

Rechnerischer Nachweis des baulichen Brandschutzes für Tunnel in offener Bauweise

Carsten Peter, Jan Knief

Ingenieurbüro Maidl & Maidl (IMM), Bochum

Zusammenfassung:

Am Beispiel eines Tunnels in offener Bauweise (Rechteckrahmenquerschnitt) wird die „heiße Bemessung“ auf Grundlage des „Allgemeinen Rechenverfahrens“ nach Eurocode EN 1992-1-2 [1], durchgeführt. Die Randbedingungen, das Berechnungsverfahren und die maßgeblichen Berechnungsergebnisse werden im folgenden Beitrag dargestellt.

Summary:

Using the example of a cut and cover tunnel the structural fire design based on the advanced calculation method according to eurocode EN 1992-1-2 is performed. The principles, the calculations method and the relevant calculation results are shown in the following article.

1 ALLGEMEINES

Reale Brandereignisse in Tunnel und Großbrandversuche haben gezeigt, dass durch Tunnelbrände größere Schädigungen am Bauwerk entstehen können und daher ein ausreichender baulicher Brandschutz zur Sicherstellung der Standsicherheit von besonderer Bedeutung ist.

In der ZTV-ING [2], dem geltenden Regelwerk für Straßentunnel, ist das derzeitige rechnerische Nachweisverfahren zum baulichen Brandschutz für Rechteckrahmenquerschnitte geregelt. Demnach darf unter bestimmten Voraussetzungen - diese werden von den üblichen Rechteckrahmenquerschnitten in der Regel erfüllt – der Nachweis des baulichen Brandschutzes vereinfacht über den Ansatz eines Temperaturgradienten von 50K in Wand und Decke geführt werden.

Falls die Voraussetzungen nicht erfüllt werden bzw. falls aus dem vereinfachten Nachweis eine deutlich erhöhte Bewehrung gegenüber der Kaltbemessung resultiert, ist nach ZTV-ING ein „genauerer rechnerischer Nachweis“ zu führen.

In der Praxis wird überwiegend der vereinfachte Brandschutznachweis nach ZTV-ING geführt, da zu dem genaueren Nachweis bisher keine eindeutigen Regelungen zur Durchführung vorliegen. Der vereinfachte Brandschutznachweis kann in Abhängigkeit der Randbedingungen bemessungsrelevant werden und bestimmt den erforderlichen Bewehrungsgehalt. Insbesondere bei größeren Bauteildicken kann ein genauerer rechnerischer Nachweis wirtschaftliches Optimierungspotential beinhalten.

Andererseits haben Brandereignisse in Straßentunneln und Großbrandversuche gezeigt, dass durch die Brandbeanspruchung teilweise erhebliche Betonabplatzungen resultieren können. Es stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, welche Konsequenzen dies für den baulichen Brandschutz für Rechteckrahmenquerschnitte hat.

Um diese Fragestellung zu beantworten wurde ein genauer rechnerischer Nachweis für einen typischen Rechteckrahmenquerschnitt eines Straßentunnels (RQ 26t) auf Grundlage des „Allgemeinen Rechenverfahrens“ nach Eurocodes EN 1992-1-2 [1] durchgeführt. Als äußere Brandeinwirkung wurde die ZTV-ING-Kurve angesetzt (siehe Abb.1).

Die Untersuchungen sind Bestandteil des vom BMVBS, vertreten durch die BAST, beauftragten Forschungsvorhabens FE 15.0502/2010/ERB „Rechnerischer Nachweis des baulichen Brandschutzes für Tunnel in offener Bauweise“ [5].

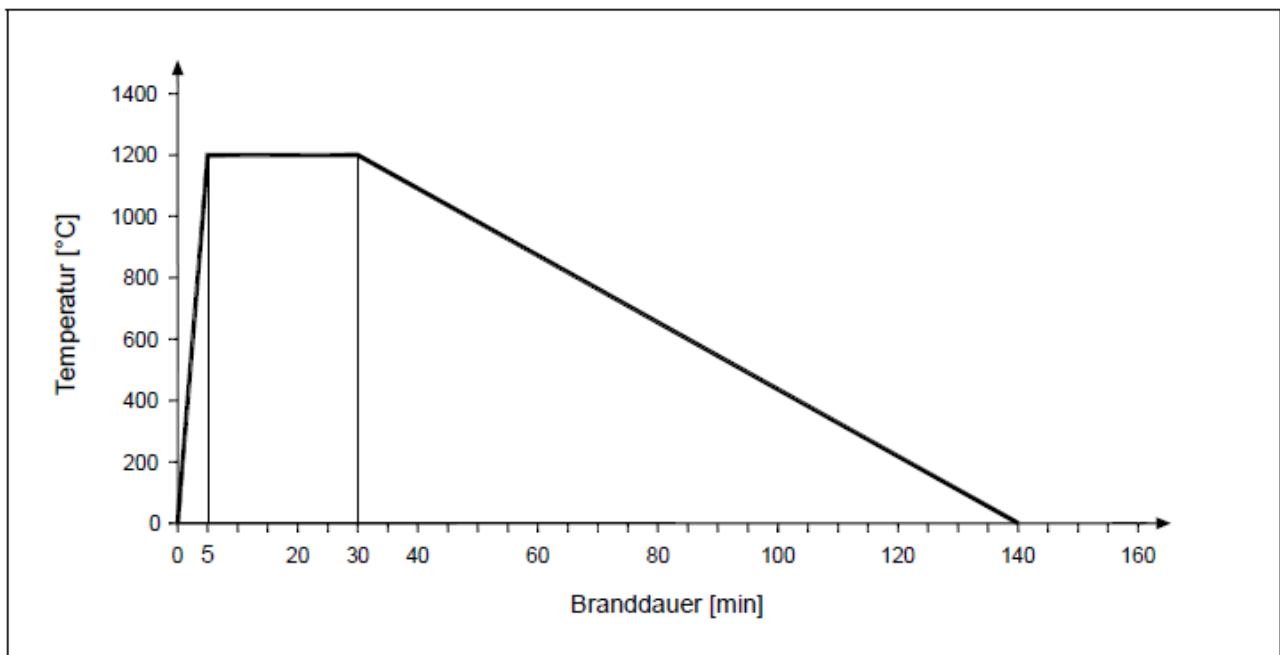


Abbildung 1: ZTV-ING Brandkurve [2]

Die rechnerischen Annahmen für die Tiefe und den Zeitpunkt der Betonabplatzungen basieren auf den Auswertungen von Großbrandversuchen für Rechteckrahmenquerschnitte an der MFPA Leipzig [3]. Die Versuche wurden an zwei Rahmenecken aus einem Referenzbeton ohne Polypropylenfasern (PP-Fasern) mit einer konstruktiv angeordneten Mattenbewehrung (N94) und einem Beton mit PP-Fasernanteil von 2 kg/m³ durchgeführt. Die Versuchsanordnung für beide Probekörper ist in Abbildung 2 dargestellt.

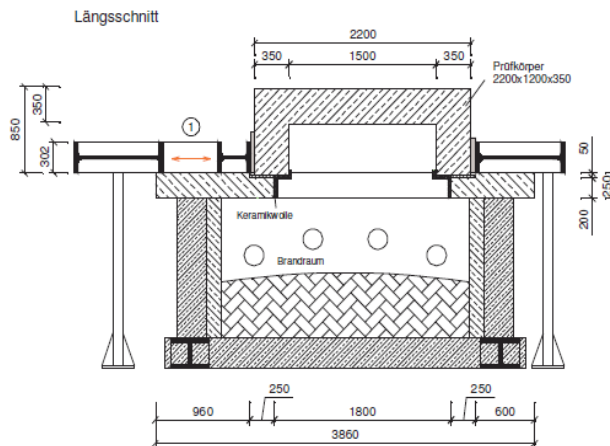


Abbildung 2: Versuchsanordnung Großbrandversuch [3]



Abbildung 3: Probekörper aus Referenzbeton (ohne PP-Fasern) nach Großbrandversuch [3]



Abbildung 4: Probekörper aus Referenzbeton (mit PP-Fasern) nach Großbrandversuch [3]

Die Auswertung der Versuche haben ein deutlich unterschiedliches Abplatzverhalten von Beton ohne PP-Fasern und Beton mit PP-Fasern gezeigt. Bei einem Beton ohne PP-Fasern sind Betonabplatzungen von im Mittel ca. 6cm festgestellt worden. Die Abplatzungen waren so groß, dass teilweise die luftseitig angeordnete tragende Bewehrung frei lag (siehe Abbildung 3).

Bei dem Beton mit PP-Fasern wurden wesentlich geringere Betonabplatzungen von im Mittel ca. 3cm festgestellt. Es wird derzeit davon ausgegangen, dass bei Optimierung der Betonrezeptur und

der Betonherstellung die Verteilung der Fasern im Frischbeton weiter verbessert werden kann, so dass die Betonabplatzungen auf ein vernachlässigbares Maß verringert werden können. Die positive Wirkung von PP-Fasern auf das Abplatzverhalten ist darauf zurückzuführen, dass die Fasern bei relativ niedriger Temperatur schmelzen und damit einen Porenraum zur Entspannung des bei der Erhitzung des Betons entstehenden Wasserdampfes bieten.

2 STATISCHE BERECHNUNG MIT GENAUEREM RECHNERISCHEN NACHWEIS DES BRANDFALLS

2.1 Allgemeines

Die genaueren rechnerischen Nachweise werden auf Grundlage des „Allgemeinen Rechenverfahren“ nach Eurocodes EN 1992-1-2 [1] durchgeführt.

Als repräsentativer Tunnelquerschnitt für einen genaueren rechnerischen Nachweis wird ein „zweizelliges“ Tunnelbauwerk (RQ 26t) als wasserundurchlässige Betonkonstruktion (WUB-KO) gewählt. Die Bauteildicke für die Decke und die Außenwände beträgt 90 cm. Die Berechnungen werden für einen Beton ohne gesonderte Brandschutzmaßnahmen (z.B. PP-Fasern oder Brandschutzbekleidung) und damit unter Berücksichtigung möglicher Betonabplatzungen durchgeführt.

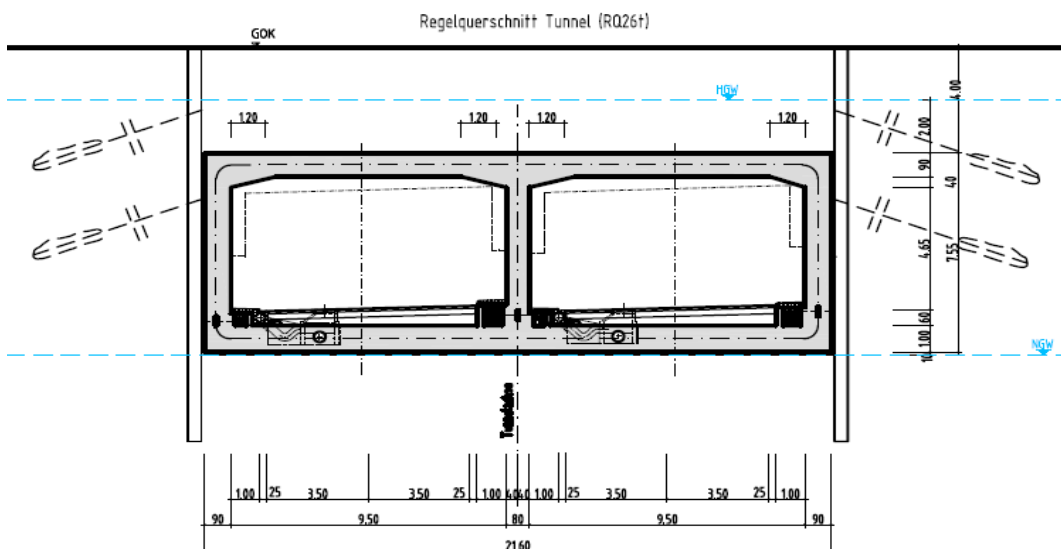


Abbildung 5: Repräsentativer Tunnelquerschnitt (RQ 26t) [5]

In einem ersten Schritt wird im Rahmen einer thermischen Analyse die Temperaturverteilung im Bauteil mit der Finiten Elementen Methode durchgeführt. Der Temperaturverlauf im Querschnitt wird maßgeblich durch die äußere Temperatureinwirkung (maximale Temperatur und

Einwirkdauer) und den möglichen, aus den thermischen Einwirkung resultierenden, Betonabplatzungen bestimmt. Die rechnerischen Annahmen zu den Abplatztiefen und Abplatzzeitpunkten basieren auf den Auswertungen von Großbrandversuchen [3].

Im zweiten Schritt werden im Rahmen der mechanischen Analyse die Schnittgrößen und die erforderlichen Bewehrungsgehalte aus der Überlagerungen der temperaturbedingten Zwängungen mit den Gebrauchslastfällen (Kaltbemessung) über ein iteratives, nichtlineares Berechnungsverfahren ermittelt.

2.2 Thermische Analyse

Die Berechnung des Temperaturverlaufs im Betonquerschnitt wird in einer nichtlinearen, instationären thermischen Analyse mit dem SOFISTIK-Modul HYDRA-T durchgeführt. Folgende Eingabeparameter sind gewählt worden:

Materialwahl: Als Material des Bauteils wird „Normalbeton“ mit einer relativen Feuchte von 4 % ausgewählt. Das Programm HYDRA-T errechnet sich aus diesen Angaben die entsprechenden Materialkennwerte wie z.B. die Wärmeleitfähigkeit des Betons in Abhängigkeit der Temperatur. Die Bewehrung wird bei der Berechnung der Temperaturverteilung vernachlässigt, da die Temperatur in der Achse der Bewehrung in etwa der Temperatur im Beton entspricht.

Wahl der Brandkurve: Die Brandkurve für die Beflammung des Bauteils ist in „HYDRA-T“ frei definierbar. Für die Beispielrechnung wird der Brandverlauf nach der ZTV-ING-Brandkurve angesetzt (Abbildung 1). Hierbei werden in HYDRA-T charakteristische Daten des Brandverlaufs eingegeben (Tabelle 1). Der Zeitraum für die Berechnung der Temperaturverteilung im Querschnitt kann frei definiert werden. Es wird ein Zeitraum von 180 Minuten gewählt

Zeit [min]	Temperatur [°C]
0	0
5	1200
30	1200
140	0

Tabelle 1: Eingabeparameter der ZTV-ING-Brandkurve

Festlegung des Wärmeübergangswiderstandes und des Emissionsgrades: Die Erwärmung eines Bauteils ist abhängig vom Wärmeübergang am Bauteilrand und dem Wärmestrom im Inneren des Bauteils. Als Wärmeübergangsbedingung an der beflamnten Oberfläche können in HYDRA-T der konvektive Wärmeübergangskoeffizient α_c sowie der resultierende Emissionsgrad eingegeben werden. Diese Parameter werden sowohl für die Oberfläche des Bauteils ohne Abplatzung als auch für die Oberfläche des Bauteils nach der Abplatzung wie folgt festgelegt:

Für den Wärmeübergangskoeffizienten an der Oberfläche wird ein Wert von $\alpha_c = 25 \frac{W}{m^2 K}$ gewählt.

Der resultierende Emissionsgrad an der Oberfläche berücksichtigt die Wärmeübertragung durch Strahlung der Flamme und die Absorption der Strahlung durch die Betonoberfläche und setzt sich wie folgt zusammen:

$$\varepsilon_{res} = \varepsilon_f * \varepsilon_m [-]$$

ε_f = Faktor der Strahlungsquelle (Flamme; wird im Allgemeinen zu $\varepsilon_f = 1,0$ angenommen)

ε_m = Faktor des absorbierenden Bauteils(wird zu 0,8 angenommen)

Der Emissionsgrad an der Oberfläche beträgt somit: $\varepsilon_{res} = 1,0 * 0,8 = 0,8 [-]$

Berücksichtigung von Betonabplatzungen: Die Abplatzzeitpunkte und Abplatztiefen sind auf Grundlage der Ergebnisse aus den Großbrandversuchen [3] festgelegt worden. Für die Berechnung ist gegenüber der mittleren Abplatztiefe aus den Versuchen ein Vorhaltemaß von 2cm (bezogen auf die Gesamtabplatztiefe) gewählt worden um den Einfluss größerer Abplatzungen auf das Tragverhalten zu untersuchen.

Zeitpunkt der Abplatzungen [min]	Mittlere Abplatztiefen aus Versuchen [3] [cm]	Abplatztiefen für Berechnungen [cm]
4	2	2
8	4	4
12	6	6
14	6	8

Tabelle 2: Abplatzzeitpunkte und Abplatztiefen

Bei den Berechnungen mit Abplatzungen wird folgendermaßen vorgegangen: Um für den Betonquerschnitt ohne PP-Fasern die erste Abplatzung bis zu einer Bauteiltiefe von 2 cm nach 4 Minuten zu simulieren, wird in HYDRA-T vorgegeben, dass nach 4 Minuten die oberste Bauteilschicht mit einer Dicke von 2 cm ausfällt. Nach dieser ersten Abplatzung wird die Beflammung auf den nun schlankeren Betonquerschnitt (88 cm) aufgebracht. Die Temperatur an der abgeplatzten Betonoberfläche steigt dadurch sprunghaft an. In den tiefer liegenden Betonbereichen, die bereits durch die Beflammung in den ersten 4 Minuten erwärmt wurden, steigt die Temperatur weiter an. Um die weiteren Abplatzungen bis zu den Tiefen von 4 cm, 6 cm und 8 cm zu simulieren wird analog zur Vorgehensweise bei der ersten Abplatzung vorgegangen. Die programmtechnische Umsetzung wird am Beispiel der ersten Abplatzung bis 2cm gezeigt:

```
+PROG HYDRA
KOPF Feuereinwirkung auf FE-Querschnitt
ECHO VOLL
SYST DIMT MIN DIMQ KW
STEP N $(min1) T 1.0 HOPT 10 ; PLF HP 10.0 ; STEU KITE 0
LF 2 BEZ 'Abplatzung bis 2 cm'
SYST DIMT MIN DIMQ KW
GRUP 1,2,3,4
let#min3 ($(min2)-$(min1)) $ variable
STEP. N. #min3 T 1.0 HOPT 10 ; PLF 1 T CONT; STEU KITE 0 $ setzt
kontinuierlich auf PLF1 auf
rand typ spez 0.025 von 120 bis 130 delt 1.0 eps 0.7 f 1 vp 1 $ randbedingung
FUNK
          0          0          1
          5          1200        1
          30         1200        1
          140         0          1
          200         0          1

ENDE
```

Die berechneten Temperaturverläufe wurden zur Verifizierung mit den Temperaturmessungen aus den Brandversuchen [3] verglichen. Im Bereich der Messstelle sind Abplatztiefen zwischen 6 und 7 cm gemessen worden. Da eine genaue Angabe nicht vorliegt, müssen die zugehörigen Berechnungen auch für beide Abplatztiefen (6cm und 7cm) durchgeführt werden. In der Abbildung 6 sind die mit HYDRA-T berechneten Temperaturverteilungen über die Bauteiltiefe mit den

gemessenen Temperaturen verglichen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung, da die gemessenen Temperaturen bei einer Abplatztiefe von 6-7cm zwischen den berechneten Temperaturen mit Abplatzungen von 6cm bzw. 7cm liegen.

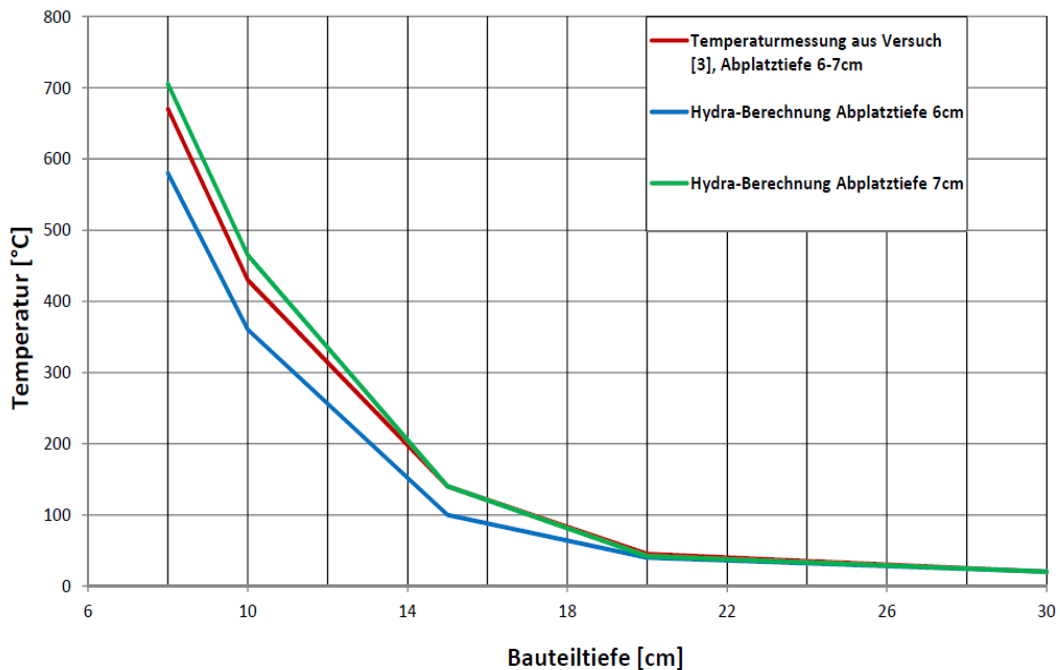


Abbildung 6: Temperaturberechnungen für ZTV-ING-Kurve und Temperaturmessungen aus Großbrandversuchen

2.3 Mechanische Analyse

Grundlage für die nichtlineare Systemanalyse sind die mit HYDRA-T ermittelten Temperaturverläufe im Querschnitt. Die berechneten „heißen“ Querschnitte werden in das Querschnittsprogramm AQUA eingelesen. Die Zwangsschnittgrößen im Brandfall entstehen aus der temperaturabhängigen Dehnung des Betons. Die nachfolgende Abbildung 7 zeigt den Verlauf der thermischen Dehnung für Beton für quarzhaltigen Zuschlag (Kurve 1) und für kalksteinhaltigen Zuschlag (Kurve 2).

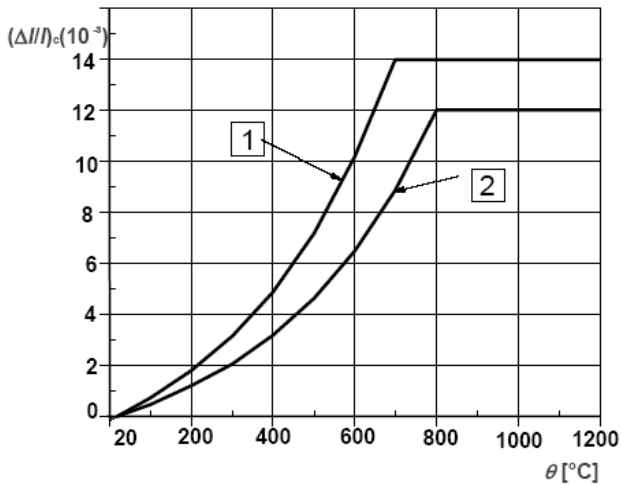


Abbildung 7: Thermische Dehnung von Beton [1]

Die thermische Analyse hat zum Ergebnis, dass sich die Temperatureindringung im Bauteil auf ca. 30cm Bauteiltiefe beschränkt, woraus folgender qualitativer Verlauf der thermischen Zwangsdehnung resultiert.

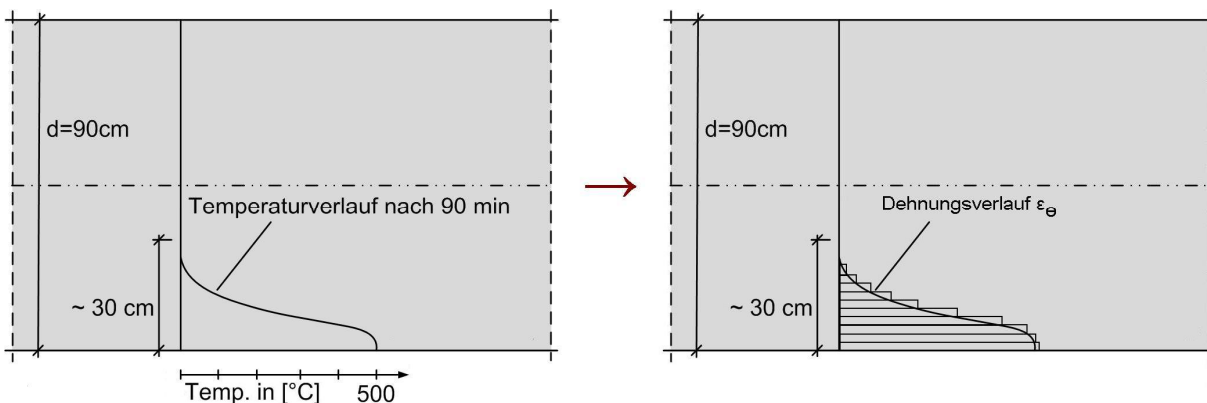


Abbildung 8: Thermische Zwangsdehnung aus Temperaturverteilung

Die nichtlineare Berechnung erfolgt über ein ebenes Stabwerksmodell mit dem Programm STAR 2. Das gewählte Berechnungsverfahren berücksichtigt das nichtlineare Materialverhalten des Stahlbetons unter Berücksichtigung des Rissverhaltens und der damit einhergehenden Steifigkeitsabminderung (Zustand II) sowie die temperaturabhängigen Materialeigenschaften. In der iterativen Schnittgrößenermittlung werden die Zwangsschnittgrößen aus der Brandeinwirkung so berücksichtigt, dass die im Rahmen der thermischen Analyse ermittelte nichtlineare Dehnungsverteilung im Betonquerschnitt mit der spannungsabhängigen Dehnungsverteilung aus den Gebrauchslasten überlagert wird.

Die temperaturabhängigen Materialeigenschaften werden nach DIN EN 1992-1-2 [1] berücksichtigt.

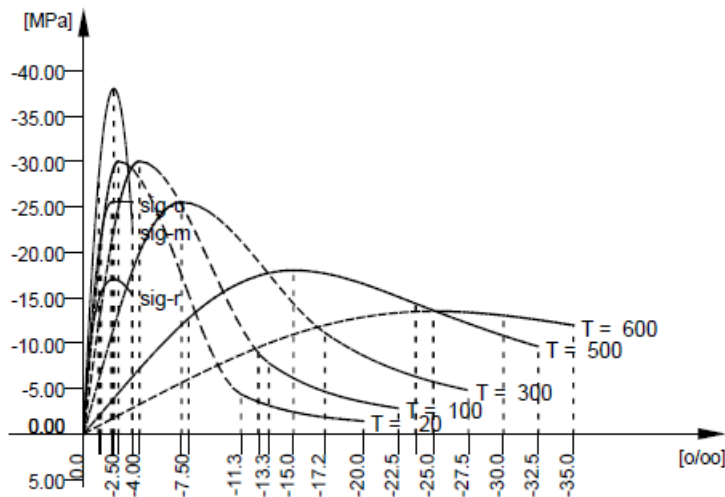


Abbildung 9: Spannungs-Dehnungsbeziehung Beton C30/37 mit quarzhaltigem Zuschlag unter erhöhten Temperaturen nach [1]

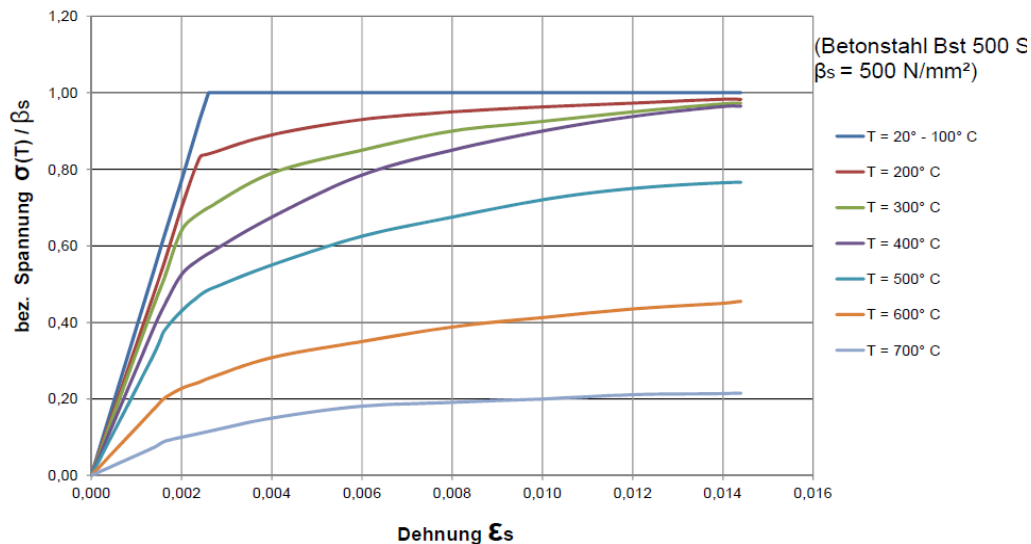


Abbildung 10: Spannungs-Dehnungslinien Betonstahl unter erhöhten Temperaturen nach [1]

Die berücksichtigte Betonabplatzung von 8 cm in der Decke hat einen Ausfall der luftseitigen Bewehrung zur Folge, da bei einer üblichen Betondeckung der Bestandstunnel von 4 bis 6 cm durch die fehlende Verbundwirkung sowie der starken Erwärmung die luftseitigen Bewehrung nicht mehr tragfähig ist.

Durch die thermische Beanspruchung entstehen negative Zwangsbiegemomente mit einer Zugbeanspruchung der erdseitigen Bewehrung, so dass der Entfall der luftseitigen Bewehrung während der Brandbeanspruchung nicht zu einem Tragwerksversagen führt. Aus programmtechnischen Gründen wurde zur Erhöhung der Iterationsstabilität eine untere Bewehrung in einer Größenordnung von $0,08 \text{ cm}^2/\text{m}$ berücksichtigt. Da die Bewehrung ca. auf Höhe der

Nulllinie angeordnet wurde und die Materialeigenschaft des Betonstahls auf 0,2 % der Ursprungswerte reduziert wurde, hat die untere Bewehrung keinen Einfluss auf die Schnittgrößenermittlung.

Da die Zwangsschnittgrößen aus der Brandbeanspruchung in Abhängigkeit der entsprechenden zeitabhängigen thermischen Dehnungen variieren, wurde eine Berechnung für die Zeitstufen $t = 0, 30, 60, 90, 120, 150$ und 180 min nach Brandbeginn durchgeführt. Die maximalen Zwangsbiegemomente entstehen ca. im Zeitraum $T = 90$ min (siehe Abb.11).

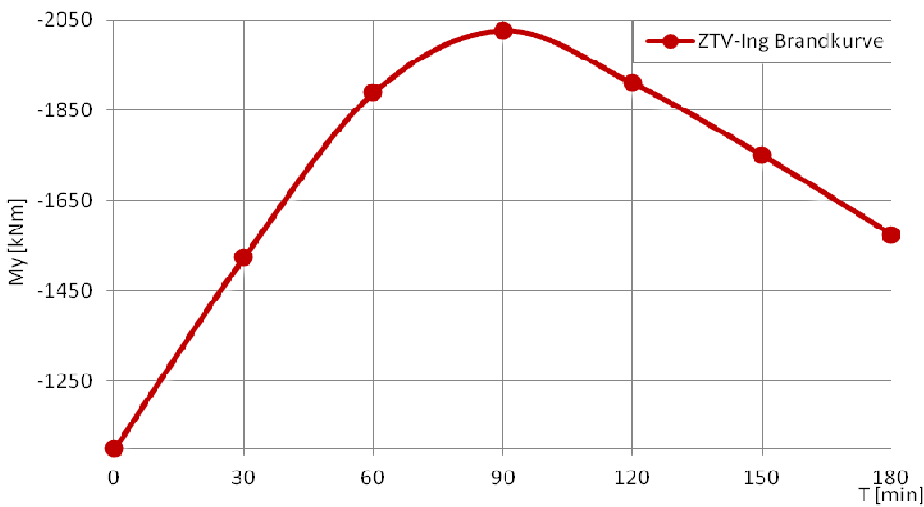


Abbildung 11: Verlauf des Stützbiegemomentes in der Decke in Abhängigkeit der Zeit [5]

Nachfolgend sind die bemessungsrelevanten Normalkräfte und Biegemomente aus der außergewöhnlichen Bemessungssituation Brand (mit Überlagerung der Gebrauchslastfälle) und die erforderliche Bewehrung für den Zeitpunkt $T=90$ min dargestellt.

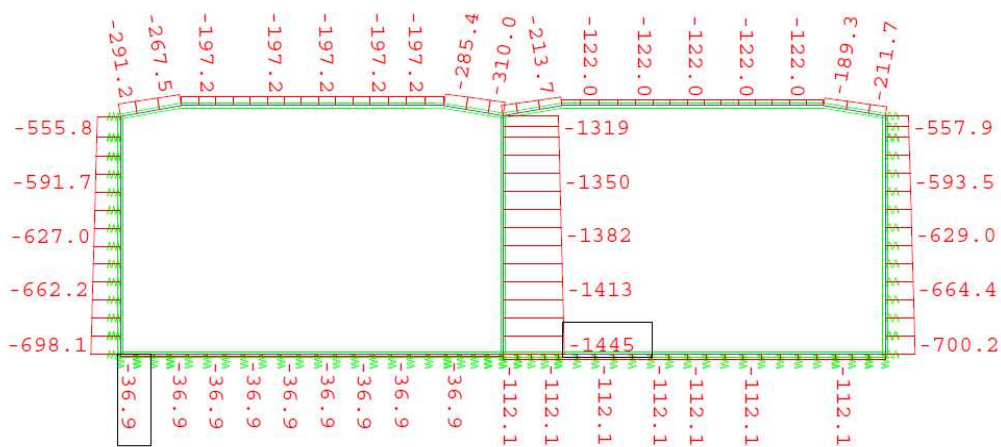


Abbildung 12: Normalkraft Bemessungssituation Brand [kN]

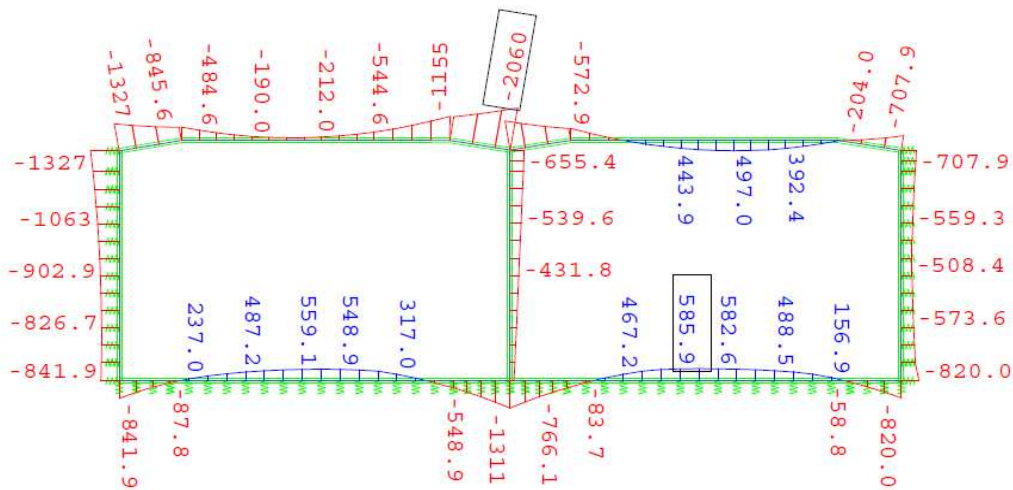


Abbildung 13: Biegemoment Bemessungssituation Brand [kN]

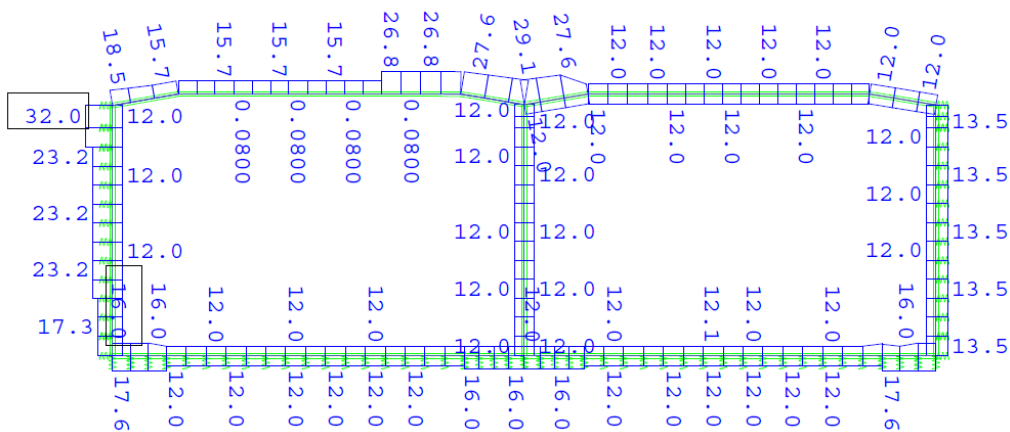


Abbildung 14: erf. Bewehrung Bemessungssituation Brand [cm²/m]

Die erforderliche Bewehrung für die außergewöhnliche Bemessungssituation mit dem genaueren rechnerischen Nachweis des Brandes unter Berücksichtigung von möglichen Abplatzungen ist geringer als die Bewehrung aus der außergewöhnlichen Bemessungssituation Brand nach ZTV-ING (Ansatz Temperaturgradient 50K im Zustand I, keine Abplatzungen).

3 STATISCHE BERECHNUNGEN NACH DEM BRAND

Durch die Brandeinwirkung erfährt der Stahlbeton nichtreversible Festigkeitsminderungen. Die nachfolgende Abbildung 15 zeigt die Restdruckfestigkeit von Normalbeton in Abhängigkeit der erreichten Maximaltemperatur auf Grundlage der DIN EN 1992 [1].

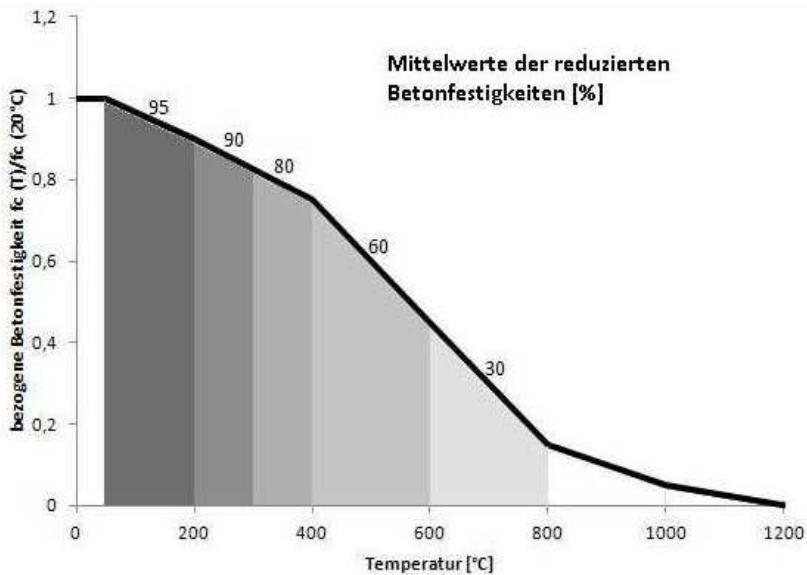


Abbildung 15: Restdruckfestigkeit von Beton in Abhängigkeit der maximalen Temperatur nach [1]

Die nachfolgende Abbildung 16, Kurve 2 zeigt die Restfestigkeit von Betonstahl (BSt 500 kaltverformt) nach der Temperaturbeanspruchung in Abhängigkeit der erreichten Maximaltemperatur. Bei Verwendung von warmgewalzten Stahl (Kurve 1) sind die temperaturabhängigen Festigkeitsreduzierungen reversibel. Im vorliegenden Berechnungsbeispiel ist dies nicht relevant, da die Bewehrung aufgrund der berücksichtigten Abplattung von 8 cm vollständig ausfällt.

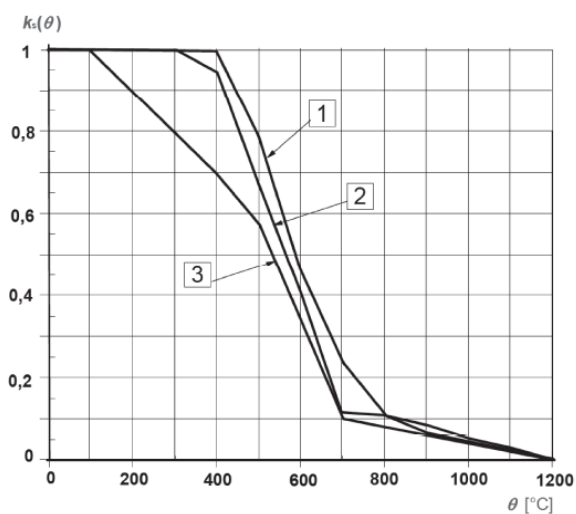


Abbildung 16: Restfestigkeit von Betonstahl in Abhängigkeit der maximalen Temperatur [1]

Es werden im Rahmen einer außergewöhnlichen Bemessungssituation statische Berechnungen für den Lastfall nach dem Brand mit Berücksichtigung der veränderten Baustoffeigenschaften durch die Brandeinwirkung durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung 17 sind die maximalen Temperaturen aus der thermischen Analyse dargestellt.

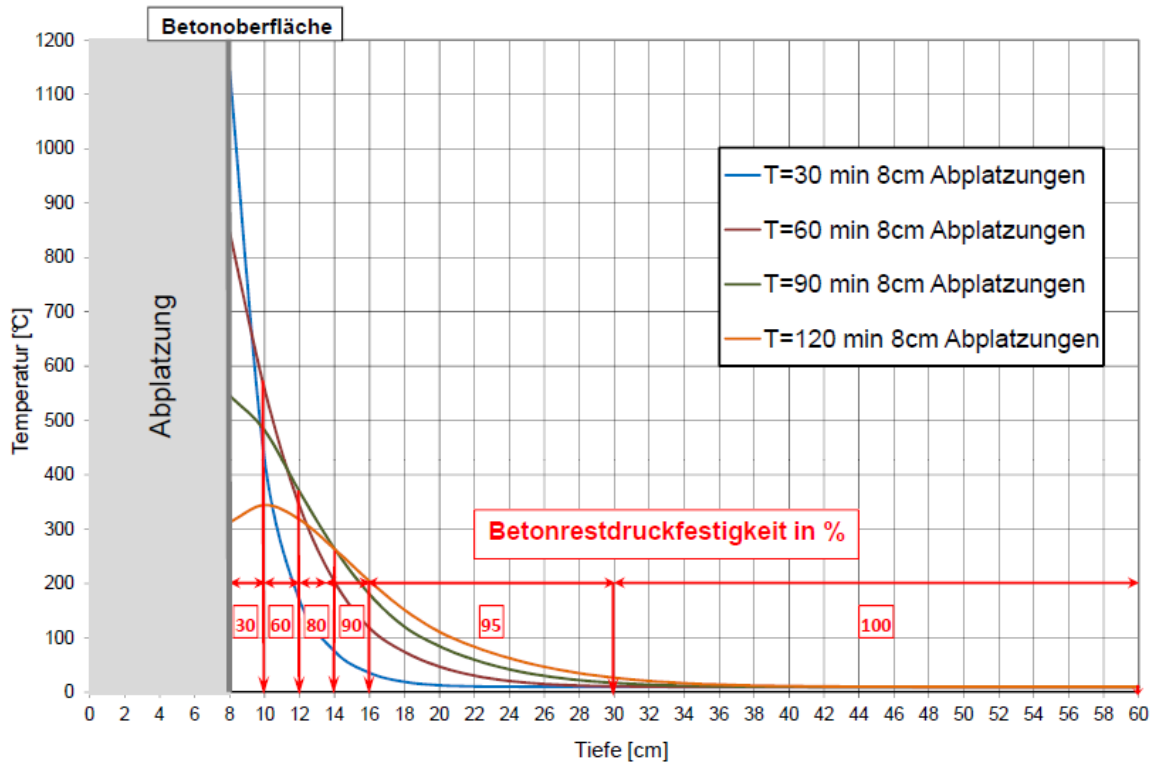


Abbildung 17: Temperaturverteilung im Betonquerschnitt bei 8 cm Betonabplatzung [5]

In Abhängigkeit der maximal erreichten Temperaturen ist eine lamellenartige Einteilung des Betonquerschnittes mit dazugehörigen reduzierten Betondruckfestigkeiten vorgenommen worden. Diese Lamelleneinteilung ist bei der Diskretisierung des Betonquerschnittes im statischen System berücksichtigt worden.

Der Betonquerschnitt wird in sieben Lamellen aufgeteilt:

Lamelle 1 (0 cm bis 8 cm von Bauteiloberfläche): Abplatzung bzw. Beton ohne Restfestigkeit

Lamelle 2 (8 cm bis 10 cm von Bauteiloberfläche): Beton mit 30 % Restfestigkeit

Lamelle 3 (10 cm bis 12 cm von Bauteiloberfläche): Beton mit 60 % Restfestigkeit

Lamelle 4 (12 cm bis 14 cm von Bauteiloberfläche): Beton mit 80 % Restfestigkeit

Lamelle 5 (14 cm bis 16 cm von Bauteiloberfläche): Beton mit 90 % Restfestigkeit

Lamelle 6 (16 cm bis 30 cm von Bauteiloberfläche): Beton mit 95 % Restfestigkeit

Lamelle 7 (ab 30 cm von Bauteiloberfläche): keine Einschränkung der Betondruckfestigkeit

Die programminterne Umsetzung wird nachfolgend beispielhaft an den Lamellen 2 (30% Betonrestfestigkeit) und Lamellen 7 (100% Betonrestfestigkeit) dargestellt.

\$Querschnitt Nr.5 Decke mitte

qnr 5 MNR 1

qpo1 upz mnr 6 \$0.3

qp 1 -.5 0.80

qp 2 -.5 0.82

...

qpo1 upz MNR 1 \$1.0

qp 1 -.5 0.0

qp 2 -.5 0.52

Der Ansatz von Abplatzung in der Größenordnung von 8cm mit Ausfall der luftseitigen Bewehrung hat bei den statischen Nachweisen nach dem Brand über übliche lineare und nichtlineare Berechnungsverfahren (Zustand II) ein rechnerisches Versagen des Systems zur Folge. Dies haben Voruntersuchungen gezeigt. Die Begründung liegt darin, dass gegenüber den Nachweisen während des Brandes durch den Entfall des negativen Zwangsbiegemomentes aus dem Brand ein positives Biegemoment im Deckenfeld mit Zugbeanspruchung auf der Luft- bzw. Innenseite vorhanden ist.

Die ausreichende Standsicherheit für die außergewöhnliche Bemessungssituation nach dem Brand kann über das Nachweisverfahren mit Ansatz eines plastischen Gelenks im Deckenfeld nachgewiesen werden (siehe Abb. 18).

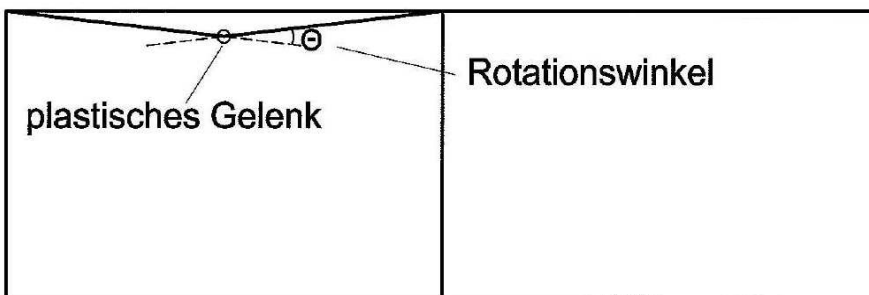


Abbildung 18 Statisches System mit plastischem Gelenk in Deckenmitte

Das plastische Gelenk wird in Form einer Drehfeder iterativ so modelliert (händisch), dass ein Biegemoment in Größenordnung der Drucknormalkraft x Hebelarm zur Systemlinie aufgenommen werden kann (siehe Abb.19).

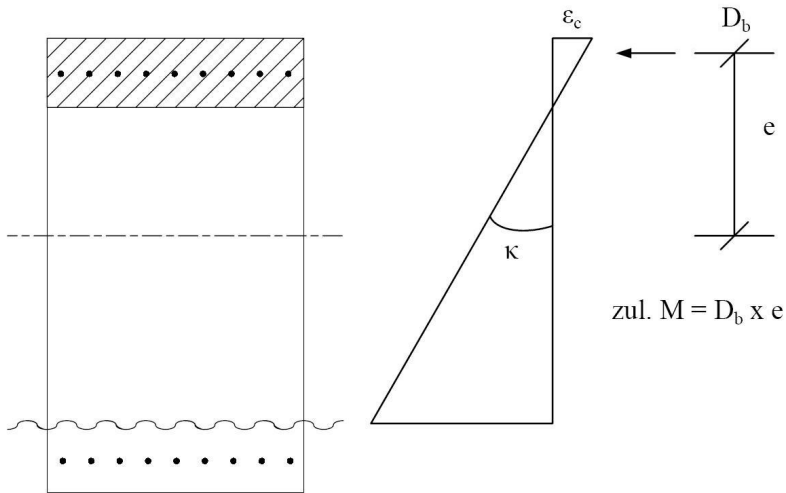


Abbildung 19 Aufnehmbares Moment in Deckenmitte bei Entfall der luftseitigen Bewehrung

Der Nachweis der plastischen Rotation wird nach DIN 1045-1, Ziffer 8.4.2 [4] über den Nachweis der Einhaltung der Bemessungswerte der zulässigen Rotation geführt:

Vorhandene Rotation $\Theta \leq \Theta_{pl,d}$

Nachfolgend werden die bemessungsrelevanten Normalkräfte und Biegemomente und die dazugehörige Bewehrung dargestellt. Es zeigt sich, dass der Lastfall nach dem Brand mit dem Nachweisverfahren der plastischen Rotation nachweisbar ist. Die vorhandene Rotation im plastischen Gelenk liegt unterhalb des Bemessungswertes der zulässigen plastischen Rotation $\Theta_{pl,d}$ (siehe Abb. 23). Die erforderliche Bewehrung für die außergewöhnliche Bemessungssituation für den Lastfall nach dem Brand unter Berücksichtigung von möglichen Abplatzungen ist über die erforderliche Bewehrung aus der außergewöhnlichen Bemessungssituation Brand nach ZTV-ING (Ansatz Temperaturgradient 50K im Zustand I, keine Abplatzungen) abgedeckt.

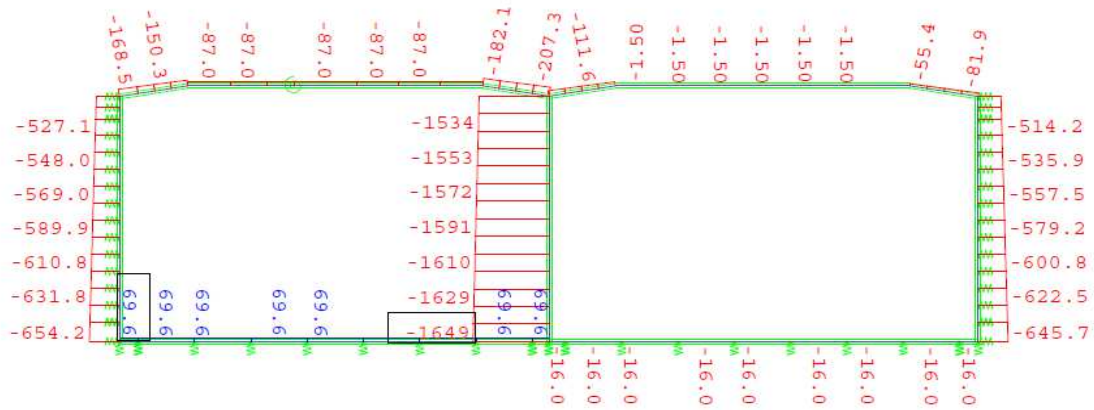


Abbildung 20: Normalkraft Bemessungssituation nach dem Brand [kN]

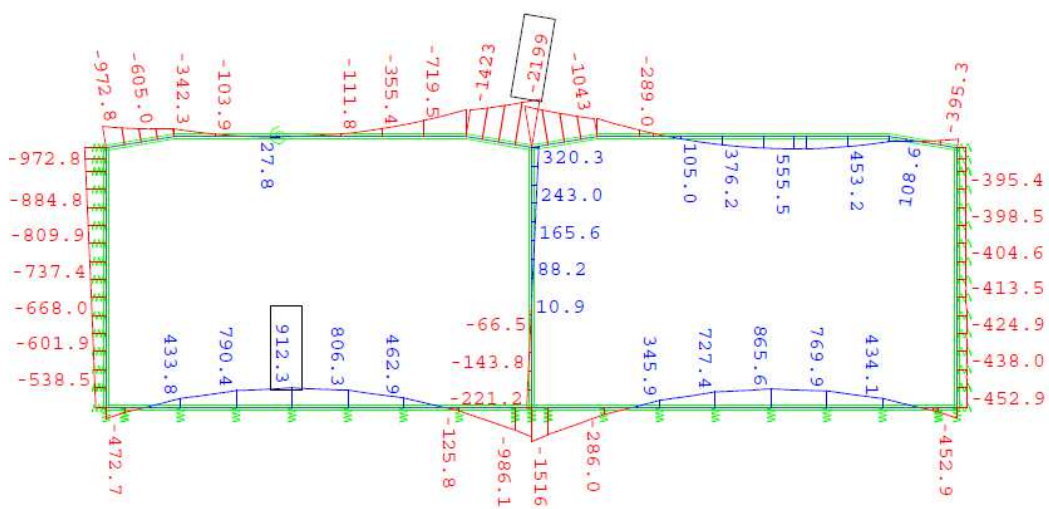


Abbildung 21: Biegemomente Bemessungssituation nach dem Brand [kNm]

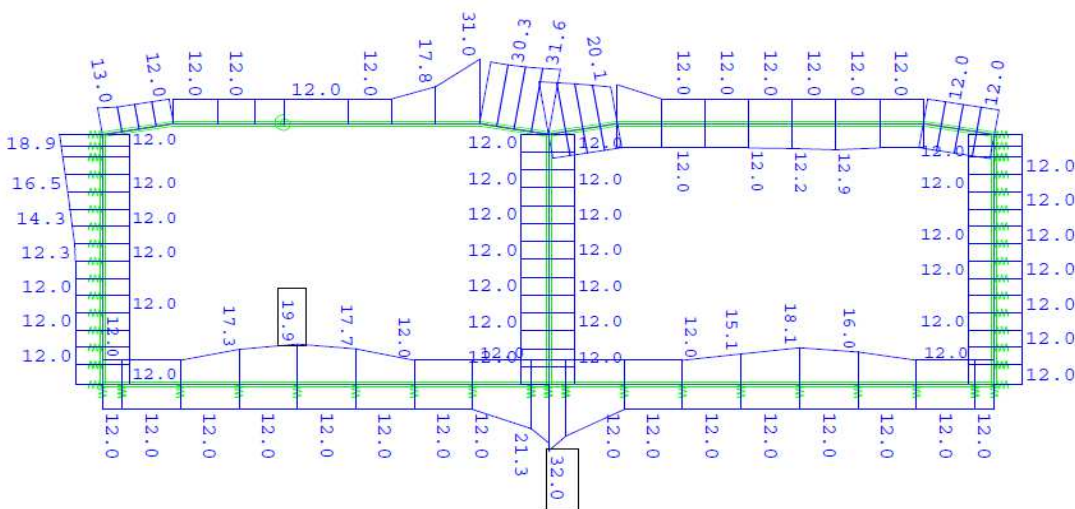


Abbildung 22: Biegebewehrung Bemessungssituation nach dem Brand [cm²/m]

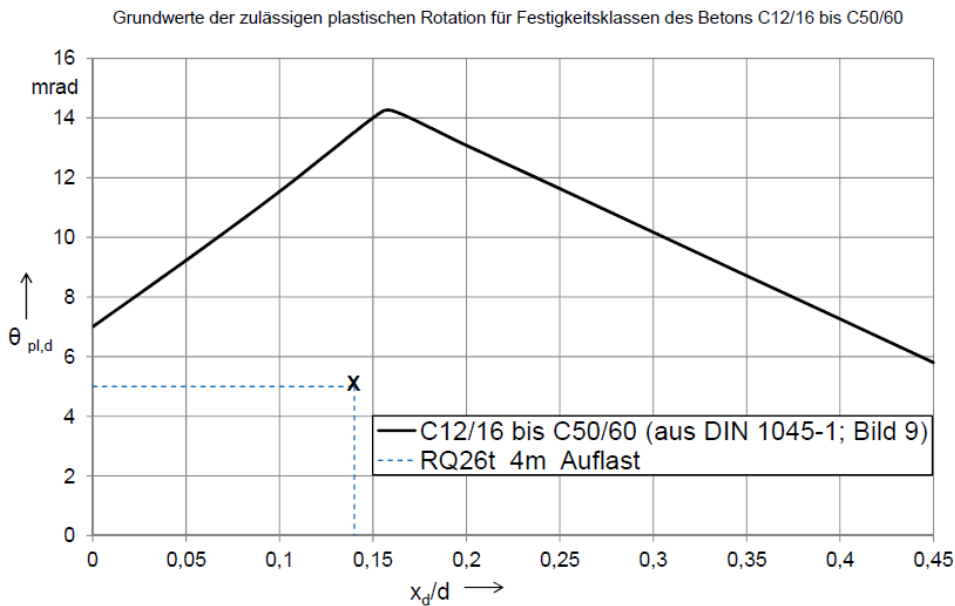


Abbildung 23: Nachweis plastische Rotation Bemessungssituation nach dem Brand

4 RESÜMEE

Die durchgeführte „heiße“ Bemessung am Beispiel des Tunnelquerschnittes RQ26t auf Grundlage des „Allgemeinen Rechenverfahrens“ nach Eurocodes EN 1992-1-2 [1] hat gezeigt, dass eine ausreichende Tragfähigkeit im Brandfall auch bei Berücksichtigung von möglichen Betonabplatzungen vorhanden ist. Die zeit- und temperaturabhängigen Betonabplatzungen wurden auf Grundlage der Ergebnisse von Großbrandversuchen [3] angesetzt.

Zusätzlich zu der Berechnung während des Brandfalls wurden Standsicherheitsuntersuchungen für den Lastfall nach dem Brand durchgeführt. Es wurden der Ausfall der luftseitigen Bewehrung und die nichtreversiblen temperaturabhängigen Festigkeitsabminderungen des Betons berücksichtigt. Über das Nachweisverfahren der plastischen Rotation mit Ansatz eines plastischen Gelenkes i , Deckenfeld konnte eine ausreichende Tragfähigkeit nachgewiesen werden.

5 BETEILIGTE



IMM Maidl & Maidl

Beratende Ingenieure
GmbH & Co. KG

44799 Bochum;
Tel.: +49 (0)234 970 77-0
imm.bochum@t-online.de

Universitätsstraße 142;
Fax: +49 (0)234 970 77-88
<http://www.imm-bochum.de>

6 LITERATUR

- [1] *DIN EN 1992-1-2: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall*, Dezember 2010
- [2] *Verkehrsblatt Sammlung S1056: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) Teil 5 „Tunnelbau“*, Sammlung Brücken- und Ingenieurbau – Baudurchführung, Verkehrsblatt-Verlag Borgmann GmbH & Co. KG, Dortmund; Download über www.bast.de
- [3] *Dehn, F., et al.: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln*, Bericht zum FE Projekt 15.448/2007/ERB im Auftrag des BMVBS/ der BASt, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“, Heft B 73, Wirtschaftsverlag NW GmbH, 2010, Bremerhaven
- [4] *DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton- Teil 1: Bemessung und Konstruktion*, August 2008
- [5] *Peter C., Knief J., Schreyer J., Piazzolla A...: Rechnerischer Nachweis des baulichen Brandschutzes für Tunnel in offener Bauweise*, Schlussbericht zum FE Projekt 15.0502/2010/ERB im Auftrag des BMVBS/ der BASt, Februar 2012 (Veröffentlichung in Vorbereitung)