

STABILITÄTSGEFÄHRDETE STAHLBETONRAHMENSYSTEME UNTER BRANDEINWIRKUNG

Dirk Hollmann, Werther
Jens-Uwe Schulz, Detmold

EINLEITUNG

Im Hochbau werden häufig Stahlbetonträger mit großer Biegeschlankheit auf ebenfalls schlanken, eingespannten Stahlbetonstützen gelagert und als Rahmensystem bemessen. Für Träger und Stützen ist unter Normaltemperatur in der Regel der Grenzzustand der Tragfähigkeit für seitliches Ausweichen aus der Ebene bzw. „Knicken“ nach Theorie II. Ordnung nachzuweisen [1,2]. In Abhängigkeit von den bauaufsichtlichen Anforderungen ergeben sich für solche Rahmensysteme nachzuweisende Feuerwiderstandsdauern von bis zu 90 Minuten. Im Eurocode 2 Teil 1-2 [3,4] finden sich keine speziellen Hinweise zum Nachweis kippgefährdeter Stahlbetonträger und auch keine Tabellen für ganze Rahmensysteme.

In diesem Beitrag werden übliche stabilitätsgefährdete Stahlbetonrahmensysteme, bestehend aus eingespannten Stützen und Trägern, nach dem allgemeinen Rechenverfahren des Eurocodes 2 Teil 1-2 [3,4] mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente bezüglich ihres Trag- und Verformungsverhaltens analysiert. Einflüsse unsymmetrischer Brandeinwirkungen infolge klassifizierter Anbauteile, z.B. Trennwände, sowie stabilisierende Effekte der Dach- und Wandkonstruktion werden berücksichtigt. Die Interaktion der temperaturabhängigen Kopplung des Trägers mit der Stütze ist ebenfalls Bestandteil der Untersuchungen.

Die Rechnungen nach dem allgemeinen Rechenverfahren erfolgen mit dem Programmsystem InfoCad [5]. Dieses Programm ist entsprechend DIN EN 1991-1-2/NA [6] validiert. Am Ende des Beitrags wird darüber hinaus die Validität der durchgeführten Rechnungen insgesamt diskutiert.

Der vorliegende Beitrag ist eine thematische Fortsetzung der Untersuchungen aus dem Vorjahr [7].

SYSTEM

Das Grundsystem des gekoppelten Rahmens wird in Bild 1 dargestellt. Der Binder ist ein T-Querschnitt mit einer Obergurtbreite von 55 cm und 20 m Länge. Für die Druckzone wird gerade das Abgrenzungskriterium gemäß Ziffer 5.9 aus EC2-1-1 [1] eingehalten, wonach die Auswirkungen des seitlichen Ausweichens des Obergurtes nach Th. II. Ordnung vernachlässigt werden dürfen. Die Kragstützen sind in beiden Richtungen ungehalten und haben eine Schlankheit $\lambda=100$. Bei der Auflagerung des Binders wird eine Ausmitte von 6 cm angesetzt. Die Schiefstellung der Stützen in beiden Richtungen beträgt jeweils

Beitragsnr.

$\theta_y = \theta_x = 1/200$. Die äußeren Einwirkungen sind ebenfalls in Bild 1 zusammengefasst.

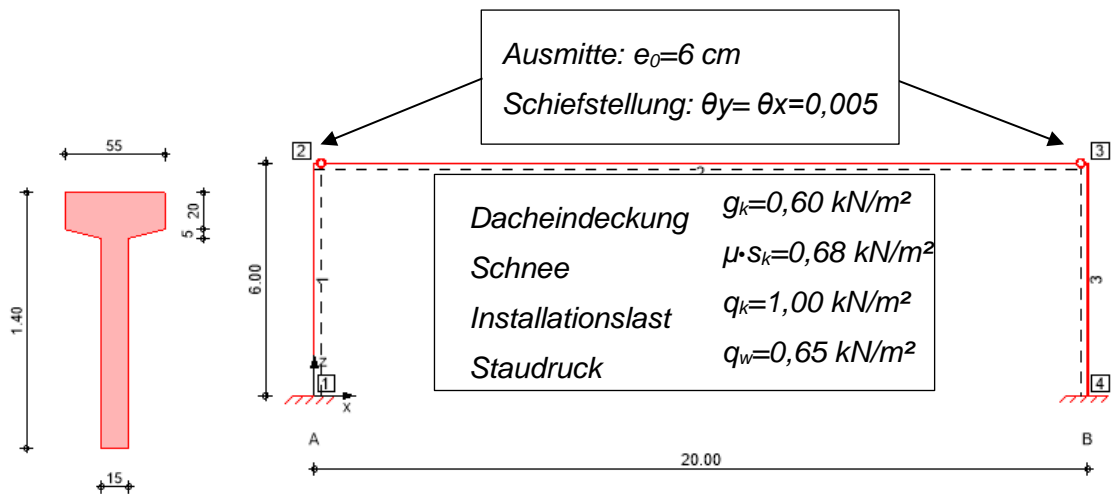


Bild 1 Statisches System des Stahlbetonrahmens, Rahmenabstand 7,50 m

Die Querschnitte mit den Grundprinzipien der Bewehrungsanordnung ergeben sich aus Bild 2. Die Bewehrung in den Stützen wird nach 2 Typen unterschieden. Typ 1 konzentriert die Bewehrung auf 2 Seiten entsprechend der Biegung in Hauptrichtung. Typ 2 ist eine Umfangsbewehrung.

Die Auslegung des Systems erfolgt mithilfe der MB-Baustatik [8]. Die Stützenbewehrung wird dabei mit einer numerischen Methode am Ersatzstab ermittelt. Die Verteilung der Windlasten aufgrund der Binder-Stützen-Kopplung fließt in den Nachweis ein. Die anschließende Heißbemessung für die Feuerwiderstandsklasse R90 erfolgt auf Basis einer erweiterten Zonenmethode [8].

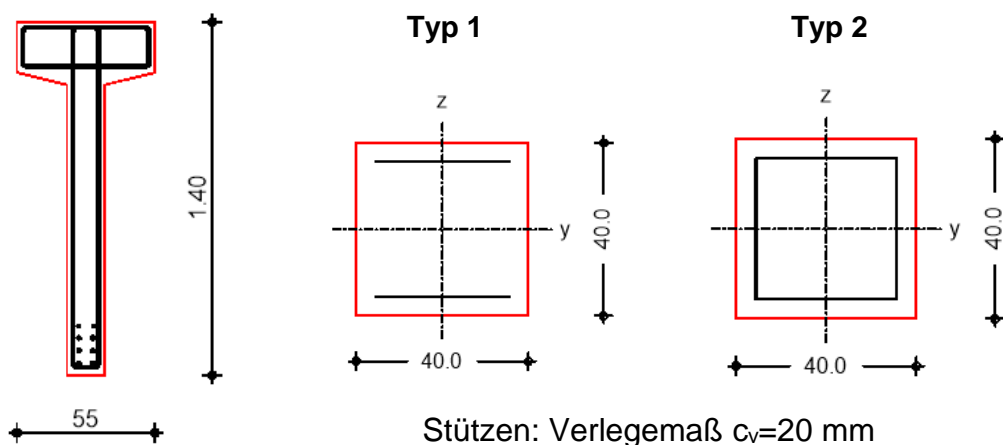


Bild 2 Querschnitte mit Bewehrungsprinzipien

STÜTZEN ALS ERSATZSTAB

Im ersten Schritt erfolgt die Heißbemessung der Stützen am Ersatzstab. Dabei werden die Bewehrungsgrade aus der Kaltbemessung und der Bemessung mit der erweiterten Zonenmethode für R90 mit der genauen Methode nach EC2-1-2 [3, 4] anhand der Kopfverschiebungen verglichen. Ferner wird unterschieden nach einer 3-seitigen und einer 2-seitigen Beflammung. Letztere berücksichtigt klassifizierte Anbauteile, bspw. eine nachträglich eingezogene Trennwand, vgl. Bild 3.

Bei der Auslegung der Bewehrung wird grundsätzlich eine 3-seitige Beflammung vorausgesetzt. Die Trennwand wird quasi nachträglich eingebaut und ist somit kein Auslegungslastfall.

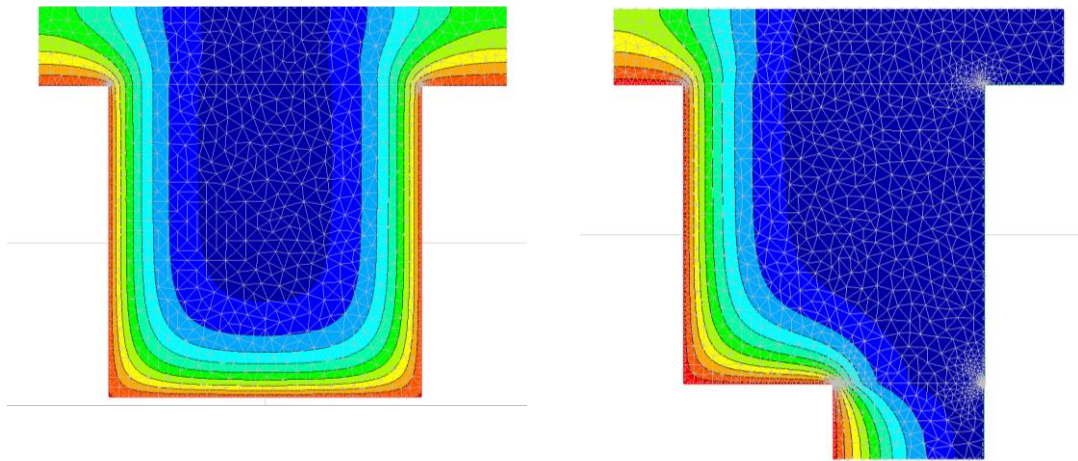


Bild 3 Thermische Querschnitte der Stützen: links: 3-seitige Beflammung; rechts 2-seitige Beflammung außermittig adaptierter Trennwand

3-seitige Beflammung

In den nachfolgenden Bildern werden jeweils die Verläufe der Auflagermomente über der Branddauer dargestellt. Die durchgezogenen Linien zeigen jeweils das Moment M_y , welches der Hauptrichtung aus der Kaltbemessung entspricht. Das Moment M_x ergibt sich aus der Schiefstellung aus der Ebene heraus. Die Auswertung erfolgt jeweils anhand von 2 Bewehrungsgraden: der niedrige Bewehrungsgrad ergibt sich aus der ausschließlichen Bemessung bei Normaltemperatur; der höhere Bewehrungsgrad ergibt sich aus der Heißbemessung mit der erweiterten Zonenmethode des Programmsystems [8].

Der Verlauf des Hauptmoments M_y beginnt mit negativen Werten und hat bei beiden Bewehrungstypen nach rund 40 Minuten einen Nulldurchgang. Dieses ist auf den Gradienten der thermischen Dehnungen infolge der unsymmetrischen Beflammung zurückzuführen. Die Krümmung der Stütze wirkt entgegen der äußeren Lastausmitte und Anfangsschiefstellung. Bei beiden Bewehrungstypen wird die angestrebte Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten mit dem kleineren

Bewehrungsgrad nicht erreicht. Der höhere Bewehrungsgrad (entsprechend der erweiterten Zonenmethode) führt dagegen bei beiden Bewehrungstypen zu ausreichenden Feuerwiderstandsdauern. Der Einfluss des Bewehrungstyps auf den Verlauf des Momentes in der Nebenrichtung wird beim Vergleich der Bilder 4a und 4b sehr deutlich. Die umlaufende Bewehrung führt zu um Größenordnungen von 50% reduzierten Auflagermomenten. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass neben der reinen Anordnung ebenfalls ein Effekt aufgrund des insgesamt größeren Bewehrungsgrades vorliegt.

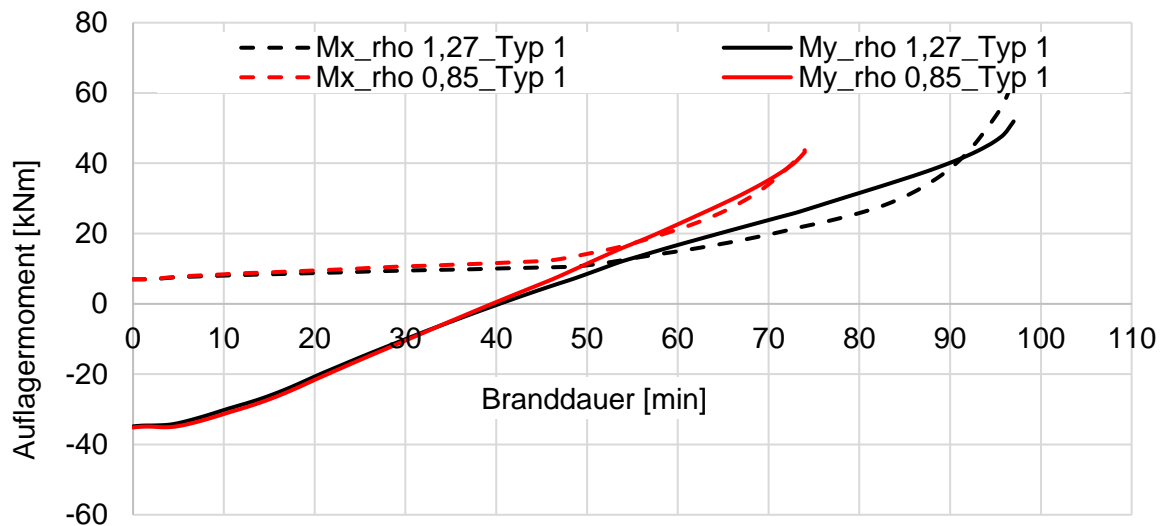


Bild 4a 3-seitige Beflammung und Bewehrungsanordnung Typ 1: Verlauf der Auflagermomente

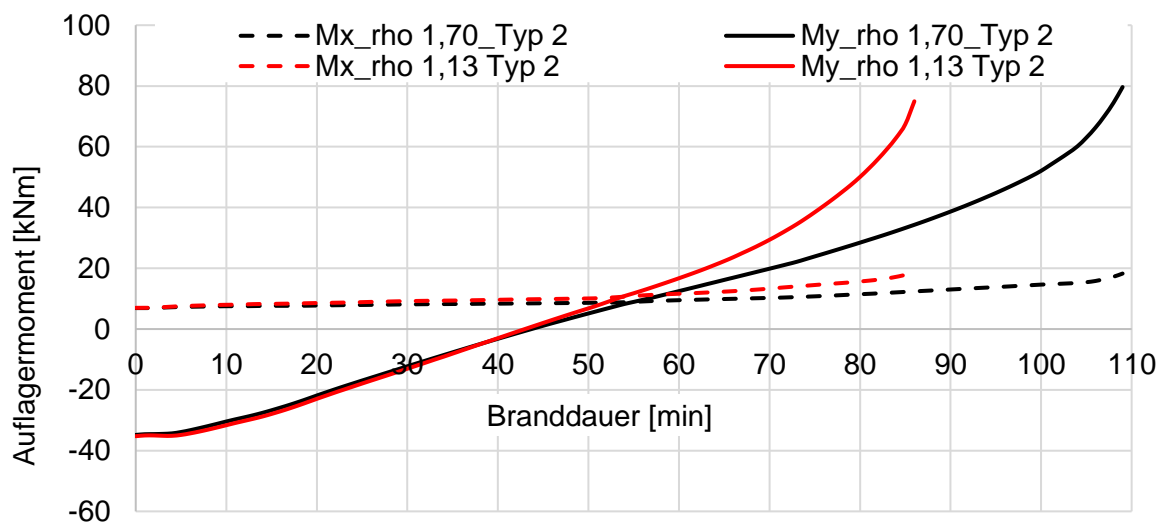


Bild 4b 3-seitige Beflammung und Bewehrungsanordnung Typ 2: Verlauf der Auflagermomente

2-seitige Beflammung

Bei den Stützen mit 2-seitiger Beflammung reicht der geringere Bewehrungsgrad aus der reinen Kaltbemessung wiederum nicht aus, um die Feuerwiderstandsklasse R90 sicherzustellen. Der mit der erweiterten Zonenmethode ermittelte Bewehrungsgrad zeigt Reserven auf – insbesondere bei der Umfangsbewehrung.

Die Auflagerkräfte in Hauptrichtung wechseln nun nicht mehr das Vorzeichen, daher bleibt die Biegung aufgrund äußerer Lasten dominierend. Das veränderte Temperaturfeld mit den entsprechenden thermischen Dehnungen hat jedoch einen großen Einfluss auf die Krümmung in der Nebenrichtung. Unabhängig vom Bewehrungstyp erreichen die Auflagermomente ein Mehrfaches gegenüber dem Referenzbauteil mit 3-seitiger Beflammung.

Wenngleich die nachträglich eingebaute Trennwand nicht zum vorzeitigen Verlust der Standsicherheit der Stütze selbst führt, wird ggf. die Fundamentausmitte in der Nebenrichtung maßgebend. Dieses ist im Einzelfall zu prüfen. Im weiteren Verlauf des Beitrags wird hierzu auch noch der entlastende Einfluss baupraktischer Halterungen überprüft.

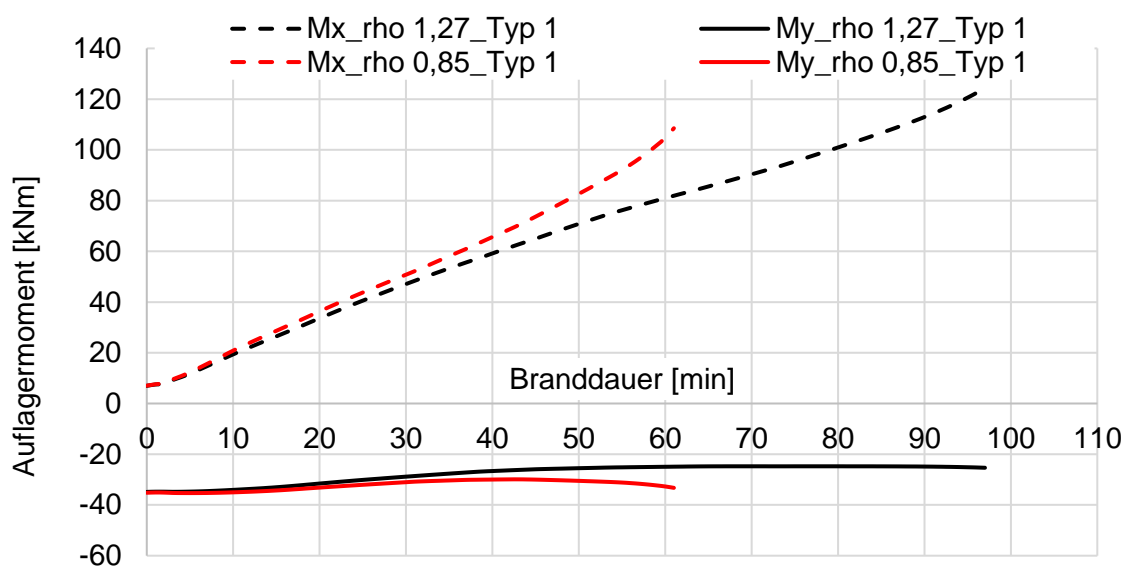


Bild 5a 2-seitige Beflammung und Bewehrungsanordnung Typ 1: Verlauf der Auflagermomente

Beitragsnr.

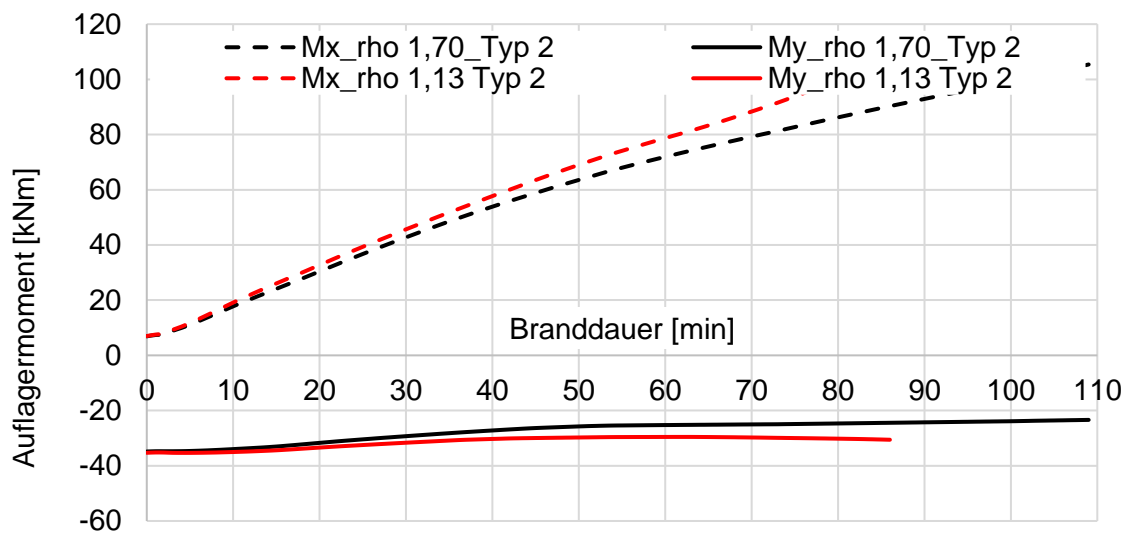


Bild 5b 2-seitige Beflammung und Bewehrungsanordnung Typ 2: Verlauf der Auflagermomente

BINDER ALS ERSATZSTAB

Die thermischen Querschnitte des Binders bei 3- und 1-seitiger Beflammung werden in Bild 6 dargestellt. Die rechten Stäbe der Unterbewehrung haben nach 90 Minuten eine Temperatur von ca. 500 °C. Die linken Stäbe haben lediglich eine Temperatur von 200 °C und verlieren damit kaum an Festigkeit und Steifigkeit.

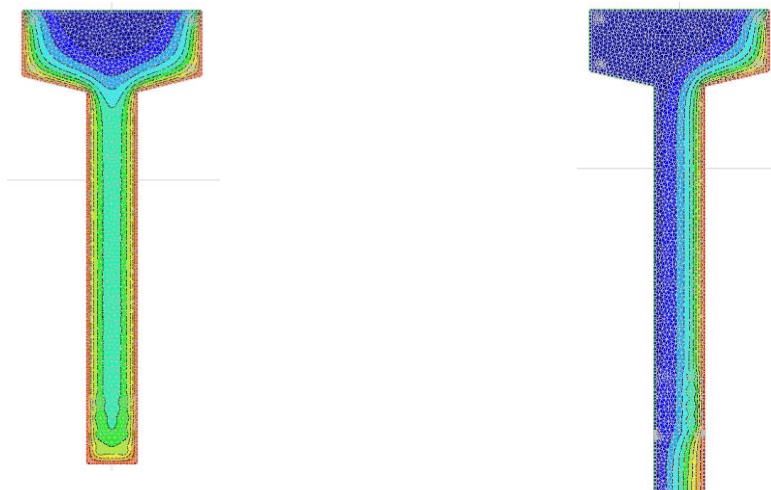


Bild 6 Thermische Querschnitte des Binders: links: 3-seitige Beflammung; rechts 1-seitige Beflammung aufgrund adaptierter Trennwand

Der Ersatzstabnachweis des Binders erfolgt jeweils mit einer seitlichen Vorverformung von $l/300$. Die Durchbiegung u_z des Binders mit 3-seitiger Beflammung wächst nach 90 Minuten über alle Schranken. Die seitliche Verschiebung fällt nur sehr gering aus. Der 1-seitig beflamte Träger dagegen weist nach 90 Minuten lediglich eine Vertikalverschiebung $u_z=200$ mm auf. Die seitliche Verschiebung ist mit $u_y=400$ mm entsprechend größer. Das Torsionsmoment an der Gabellagerung beträgt nach 90 Minuten ca. 72 kNm. Bei Betrachtung der Temperaturfelder ist das Verformungsverhalten insgesamt plausibel. Die thermischen Dehnungen führen zur seitlichen Verschiebung, während die kalte Bewehrung (immerhin 50%) die vertikale Verschiebung verhindert, welche für Biegebauteile im Regelfall immer charakteristisch für den Versagensmechanismus ist.

Die 1-seitige Beflammung führt offensichtlich nach 90 Minuten noch nicht zum Biegeversagen. Die Frage hinsichtlich des aufnehmbaren Torsionsmomentes bleibt indes noch ungeklärt. Auf diese Problematik wurde bereits in [7] hingewiesen.

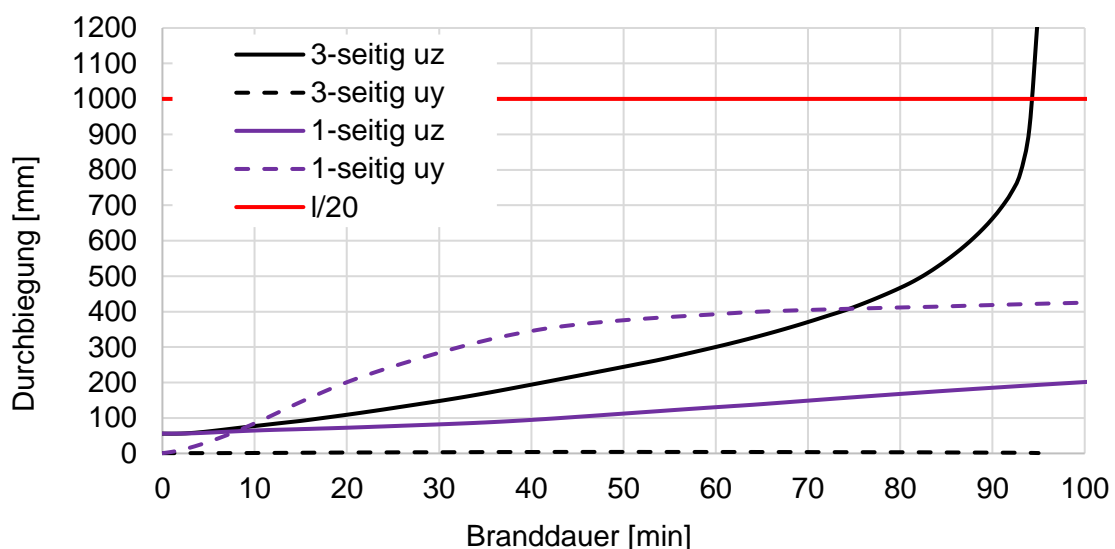


Bild 7 Verschiebungen des Bindermittelpunktes bei 3- und 2-seitiger Beflammung

RAHMEN IN DER EBENE GEHALTEN

Um eine Annäherung zum Gesamtproblem zu finden, wird in diesem Unterabschnitt zunächst ein Rahmen untersucht, der vollständig starr in der Ebene gehalten ist. Die Stützenbewehrung entspricht Typ 1. Die Beflammung erfolgt mehrseitig, also ohne Trennwand.

Der Rahmen erreicht eine Feuerwiderstandsdauer von mehr als 90 Minuten. Das Gesamtversagen wird gemäß Bild 8a offensichtlich durch das Biegeversagen des Binders eingeleitet. Die vertikale Verschiebung u_z wächst nach 90 Minuten über alle Schranken. Das Versagen des Binders im Rahmensystem verläuft etwas

„langsamer“ als beim Ersatzstab. Grund dafür ist vermutlich die Zugentlastung infolge der thermischen Dehnungen und den dadurch nach außen strebenden Kragstützen. Die Verschiebung u_x des Knotens 4 nach rechts reduziert sich in den letzten Minuten wieder. Der Binder reißt die Stütze buchstäblich mit.

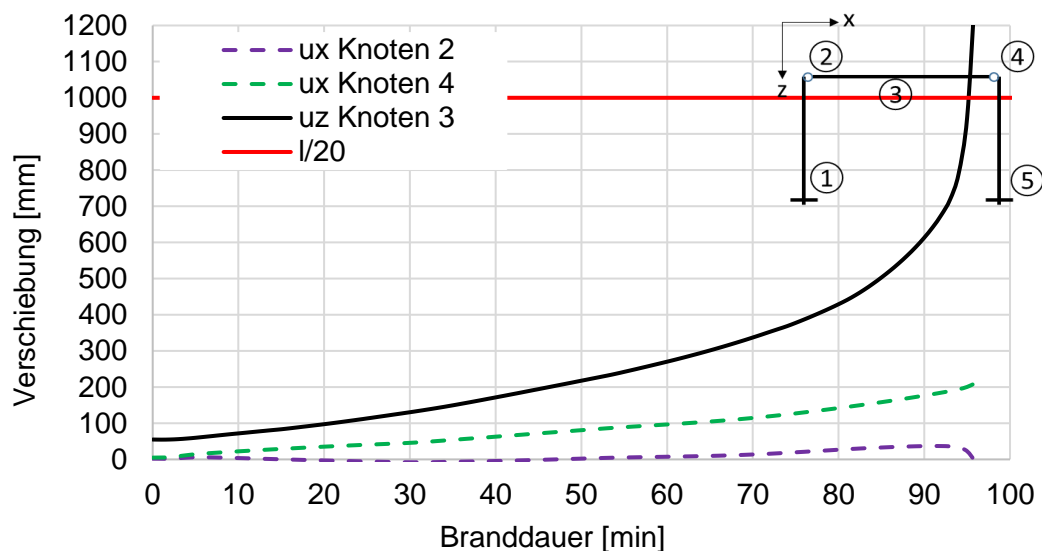


Bild 8a Verschiebungen des in der Ebene gehaltenen Rahmens

Der Verlauf der Einspannmomente ist ebenfalls durch die thermischen Dehnungen zu erklären. Die Stützen erfahren Zwänge, weil infolge der Kopplung mit dem Binder eine freie Stützenskopferschiebung nach außen nicht möglich ist. Die Stützen behindern sich also gegenseitig.

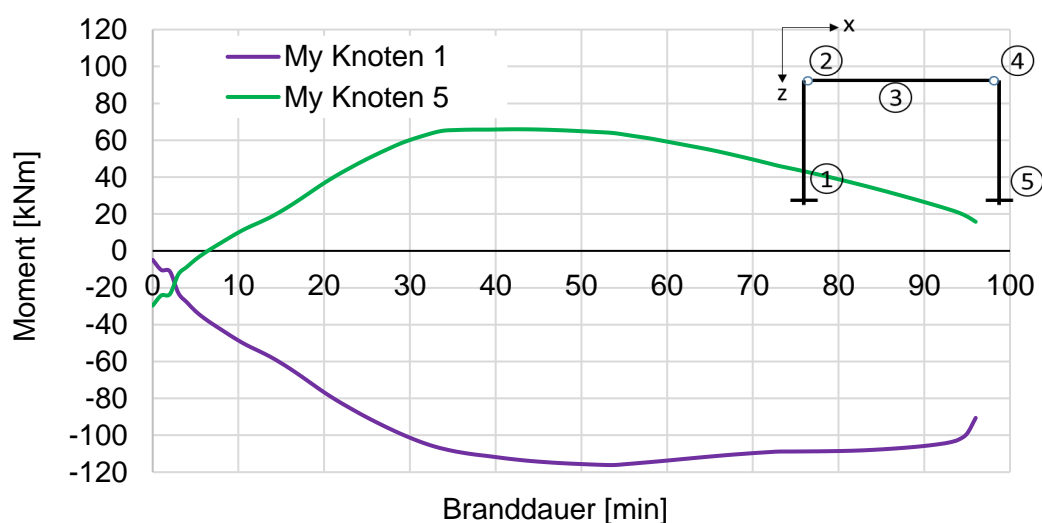


Bild 8b Auflagermomente des in der Ebene gehaltenen Rahmens

RAHMEN FREISTEHEND

In diesem Abschnitt wird der Rahmen als komplett freistehendes Tragwerk abgebildet. Dabei wird zunächst die 3-seitige bzw. mehrseitige Beflammung und dann die halbseitige Beflammung infolge des nachträglichen Einbaus einer Trennwand untersucht. Die Stützenbewehrung entspricht wiederum Typ 1. Der Anschluss des Binders an die Stützen sei um die z-Achse Biegesteif.

Mehrseitige Beflammung

Der freistehende Rahmen mit mehrseitiger Beflammung erreicht eine Feuerwiderstandsdauer von weniger als 60 Minuten. Maßgebend für das Systemversagen ist hier nicht die Vertikalverformung des Binders, sondern die Verschiebung u_y aus der Ebene heraus, vgl. Bild 9a. Die Verschiebungen u_x in der Ebene sind zum Versagenszeitpunkt noch sehr gering.

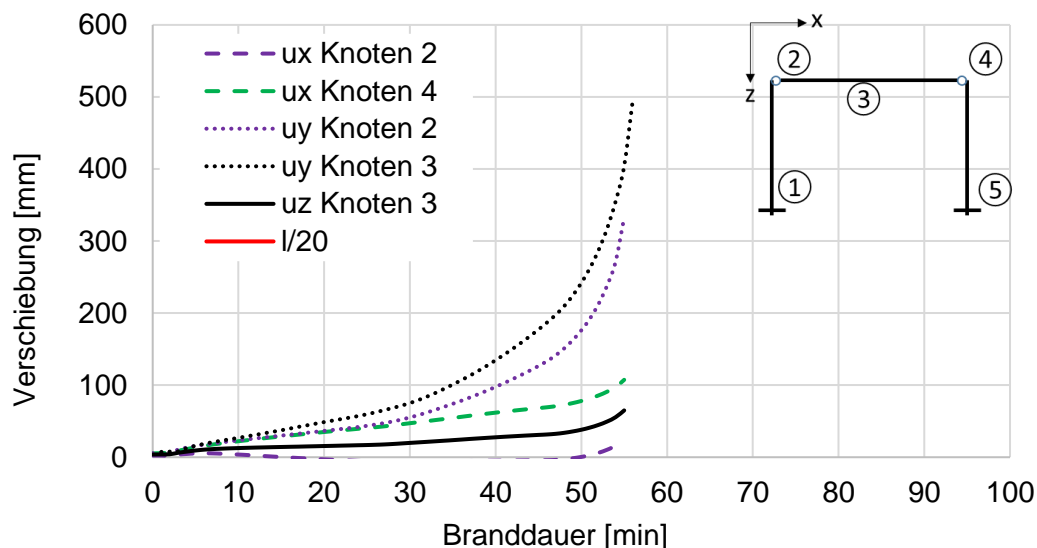


Bild 9a Verschiebungen des freistehenden Rahmens mit mehrseitiger Beflammung

Beim freistehenden Rahmen entwickelt sich über die Branddauer ein beträchtliches Auflagermoment M_x aus der Ebene heraus, vgl. Bild 9b. Zusätzlich zur Biegung wächst in den Stützen ein Torsionsmoment an, welches im Wesentlichen aus dem M_z des Binders stammt. Das Torsionsmoment im Binder beträgt zum Versagenszeitpunkt $T=27$ kNm.

Das Systemverhalten ist deutlich ungünstiger als die Ersatzstabnachweise für Binder und Stützen jeweils vermuten lassen. Dieses gilt nicht nur für die Schnittgrößen der Stütze und Binder, sondern insbesondere auch für die Fundamentausrmitteln. Die beschriebenen Sachverhalte lassen noch keinen Rückschluss auf das Sicherheitsniveau im Realbauwerk zu, weil dort immer baupraktische oder sogar planmäßige Halterungen zur Aufnahme der Beanspruchungen aus der Ebene heraus vorliegen.

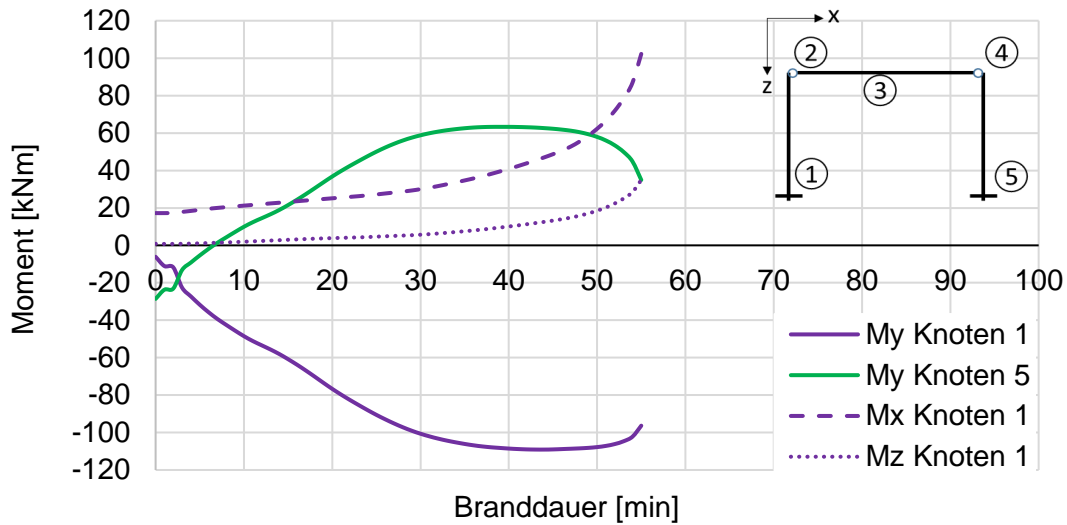


Bild 9b Auflagermomente des freistehenden Rahmens mit mehrseitiger Beflammung

Halbseitige Beflammung

In den Bildern 10 und 12 sind die Ergebnisse für eine halbseitige Beflammung in negativer y-Richtung dargestellt; die geometrischen Imperfektionen Schiefstellung der Stützen und seitliche Vorverformung der Binders ($l/300$) weisen in die positive y-Richtung. Infolge der relativ zur dreiseitigen Beflammung geringen Temperierung des Binders (siehe Bild 6) verliert er kaum an Festigkeit und Steifigkeit und es tritt kein Versagen bis 120 Minuten ein.

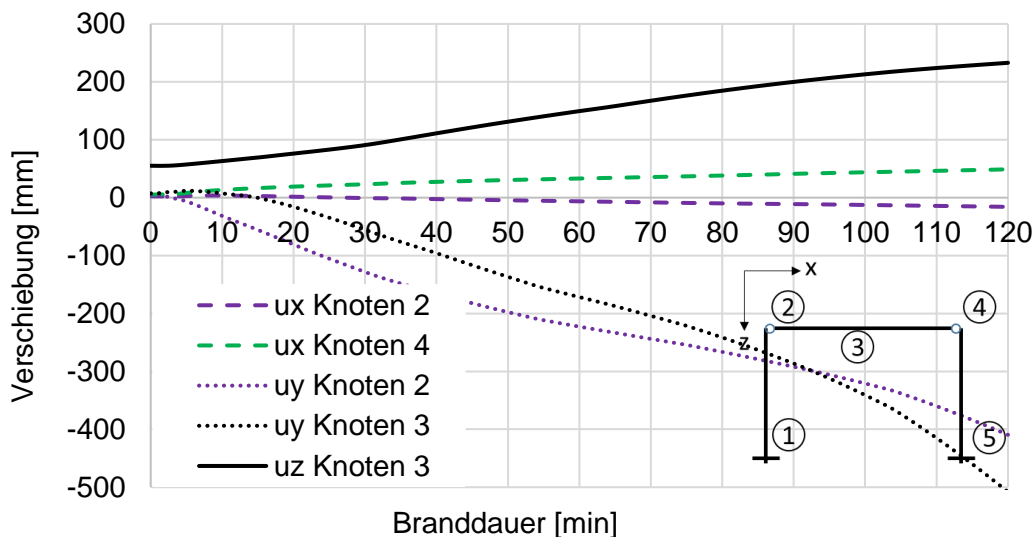


Bild 10a Verschiebungen des freistehenden Rahmens mit halbseitiger Beflammung

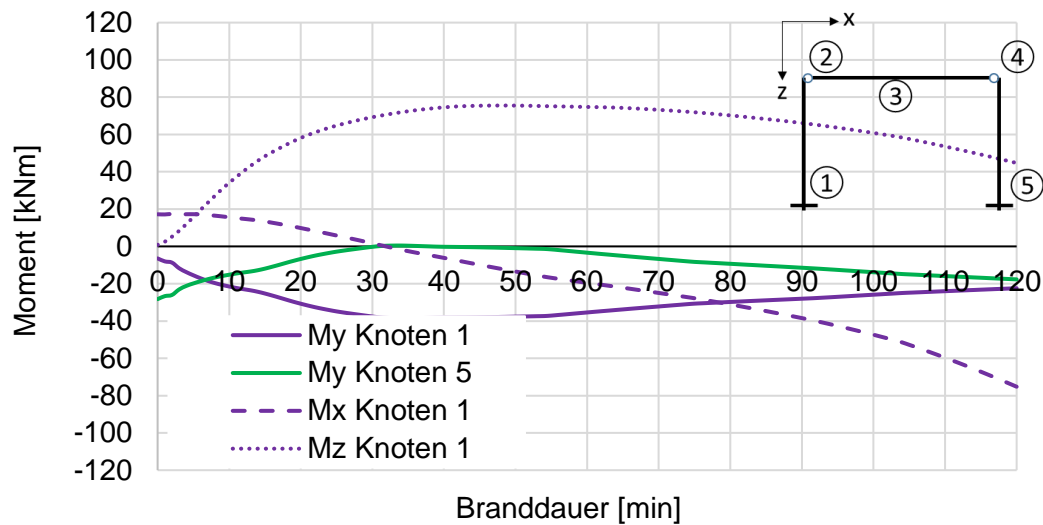


Bild 10b Auflagermomente des freistehenden Rahmens mit halbseitiger Beflammung

Die Stützenkopfverformungen als auch die Verformungen in Bindermitte vergrößern sich nahezu linear mit zunehmender Branddauer, vgl. Bild 10a. Das maximale Torsionsmoment im Binder beträgt ca. 48 kNm. In den Stützen erhöht sich die Biegebeanspruchung mit zunehmender Zeitdauer, insbesondere schlägt das Moment um die y-Achse von 19 kNm bei $t=0$ auf -75 kNm $t=120$ min um. Bei $t=120$ min sind M_y und M_z von gleicher Größenordnung. Das Torsionsmoment steigt bis $t=40$ min auf den Maximalwert von -80 kNm und verringert sich linear bis $t=120$ min auf -42 kNm, vgl. Bild 10b.

Einfluss der Richtung halbseitiger Beflammung

Wird die Richtung der halbseitigen Beflammung in die positive y-Richtung (in gleicher Richtung wie die geometrischen Imperfektionen) geändert, tritt ein Versagen bei $t=83$ min auf. Allerdings hat der Anschluss des Binders an die Stützen um die z-Achse einen Einfluss auf das Tragverhalten; bei Annahme einer freien Verdrehung beim Anschluss um die z-Achse tritt wieder bis $t=120$ min kein Versagen ein. Allerdings erhöhen sich die aufzunehmenden maximalen Torsionsmomente im Binder wieder auf 48 kNm.

RAHMEN BAUPRAKTISCH GEHALTEN

Die vorstehenden Untersuchungen zeigen, dass das Systemtragverhalten mitunter deutlich ungünstiger sein kann als die Ersatzstabnachweise vermuten lassen. Die vorstehenden Rahmen wurden jedoch als völlig freistehend modelliert, was für die Kaltbemessung in der Regel üblich ist – zumindest bei den gewählten Abmessungen. Das Konzept der Einzelbauteilnachweise unter Einwirkung der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) unterstellt implizit, dass im Realbauwerk Randbedingungen vorliegen, die ungünstigen Systembedingungen

wiederum entgegenwirken. Diesem Ansatz folgend werden in den beiden Unterabschnitten baupraktisch in Binderebene gehaltene Rahmen untersucht.

Mehrseitige Beflammung

Bei diesem Rahmensystem wird die Binderhalterung aus [7] noch einmal aufgegriffen und eine leichte seitliche Bettung des Binders mit $k=0,05 \text{ MN/m}^2$ angesetzt. Das System hat nunmehr eine Feuerwiderstandsdauer von mehr als 90 Minuten. Die Verschiebungen und Auflagerkräfte gemäß Bild 11 sind mit denen des starr gehaltenen Rahmens gemäß Bild 8 vergleichbar. Für die Aussteifungs-konstruktion ergibt sich eine mittlere Stabilisierungslast von lediglich $q_{s,m}=0,3 \text{ kN/m}$.

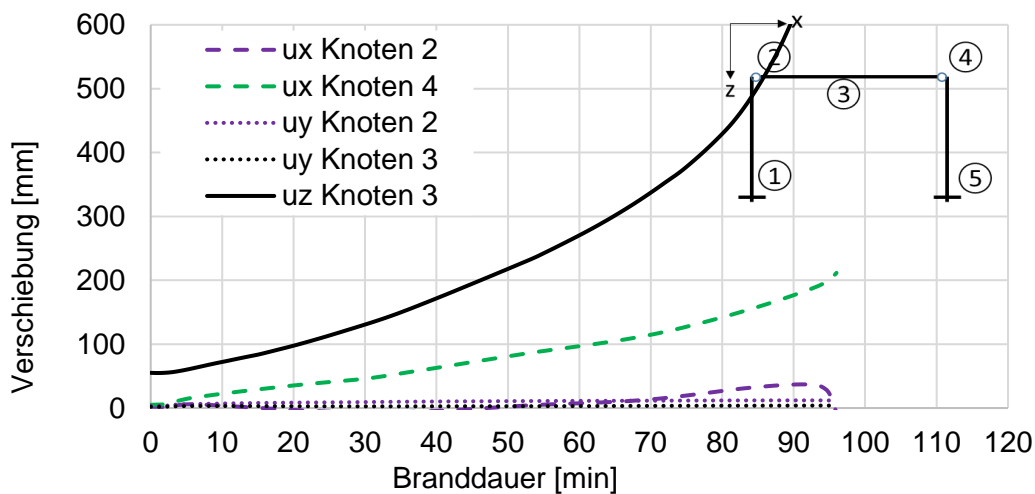


Bild 11a Verschiebungen des Rahmens mit mehrseitiger Beflammung und baupraktischer Halterung

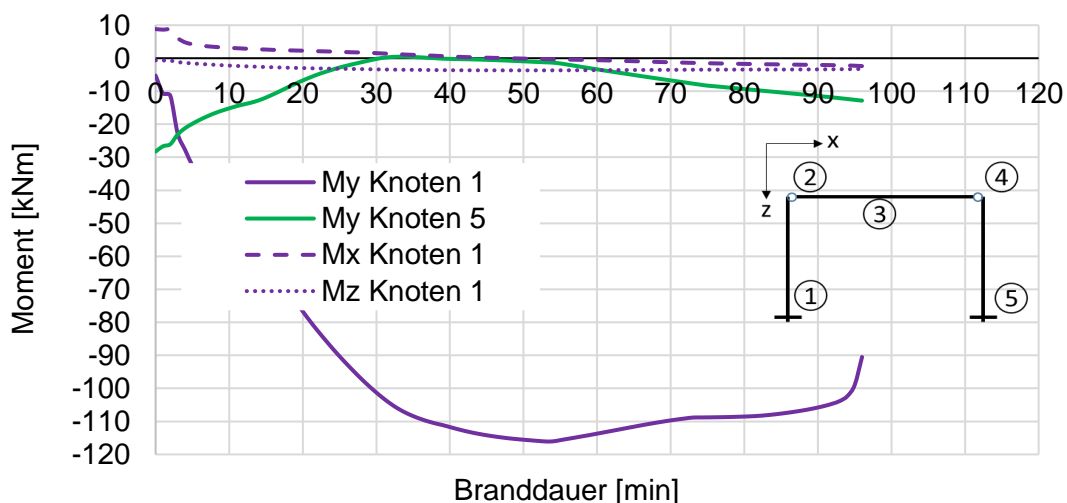


Bild 11b Auflagermomente des Rahmens mit mehrseitiger Beflammung und baupraktischer Halterung

Halbseitige Beflammung

Für das halbseitige System werden diskrete Federhalterungen an den Stützenköpfen und den Drittelpunkten des Binders eingeführt. Aufgrund der Trennwand bleiben beispielsweise die Giebelstützen kalt und können über Koppelstäbe oder Dachpfetten zur Aussteifung herangezogen werden. Die Beispielrechnung wird mit einer Federsteifigkeit $C=800 \text{ kN/m}$ durchgeführt.

Das System erreicht eine Feuerwiderstandsdauer von deutlich mehr als 90 Minuten. Aufgrund der einseitigen thermischen Dehnungen und der Tatsache, dass die Stützen lediglich am Kopf gehalten werden, stellt sich ein nicht zu vernachlässigendes Auflagermoment M_x aus der Ebene ein. In der Stütze wirkt ferner ein Torsionsmoment von 80 kNm . Die Haltekräfte werden in Bild 12 c dargestellt. Diese betragen in Relation zur Stabilisierungslast des Binders bei mehrseitiger Beflammung ein Vielfaches.

Insgesamt sind die Auflagerreaktionen an den Stützenfüßen des hier untersuchten Systems nicht günstiger als beim völlig freistehenden. Im Idealfall verhindern die seitlichen Halterungen das Anwachsen eines Fußmomentes in der Nebenrichtung und die Torsion in Stütze und Binder. Weitere Untersuchungen sind für diesen Spezialfall noch erforderlich.

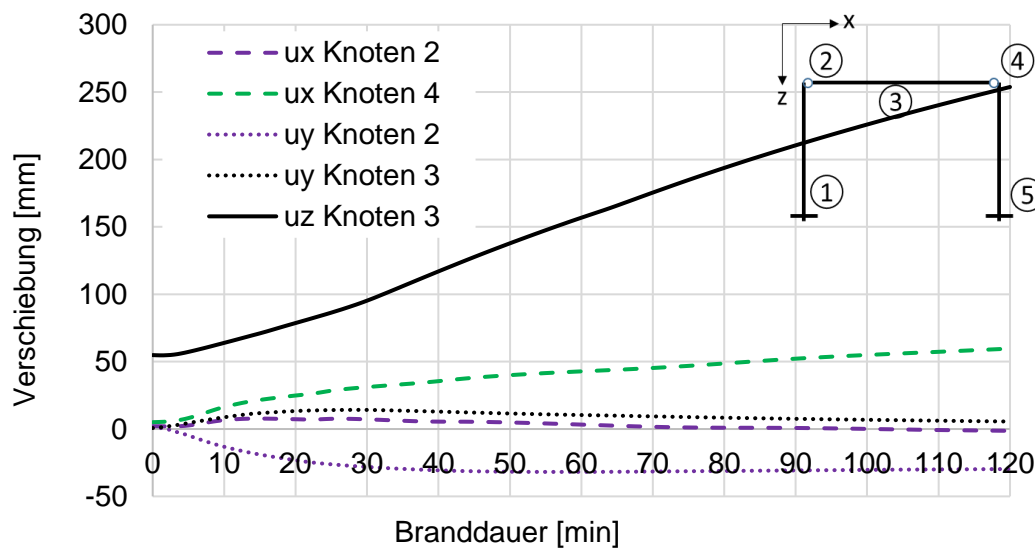


Bild 12a Verschiebungen des Rahmens mit halbseitiger Beflammung und baupraktischer Halterung

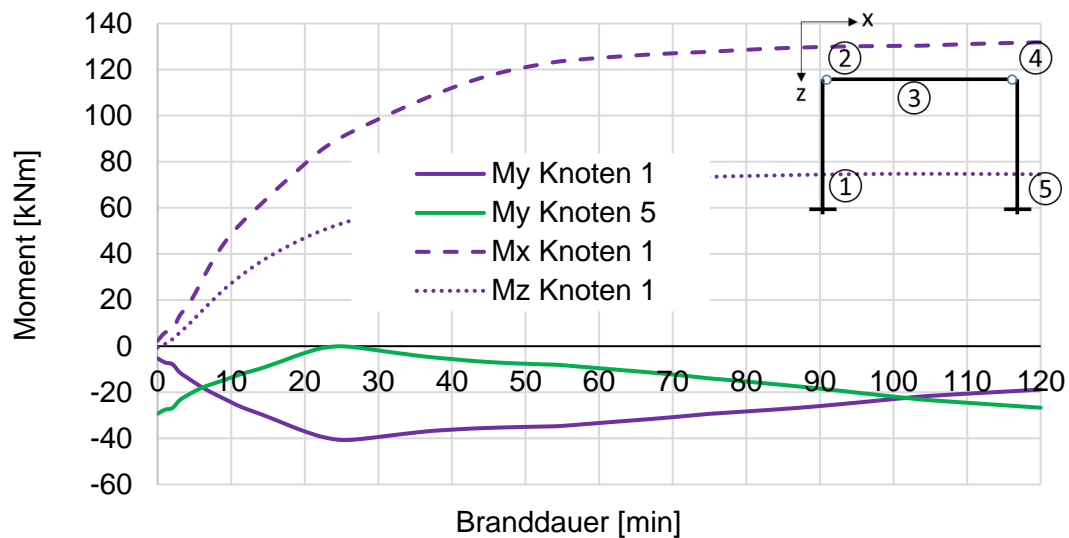


Bild 12b Auflagermomente des Rahmens mit halbseitiger Beflammung und baupraktischer Halterung

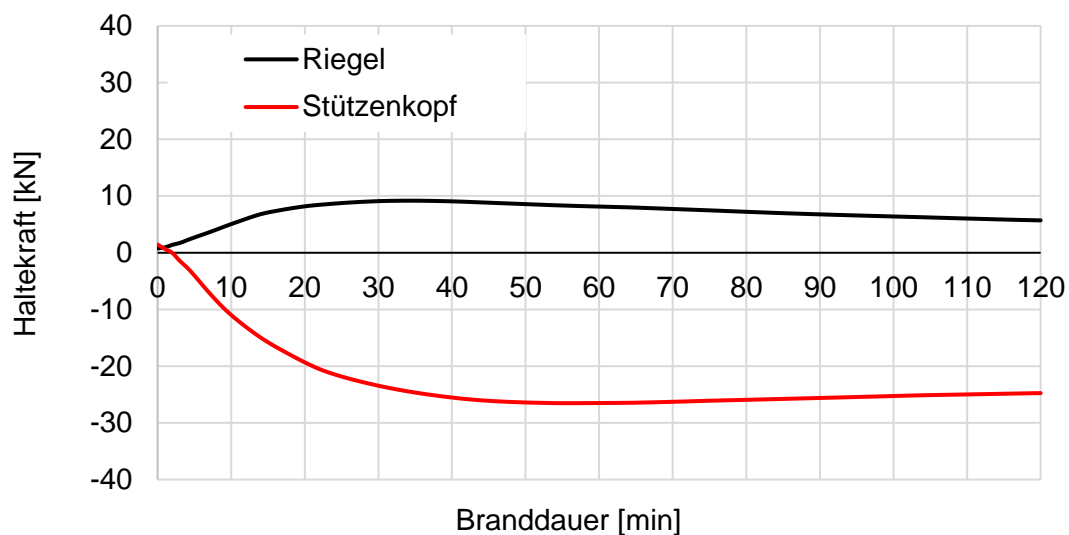


Bild 12c Haltekkräfte des Rahmens mit mehrseitiger Beflammung und baupraktischer Halterung

ZUR VALIDIERUNG

Die Berechnungen erfolgten mit einem Programm auf Stufe der allgemeinen Rechenverfahren, welches die Validierungsbeispiele gemäß [4] erfolgreich durchlaufen hat. Es ist jedoch festzustellen, dass die Validierungsbeispiele nicht auf Versagensmechanismen mit Torsionsbeanspruchung abheben. Diese ist in den untersuchten Systemen indes häufig von großem Einfluss für das Gesamttragverhalten. In den vorstehenden Berechnungen wird die Torsionssteifigkeit affin zur Biegesteifigkeit abgemindert.

Zum Zwecke der Validierung wäre die Erweiterung der normativen Beispiele in [4] um ein torsionsbeanspruchtes Bauteil zu begrüßen. Bis entsprechende Untersuchungsergebnisse vorliegen, sind die in diesem Beitrag ermittelten Kraft- und Verschiebungsgrößen bzw. Feuerwiderstandsdauern noch mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Beitrag wurde das Trag- und Verformungsverhalten stabilitätsgefährdeter Stahlbetonrahmensysteme unter Brandeinwirkung erläutert. Die erfolgreich durchlaufen Untersuchungen zeigen, dass das Systemtragverhalten Rahmens mitunter deutlich ungünstiger sein kann als die Ersatzstabnachweise separat für Binder und Stützen vermuten lassen. Das räumliche Rahmenverhalten ist wesentlich komplexer und ist geprägt durch die Kopplung der Stützenköpfe mit dem Binder. Die Stützenkopfverschiebungen in horizontaler Ebene sind beträchtlich und verschieben den Binder aus der Rahmenebene und ziehen ihn in seiner Längsrichtung. Seitliche Halterungen senkrecht zur Rahmenebene wirken sich sehr positiv auf Brandwiderstandsdauer aus. Bei unsymmetrischer Beflammung ist auf die Überlagerung mit den geometrischen Imperfektionen zu achten. Der Nachweis der zum Teil beträchtlichen Torsionsmomente im Binder als auch in den Stützen in Folge der Brandeinwirkung bleibt eine offene Fragestellung.

LITERATUR

- [1] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010
- [2] DIN EN 1992-1-1/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [3] DIN EN 1992-1-2: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1992-1-2:2004 + AC:2008
- [4] DIN EN 1992-1-2/NA Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall
- [5] InfoCad 16: InfoGraph GmbH, Aachen

Beitragsnr.

- [6] DIN EN 1991-1-2/NA.: Nationaler Anhang - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkung auf Tragwerke; 2015-09
- [7] Schulz, J.-U.; Hollmann, D.: Kippstabilität von schlanken Stahlbetonträgern unter Brandeinwirkung. Workshop 2016 – Heißbemessung – Structural Fire Engineering. Braunschweig , 2016
- [8] MB-Baustatik: Programmmodul U412.de; 2017.070