2-1-2 [1] wird in Abbildung 4.26 dargestellt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ min treten nur sehr geringe Momente auf, da der Kreisquerschnitt die mechanische Belastung hauptsächlich durch Normalkräfte in die Auflager leitet und die Momentenbeanspruchung größtenteils durch die ungünstige Lagerung der Fußpunkte (insbesondere Punkt 4) entsteht. Zum Zeitpunkt $t = 120$ min tritt das größte Biegemoment mit $M_{t=120} = -296$ kNm in der linken Schulter (Punkt 3) auf. Wie auch schon bei den bisher dargestellten Querschnitten (Rechteckquerschnitt und Gewölbequerschnitt) werden durch die thermische Beanspruchung die positiven Momente reduziert und die negativen Momente erhöht. Durch die asymmetrische Belastung tritt in der linken Schulter schon zum Zeitpunkt $t = 0$ min das größte negative Biegemoment auf. Das größte positive Moment tritt an der linken Einspannung (Punkt 4) unmittelbar vor der Brandbelastung auf. Das Biegemoment beträgt hier $M_{t=0} = 286$ kNm. Durch die thermische Belastung wird hier die Momentenbeanspruchung stark reduziert und beträgt zum Zeitpunkt $t = 120$ min nur mehr $M_{t=0} = 71$ kNm, was in etwa einem Viertel des Ausgangswertes zum Zeitpunkt $t = 0$ min entspricht.

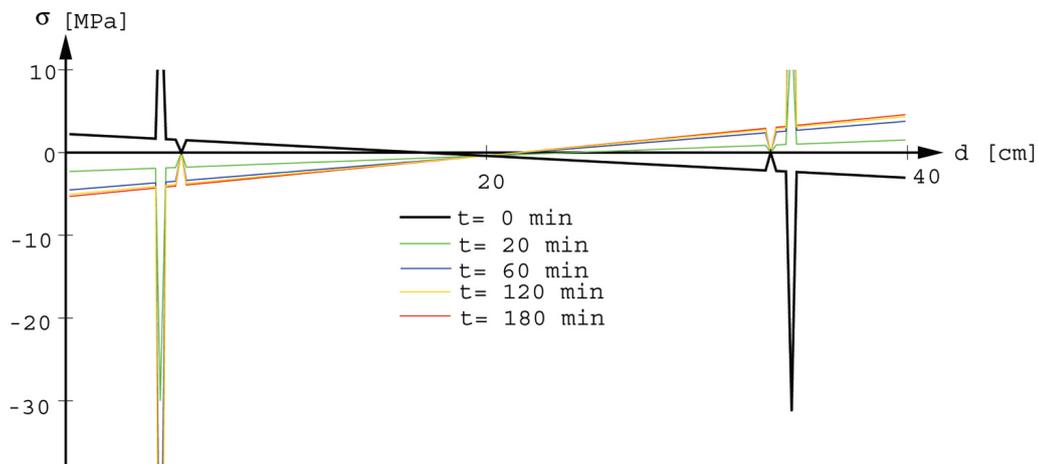


Abbildung 4.25: Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im Scheitel nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

Im Scheitel beträgt das Biegemoment zu Beginn $M_{t=0} = 75 \text{ kNm}$. Durch den thermischen Zwang baut sich hier zum Zeitpunkt $t = 120 \text{ min}$ ein negatives Biegemoment von $M_{t=120} = -149 \text{ kNm}$ auf. Bei der Simulation nach CEB [2] kam es zu einem deutlich stärkeren Anstieg der negativen Momente, was wieder auf den höheren E-Modul zurückzuführen ist. Zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ sind die Ergebnisse der Momentenbeanspruchung in etwa gleich. Bei der linearen Simulation nach CEB [2] kommt es auch im linken Fußpunkt zum Umschlagen der Momentenbeanspruchung. Das betragsmäßig größte Biegemoment tritt auch hier zum Zeitpunkt $t = 120 \text{ min}$ mit $M_{t=120} = -407 \text{ kNm}$ in der linken Schulter auf. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse ist in Tabelle 4.7 zu sehen.

In Abbildung 4.27 ist zu erkennen, dass die Normalkraftbeanspruchung des Kreisquerschnitts keine großen Veränderungen über die Zeit zeigt. Im Fall 1 für die lineare Simulation nach EC 2-1-2 [1] tritt die größte Normalkraft am rechten Fußpunkt mit $N = -417 \text{ kN}$ auf und wird durch die mechanische Belastung des Querschnitts hervorgerufen. Bei der Simulation unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Parameter nach CEB [2] konnte ebenfalls keine wesentliche Veränderung der Normalkraft festgestellt werden (siehe Tabelle 4.7).

In Abbildung 4.28 werden die Verschiebungen des Querschnitts zu ausgewählten Zeitpunkten dargestellt. Hier lässt sich erkennen, dass sich die größte vertikale Verschiebung im Scheitel zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ mit $v_{t=0} = -6,4 \text{ mm}$ ergibt. Durch die thermische Beanspruchung kommt es zu einer Reduzierung der vertikalen Verformung im Laufe der Branddauer auf $v_{t=180} = -4,6 \text{ mm}$. Dies wird durch die Ausdehnung der temperaturbeanspruchten Querschnittsteile verursacht. Die größte horizontale Verschiebung ergibt sich in der linken Schulter durch die asymmetrische mechanische Belastung. Nach Aufbringung der Brandlast steigen die Verschiebungen weiter an und es kommt zum Zeitpunkt $t = 180 \text{ min}$ zu einer horizontalen Verschiebung von $u_{t=180} = -21,0 \text{ mm}$.

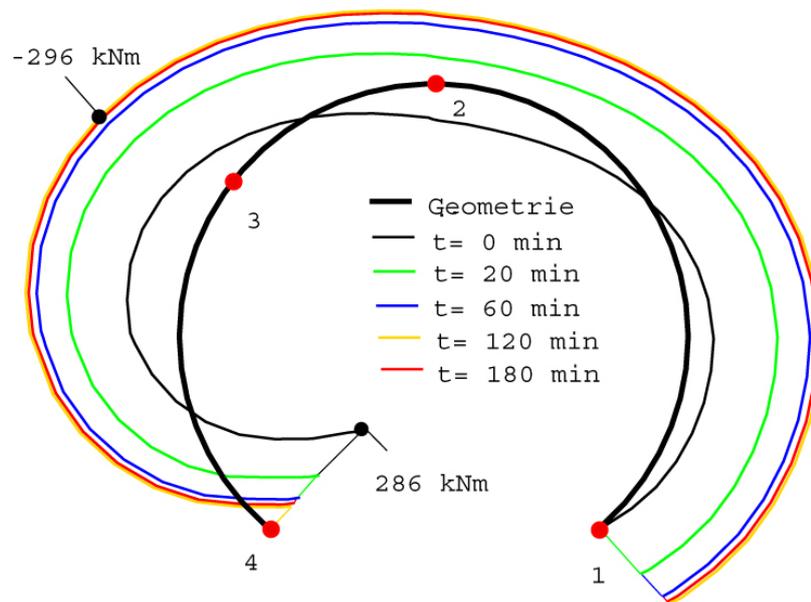


Abbildung 4.26: Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 1 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

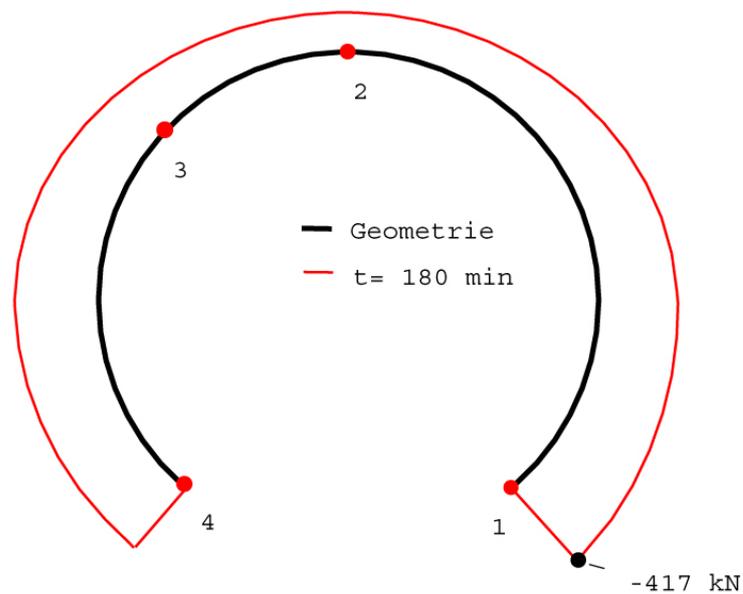


Abbildung 4.27: Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 1 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

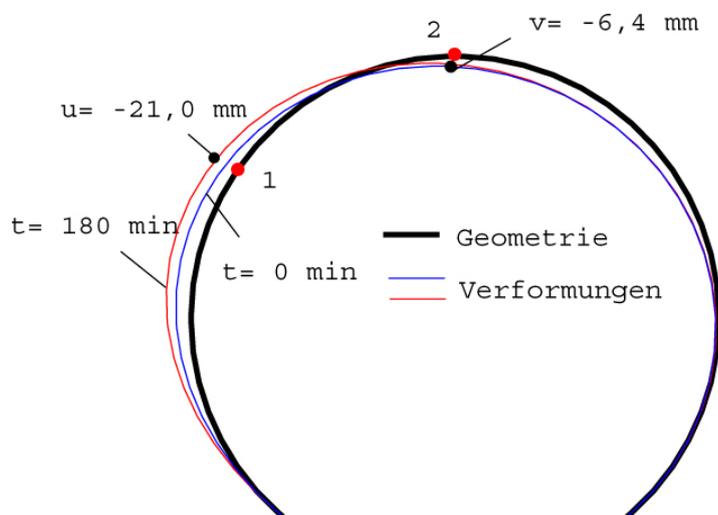


Abbildung 4.28: Verformungen des Kreisquerschnitts Fall 1 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

	$t = 0 \text{ min}$		$t = 20 \text{ min}$		$t = 60 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$		$t = 180 \text{ min}$	
Biegemoment [kNm]:	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
1 Fußpunkt rechts	-0,4	-0,4	-129	-223	-193	-317	-215	-327	-208	-283
2 Scheitel	75	75	-56	-153	-123	-253	-149	-268	-143	-228
3 linke Schulter	-67	-67	-198	-294	-264	-393	-289	-407	-284	-366
4 Fußpunkt links	286	286	157	63	93	-31	71	-41	78	-32
Normalkraft [kN]:	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
1 Fußpunkt rechts	-417	-417	-417	-416	-416	-416	-416	-415	-416	-415
2 Scheitel	-167	-167	-167	-168	-168	-169	-168	-169	-168	-170
3 linke Schulter	-267	-267	-267	-267	-267	-268	-268	-268	-268	-269
4 Fußpunkt links	-342	-342	-342	-341	-341	-341	-341	-340	-341	-340
Verschiebungen [mm]:	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
linke Schulter vert.	-3,4	-1,8	-3,0	-1,3	-2,7	-0,8	-2,7	-0,3	-1,9	-0,2
linke Schulter horiz.	-12,6	-6,6	-14,3	-7,2	-16,1	-8,0	-18,2	-8,8	-21,0	-9,4
First vert.	-6,4	-3,4	-6,0	-2,6	-5,6	-1,8	-5,0	-1,1	-4,6	-0,4
First horiz.	-11,0	-5,8	-12,2	-6,1	-13,4	-6,4	-14,8	-6,8	-16,1	-7,1

Tabelle 4.7: Ergebnisse der linearen Simulation für den Kreisquerschnitt Fall 1

4.3.2 Zwischenschritt nach EC 2-1-2 und CEB

In Abbildung 4.29 ist der Spannungsverlauf im Scheitel für die Simulation im Zwischenschritt nach EC 2-1-2 [1] dargestellt. Es zeigt sich, dass es im Zwischenschritt zu keinem Umschlagen der Spannungen im Beton kommt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Bewehrung an der Tunnelinnenseite zu jedem Zeitpunkt unter Zugspannungen steht und dass die Druckspannungen an der Tunnelaußenseite mit andauernder thermischer Belastung verringert werden bis es zum Umschlagen kommt. Im Gegensatz zum Beton an der Tunnelaußenseite, treten in der äußeren Bewehrung zum Zeitpunkt $t = 120$ min Zugspannungen auf und es steht nur mehr die Betondeckung unter Druckspannungen.

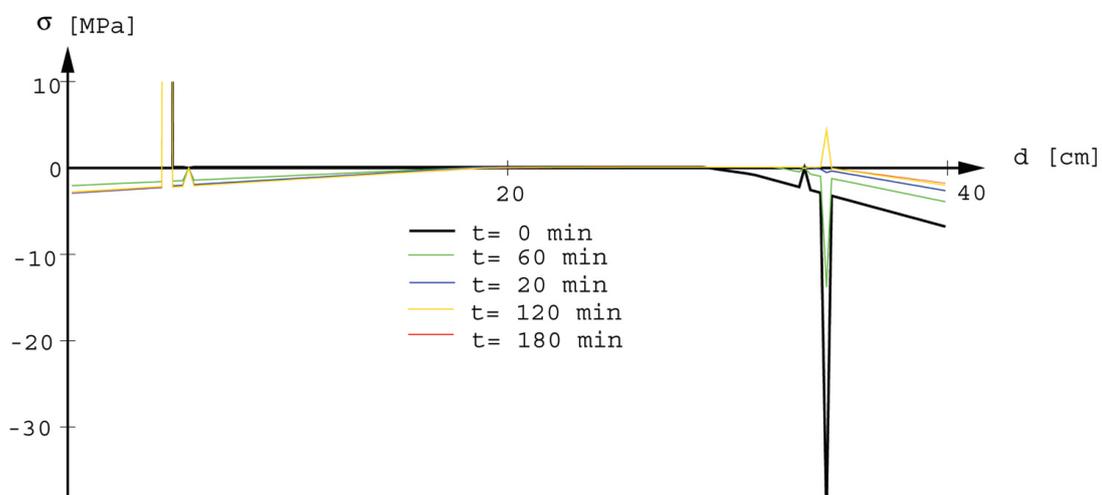


Abbildung 4.29: Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im Scheitel nach EC 2-1-2 [1] für den Zwischenschritt

Der Momentenverlauf in Abbildung 4.30 zeigt, dass sich unter Berücksichtigung des nicht-linearen Materialverhaltens und der Begrenzung der temperaturabhängigen Festigkeiten schon vor dem Brand deutliche Unterschiede zur linearen Simulation ergeben. Bei der Simulation im Zwischenschritt kommt es zu einer Umlagerung des Biegemomentes in den rechten Fußpunkt. Außerdem ergeben sich im Allgemeinen weitaus geringere Unterschiede zu den unterschiedlichen Zeitpunkten als bei der linearen Simulation. Es ist zu erkennen, dass sich die größte Veränderung des Biegemomentes im Scheitel ergibt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ min weist der Kreisquerschnitt im Scheitelpunkt unter Berücksichtigung des Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] ein Biegemoment von $M_{t=0} = 91$ kNm auf. Nach 120 Minuten kommt es zum Umschlagen des Biegemomentes in den negativen Bereich ($M_{t=120} = -8$ kNm). Das maximale Biegemoment tritt hier im Bereich der linken Schulter auf. Bei der Simulation im Zwischenschritt haben die thermischen Zwänge eine geringere Auswirkung auf die Momentenbeanspruchung als bei der linearen Simulation (siehe Kapitel 4.3.1) und der nichtlinearen Simulation (siehe Kapitel 4.3.3). Bei der Untersuchung des Kreisquerschnitts unter Berücksichtigung des Materialverhaltens nach CEB [2] ergab sich ein ähnlicher Momentenverlauf wie bei der Simulation nach EC 2-1-2 [1] (siehe Tabelle 4.8). Hier kommt

es im Scheitel jedoch schon zum Zeitpunkt $t = 60$ min zum Umschlagen des Biegemomentes in den negativen Bereich. Durch die Umlagerung der Biegemomente in geringer beanspruchte Bereiche tritt zum Zeitpunkt $t = 180$ min erneut ein positives Moment auf. Es kommt sozusagen zu einem doppelten Umschlagen der Momentenbeanspruchung (siehe Tabelle 4.8).

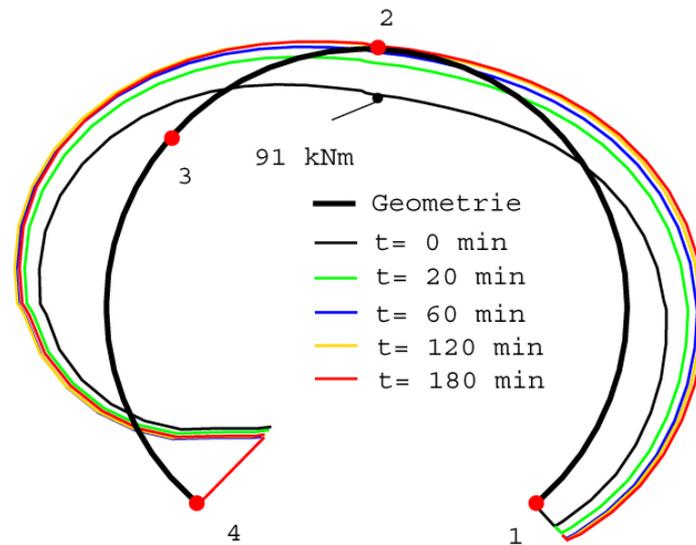


Abbildung 4.30: Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 1 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

Der Normalkraftverlauf (siehe Abbildung 4.31) weist wie schon in der linearen Simulation keine nennenswerten Veränderungen aufgrund der Brandbelastung auf. Die größte Normalkraft tritt hier ebenfalls im rechten Fußpunkt auf und ist durch die asymmetrische mechanische Belastung zu erklären. Es ließ sich jedoch feststellen, dass es im Bereich der Fußpunkte zu einer Verringerung und in den übrigen Bereichen zu einer geringfügigen Erhöhung der Normalkraft kommt. Unter Verwendung des temperaturabhängigen Materialverhaltens nach CEB [2] ergab sich eine fast identische Normalkraftbeanspruchung des Kreisquerschnitts (siehe Tabelle 4.8). Hier betragen die Abweichungen zur Simulation mit EC 2-1-2 [1] weniger als 1 kN. Die numerischen Ergebnisse für die Ausgewählten Punkte sind in Tabelle 4.8 zu finden.

Am deutlichsten lässt sich das nichtlineare Materialverhalten und die Begrenzung der Festigkeiten an den Verschiebungen erkennen (siehe Abbildung 4.32). Im Vergleich zum Rechteckquerschnitt und zum Gewölbequerschnitt weist der Kreisquerschnitt eine deutlich geringere Wandstärke auf. Dadurch kann die Temperatur verhältnismäßig tiefer in den Querschnitt eindringen. Aus diesem Grund vermindert sich die Steifigkeit des Querschnitts in höherem Maße. Im Bereich des Scheitels kommt es wie zuvor zur größten vertikalen Verschiebung. Diese beträgt zum Zeitpunkt $t = 0$ min $v_{t=0} = -30,8$ mm und zum Zeitpunkt $t = 120$ min $v_{t=120} = -37,6$ mm. Die größte horizontale Verschiebung tritt ebenfalls im Scheitel auf und beträgt am Ende der Brandbelastung $u_{t=180} = -87,2$ mm ($u_{t=0} = -57,3$ mm). Wie in Abbildung 4.32 ersichtlich, kündigt sich im Bereich des linken Fußpunktes die Ausbildung eines ersten Fließgelenkes an, da hier schon fast ein Knick in der Biegel-

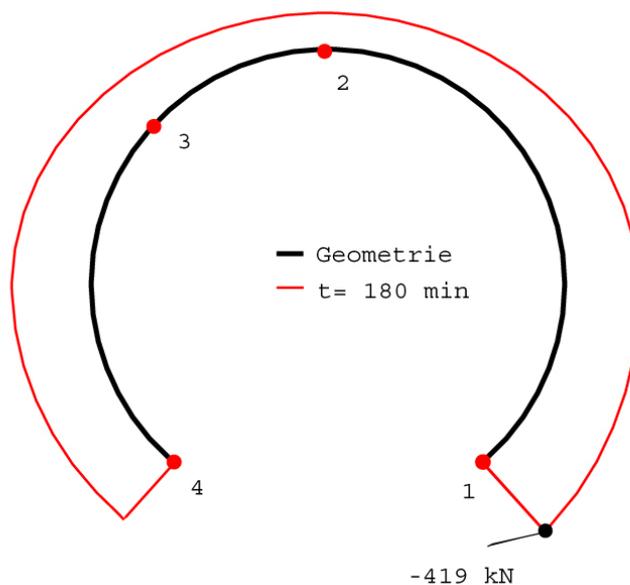


Abbildung 4.31: Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 1 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

nie entsteht. Die Simulation im Zwischenschritt nach CEB [2] zeigte, dass sich trotz des größeren E-Moduls ebenfalls sehr große Verschiebungen einstellen (siehe Tabelle 4.8).

	$t = 0$ min		$t = 20$ min		$t = 60$ min		$t = 120$ min		$t = 180$ min	
	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Biegemoment [kNm]:										
1 Fußpunkt rechts	-62	-65	-80	-82	-92	-90	-98	-90	-97	-71
2 Scheitel	91	92	26	19	1,5	-14	-8	-6	-8	23
3 linke Schulter	-69	-69	-119	-122	-141	-140	-146	-144	-146	-120
4 Fußpunkt links	220	220	211	213	198	205	198	205	200	-219
Normalkraft [kN]:										
1 Fußpunkt rechts	-424	-425	-420	-420	-419	-419	-419	-418	-419	-419
2 Scheitel	-156	-156	-163	-164	-165	-166	-166	-166	-166	-165
3 linke Schulter	-261	-260	-264	-264	-265	-265	-265	-265	-265	-265
4 Fußpunkt links	-351	-350	-344	-343	-343	-342	-342	-341	-341	-343
Verschiebungen [mm]:										
linke Schulter vert.	-15,9	-12,2	-16,2	-12,7	-16,3	-12,6	-16,1	-12,2	-15,8	-12,2
linke Schulter horiz.	-57,3	-45,4	-71,1	-59,5	-78,4	-65,3	-84,6	-67,7	-87,2	-69,4
First vert.	-30,8	-25,2	-34,3	-29,2	-36,2	-30,7	-37,6	-30,6	-37,3	-30,3
First horiz.	-46,8	-35,9	-57,8	-47,0	-63,4	-51,2	-67,5	-52,8	-69,1	-54,2

Tabelle 4.8: Ergebnisse der Simulation im Zwischenschritt für den Kreisquerschnitt Fall 1

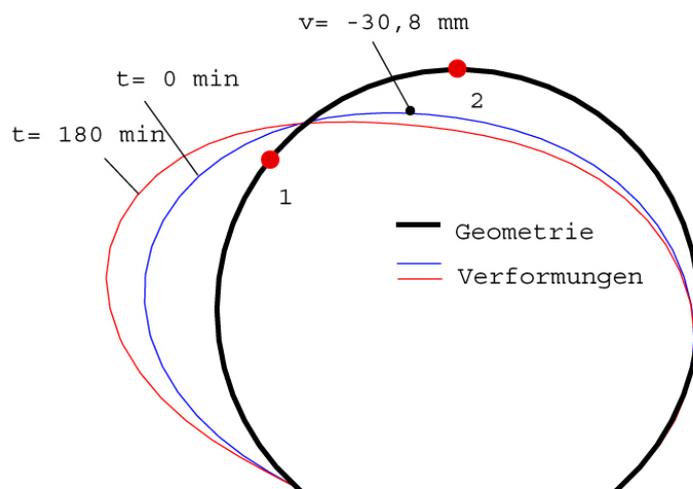


Abbildung 4.32: Verformungen des Kreisquerschnitt Fall 1 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

4.3.3 Nichtlineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB

Bei der nichtlinearen Simulation kommt es aufgrund der starken Abminderung der Systemsteifigkeit zum Versagen des Querschnitts unter der angesetzten thermischen Beanspruchung. Dies äußert sich dadurch, dass in der Berechnung keine Konvergenz erreicht werden konnte und die Verformungen schon nach kurzer Branddauer, d.h. $t = 20 \text{ min}$, die Verformungen unrealistisch groß wurden. Die Ergebnisse zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ entsprachen den Ergebnissen des Zwischenschritts (sowohl bei der Simulation nach EC 2-1-2 [1] als auch bei der Simulation nach CEB [2]), da das verwendete Materialmodell ident ist.

4.4 Kreisquerschnitt Fall 2

Wie in Kapitel 2.4.3 ausgeführt, stellt Fall 2 den gebetteten offenen Kreisquerschnitt dar. Zusätzlich ist der Kreis Fall 2 in den Fußpunkten horizontal unverschieblich gelagert. In vertikaler Richtung sind die Fußpunkte verschieblich gelagert.

4.4.1 Lineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB

Abbildung 4.33 zeigt den Spannungsverlauf von Fall 2 des Kreisquerschnitts im Scheitelpunkt für die lineare Simulation nach EC 2-1-2 [1]. Es zeigt sich, dass zum Zeitpunkt $t = 0$ min nur Druckspannungen wirken und dass der First kaum belastet ist. Erst nach Aufbringen der Temperaturbeanspruchung werden durch den thermischen Zwang an der Tunnelinnenseite Druckspannungen hervorgerufen. Durch den höheren Elastizitätsmodul bei der Simulation nach CEB [2] bauen sich stärkere Zwangsbeanspruchungen auf und es kommt wie schon bei den zuvor dargestellten Simulationen zu einem stärkeren Anstieg der Spannungen (siehe Schnittgrößen in Tabelle 4.9).

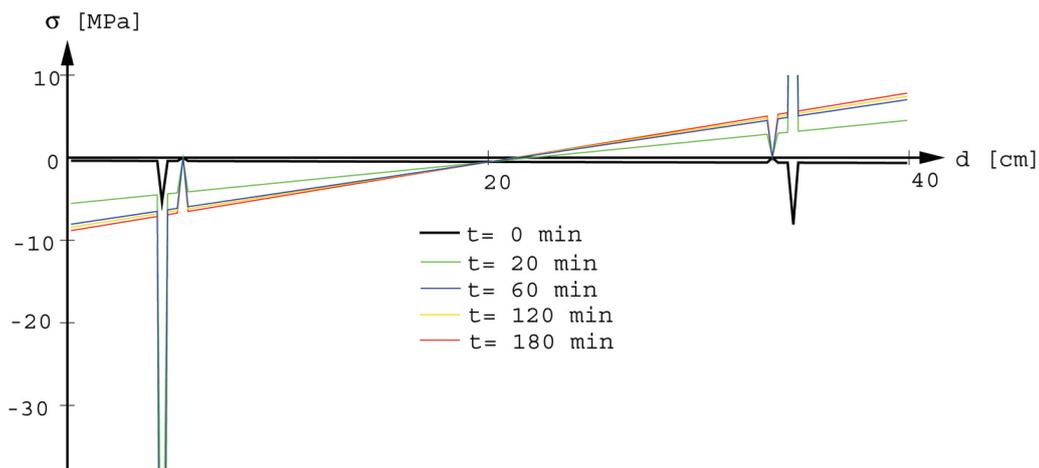


Abbildung 4.33: Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im Scheitel nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

Abbildung 4.34 stellt den Momentenverlauf für die lineare Simulation nach EC 2-1-2 [1] dar. Es ist zu erkennen, dass sich die größten positiven Momente ca. 1,5 m oberhalb der Fußpunkte einstellen (zum Zeitpunkt $t = 0$ min tritt ein Biegemoment von $M_{t=0} = 190$ kNm auf). Am Fußpunkt selbst kann sich aufgrund der Lagerung kein Moment aufbauen. Die vorhandenen positiven Momente bauen sich durch die ungünstige Position der Lagerung auf. Diese klingen jedoch schnell wieder ab. Die asymmetrische mechanische Belastung spiegelt sich im asymmetrischen Momentenverlauf wider. Während der thermischen Beanspruchung nimmt der Momentenverlauf einen beinahe symmetrischen Verlauf an. Das größte Biegemoment tritt bei der Simulation nach EC 2-1-2 [1] in der linken Schulter auf und beträgt nach einer Branddauer von $t = 120$ min $M_{t=120} = -256$ kNm. Bei der Simulation nach CEB [2] wächst das Moment deutlich höher an und beträgt an der gleichen

Stelle ebenfalls zum Zeitpunkt $t = 120$ min $M_{t=120} = -409$ kNm (siehe Tabelle 4.9). Dies kann wieder mit dem höheren E-Modul erklärt werden. Auch hier zeigt sich, dass die thermisch induzierte Momentenbeanspruchung nach 120 min aufgrund der Momentenumlagerung wieder abnimmt.

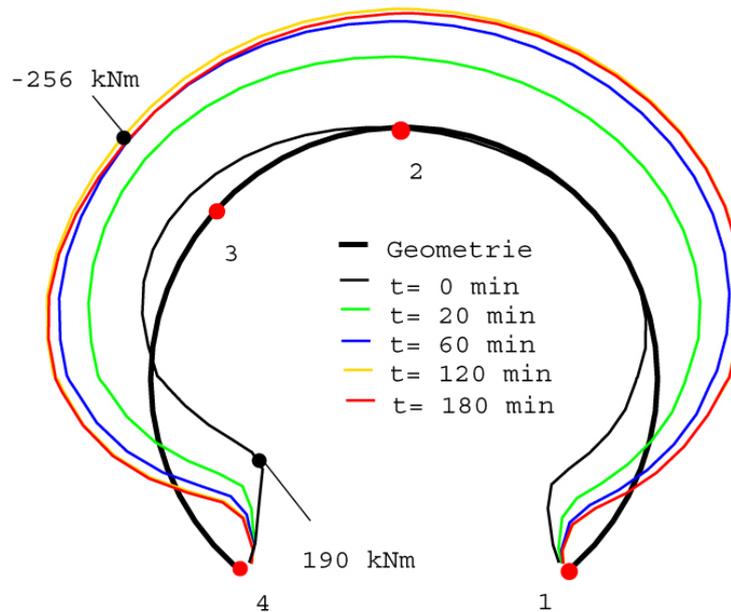


Abbildung 4.34: Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

Die Normalkraftbeanspruchung zeigt bei der linearen Simulation wieder nur geringe Veränderungen (siehe Abbildung 4.35). Wie zu erwarten war, treten die größten Normalkräfte in den Fußpunkten auf. Außerdem verringert sich die Normalkraftbeanspruchung in den Fußpunkten mit zunehmender Temperatur und erhöht sich im Bereich des Scheitels. Die größte Normalkraft tritt im linken Fußpunkt auf und beträgt zum Zeitpunkt $t = 0$ min $N_{t=0} = -424$ kN. Nach einer Branddauer von $t = 120$ min beträgt die Normalkraft in diesem Punkt nur noch $N_{t=120} = -392$ kN. Die Ergebnisse sind für weitere ausgewählte Punkte in Tabelle 4.9 dargestellt.

Die Verschiebungen des Querschnitts sind aufgrund der angesetzten Bettung eher gering. Nur im Bereich der Fußpunkte stellen sich im Vergleich zu den anderen Bereichen größere vertikale Verschiebungen ein. Durch die zunehmende Temperaturbeanspruchung kommt es zu einer Art Luftballoneffekt und der Querschnitt dehnt sich durch die thermische Ausdehnung des Materials in alle Richtungen aus. Dieser Effekt führt dazu, dass sich die größten Verformungen in den Fußpunkten einstellen. In den übrigen Bereichen nehmen die Verformungen eher ab, hier wählt der Querschnitt sozusagen den Weg des geringsten Widerstands, was aus den Lagerungsbedingungen herrührt. Die größten horizontalen Verschiebungen treten durch die mechanische Belastung im Bereich der rechten Schulter auf. Tabelle 4.9 zeigt die ermittelten Ergebnisse für die horizontalen und vertikalen Verschiebungen in der linken Schulter und im Scheitel des Querschnitts.

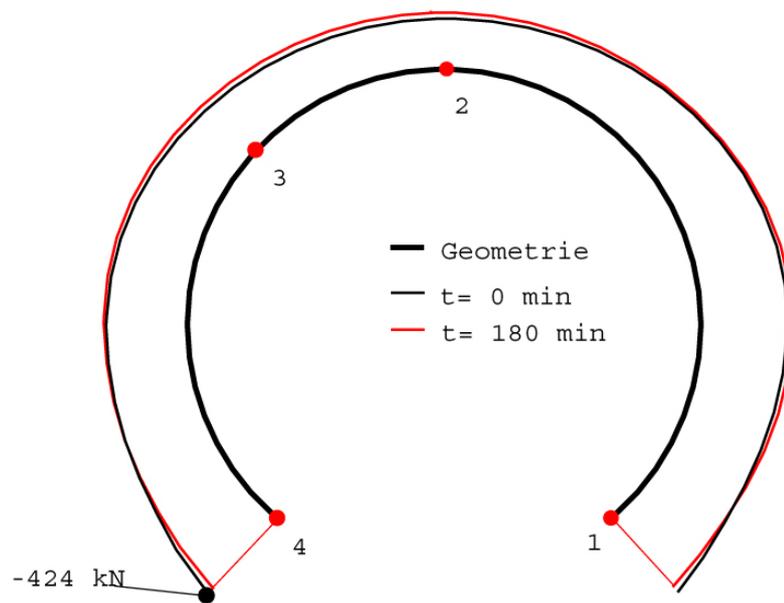


Abbildung 4.35: Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

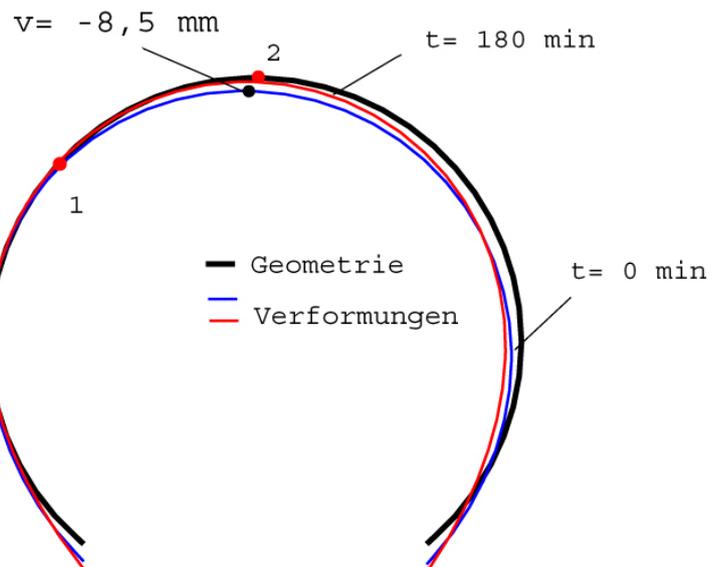


Abbildung 4.36: Verformungen des Kreisquerschnitts Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

	$t = 0 \text{ min}$		$t = 20 \text{ min}$		$t = 60 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$		$t = 180 \text{ min}$	
	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Biegemoment [kNm]:										
1 Fußpunkt rechts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 Scheitel	3	-11	-148	-279	-224	-397	-250	-411	-240	-361
3 linke Schulter	-59	-72	-187	-318	-242	-408	-256	-409	-242	-359
4 Fußpunkt links	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Normalkraft [kN]:										
1 Fußpunkt rechts	-424	-427	-403	-389	-395	-377	-392	-377	-394	-384
2 Scheitel	-210	-217	-224	-240	-232	-255	-236	-258	-236	-254
3 linke Schulter	-283	-290	-291	-308	-295	-316	-295	-316	-294	-312
4 Fußpunkt links	-413	-416	-392	-378	-383	-366	-381	-366	-376	-373
Verschiebungen [mm]:										
linke Schulter vert.	-8,3	-7,8	-8,0	-7,3	-7,7	-6,9	-7,2	-6,4	-6,6	-5,9
linke Schulter horiz.	-5,4	-3,7	-6,7	-5,9	-7,1	-6,4	-6,8	-6,1	-6,3	-5,6
First vert.	-8,5	-7,6	-6,4	-5,5	-4,7	-3,9	-3,4	-3,0	-2,5	-2,6
First horiz.	-5,7	-4,1	-7,6	-6,8	-8,1	-7,5	-7,6	-7,0	-6,6	-6,1

Tabelle 4.9: Ergebnisse der linearen Simulation für den Kreisquerschnitt Fall 2

4.4.2 Zwischenschritt nach EC 2-1-2 und CEB

Abbildung 4.37 zeigt die Spannungsverläufe für den Scheitelpunkt zu ausgewählten Zeitpunkten für den Zwischenschritt nach EC 2-1-2 [1]. Zum Zeitpunkt $t = 0$ bilden sich an diesem Punkt des Kreisquerschnitts Zugspannungen in der Bewehrung an der Tunnelinnen-seite. Durch die thermische Belastung kommt es zu einem Umschlagen dieser Spannungen. Auch hier zeigt sich wie auch bei der linearen Simulation, dass der Querschnitt im Scheitel eher gering belastet ist.

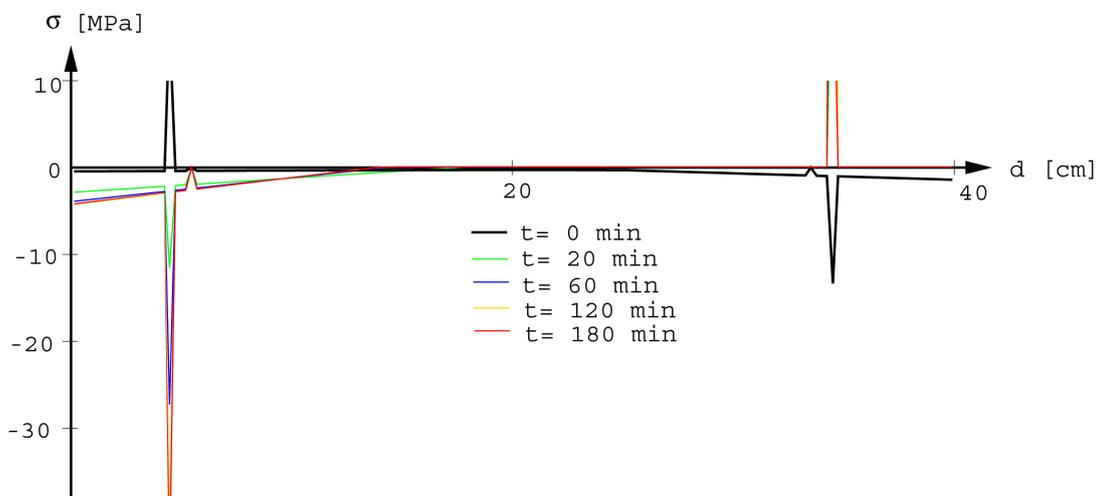


Abbildung 4.37: Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im Scheitel nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

Für den Momentenverlauf (siehe Abbildung 4.38) ergibt sich zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ ein ähnlicher Verlauf wie für die lineare Simulation. Es ist jedoch deutlich zu sehen, dass sich bei der Simulation im Zwischenschritt die thermischen Zwänge geringer ausbilden. Daraus resultiert ein geringerer Anstieg der negativen Momente mit zunehmender Brandbelastung. Abbildung 4.38 zeigt, dass sich die positiven Momente wie erwartet verringern und die negativen Momente anwachsen. Es ist sowohl bei der Simulation nach EC 2-1-2 [1] als

auch nach CEB [2] zu sehen, dass sich nur geringe Momente ergeben (siehe Tabelle 4.10).

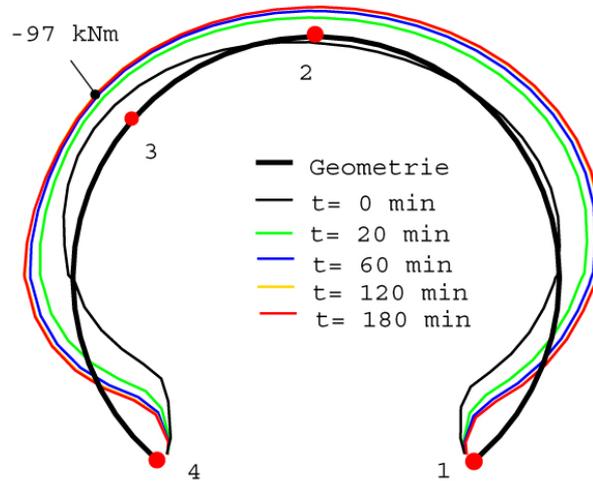


Abbildung 4.38: Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

Der Normalkraftverlauf zeigt auch im Zwischenschritt kaum Veränderungen durch die thermische Beanspruchung (siehe Abbildung 4.39). Die größte Normalkraft tritt wieder im linken Fußpunkt auf und resultiert aus der mechanischen Beanspruchung. Sie beträgt in der Simulation nach EC 2-1-2 [1] zum Zeitpunkt $t = 0$ min $N_{t=0} = -420$ kN. Mit ansteigender Temperatur sinkt hier die Normalkraft bis zum Zeitpunkt $t = 120$ min auf $N_{t=120} = -408$ kN ab. Die Ergebnisse für ausgewählte Zeitpunkte sind in Tabelle 4.10 angeführt.

Die Verformungen zeigen im Zwischenschritt im Vergleich zur linearen Simulation kaum Veränderungen. Es lässt sich als Unterschied erkennen, dass durch die mechanische Belastung im Bereich des Scheitels größere vertikale Verschiebungen auftreten. Die vertikalen Verschiebungen in den Fußpunkten zeigen ebenfalls keine großen Veränderungen gegenüber der linearen Simulation. Am Auffälligsten ist jedoch, dass der Querschnitt durch die thermische Belastung wieder annähernd in die Ausgangsposition zurückkehrt (wie schon bei der linearen Simulation, siehe Kapitel 4.4.1). Dies zeigen auch die numerischen Ergebnisse in Tabelle 4.10.

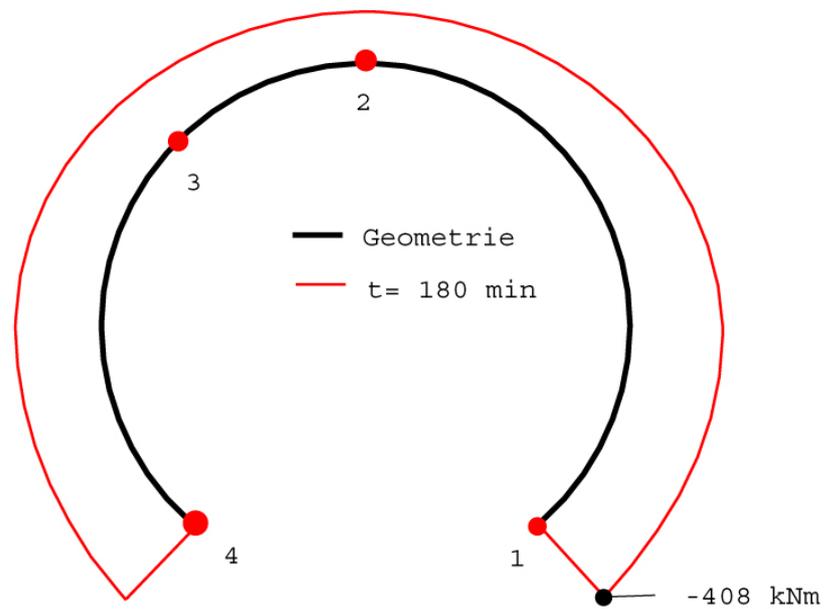


Abbildung 4.39: Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

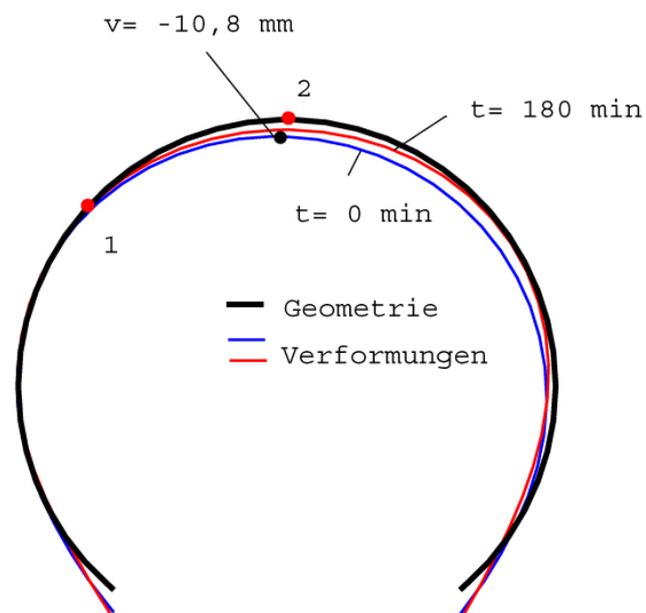


Abbildung 4.40: Verformungen des Kreisquerschnitts Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

	$t = 0 \text{ min}$		$t = 20 \text{ min}$		$t = 60 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$		$t = 180 \text{ min}$	
	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Biegemoment [kNm]:										
1 Fußpunkt rechts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 Scheitel	13	-10	-42	-49	-57	-61	-64	-63	-65	-32
3 linke Schulter	-47	-54	-80	-84	-92	-94	-98	-94	-97	-63
4 Fußpunkt links	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Normalkraft [kN]:										
1 Fußpunkt rechts	-420	-420	-413	-413	-410	-411	-408	-410	-408	-415
2 Scheitel	-204	-204	-209	-211	-209	-211	-209	-211	-209	-208
3 linke Schulter	-276	-278	-276	-277	-275	-276	-275	-276	-275	-274
4 Fußpunkt links	-409	-409	-402	-402	-399	-400	-397	-399	-398	-404
Verschiebungen [mm]:										
linke Schulter vert.	-9,5	-8,9	-8,9	-8,3	-8,3	-7,7	-7,5	-7,0	-6,7	-6,5
linke Schulter horiz.	-5,9	-5,5	-6,9	-6,7	-6,5	-6,4	-6,0	-6,0	-5,5	-5,5
First vert.	-10,8	-9,9	-10,3	-8,7	-9,0	-7,4	-7,6	-6,4	-6,5	-5,9
First horiz.	-5,5	-5,2	-5,5	-5,7	-4,6	-5,0	-3,4	-4,1	-2,4	-3,2

Tabelle 4.10: Ergebnisse der Simulation im Zwischenschritt für den Kreisquerschnitt Fall 2

4.4.3 Nichtlineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB

In Abbildung 4.41 ist der Spannungsverlauf für den offenen Kreisquerschnitt (Fall 2) im First dargestellt. Wie schon in der linearen Simulation und in der Simulation im Zwischenschritt, kommt es auch in der nichtlinearen Simulation zum Umschlagen der Spannungen im First. Weiters ist zu erkennen, dass die Spannungen zufolge thermischer Belastung die temperaturabhängigen Festigkeiten erreichen. Unter Berücksichtigung der thermischen Festigkeiten nach CEB [2] kommt es durch den erheblich stärkeren thermischen Zwang zu deutlich höheren Spannungen über die Querschnittsdicke (siehe Schnittgrößen in Tabelle 4.11).

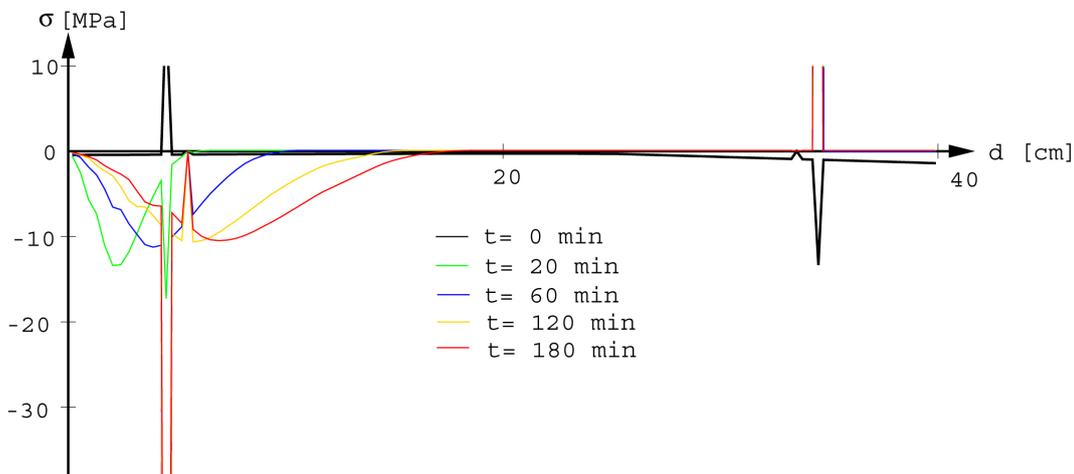


Abbildung 4.41: Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im First für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

Der Momentenverlauf in Abbildung 4.42 zeigt, dass es zu einer ungleichmäßigen Erhöhung der Biegemomente durch die thermische Belastung kommt. Es lässt sich jedoch deutlich erkennen, dass sich der ungleichmäßige Momentenverlauf mit zunehmender Temperaturbelastung gleichmäßig über den Kreisquerschnitt verteilt. Abbildung 4.42 zeigt, dass sich

die Biegemomente stark in Richtung der Fußpunkte verlagern, wodurch es zu einer Abminderung der positiven Biegemomente in diesen Bereichen kommt. Es ist zum Zeitpunkt $t = 180$ min nur mehr ein geringer Bereich des Querschnitts durch positive Biegemomente beansprucht. Unmittelbar an den Fußpunkten ist die Momentenbeanspruchung gleich null, was sich durch das statische System erklären lässt. Das Biegemoment in der linken Schulter steigt von $M_{t=0} = -47$ kNm zum Zeitpunkt $t = 0$ min auf $M_{t=120} = -194$ kNm zum Zeitpunkt $t = 120$ min an. Unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach CEB [2] ist der Anstieg der negativen Biegemomente durch den größeren thermischen Zwang deutlich mehr ausgeprägt (siehe Tabelle 4.11).

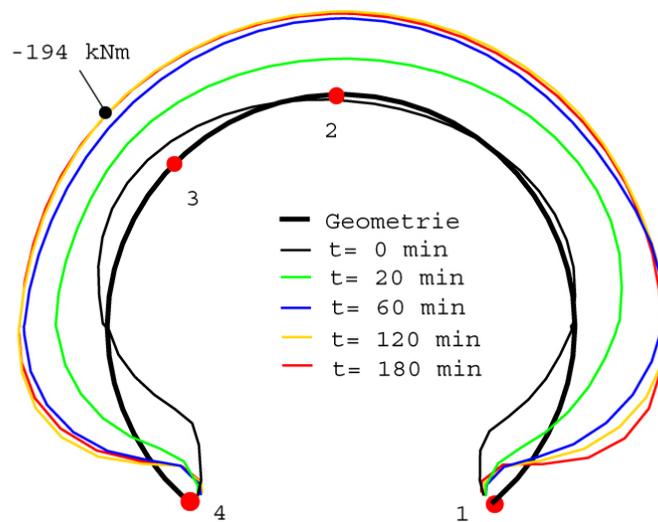


Abbildung 4.42: Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

Der Normalkraftverlauf (siehe Abbildung 4.43) zeigt im Vergleich zur linearen Simulation und zum Zwischenschritt einen deutlichen Anstieg. Hier macht sich der Ansatz einer Bettung bemerkbar. Durch die thermische Beanspruchung kommt es zur Ausdehnung des Querschnitts, die durch die Bettung behindert wird. Dies wirkt wie eine radiale Gleichlast auf den Kreisquerschnitt und erhöht die Normalkräfte. Unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] tritt die größte Normalkraft im rechten Fußpunkt auf und beträgt zum Zeitpunkt $t = 0$ min $N_{t=0} = -420$ kN. Mit der thermischen Beanspruchung steigt die Normalkraft auf $N_{t=180} = -666$ kN an. Unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach CEB [2] steigt die Normalkraft über den gesamten Querschnitt deutlich stärker an, da der Querschnitt durch die höhere Steifigkeit einen größeren thermischen Zwang aufbaut (siehe Tabelle 4.11).

Hinsichtlich der Verformungen (siehe Abbildung 4.44) lässt sich sagen, dass sich der Kreisquerschnitt durch die angesetzte Bettung sehr steif verhält. Zu Beginn kommt es durch die mechanische Belastung zu einer vertikalen Verschiebung im First von $v_{t=0} = -10,8$ mm. Durch die Brandbelastung dehnt sich der Querschnitt stark aus und die vertikale Verschiebung im First nimmt ab ($v_{t=180} = -1,1$ mm zum Zeitpunkt $t = 180$ min). Einzig die vertikale Verschiebung in den Fußpunkten nimmt deutlich zu. Dies geschieht, da sich der

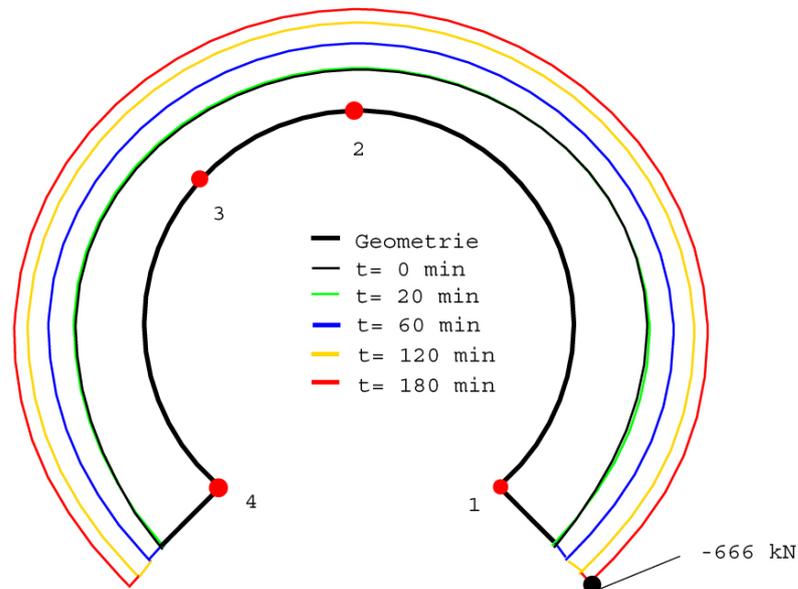


Abbildung 4.43: Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

Querschnitt weiter ausdehnen will und dies durch die angesetzte Bettung verhindert wird. Die vertikale Verschiebung in der linken Schulter nimmt ebenfalls von $v_{t=0} = -9,5$ mm zum Zeitpunkt $t = 0$ min auf $v_{t=180} = -7,8$ mm zum Zeitpunkt $t = 180$ min ab. Weitere Ergebnisse für ausgewählte Punkte sind in Tabelle 4.11 angeführt.

	$t = 0$ min		$t = 20$ min		$t = 60$ min		$t = 120$ min		$t = 180$ min	
	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Biegemoment [kNm]:										
1 Fußpunkt rechts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 Scheitel	13	10	-82	-143	-174	-213	-190	-231	-185	-231
3 linke Schulter	-47	-54	-110	-133	-169	-222	-194	-283	-190	-236
4 Fußpunkt links	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Normalkraft [kN]:										
1 Fußpunkt rechts	-420	-420	-407	-436	-505	-672	-601	-895	-666	-1033
2 Scheitel	-204	-205	-211	-256	-334	-516	-437	-752	-504	-895
3 linke Schulter	-276	-278	-276	-311	-391	-577	-496	-813	-563	-955
4 Fußpunkt links	-409	-409	-396	-425	-494	-661	-590	-884	-655	-1022
Verschiebungen [mm]:										
linke Schulter vert.	-9,5	-8,9	-7,3	-5,7	-6,1	-7,3	-7,2	-9,4	-7,8	-10,7
linke Schulter horiz.	-5,9	-5,5	-5,6	-5,7	-6,4	-8,5	-7,8	-11,6	-8,8	-13,6
First vert.	-10,8	-9,9	-7,5	-0,1	-0,3	-1,2	-0,8	-2,2	-1,1	-2,8
First horiz.	-5,5	-5,2	-2,1	-2,5	-1,5	-0,9	-1,4	-0,8	-1,3	-0,8

Tabelle 4.11: Ergebnisse der nichtlinearen Simulation für den geschlossenen Kreisquerschnitt Fall 2

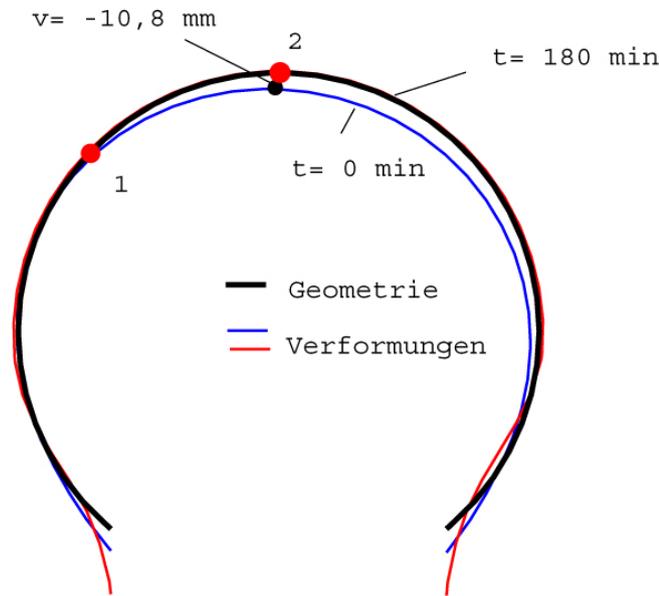


Abbildung 4.44: Verschiebungen für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

4.5 Kreisquerschnitt Fall 3

Wie in Kapitel 2.4.3 ausgeführt, stellt Fall 3 den gebetteten geschlossenen Kreisquerschnitt dar. Zusätzlich wird der Kreis Fall 3 im Fußpunkt und im First horizontal durch eine sehr weiche Feder festgehalten um eine Rotation des Kreisquerschnitts um die Achse zu verhindern.

4.5.1 Lineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB

Der Spannungsverlauf der linearen Simulation für den Kreisquerschnitt Fall 3 (siehe Abbildung 4.45) zeigt keinen wesentlichen Unterschied zu den bereits beschriebenen Querschnitten. Hier zeichnet sich ab, dass sich der Spannungsverlauf nach $t = 60$ min nur mehr geringfügig ändert. Zum Zeitpunkt $t = 0$ min ist im Firstpunkt über die gesamte Querschnittsdicke die Festigkeit nicht überschritten (siehe Abbildung 4.45). Es lässt sich ebenfalls erkennen, dass es im Zuge der Brandbelastung zu einem Umschlagen der Spannungen kommt.

Abbildung 4.46 zeigt den Momentenverlauf über den Querschnitt für die lineare Simulation unter Verwendung des Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1]. Es lässt sich deutlich erkennen, dass der Kreisquerschnitt im Fall 3 zum Zeitpunkt $t = 0$ min nur geringe Momente aufweist und dass sich die asymmetrische Belastung im Momentenverlauf abzeichnet. Erst nach Beginn der Brandbelastung wachsen die Biegemomente stark in den negativen Bereich an. Lediglich im Bereich des Fußpunktes bleibt der ursprüngliche Momentenverlauf zum Zeitpunkt $t = 0$ min mehr oder weniger erhalten, da die Brandlast erst ab einer Höhe von 1,0 m angesetzt wurde. Mit fortschreitender Brandbelastung zeigt sich, dass der Momentenverlauf symmetrisch wird. Dies geschieht weil sich die temperaturinduzierten

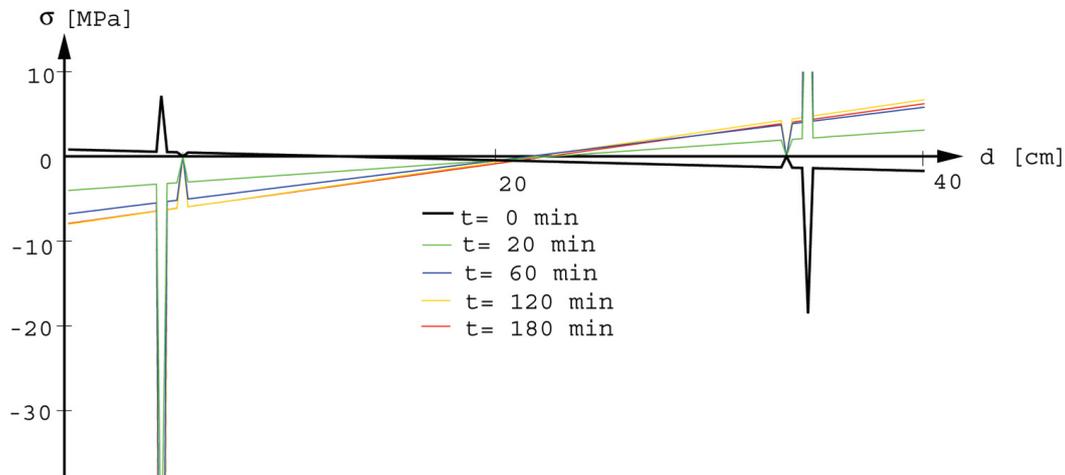


Abbildung 4.45: Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im First für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

Biegemomente gleichmäßig in den thermisch beanspruchten Teilen des Querschnitts erhöhen. Die größten Biegemomente treten zum Zeitpunkt $t = 120$ min auf. Im First beträgt das Biegemoment nach $t = 120$ min $M_{t=120} = -214$ kN. Die lineare Simulation unter Berücksichtigung des Materialverhaltens nach CEB ergibt auch für den geschlossenen Kreisquerschnitt (Fall 3) einen deutlich höheren Zuwachs der Momentenbeanspruchung als unter Berücksichtigung des Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] (siehe Tabelle 4.12). Dies ist wieder auf den höheren E-Modul zurückzuführen. Bei der linearen Simulation nach CEB [2] beträgt das Biegemoment zum Zeitpunkt $t = 120$ min $M_{t=120} = -332$ kN. Hier zeigt sich weiters, dass die Momentenbeanspruchung zum Zeitpunkt $t = 180$ min geringer ist als jene zum Zeitpunkt $t = 60$ min (siehe Tabelle 4.12).

Bei Betrachtung des Normkraftverlaufs (siehe Abbildung 4.47) zeigt sich, dass dieser in etwa symmetrisch ist. Auf der linken Seite ergibt sich jedoch eine geringfügig höhere Normkraftbeanspruchung. Die größte Normkraft tritt für alle Zeitpunkte in der Mitte der Sohle des Querschnitts auf. Unter Berücksichtigung des Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] ergibt sich hier zum Zeitpunkt $t = 0$ min eine Normkraft von $N_{t=0} = -536$ kN. Diese steigt mit andauernder Branddauer an und beträgt zum Zeitpunkt $t = 180$ min auf $N_{t=180} = -670$ kN. Hier lässt sich durch den Vergleich des Momentenverlaufs mit dem Normkraftverlauf erkennen, dass sich die Normkräfte im Querschnitt zur gleichen Zeit (ab dem Zeitpunkt $t = 60$ min) erhöhen wie die Zunahme der Momentenbeanspruchung zum Stillstand kommt. Der Anstieg der Normkraft lässt sich beim gebetteten Querschnitt durch die thermische Ausdehnung des Materials und dessen Behinderung durch den Ansatz eben dieser Bettung erklären. Dasselbe Verhalten des Querschnitts zeigt auch die lineare Simulation unter Berücksichtigung des Materialverhaltens nach CEB [2] (siehe Tabelle 4.12).

Die Verschiebungen zeigen in der linearen Simulation im Zuge der Brandbelastung kaum Veränderungen (siehe Abbildung 4.48). Es zeigt sich jedoch, dass der geschlossene Kreisquerschnitt unter Berücksichtigung einer Bettung zum Zeitpunkt $t = 0$ min eine größere

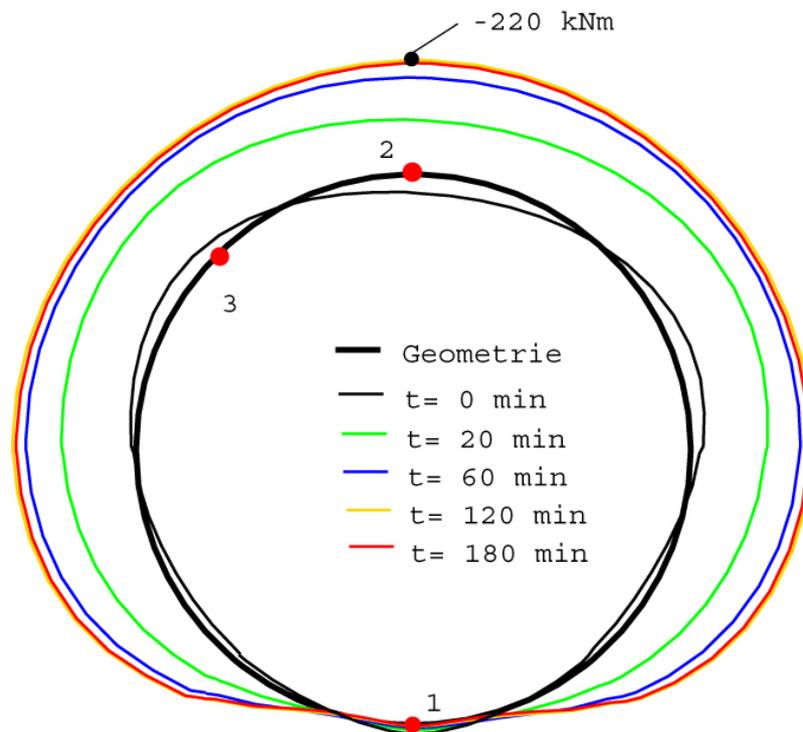


Abbildung 4.46: Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

Verformung erfährt als zum Zeitpunkt $t = 180$ min. Die größte vertikale Verschiebung tritt zum Zeitpunkt $t = 0$ min durch die mechanische Belastung im First des Querschnitts auf und beträgt $v_{t=0} = -3,9$ mm. Die größte horizontale Verschiebung in der linken Schulter tritt zum Zeitpunkt $t = 180$ min auf und beträgt $u_{t=0} = -1,9$ mm. In diesem Bereich nimmt die Größe der Verschiebung mit andauernder Brandbelastung zuerst ab und anschließend wieder zu. Die numerischen Werte der Schnittgrößen und Verformungen für ausgewählte Punkte des Querschnitts sind in Tabelle 4.12 aufgelistet.

	$t = 0$ min		$t = 20$ min		$t = 60$ min		$t = 120$ min		$t = 180$ min	
Biegemoment [kNm]:	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
1 Fußpunkt	-19	-23	-12	-20	-7	-18	-4	-13	-3	-12
2 Scheitel	36	42	-105	-195	-186	-314	-220	-332	-214	-292
3 linke Schulter	-30	-35	-151	-251	-202	-330	-221	-341	-215	-300
Normalkraft [kN]:	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
1 Fußpunkt	-536	-533	-511	-485	-512	-487	-584	-553	-670	-625
2 Scheitel	-190	-184	-200	-193	-221	-224	-302	-295	-386	-358
3 linke Schulter	-277	-274	-282	-278	-297	-299	-374	-369	-458	-432
Verschiebungen [mm]:	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
linke Schulter vert.	-2,3	-2,0	-1,4	-1,1	-0,7	-0,5	-0,4	-0,3	-0,3	-0,2
linke Schulter horiz.	-1,7	-1,5	-1,5	-1,3	-1,3	-1,2	-1,5	-1,4	-1,9	-1,7
First vert.	-3,9	-3,0	-2,4	-1,6	-0,6	-0,2	-0,2	-0,2	-0,6	0,5
First horiz.	-1,0	-1,0	-0,7	-0,6	-0,4	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4

Tabelle 4.12: Ergebnisse der linearen Simulation für den geschlossenen Kreisquerschnitt Fall 3

4.5.2 Zwischenschritt nach EC 2-1-2 und CEB

In Abbildung 4.49 ist der Spannungsverlauf im First des Querschnitts für den Zwischenschritt unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Materialparameter nach EC 2-1-2 [1] dargestellt. Wie zu erwarten war, sind die Spannungen über die Querschnittsdicke kleiner als jene der linearen Simulation. Zum Zeitpunkt $t = 0$ min sind die Zugspannungen im Bewehrungsstahl im Zwischenschritt jedoch höher als in der linearen Simulation. Der Grund hierfür ist, dass die Zugfestigkeit des Betons mit 0 MPa angesetzt wurde, wodurch die Zugspannungen nur durch den Bewehrungsstahl aufgenommen werden. Auch hier kommt es im Zuge der Brandbelastung zu einem Umschlagen der Spannungen.

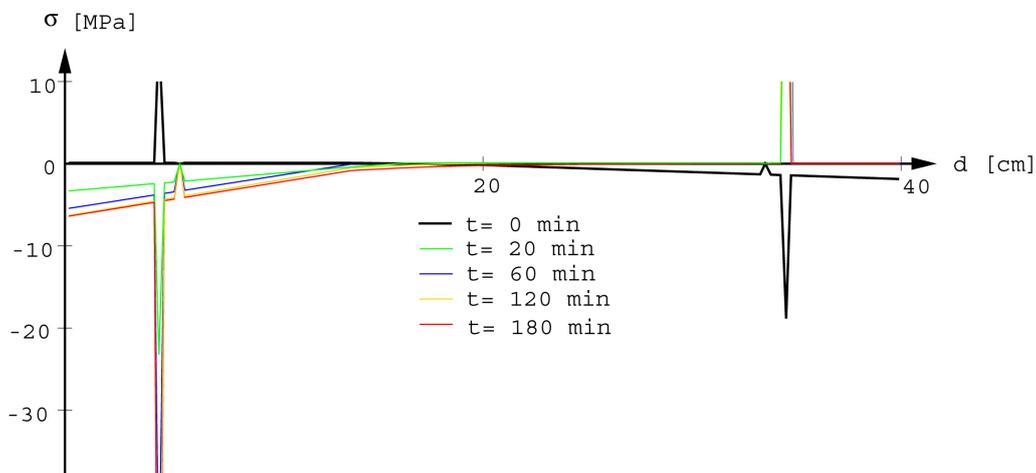


Abbildung 4.49: Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im First für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

Der Momentenverlauf (siehe Abbildung 4.50) zeigt zum Zeitpunkt $t = 0$ min kaum einen Unterschied zur linearen Simulation. Der Unterschied wird erst nach dem Ansetzen der Brandlast deutlich. Die Biegemomente sind deutlich kleiner als bei der linearen Simulation. Bei der Simulation im Zwischenschritt unter Verwendung des Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] ergibt sich im First ein Biegemoment zum Zeitpunkt $t = 180$ min von

$M_{t=180} = -101 \text{ kNm}$. Auch im Zwischenschritt lässt sich deutlich erkennen, dass der Bereich der Sohle nicht thermisch belastet wird. Unter Ansatz des thermischen Materialverhaltens nach CEB [2] ergab sich ein ähnlicher Momentenverlauf (siehe Tabelle 4.13), jedoch zeigte sich hier, dass die größten Biegemomente zum Zeitpunkt $t = 120 \text{ min}$ auftreten (mit $M_{t=120} = -96 \text{ kNm}$).

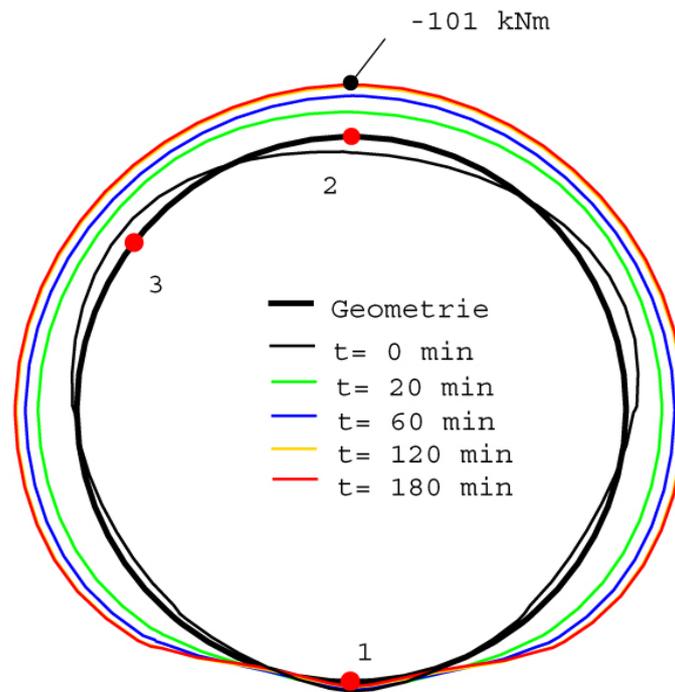


Abbildung 4.50: Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

In Abbildung 4.51 ist der Normalkraftverlauf zu unterschiedlichen Zeitpunkten dargestellt. Dieser zeigt auch im Zwischenschritt einen starken Zuwachs mit andauernder thermischer Belastung. Wie bei der linearen Simulation tritt die größte Normalkraft zu jedem Zeitpunkt der Simulation in der Mitte der Sohle auf. Zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ beträgt die Normalkraft an dieser Stelle $N_{t=0} = -537 \text{ kN}$. Diese steigt im Zwischenschritt unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] auf $N_{t=180} = -806 \text{ kN}$ zum Zeitpunkt $t = 180 \text{ min}$ an. Für die Simulation im Zwischenschritt nach CEB [2] bilden sich ähnliche Normalkräfte aus (siehe Tabelle 4.13).

Im Unterschied zu den anderen Querschnitten (Rechteckquerschnitt und Gewölbequerschnitt) treten für den Kreisquerschnitt Fall 3 nur sehr kleine Verschiebungen bei der Simulation im Zwischenschritt auf, der Querschnitt bleibt annähernd unverformt (siehe Abbildung 4.52). Dies lässt sich durch die angesetzte Bettung erklären, welche die Verformungen im Vergleich zu den ungebetteten Querschnitten behindert. Auch hier lässt sich erkennen, dass sich der Kreisquerschnitt durch die thermische Belastung ausdehnt und sich somit die durch die mechanische Belastung hervorgerufenen Verschiebungen (Vertikal- und Horizontalverschiebungen) verringern. Die größten Verschiebungen treten wie bei der linearen Simulation auch im Zwischenschritt zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ auf. Dies gilt sowohl für

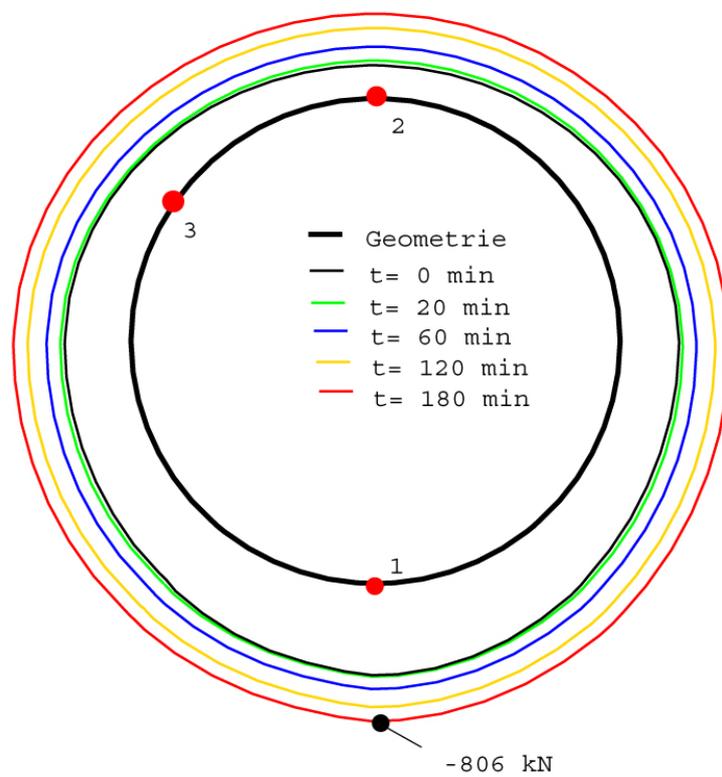


Abbildung 4.51: Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

die Simulation unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] als auch nach CEB [2].

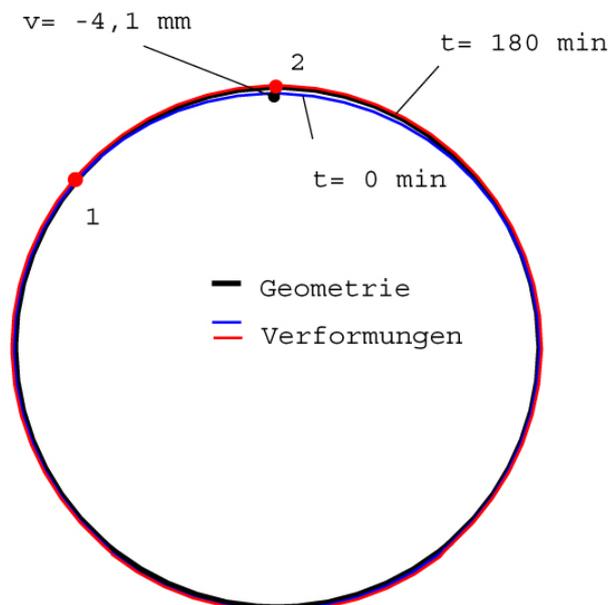


Abbildung 4.52: Verformungen für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

	$t = 0 \text{ min}$		$t = 20 \text{ min}$		$t = 60 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$		$t = 180 \text{ min}$	
Biegemoment [kNm]:	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
1 Fußpunkt	-20	-24	-16	-30	-14	-28	-11	-26	-10	-24
2 Scheitel	31	34	-48	-56	-79	-85	-98	-96	-101	-69
3 linke Schulter	-30	-35	-65	-69	-84	-91	-102	-101	-105	-73
Normalkraft [kN]:	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
1 Fußpunkt	-537	-535	-545	-552	-619	-644	-723	-729	-806	-800
2 Scheitel	-193	-189	-220	-225	-301	-324	-410	-412	-494	-478
3 linke Schulter	-279	-277	-296	-300	-374	-397	-483	-486	-567	-551
Verschiebungen [mm]:	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
linke Schulter vert.	-2,3	-2,0	-1,0	-0,7	-0,5	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2	-0,2
linke Schulter horiz.	-1,7	-1,5	-1,6	-1,4	-1,6	-1,6	-2,1	-0,2	-2,4	-2,3
First vert.	-4,1	-3,3	-1,9	-0,9	0,2	0,3	0,7	0,7	1,0	1,0
First horiz.	-1,0	-0,9	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4

Tabelle 4.13: Ergebnisse der Simulation im Zwischenschritt für den geschlossenen Kreisquerschnitt Fall 3

4.5.3 Nichtlineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB

Bei der nichtlinearen Simulation zeigt sich die schon bekannte Spannungsglocke (siehe Abbildung 4.53), welche sich mit zunehmender thermischer Beanspruchung vergrößert und ins Innere des Querschnitts verlagert. Zum Zeitpunkt $t = 0$ min entspricht der Spannungsverlauf auch hier jenem der Simulation im Zwischenschritt. Der Spannungsverlauf unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] zeigt, dass unmittelbar nach dem Aufbringen der thermischen Beanspruchung die zulässigen temperaturabhängigen Festigkeiten erreicht werden. Man kann auch sehr gut erkennen, dass die Spannungsglocke mit zunehmender Branddauer flacher wird (siehe Abbildung 4.53).

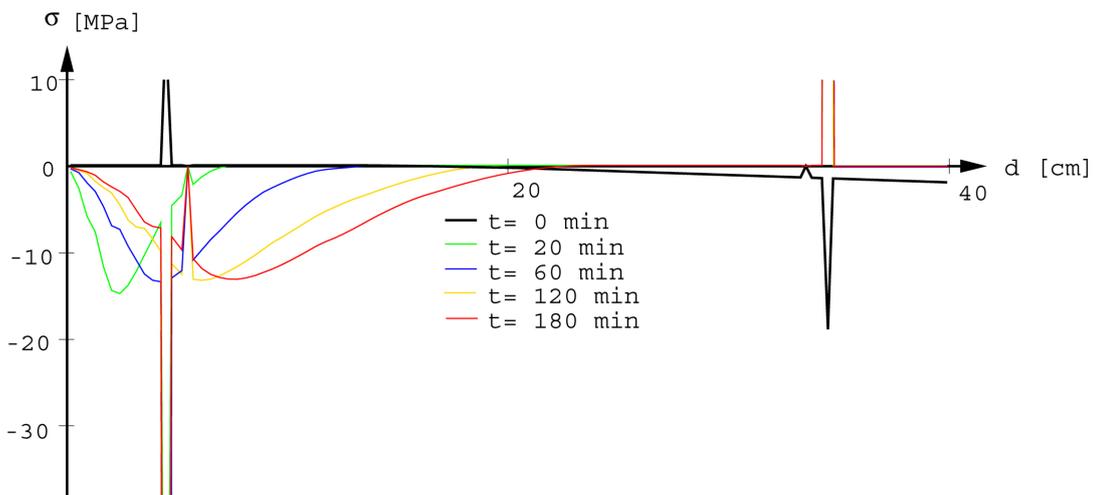


Abbildung 4.53: Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im First für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

Wie in der linearen Simulation und bei der Simulation im Zwischenschritt, lässt sich auch in der nichtlinearen Simulation nur zum Zeitpunkt $t = 0$ min die asymmetrische mechanische Belastung am Momentenverlauf (siehe Abbildung 4.54) erkennen. Schon zum Zeitpunkt $t = 20$ min wird der Momentenverlauf annähernd symmetrisch. Ab dem Zeitpunkt $t = 60$ min ist kaum mehr eine Veränderung der Biegemomente zu sehen. Es ist zu erkennen, dass sich bei der nichtlinearen Simulation die Biegemomente viel näher in Richtung des Fußpunktes des Kreisquerschnitts umlagern. Das größte Biegemoment im First tritt zum Zeitpunkt $t = 120$ min auf und beträgt $M_{t=120} = -204$ kNm. Außerdem ist deutlich zu sehen, dass die thermisch belasteten Bereiche des Kreisquerschnitts (ab 1,0 m über Fußpunkt) annähernd gleich große Biegemomente aufweisen. Bei der nichtlinearen Simulation unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach CEB [2] zeigte sich ein ähnlicher Momentenverlauf (siehe Tabelle 4.14). Hier lag der Unterschied nur darin, dass sich die Biegemomente durch den höheren E-Modul stärker ausbilden und noch stärker in Richtung des Fußpunktes verlagern. Unter Berücksichtigung des Materialverhaltens nach CEB [2] ergab sich das größte Biegemoment im First zum Zeitpunkt $t = 120$ min zu $M_{t=120} = -301$ kNm.

In Abbildung 4.55 ist der Normalkraftverlauf über den Kreisquerschnitt (Fall 3) unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] dargestellt. Zum

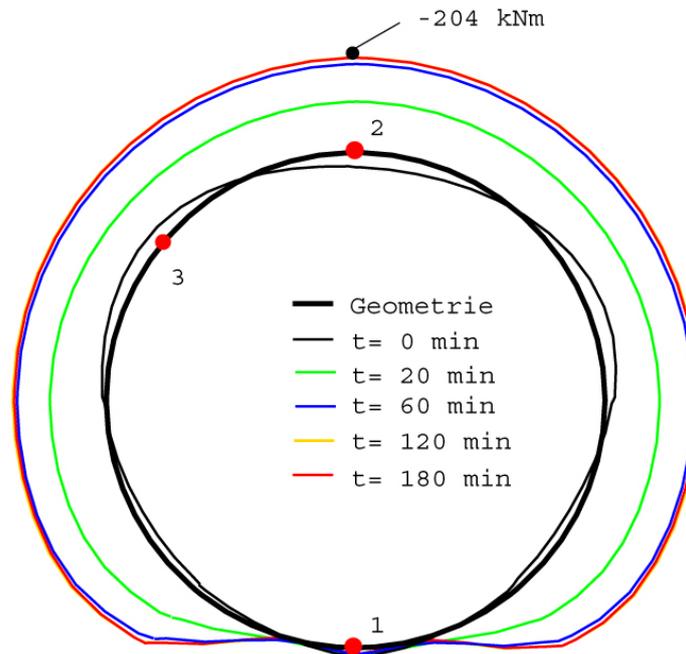


Abbildung 4.54: Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ zeigt sich, dass die Normalkraft auf der linken Seite des Querschnitts geringfügig größer ist als auf der rechten Seite (asymmetrische mechanische Belastung). Wie schon in den vorangegangenen Simulationen (lineare Simulation und Simulation im Zwischenschritt), weist der Kreisquerschnitt im Fußpunkt zu jedem Zeitpunkt der Simulation die größte Normalkraft auf. Dies zeigte sich auch unter Berücksichtigung des Materialverhaltens nach CEB [2] (siehe Tabelle 4.14). Nach EC 2-1-2 [1] ergab sich ein Anstieg der Normalkraft im Fußpunkt von $N_{t=0} = -537 \text{ kN}$ zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ auf $N_{t=180} = -1391 \text{ kN}$ zum Zeitpunkt $t = 180 \text{ min}$. Bei Ansatz des thermischen Materialverhaltens nach CEB [2] war dieser Anstieg deutlich größer (siehe Tabelle 4.14). Hier ergab sich ein Anstieg der Normalkraft im Fußpunkt von $N_{t=0} = -535 \text{ kN}$ zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ auf $N_{t=180} = -2050 \text{ kN}$ zum Zeitpunkt $t = 180 \text{ min}$. Dies lässt sich nur durch die thermische Ausdehnung und die höhere Steifigkeit des Querschnitts erklären, da sich der Kreisquerschnitt bei der nichtlinearen Simulation vergrößert und gegen die angesetzte Bettung drückt. Dadurch wird eine radiale Last am Querschnitt aufgebracht, welche den starken Anstieg der Normalkraft verursacht.

Wie schon erwähnt, wird der Kreisquerschnitt nach dem Aufbringen der mechanischen Belastung zusammengedrückt, wodurch sich die negativen vertikalen Verschiebungen erklären lassen (siehe Abbildung 4.56). Mit fortschreitender Branddauer dehnt sich der Querschnitt aus und die Verschiebungen nehmen stark ab. Zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ beträgt die vertikale Verschiebung im First $v_{t=0} = -2,3 \text{ mm}$ und zum Zeitpunkt $t = 180 \text{ min}$ $v_{t=180} = -0,1 \text{ mm}$. Die Ergebnisse sind für ausgewählte Punkte in Tabelle 4.14 zusammengefasst.

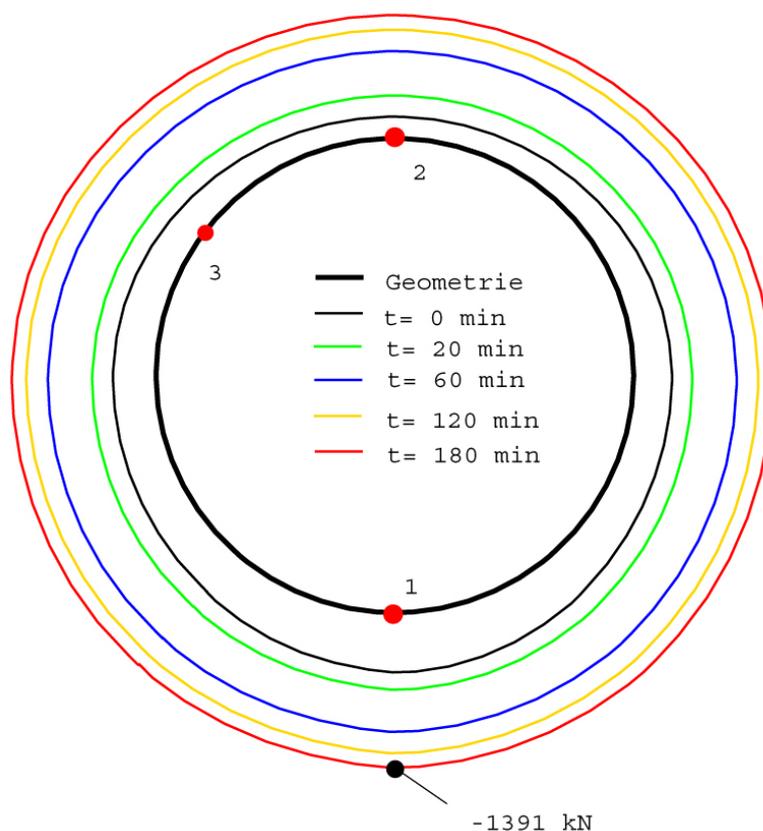


Abbildung 4.55: Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

	$t = 0 \text{ min}$		$t = 20 \text{ min}$		$t = 60 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$		$t = 180 \text{ min}$	
	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Biegemoment [kNm]:										
1 Fußpunkt	-20	-23	-16	-33	-15	-35	-15	-35	-15	-32
2 Scheitel	31	34	-109	-164	-190	-270	-204	-301	-203	-297
3 linke Schulter	-30	-35	-110	-164	-187	-268	-200	-297	-198	-297
Normalkraft [kN]:										
1 Fußpunkt	-537	-535	-693	-913	-1071	-1463	-1261	-1818	-1391	-2050
2 Scheitel	-193	-189	-382	-610	-778	-1184	-972	-1547	-1101	-1778
3 linke Schulter	-279	-277	-454	-683	-850	-1257	-1044	-1620	-1173	-1852
Verschiebungen [mm]:										
linke Schulter vert.	-2,3	-2,0	-0,8	-0,5	-0,4	0,3	-0,1	0,9	0,1	1,3
linke Schulter horiz.	-1,7	-1,5	-2,3	-3,3	-4,1	-5,8	-5,0	-7,4	-5,6	-8,4
First vert.	-4,1	-3,3	0,6	1,5	2,2	4,0	3,1	5,5	3,6	6,6
First horiz.	-1,0	-0,9	-0,6	-0,6	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7

Tabelle 4.14: Ergebnisse der nichtlinearen Simulation für den geschlossenen Kreisquerschnitt Fall 3

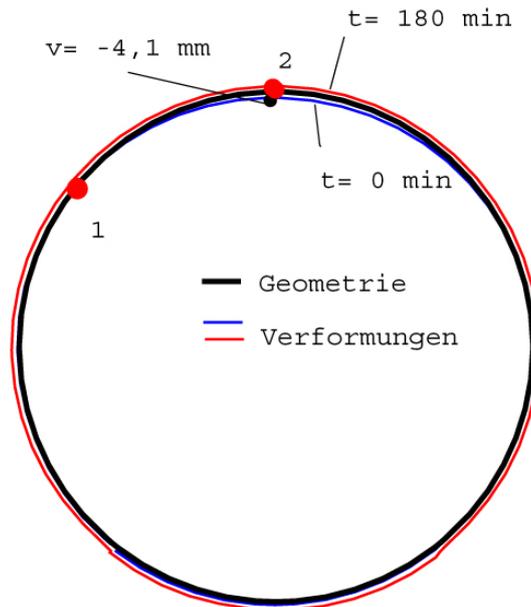


Abbildung 4.56: Verformungen des Kreisquerschnitts Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die nicht-lineare Simulation

4.6 Kreisquerschnitt Fall 4 (unbewehrt)

Wie in Kapitel 2.4.3 ausgeführt, stellt Fall 4 den gebetteten geschlossenen Kreisquerschnitt dar. Wie beim Kreis Fall 3 wird im Fußpunkt und im First eine sehr weiche Feder angesetzt um eine Rotation des Kreisquerschnitts um die Achse zu verhindern. In diesem Fall wird eine unbewehrte Tunnelinnenschale in offener Bauweise simuliert.

4.6.1 Lineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB

Im Kreisquerschnitt Fall 4 lässt sich anhand des Spannungsverlaufs (siehe Abbildung 4.57) deutlich erkennen, dass der Querschnitt unbewehrt berechnet wurde. Im Vergleich zu den vorangegangenen Simulationen fehlen hier die Spannungsspitzen, die den Bewehrungsstahl repräsentieren. Zum Zeitpunkt $t = 0$ min weist der Querschnitt im First nur Druckspannungen (von geringer Größe) auf. Erst nach dem Aufbringen der thermischen Belastung treten Druckspannungen an der Tunnelinnenseite und Zugspannungen an der Tunnelaußenseite auf. Durch die vorhandene Druckspannung verschiebt sich der Spannungsnullpunkt im Querschnitt nach außen.

In Abbildung 4.58 ist der Momentenverlauf dargestellt. Hier lässt sich erkennen, dass der Kreisquerschnitt zum Zeitpunkt $t = 0$ min kaum durch Biegemomente beansprucht wird. In den ersten 20 Minuten der Brandbelastung weist der unbewehrte Kreisquerschnitt den größten Anstieg der Momentenbeanspruchung auf, ab dem Zeitpunkt $t = 60$ min bleibt der Momentenverlauf nahezu unverändert. Weiters spiegelt sich die symmetrische mechanische Belastung aus dem Wasserdruck (horizontaler Wasserdruck und Auftrieb) in der Momentenlinie wider. Das größte Biegemoment im First tritt zum Zeitpunkt $t = 120$ min

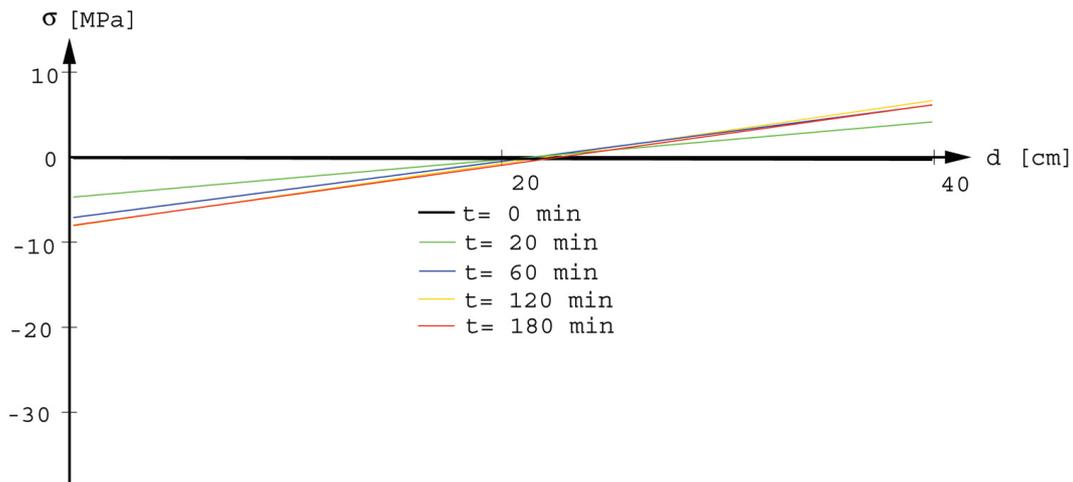


Abbildung 4.57: Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im First für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

auf und beträgt $M_{t=120} = -198$ kNm. Die lineare Simulation unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach CEB [2] weist einen ähnlichen Momentenverlauf auf (siehe Tabelle 4.15). Hier zeigte sich wieder, dass sich die Biegemomente unter Berücksichtigung des höheren E-Moduls nach CEB [2] deutlich stärker ausbilden und sich weiter in Richtung des Fußpunktes des Querschnitts verlagern. Des Weiteren bildete sich auch beim unbewehrten Kreisquerschnitt im Bereich des Fußpunktes nur ein sehr geringes Biegemoment aus, da dieser Bereich nicht thermisch belastet ist. Dies gilt sowohl für die lineare Simulation unter Berücksichtigung des Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] als auch nach CEB [2].

Bei Betrachtung des Normalkraftverlaufs über den Querschnitt (siehe Abbildung 4.59) zeigt sich, dass sich die Normalkräfte nahezu proportional zum Temperaturanstieg und zur Branddauer verhalten. Die Ergebnisse für ausgewählte Punkte sind in Tabelle 4.15 aufgelistet.

Die Verschiebungen des Kreisquerschnitts zeigen keine nennenswerten Veränderungen über die Branddauer (siehe Abbildung 4.60), dem wirken auch die thermischen Dehnungen und die angesetzte Bettung entgegen. Da bei der linearen Simulation die Spannungen nicht begrenzt sind, weist der Querschnitt eine sehr hohe Steifigkeit auf.

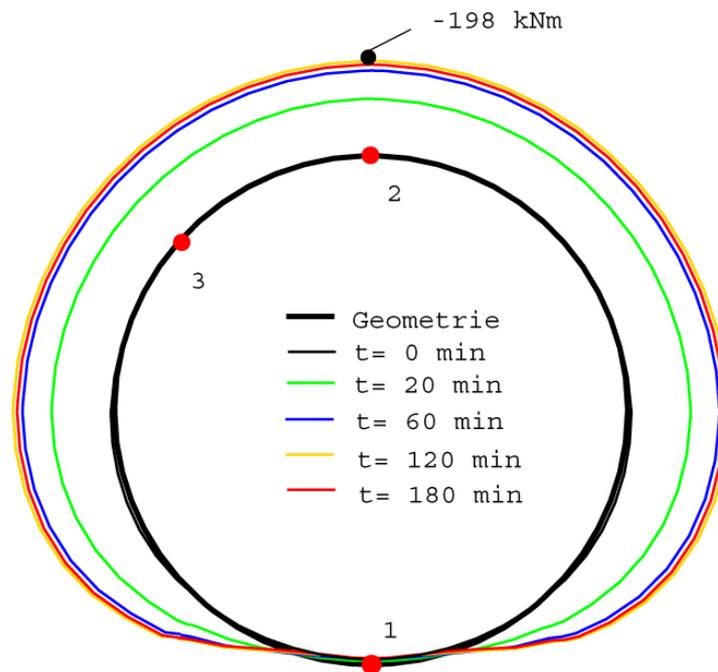


Abbildung 4.58: Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

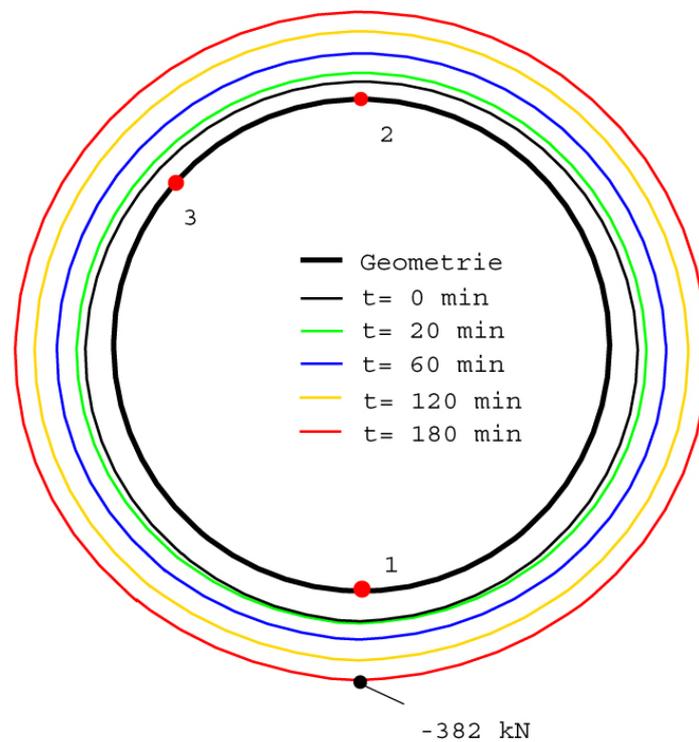


Abbildung 4.59: Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

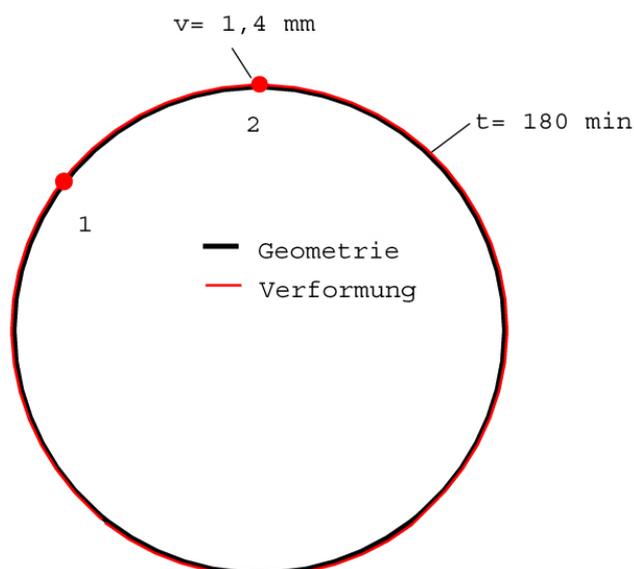


Abbildung 4.60: Verformungen für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation

	$t = 0$ min		$t = 20$ min		$t = 60$ min		$t = 120$ min		$t = 180$ min	
	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Biegemoment [kNm]:										
1 Fußpunkt	11	16	7	6	11	12	13	14	12	15
2 Scheitel	3	6	-119	-214	-178	-308	-198	-320	-190	-281
3 linke Schulter	3	4	-119	-219	-178	-314	-198	-325	-190	-285
Normalkraft [kN]:										
1 Fußpunkt	-127	-123	-136	-122	-206	-175	-296	-251	-382	-324
2 Scheitel	-76	-72	-113	-121	-197	-197	-292	-277	-376	-341
3 linke Schulter	88	-85	-126	-135	-210	-211	-305	-291	-389	-355
Verschiebungen [mm]:										
linke Schulter vert.	0,1	0,1	-0,03	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4
linke Schulter horiz.	-0,3	-0,3	-0,6	-0,6	-0,9	-1,0	-1,4	-1,3	-1,8	-1,6
First vert.	0,1	0,1	0,3	0,3	0,7	0,7	1,1	1,0	1,4	1,3
First horiz.	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4

Tabelle 4.15: Ergebnisse der linearen Simulation für den geschlossenen Kreisquerschnitt Fall 4

4.6.2 Zwischenschritt nach EC 2-1-2 und CEB

Wie in Abbildung 4.61 zu sehen ist, stellt sich auch bei der Simulation im Zwischenschritt für den unbewehrten Kreisquerschnitt der typische Spannungsverlauf ein. Zum Zeitpunkt $t = 0$ min wird der Kreisquerschnitt nur durch Druckspannungen beansprucht. Erst durch die thermische Belastung entstehen an der Tunnelinnenseite Druckspannungen. Die Zugspannungen an der Tunnelaußenseite, welche durch die thermische Belastung hervorgerufen würden, werden durch die Berücksichtigung von $f_{t0} = 0,0$ MPa zu null. Mit andauernder Temperaturbeanspruchung verlagert sich der Knick in der Spannungsverteilung immer weiter ins Querschnittsinnere, was sich mit dem Eindringen der Temperatur in den Querschnitt erklären lässt.

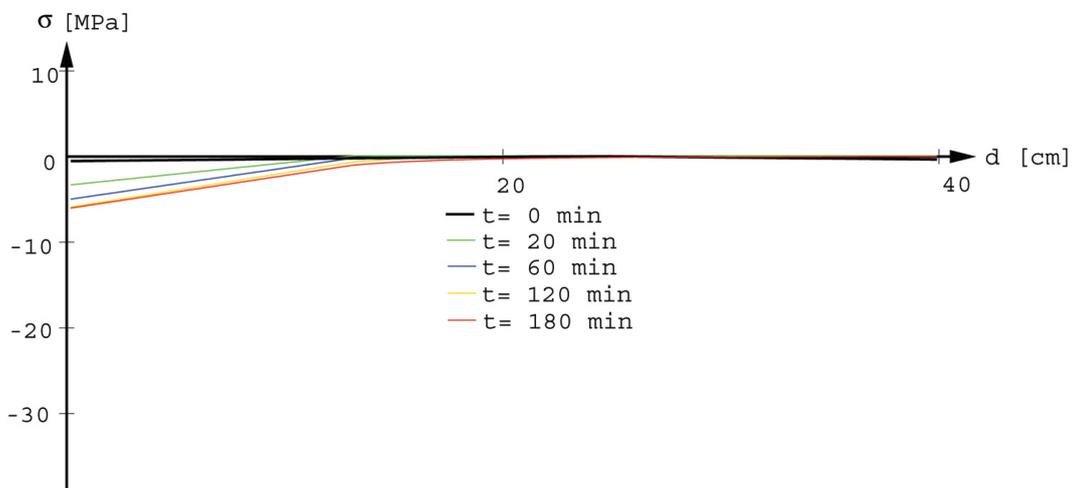


Abbildung 4.61: Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im First für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

Der Momentenverlauf (siehe Abbildung 4.62) zeigt bei der Simulation im Zwischenschritt unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] nur sehr geringe Veränderungen. Zu Beginn der Simulation (Zeitpunkt $t = 0$ min) ergibt sich auch im Zwischenschritt keine nennenswerte Momentenbeanspruchung. Durch das Aufbringen der Brandlast erhöhen sich in den thermisch belasteten Bereichen die Biegemomente. Dies geschieht nur im geringen Ausmaß, was auf die Begrenzung der Festigkeiten zurückzuführen ist. Unter Verwendung des Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] ergibt sich das größte Biegemoment im First zum Zeitpunkt $t = 180$ min zu $M_{t=180} = -71$ kNm. Unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach CEB [2] stellt sich die größte Momentenbeanspruchung zum Zeitpunkt $t = 120$ min ein (siehe Tabelle 4.16), anschließend kommt es zu einem starken Abfall der Biegemomente. Zum Zeitpunkt $t = 180$ min entspricht der Momentenverlauf jenem zum Zeitpunkt $t = 20$ min. Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich die Biegemomente stark in den thermisch unbelasteten Bereich verlagern und es dadurch zu einem Abfall der Biegemomente in den übrigen Bereichen kommt. Ein weiterer Grund ist die schnellere Abminderung der temperaturabhängigen Festigkeiten unter Berücksichtigung des Materialverhaltens nach CEB [2].

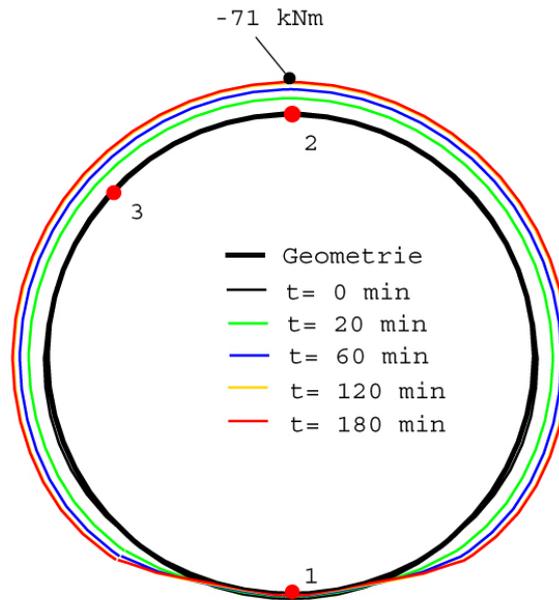


Abbildung 4.62: Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

In Abbildung 4.63 ist der Normalkraftverlauf für die Simulation im Zwischenschritt unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] über den Kreisquerschnitt (Fall 4) dargestellt. Wie schon zuvor in der linearen Simulation steigt die Normalkraft im Querschnitt mit andauernder Temperatur an, jedoch nicht mehr derart kontinuierlich. Der größte Zuwachs der Normalkraft erfolgt bis zum Zeitpunkt $t = 60$ min, anschließend steigt die Normalkraft nicht mehr derart schnell an, was auf den abnehmenden thermischen Zwang zurückzuführen ist. Wie schon in den vorangegangenen Simulationen des geschlossenen und gebetteten Kreisquerschnitts (Fall 3 und Fall 4) tritt im Fußpunkt die größte Normalkraft auf.

Auch im Zwischenschritt lassen sich kaum nennenswerte Verschiebungen zu den unterschiedlichen Zeitpunkten über den Querschnitt feststellen (siehe Abbildung 4.64).

	$t = 0$ min		$t = 20$ min		$t = 60$ min		$t = 120$ min		$t = 180$ min	
	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Biegemoment [kNm]:										
1 Fußpunkt	10	15	2	-2	3	-2	3	0	3	0
2 Scheitel	-4	-7	-35	-41	-55	-61	-68	-71	-71	-45
3 linke Schulter	4	7	-36	-42	-56	-62	-69	-72	-72	-46
Normalkraft [kN]:										
1 Fußpunkt	-127	-124	-231	-250	-357	-369	-465	-458	-547	-530
2 Scheitel	-77	-76	-186	-206	-317	-330	-428	-421	-511	-487
3 linke Schulter	-88	-85	-199	-219	-330	-343	-442	-434	-525	-500
Verschiebungen [mm]:										
linke Schulter vert.	0,1	0,1	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5
linke Schulter horiz.	-0,3	-0,4	-1,0	-1,0	-1,5	-1,6	-2,0	-1,9	-2,4	-2,2
First vert.	0,1	0,1	0,6	0,7	1,1	1,2	1,6	1,6	2,0	1,9
First horiz.	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4

Tabelle 4.16: Ergebnisse der Simulation im Zwischenschritt für den geschlossenen Kreisquerschnitt Fall 4

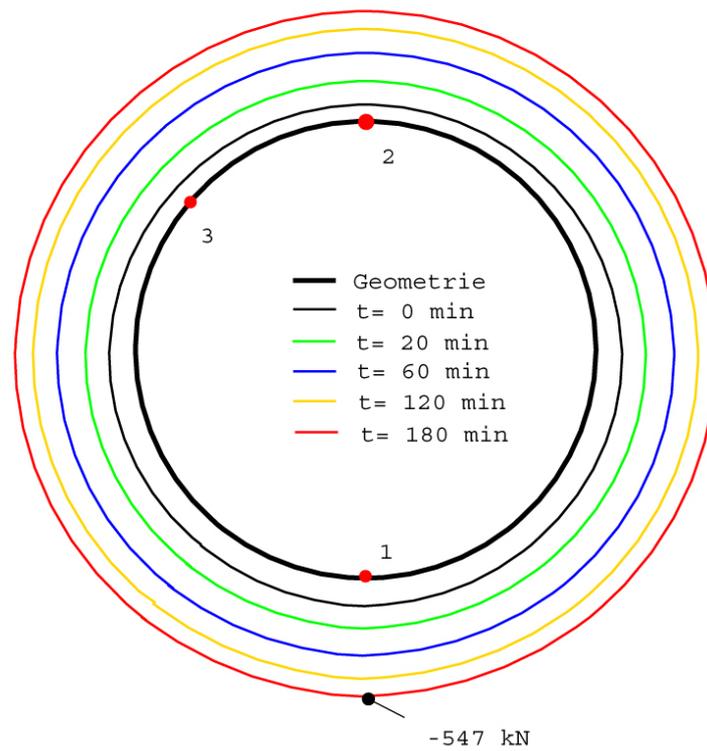


Abbildung 4.63: Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

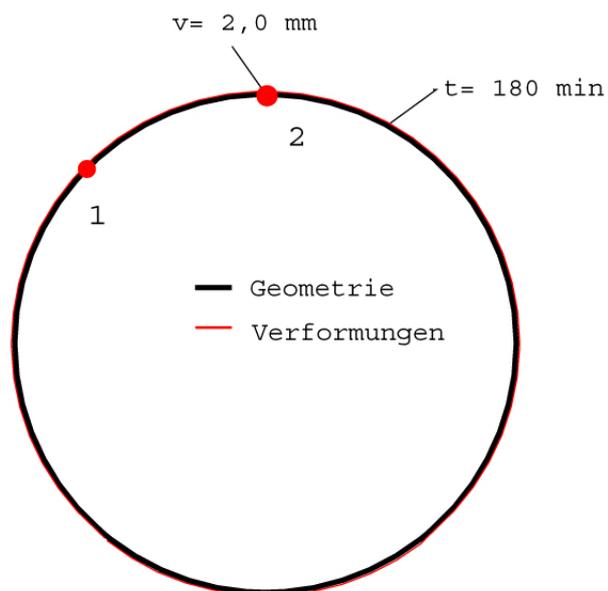


Abbildung 4.64: Verformungen für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt

4.6.3 Nichtlineare Simulation nach EC 2-1-2 und CEB

Der Spannungsverlauf in der nichtlinearen Simulation des unbewehrten Kreisquerschnitts in Abbildung 4.65 zeigt deutlich, wie sich die Spannungen im First über die Dicke aufbauen. Zum Zeitpunkt $t = 20$ min befindet sich die Spannungsglocke in oberflächennahen Schichten und ist noch sehr steil, da die Temperatur noch nicht weit in den Querschnitt eingedrungen ist. Mit zunehmender Branddauer verschiebt sich die Spannungsglocke immer weiter ins Innere und wird flacher. Wie in Abbildung 4.65 zu erkennen ist, werden die zulässigen temperaturabhängigen Festigkeiten des Betons erreicht.

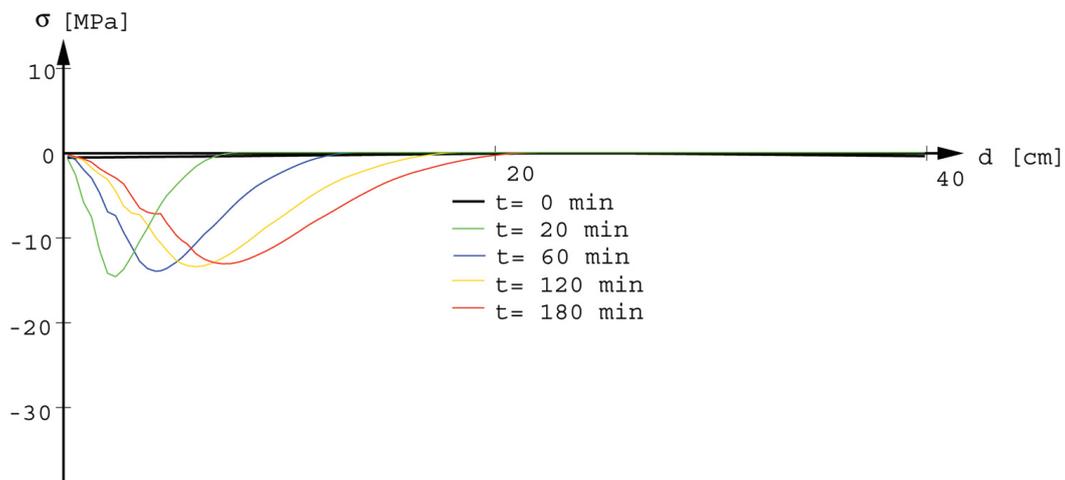


Abbildung 4.65: Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im First für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

Wie erwartet liegen die Ergebnisse für die Biegemomente der nichtlinearen Simulation (siehe Abbildung 4.66) zwischen jenen der linearen Simulation und der Simulation im Zwischenschritt. Wie schon zuvor beobachtet, zeigt sich auch hier aufgrund der symmetrischen mechanischen Belastung ein symmetrischer Momentenverlauf. Zum Zeitpunkt $t = 0$ min sind die Biegemomente identisch zu jenen des Zwischenschritts. Durch die thermische Belastung bauen sich die Biegemomente in den temperaturbelasteten Bereichen stark auf. Auch im thermisch unbelasteten Bereich kommt es zu einem Anwachsen der negativen Biegemomente die immer weiter in Richtung des Fußpunktes wandern (in etwa bis zur Hälfte des unbelasteten Bereichs, im verbleibenden Bereich bleibt die Momentenbeanspruchung nahezu unverändert). Das größte Biegemoment tritt im First auf und beträgt zum Zeitpunkt $t = 180$ min $M_{t=180} = -137$ kNm. Für die Simulation nach CEB [2] ergibt sich das größte Biegemoment ebenfalls zum Zeitpunkt $t = 180$ min zu $M_{t=180} = -210$ kNm (siehe Tabelle 4.17).

Der Normalkraftverlauf (siehe Abbildung 4.67) zeigt auch bei der nichtlinearen Simulation den erwarteten Verlauf. Da sich die thermischen Dehnungen bei der nichtlinearen Simulation ebenfalls sehr stark ausbilden, steigt auch die Normalkraft stark an. Grund für den Anstieg der Normalkraft ist wiederum die angesetzte Bettung, die den thermischen Dehnungen entgegenwirkt. Die größte Normalkraft tritt im Fußpunkt auf und beträgt zum

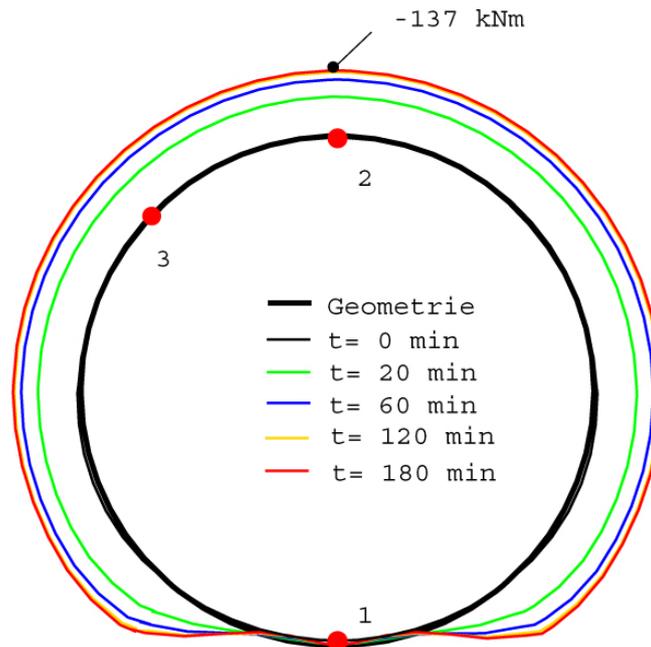


Abbildung 4.66: Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation für die nichtlineare Simulation

Zeitpunkt $t = 180 \text{ min}$ $N_{t=180} = -1205 \text{ kN}$. Unter Berücksichtigung des Materialverhaltens nach CEB [2] steigt die Normalkraft im Fußpunkt zum Zeitpunkt $t = 180 \text{ min}$ auf $N_{t=180} = -1978 \text{ kN}$ und in der linken Schulter sogar auf $N_{t=180} = -1985 \text{ kN}$ an (siehe Tabelle 4.17). Die Schnittgrößen sind in Tabelle 4.17 zusammengefasst.

Der unbewehrte Kreisquerschnitt zeigt auch in der nichtlinearen Simulation aufgrund der symmetrischen mechanischen Belastung und der angesetzten Bettung kaum Verformungen (siehe Abbildung 4.68). Man kann jedoch erkennen, dass sich der Querschnitt ausdehnt beziehungsweise vergrößert. Die Verschiebung im First steigt von $v_{t=0} = 0,1 \text{ mm}$ zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ min}$ auf $v_{t=180} = 4,9 \text{ mm}$ zum Zeitpunkt $t = 180 \text{ min}$ an. Ähnliche Verschiebungen zeigen sich auch in den übrigen Bereichen.

	$t = 0 \text{ min}$		$t = 20 \text{ min}$		$t = 60 \text{ min}$		$t = 120 \text{ min}$		$t = 180 \text{ min}$	
	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB	EC 2	CEB
Biegemoment [kNm]:										
1 Fußpunkt	10	15	2	-8	1	-13	0	-15	0	-15
2 Scheitel	-4	-7	-82	-135	-118	-188	-133	-208	-137	-210
3 linke Schulter	4	7	-84	-137	-119	-190	-135	-210	-138	-211
Normalkraft [kN]:										
1 Fußpunkt	-127	-124	-474	-787	-786	-1290	-1036	-1699	-1205	-1978
2 Scheitel	-77	-76	-441	-764	-761	-1278	-1013	-1690	-1183	-1969
3 linke Schulter	-88	-85	-455	-778	-775	-1292	-1028	-1706	-1198	-1985
Verschiebungen [mm]:										
linke Schulter vert.	0,1	0,1	-0,1	0,5	0,4	1,4	0,8	2,1	1,1	2,5
linke Schulter horiz.	-0,3	-0,4	-2,5	-3,8	-3,9	-6,0	-5,0	-7,8	-5,7	-8,9
First vert.	0,1	0,1	1,7	3,1	3,1	5,4	4,2	7,1	4,9	8,3
First horiz.	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4

Tabelle 4.17: Ergebnisse der nichtlinearen Simulation für den geschlossenen Kreisquerschnitt Fall 4

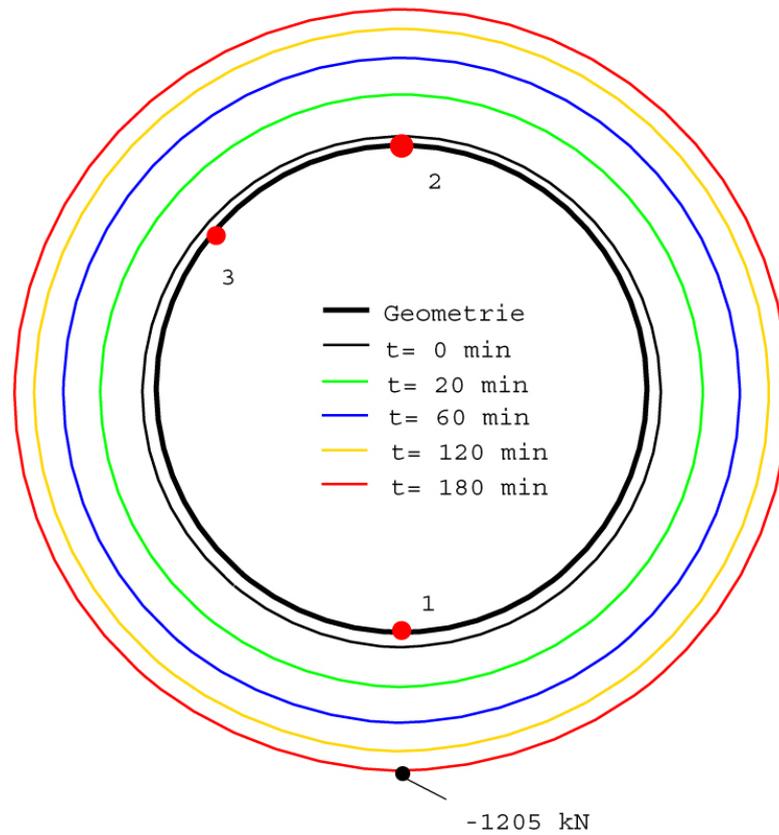


Abbildung 4.67: Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

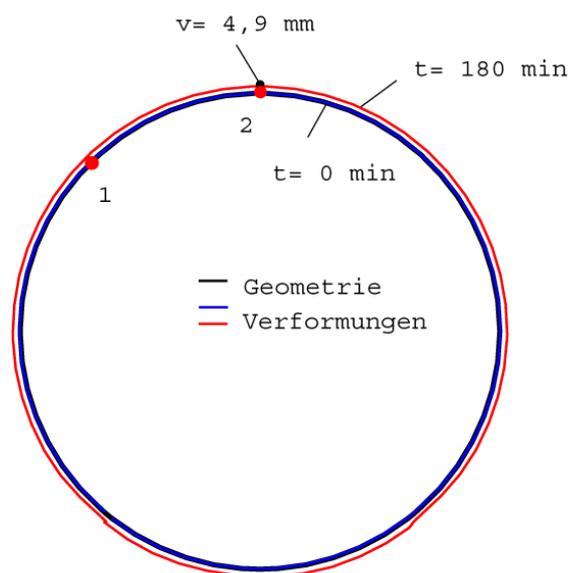


Abbildung 4.68: Verformungen für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In dieser Diplomarbeit wurde das Strukturverhalten von drei unterschiedlichen Tunnelquerschnitten (Rechteckquerschnitt, Gewölbequerschnitt und Kreisquerschnitt) unter Brandbelastung mittels numerischer Simulation untersucht. Es wurden drei unterschiedliche Berechnungsmodelle (lineare Simulation, Simulation im Zwischenschritt und nichtlineare Simulation) verwendet. Die mechanische Belastung wurde für den Rechteckquerschnitt, den Gewölbequerschnitt und den bewehrten Kreisquerschnitt asymmetrisch angesetzt. Der unbewehrte Kreisquerschnitt wurde durch eine symmetrische mechanische Belastung, bestehend aus Eigengewicht, Wasserdruck und Auftrieb, belastet. Durch die thermische Beanspruchung zeigte sich ein starkes Anwachsen der Biegemomente im negativen Bereich und eine Reduktion der Biegemomente im positiven Bereich. Der Normalkraftverlauf zeigte bei den Simulationen der nicht umlaufend gebetteten Systeme (Rechteck-, Gewölbe- und Kreisquerschnitt Fall 1) nur sehr geringe Unterschiede. Die umlaufend gebetteten Systeme (Kreisquerschnitt Fall 2,3,4) zeigten aufgrund der behinderten thermischen Ausdehnung des Querschnitts ein starkes Anwachsen der Normalkraft, vor allem bei der Simulation im Zwischenschritt und der nichtlinearen Simulation. Die Verschiebungen zeigten die größten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Simulation, da diese wesentlich vom verwendeten Materialmodell abhängen.

Beim **Rechteckquerschnitt** zeigten sich die größten Biegemomente in den oberen Rahmenecken. Durch die thermische Belastung kam es in diesem Bereich zu einem starken Anwachsen der negativen Biegemomente. Im Bereich der Feldmitte der Decke kam es infolge der thermischen Belastung zu einem Vorzeichenwechsel des zu Beginn positiven Biegemoments. In der Simulation im Zwischenschritt stellte sich dieser Vorzeichenwechsel nicht ein, da sich der thermische Zwang nicht so stark ausbildete. Es ließ sich ebenfalls beobachten, dass sich die Biegemomente zufolge Temperaturbeanspruchung in den Simulationen mit nichtlinearem Materialmodell in die unbelasteten Bereiche (Fußpunkte) umlagerten. Für die Normalkraft ergaben sich in den jeweiligen Simulationen nur geringe Unterschiede. Es

zeigte sich jedoch, dass thermisch unbelastete Bereiche die Normalkraft beeinflussten, indem sie die thermischen Ausdehnungen der thermisch belasteten Bereiche verhinderten. In der linearen Simulation wurden die in der Realität zu vermutenden Verschiebungen durch den geringen Verlust der Steifigkeit unterschätzt. Die Simulation im Zwischenschritt ergab ca. 3-mal so große Verschiebungen wie die lineare Simulation. Die größten Verschiebungen ergaben sich in der nichtlinearen Simulation, welche um den 10-fachen Wert größer waren als jene der linearen Simulation. Unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach CEB [2] bildeten sich aufgrund des höher angesetzten E-Modul und des geringeren Abfalls der temperaturabhängigen Festigkeiten die thermischen Zwänge deutlich stärker aus als unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1].

Beim **Gewölbequerschnitt** erzeugte die mechanische Belastung eher geringe Biegemomente im Gewölbe, was durch die für den Lastabtrag günstige Gewölbeform erklärt werden kann. Durch die thermische Belastung kam es im Bereich des Gewölbes zu einem relativ gleichmäßigen Anstieg der Momentenbeanspruchung, vor allem in der linearen Simulation. In der nichtlinearen Simulation kam es zu einer Umlagerung der Biegemomente in den linken, nicht temperaturbeanspruchten Fußpunkt, der als Rahmeneck wirkte. Die thermische Belastung zeigte auch beim Gewölbequerschnitt kaum Auswirkungen auf die Normalkraft, sowohl unter Berücksichtigung des thermischen Materialverhaltens nach EC 2-1-2 [1] als auch nach CEB [2]. Der Gewölbequerschnitt zeigte vor allem große horizontale Verschiebungen, welche durch die Abnahme der Steifigkeit aufgrund der thermischen Belastung stark anwuchsen. Da das Gewölbe in vertikaler Richtung eine hohe Steifigkeit aufweist, kam es im Bereich des Firstes zu sehr geringen vertikalen Verschiebungen. In horizontaler Richtung zeichnete sich diese Steifigkeit nicht ab.

Beim **Kreisquerschnitt** war ein starker Einfluss des verwendeten statischen Systems zu erkennen. Grundsätzlich traten beim Kreisquerschnitt durch die mechanische Belastung eher geringe Biegemomente auf. Durch den thermischen Zwang kam es auch beim Kreisquerschnitt zu einem Anwachsen der negativen und einer Abnahme der positiven Biegemomente. Der größte Unterschied ergab sich durch die Berücksichtigung der Bettung. Vor allem die Normalkraft stieg bei der Berücksichtigung einer Bettung (Fälle 2,3,4) stark an und könnte durch Ansatz eines geringeren Bettungsmoduls abgemindert werden. Hierdurch würden sich jedoch die Verformungen deutlich vergrößern, was der ungebettete Kreisquerschnitt deutlich zeigte.

Beim Vergleich des **Rechteckquerschnitts** (Kapitel 4.1) mit dem **Gewölbequerschnitt** (Kapitel 4.2) zeigt sich, dass die Biegemomente beim Gewölbequerschnitt deutlich geringer waren als beim Rechteckquerschnitt. Durch die Gewölbewirkung wurden die Lasten vorwiegend über Normalkräfte abgetragen. Außerdem stellte sich durch die thermische Belastung eine nahezu gleichmäßige Verteilung der Biegemomente im Gewölbe ein. Beim Rechteckquerschnitt konzentrierten sich die Maxima der Biegemomente in den Rahmenecken. Der Normalkraftverlauf zeigte für beide Querschnitte nur sehr geringe Veränderungen aufgrund der thermischen Belastung. Beide Querschnitte zeigten, dass sich bei der linearen Simulation sehr geringe Verschiebungen einstellen. Die nichtlineare Simulation, welche der Realität sehr nahe kommt, zeigte, dass sich der untersuchte Gewölbequerschnitt bei thermischer Belastung weicher verhält als der untersuchte Rechteckquerschnitt, vor allem in horizontaler Richtung. Beim Rechteckquerschnitt traten vorwiegend vertikale Verschiebungen in

der Decke in Feldmitte auf.

Der Vergleich des **Gewölbequerschnitts** (Kapitel 4.2) mit dem **Kreisquerschnitt** (Kapitel 4.3 bis Kapitel 4.6) zeigte geringere Unterschiede zwischen den beiden Querschnittsformen. Natürlich sollte erwähnt werden, dass hier die Unterschiede stark durch das jeweils verwendete statische System bestimmt waren. Der Kreisquerschnitt im Fall 1 (Kapitel 4.3), welcher ungebettet und in den Fußpunkten eingespannt ist, weist am ehesten ein dem Gewölbequerschnitt ähnliches Verhalten auf. Dies lässt sich deutlich anhand des Momenten- und der Normalkraftverlaufs erkennen. Da beide Querschnitte die mechanische Belastung vorwiegend über Normalkräfte abtragen, verteilte sich der Biegemomentenverlauf zufolge thermischer Belastung gleichmäßig über das Gewölbe beziehungsweise den Kreisquerschnitt. Der größte Unterschied ergab sich in der Systemsteifigkeit, welche durch die bereits erwähnte, ungünstige Position der Einspannung des Kreisquerschnitts (Fall 1, Kapitel 4.3) entstand. Im Fall 2 des Kreisquerschnitts (Kapitel 4.4) zeigte sich in den Fußpunkten des Kreisquerschnitts ein ähnliches Verhalten wie in den vertikalen Wänden des Gewölbequerschnitts. Der Kreisquerschnitt Fall 2 (Kapitel 4.4) zeigte jedoch eine ungleichmäßige Verteilung der Biegemomente, welche mit zunehmender und andauernder thermischer Belastung noch ungleichmäßiger wurde. Der Normalkraftverlauf unterschied sich bei der linearen Simulation und der Simulation im Zwischenschritt kaum von jener des Gewölbequerschnitts. Erst in der nichtlinearen Simulation stiegen die Normalkräfte durch die Behinderung der thermischen Ausdehnung des Kreisquerschnitts zufolge der angesetzten Bettung an. Fall 3 (Kapitel 4.5) und Fall 4 (Kapitel 4.6) zeigten die größten Unterschiede zum Gewölbequerschnitt. Weil der geschlossene Kreisquerschnitt simuliert wurde, hatte der Querschnitt eine große Steifigkeit und zeigte durch die mechanische und thermische Belastung kaum nennenswerte Verschiebungen, insbesondere in der linearen Simulation.

Der größte Unterschied im Strukturverhalten ergab sich beim Vergleich des **Kreisquerschnitts** (Kapitel 4.3 bis Kapitel 4.6) mit dem **Rechteckquerschnitt** (Kapitel 4.1). Der Rechteckquerschnitt zeichnete sich hauptsächlich durch seine Rahmenwirkung aus, wodurch es wie bereits erwähnt zu konzentrierten Spitzen der Biegemomente in den Rahmenecken kam. Die bereits durch die mechanische Belastung vorhandenen, negativen Biegemomente in den Rahmenecken stiegen durch die thermische Belastung noch stärker an. Die Umlagerung der Biegemomente bewirkte hauptsächlich einen Anstieg der Biegemomente in den unteren, geringer belasteten Rahmenecken. Im Gegensatz dazu kam es beim Kreisquerschnitt zu einer gleichmäßigen Umlagerung der Biegemomente über den gesamten Querschnitt. Die Normalkräfte zeigten beim Rechteckquerschnitt und nur für den nicht gebetteten Kreisquerschnitt (Fall 1) keine wesentliche Veränderung durch die thermische Belastung. Der gebettete Kreisquerschnitt (Fall 2,3,4) zeigte wie bereits erwähnt ein starkes Anwachsen der Normalkräfte, vor allem bei der nichtlinearen Simulation.

Beim Vergleich der unterschiedlichen statischen Systeme des **Kreisquerschnitts** vergleicht, zeigte sich, dass sich der offene Kreisquerschnitt mit Fußpunkteinspannung (Fall 1, Kapitel 4.3) von Anfang an durch eine geringe Systemsteifigkeit auszeichnet. Untypisch für den Kreisquerschnitt bilden sich durch die ungünstige Position der Einspannung schon zu Beginn große Biegemomente in den Fußpunkten aus. Würde man die Wandstärke im Fußpunkt erhöhen und bis hin zum First auf die vorhandenen 40 cm verringern, so würde sich die Steifigkeit deutlich erhöhen. Der gebettete, offene Kreisquerschnitt (Fall 2, Kapitel 4.4) zeigte durch die vorhandene Bettung eine deutlich höhere Steifigkeit der Gesamtstruk-

tur. Der Biegemomentenverlauf unterschied sich hauptsächlich in den Fußpunkten vom ungebetteten Kreisquerschnitt (Fall 1), da beim gebetteten, offenen Querschnitt (Fall 2, Kapitel 4.4) keine Biegemomente in den gelenkig gelagerten Fußpunkten auftraten und sich erst in weiter entfernten Bereichen aufbauten. Außerdem lagerten sich die Biegemomente durch die thermische Belastung in die geringer belasteten Bereiche um und blieben in den restlichen Bereichen fast unverändert. Der geschlossene, gebettete Querschnitt zeigte den für einen Kreisquerschnitt typischen Momentenverlauf. Hier ergaben sich in beiden Fällen keine nennenswerten Biegemomente durch die mechanische Belastung, auch die Verformungen blieben gering, da diese durch die Bettung behindert wurden. Durch den Ansatz einer Bettung stieg die Normalkraft durch die behinderte thermische Ausdehnung stark an. Der Vergleich der Verschiebungen des bewehrten und des unbewehrten Querschnitts zeigte trotz der unterschiedlichen mechanischen Belastung ebenfalls keine nennenswerten Unterschiede. Dies änderte sich auch mit zunehmender thermischer Belastung nicht. Abschließend lässt sich sagen, dass sich aufgrund der Schnittgrößenverläufe (Biegemomente, Normalkräfte) und Verschiebungen der Kreisquerschnitt unter thermischer Belastung am günstigsten verhielt, da keine Momentenspitzen (z.B. in Rahmenecken) entstanden und der Kreisquerschnitt eine höhere Steifigkeit aufwies (jedoch nur bei Simulationen eines geschlossenen Kreisquerschnitts).

Literaturverzeichnis

- [1] EN1992-1-2. Eurocode 2 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall, European Committee for Standardization (CEN), 2010.
- [2] CEB. Fire Design of Concrete Structures, Bulletin d'Information 208. CEB, Lausanne, Switzerland, 1991.
- [3] EN1992-1-1. Eurocode 2 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, European Committee for Standardization (CEN), 2011.
- [4] ON EN 1990. Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung, Österreichisches Normungsinstitut, 2003.
- [5] EN1991-1-1. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau. European Committee for Standardization (CEN), 2011.
- [6] EN1991-1-2. Eurocode 1 - Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Brandeinwirkungen auf Tragwerke, European Committee for Standardization (CEN), 2011.
- [7] MSC MARC Manual, MSC.Software Corporation, 2001.
- [8] K. Savov, R. Lackner, and H. A. Mang. Stability assessment of shallow tunnels subjected to fire load. *Fire Safety Journal*, 40:745-763, 2005.
- [9] W. Kusterle, W. Lindlbauer, G. Hampejs, A. Heel, P.-F. Donauer, M. Zeiml, W. Brunnsteiner, R. Dietze, W. Hermann, H. Viechtbauer, M. Schreiner, R. Vierthaler, H. Stadlober, H. Winter, J. Lemmerer, and E. Kammeringer. Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton [Fire resistance of fiber-reinforced, reinforced, and prestressed concrete]. Technical Report 544, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Vienna, 2004. In German.
- [10] T. Ring, M. Zeiml, and R. Lackner. Underground concrete frame structures subjected to fire loading: Part II - re-analysis of large scale fire tests. *Engineering Structures*, 2012. Accepted under revision.

-
- [11] T. Ring. Experimental characterization and modeling of concrete at high temperatures-structural safety assesment of different tunnel cross-sections subjected to fire loading. Doctoral thesis, Vienna Universtiy of Technology, 2012.
 - [12] T. Ring. Finite Element Analysis of concrete structures subjected to fire load considering different element types and material models. Master thesis, Vienna University of Technology, 2008.
 - [13] M. Zeiml, Ch. Wikete. Simulation des Strukturverhaltens eines zweigleisigen Eisenbahntunnels mit Rechteckquerschnitt unter TSI - Brandbelastung unter Annahme unterschiedlicher Materialmodelle. Bericht, Vienna University of Technology, 2012.
 - [14] M. Zeiml, Ch. Wikete. Simulation des Strukturverhaltens eines zweigleisigen Eisenbahntunnels mit Gewölbequerschnitt unter TSI - Brandbelastung unter Annahme unterschiedlicher Materialmodelle. Bericht, Vienna University of Technology, 2012.
 - [15] Finite-Elemente-Programm Marc Mentat 2005. www.mscsoftware.com.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau eines finiten Schalenelements [8]	4
2.2	Temperaturentwicklung über die Zeit	5
2.3	Querschnittabmessungen für den Rechteckquerschnitt (linke Hälfte des Querschnitts dargestellt)	6
2.4	Statisches System und Belastung für den Rechteckquerschnitt	7
2.5	Querschnittabmessungen für den Gewölbequerschnitt (rechte Hälfte des Querschnitts dargestellt)	8
2.6	Statisches System und Belastung für den Gewölbequerschnitt	9
2.7	Querschnittabmessungen Kreisquerschnitt	10
2.8	Statisches System und Belastung für den Kreisquerschnitt Fall 1	11
2.9	Statisches System und Belastung für den Kreisquerschnitt Fall 2	12
2.10	Statisches System und Belastung für den Kreisquerschnitt Fall 3	13
3.1	Berechnungsprinzip der äquivalenten Temperatur [9]	15
3.2	Materialverhalten von Beton: Spannungs- Dehnungsbeziehungen a) im Druckbereich und b) im Zugbereich (blau: linear-elastisch, grün: elasto-plastisch) [10]	17
3.3	Materialverhalten von Beton: 2D-Plastizitätsmodell [8]	17
3.4	Temperaturabhängigkeit der Materialparameter nach EC 2-1-2 [1] und CEB [2]	18
4.1	Spannungsverteilung für den Rechteckquerschnitt über die Querschnittsdicke an der Decke in Feldmitte nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	20
4.2	Momentenverlauf für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	20
4.3	Normalkraftverlauf für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] der linearen Simulation	21
4.4	Verformungen für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] der linearen Simulation	22
4.5	Spannungsverteilung für den Rechteckquerschnitt über die Querschnittsdicke an der Decke in Feldmitte nach EC 2-1-2 [1] im Zwischenschritt	23
4.6	Momentenverlauf für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für den Zwischenschritt	24
4.7	Normalkraftverlauf für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] im Zwischenschritt	25

4.8	Verformungen für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] im Zwischenschritt	25
4.9	Spannungsverteilung für den Rechteckquerschnitt über die Querschnittsdicke nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	27
4.10	Momentenverlauf für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	27
4.11	Normalkraftverlauf für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	28
4.12	Verformungen für den Rechteckquerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	29
4.13	Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im linken Scheitelpunkt des Gewölbequerschnitts nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	30
4.14	Momentenverlauf für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	31
4.15	Normalkraftverlauf für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	31
4.16	Verformungen für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	32
4.17	Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im linken Scheitelpunkt des Gewölbequerschnitts nach EC 2-1-2 [1] im Zwischenschritt	33
4.18	Momentenverlauf für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] im Zwischenschritt	34
4.19	Normalkraftverlauf für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] im Zwischenschritt	34
4.20	Verformungen für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] im Zwischenschritt	35
4.21	Spannungsverteilung für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	36
4.22	Momentenverlauf für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	37
4.23	Normalkraftverlauf für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] der nichtlinearen Simulation	37
4.24	Verformungen für den Gewölbequerschnitt nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	38
4.25	Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im Scheitel nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	40
4.26	Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 1 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	41
4.27	Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 1 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	41
4.28	Verformungen des Kreisquerschnitts Fall 1 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	42
4.29	Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im Scheitel nach EC 2-1-2 [1] für den Zwischenschritt	43

4.30	Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 1 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt	44
4.31	Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 1 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt	45
4.32	Verformungen des Kreisquerschnitt Fall 1 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt	46
4.33	Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im Scheitel nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	47
4.34	Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	48
4.35	Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	49
4.36	Verformungen des Kreisquerschnitts Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	49
4.37	Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im Scheitel nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt	50
4.38	Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt	51
4.39	Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt	52
4.40	Verformungen des Kreisquerschnitts Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt	52
4.41	Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im First für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	53
4.42	Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	54
4.43	Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	55
4.44	Verschiebungen für den Kreisquerschnitt Fall 2 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	56
4.45	Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im First für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	57
4.46	Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	58
4.47	Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	59
4.48	Verformungen des Kreisquerschnitts Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	59
4.49	Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im First für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt . . .	60
4.50	Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt	61
4.51	Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt	62

4.52	Verformungen für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt	63
4.53	Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im First für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	64
4.54	Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	65
4.55	Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	66
4.56	Verformungen des Kreisquerschnitts Fall 3 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	67
4.57	Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im First für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	68
4.58	Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	69
4.59	Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	69
4.60	Verformungen für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die lineare Simulation	70
4.61	Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im First für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt . . .	71
4.62	Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt	72
4.63	Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt	73
4.64	Verformungen für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation im Zwischenschritt	73
4.65	Spannungsverteilung über die Querschnittsdicke im First für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	74
4.66	Momentenverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die Simulation für die nichtlineare Simulation	75
4.67	Normalkraftverlauf für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	76
4.68	Verformungen für den Kreisquerschnitt Fall 4 nach EC 2-1-2 [1] für die nichtlineare Simulation	76

Tabellenverzeichnis

2.1	Querschnittseinteilung und Bewehrungsgehalte für den Rechteckquerschnitt	5
2.2	mechanische Belastung für den Rechteckquerschnitt	7
2.3	Querschnittseinteilung und Bewehrungsgehalte für den Gewölbequerschnitt	8
2.4	mechanische Belastung für den Gewölbequerschnitt	9
2.5	mechanische Belastung für den Kreisquerschnitt Fall 1	11
2.6	mechanische Belastung für den Kreisquerschnitt Fall 3	12
3.1	thermische Parameter zur Simulation der Temperatureindringung in den Querschnitt (temperaturabhängiger Verlauf gem. angegebener Norm) . . .	14
4.1	Ergebnisse der linearen Simulation für den Rechteckquerschnitt	22
4.2	Ergebnisse für den Zwischenschritt bei der Simulation des Rechteckquerschnitts	26
4.3	Ergebnisse der nichtlinearen Simulation für den Rechteckquerschnitt	29
4.4	Ergebnisse der linearen Simulation für den Gewölbequerschnitt	32
4.5	Ergebnisse des Zwischenschritts für den Gewölbequerschnitts	35
4.6	Ergebnisse der nichtlinearen Simulation für den Gewölbequerschnitt	39
4.7	Ergebnisse der linearen Simulation für den Kreisquerschnitt Fall 1	42
4.8	Ergebnisse der Simulation im Zwischenschritt für den Kreisquerschnitt Fall 1	45
4.9	Ergebnisse der linearen Simulation für den Kreisquerschnitt Fall 2	50
4.10	Ergebnisse der Simulation im Zwischenschritt für den Kreisquerschnitt Fall 2	53
4.11	Ergebnisse der nichtlinearen Simulation für den geschlossenen Kreisquerschnitt Fall 2	55
4.12	Ergebnisse der linearen Simulation für den geschlossenen Kreisquerschnitt Fall 3	60
4.13	Ergebnisse der Simulation im Zwischenschritt für den geschlossenen Kreisquerschnitt Fall 3	63
4.14	Ergebnisse der nichtlinearen Simulation für den geschlossenen Kreisquerschnitt Fall 3	66
4.15	Ergebnisse der linearen Simulation für den geschlossenen Kreisquerschnitt Fall 4	70
4.16	Ergebnisse der Simulation im Zwischenschritt für den geschlossenen Kreisquerschnitt Fall 4	72
4.17	Ergebnisse der nichtlinearen Simulation für den geschlossenen Kreisquerschnitt Fall 4	75