

Mfpa Leipzig GmbH

Gesellschaft für Materialforschung
und Prüfungsanstalt für
das Bauwesen Leipzig mbH

Prüf-, Überwachungs- und Zerti-
fizierungsstelle für Baustoffe, Bau-
produkte und Bausysteme

Anerkannt nach Landesbauord-
nung (SAC02), notifiziert nach
Bauprodukten-
verordnung (NB 0800)

Geschäftsbereich III:
Baulicher Brandschutz
Geschäftsbereichsleiter:
Dipl.-Ing. Michael Juknat
Tel.: +49 (0) 341-6582-134
Fax: +49 (0) 341-6582-197
brandschutz@mfpa-leipzig.de

Arbeitsgruppe 3.2
Brandverhalten von Bauarten und
Sonderkonstruktionen

Ansprechpartner*in:
Sebastian Treutler, M.Sc.
Tel.: +49 (0) 341-6582-116
s.treutler@mfpa-leipzig.de



Durch die DAKKS GmbH nach DIN EN
ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflabora-
torium. Die Urkunde kann unter
www.mfpa-leipzig.de eingesehen wer-
den.

Prüfbericht Nr. PB 3.2/21-032-1

vom 10. November 2021

1. Ausfertigung

Gegenstand: Belasteter Brandversuch in Anlehnung an
DIN EN 13381-3:2015-06 in Verbindung mit
DIN EN 1363-1:2020-05 an einer großmaßstäblichen Beton-
platte (d = 140 mm) mit einer statischen Verstärkung und
abschließender brandschutztechnischer Ertüchtigung unter
einseitiger thermischer Beanspruchung durch die Einheits-
temperaturzeitkurve

Grundlage der Untersuchung

Mfpa Leipzig GmbH - Prüfprogramm S6.1/20-003-1 zur
Charakterisierung des Tragverhaltens von Stahlbeton-
Konstruktionen mit re-fer-Verstärkung im Brandfall vom
13.01.2021

Statische Ertüchtigung

re-fer re-plate Memory Stahllamellen

Brandschutztechnische Ertüchtigung:

Putzhaftgrund SikaCem® Pyrocoat Base

Brandschutzputz SikaCem® Pyrocoat – d = 23 mm

Auftraggeber: re-fer AG
Riedmattli 9
CH-6423 Seewen

Auftragsdatum: 04. Februar 2021

Probenherstellung: 01. Juni 2021 (Installation der Stahllamellen)
08. Juni 2021 (Applikation des Brandschutzputzes)

Probennahme: 08. Juni 2021 (Feuchteproben, nicht amtlich)

Prüfdatum: 28. Juli 2021

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Michael Juknat
Sebastian Treutler, M.Sc.

Dieses Dokument besteht aus 9 Seiten und 3 Anlagen.

Dieses Dokument darf nur ungekürzt vervielfältigt und veröffentlicht werden. Als rechtsverbindliche Form gilt die deutsche Schriftform mit Originalunterschriften und Originalstempel des/der Zeichnungsberechtigten. Es gelten die Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) der Mfpa Leipzig GmbH.

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Zielsetzung	3
2	Geprüfte Konstruktion.....	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Stahlbetonprobekörper	3
2.3	Statische Verstärkung	4
2.4	Brandschutztechnische Ertüchtigung	4
2.5	Baustoffkennwerte	5
3	Beschreibung des Prüfaufbaus	5
3.1	Messstellen im und am Stahlbetonprobekörper	5
3.2	Messtechnik auf der brandabgewandten Seite des Probekörpers.....	5
3.3	Messtechnik zur Brandraumsteuerung.....	5
3.4	Messtechnik zur Überwachung des Lasteintrags.....	6
3.5	Datensicherung und Speicherung	6
3.6	Prüfkonstruktion / Aufbau auf dem Prüfstand.....	6
3.7	Belastung des Probekörpers	6
4	Prüfbeobachtungen	7
5	Zusammenfassung der Prüfergebnisse	7
6	Annehmbarkeit der Prüfergebnisse gemäß DIN EN 13381-3:2013-08, Abs. 11	7
7	Bemerkung gem. DIN EN 13381-3:2015-06, Abs. 12	8
8	Bemerkung gem. DIN EN 1363-1:2020-05, Abs. 12.1 w)	8
9	Anlagen.....	9

1 Veranlassung und Zielsetzung

Am 04. Februar 2021 beauftragte die re-fer AG die MFPA Leipzig GmbH mit der Durchführung einer Feuerwiderstandsprüfung an einer Stahlbetonplatte mit statischer und brandschutztechnischer Ertüchtigung in Anlehnung an DIN EN 13381-3:2015-06 in Verbindung mit DIN EN 1363-1:2020-05, mit einer einseitigen thermischen Beanspruchung durch die Einheitstemperaturzeitkurve (ETK).

Ziel war es, die vergrößerte Tragfähigkeit der Stahlbetonplatte durch den Einsatz von Memorystahllamellen an der Unterseite des Stahlbetons in Kombination mit dem Durchwärmungsverhalten des Brandschutzputzes zu untersuchen. Der Stahlbetongrundkörper wurde gemäß DIN EN 13381-3:2015-06 hergestellt.

Dieser Prüfbericht beschreibt den konstruktiven Aufbau inklusive Montageverfahren, die Prüfbedingungen sowie die Ergebnisse, für das hier beschriebene spezifische Bauteil, nachdem dieses entsprechend DIN EN 13381-3:2015-06 in Verbindung mit DIN EN 1363-1:2020-05 geprüft wurde.

Die Feuerwiderstandsprüfung wurde in der Brandprüfstelle der MFPA Leipzig GmbH, MFPA-Allee 1 in 04509 Laue bei Delitzsch durchgeführt.

2 Geprüfte Konstruktion

2.1 Allgemeines

Zur brandschutztechnischen Ertüchtigung wurde eine Stahlbetonplatte mit den geometrischen Abmessungen von $l \times b \times h = 4750 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ durch die MFPA Leipzig GmbH bereitgestellt. Die Herstellung der Stahlbetonplatte erfolgte im BTG Betonwerk Großpösna. Die Materialparameter des Probekörpers können dem Abschnitt 2.5 entnommen werden. Für die Applikation der Stahllamellen sowie des Brandschutzputzes wurde die Stahlbetonplatte horizontal als Deckenelement auf zwei Widerlager aufgelegt. Die Applikation erfolgte über Kopf. Der Zielwert der Dicke der brandschutztechnischen Ertüchtigung war $d = 23 \text{ mm}$.

2.2 Stahlbetonprobekörper

Entsprechend der normativen Vorgaben in DIN EN 13381-3:2015-06 wurde eine vorgefertigte Stahlbetonplatte mit den geometrischen Abmessungen von $l \times b \times h = 4750 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ als Probekörper für die Applikation des Brandschutzputzes SikaCem® Pyrocoat verwendet.

Gemäß Normvorgabe wurde in die Stahlbetonplatten ein unterer Bewehrungsgehalt von kreuzweise $5,24 \text{ cm}^2/\text{m}$ eingebaut. Dieser Bewehrungsgehalt entspricht einer Bewehrung aus Stabstahl $\varnothing 10 \text{ mm}$ mit einem Verlegeabstand von $a = 150 \text{ mm}$. Der obere Bewehrungsgehalt betrug kreuzweise $1,88 \text{ cm}^2/\text{m}$. Dieser Bewehrungsgehalt wird mit einer Bewehrung aus Stabstahl $\varnothing 6 \text{ mm}$ mit einem Verlegeabstand von $a = 150 \text{ mm}$ erreicht. Sowohl für die untere als auch die seitliche und obere Betondeckung ist in DIN EN 13381-3:2015-06 ein Abstand zur Stabstahlbewehrung von $c_{\text{nom}} = 20 \text{ mm}$ angegeben. Die Übereinstimmungszertifikate der Betonstähle liegen der MFPA Leipzig GmbH vor.

Zur Herstellung der Stahlbetontragkonstruktion wurde ein konventioneller Normalbeton der Festigkeitsklasse C30/37 gemäß DIN EN 206 und DIN EN 1992-1-1 mit quarzitäen Gesteinskörnungen verwandt. Das Mischungsprotokoll sowie die Protokolle zur Prüfung der Frisch- und Festbetoneigenschaften liegen der MFPA Leipzig GmbH vor.

Der Boden der Schalung bestand aus Stahl. Für die seitliche Schalung wurden filmbeschichtete Holztafeln verwendet. Die Verdichtung erfolgte mittels Tischrüttler. Angaben zu den Arbeitsvorgängen und den verwendeten Herstellungsmitteln wurden dokumentiert und liegen der MFPA Leipzig GmbH vor.

Nach dem Herstellen der Stahlbetonplatte am 13. Februar 2020 wurde der Probekörper nach fünf Tagen ausgeschalt und anschließend trocken unter normalen geschützten Umgebungsbedingungen

bis zur Applikation der statischen Verstärkung am 01. Juni 2021 und der brandschutztechnischen Ertüchtigung am 08. Juni 2021 gelagert. Das Alter der Stahlbetonplatte betrug zu diesem Zeitpunkt 362 bzw. 369 Tage. Anschließend lagerten die Platte unter geschützten Umgebungsbedingungen (ca. 20°C) in einer Halle der MFPA Leipzig GmbH. Am Tag der Feuerwiderstandsprüfung hatten der Stahlbetonprobekörper ein Alter von 419 Tagen.

Die Ermittlung der Würfeldruckfestigkeiten des Stahlbetonprobekörpers wurde entsprechend DIN EN 13381-3:2015-06 nach 28 und 56 Tagen durchgeführt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die gewählte Betonzusammensetzung die Mindestanforderungen hinsichtlich der Druckfestigkeitsklasse C30/37 erfüllt hat.

2.3 Statische Verstärkung

Die statische Verstärkung durch 4 Stahllamellen aus Memory-Stahl erfolgte am 01. Juni 2021 durch Fachkräfte des Auftraggebers. Das Aufbringen erfolgte im horizontalen Einbauzustand. Die Arbeiten wurden über Kopf ausgeführt. Dazu wurden die Lamellen mit den Abmessungen $L \times B \times d = 3900 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm}$ plan an die Unterseite der Stahlbetonplatte angelegt. Die genaue Positionierung kann Anlage 1 entnommen werden. Vor der Befestigung wurden die nach dem Ausrollen welligen Stahlbänder möglichst plan an den Untergrund angedrückt. Über die an den Enden der Lamellen vorgefertigten Lochreihen wurden die Bänder in vorgebohrte Löcher in der Stahlbetonplatte mit Nägeln Hilti X-CR 48 P8 S15 mit einer Schaftlänge von 48 mm befestigt. Zum Einschließen der Nägel wurde eine Hilti DX 5 genutzt. An jedem Ende der Lamellen wurden in zwei Lochreihen jeweils mindestens 7 Nägel eingebracht. Weitere Nägel wurden lediglich zur Kompensation von Setzausfällen eingesetzt. Nach dem Abschluss der Befestigung wurden alle Stahlbänder mit einer Gaslanze auf 250°C bis 300°C erwärmt, um den Memoryeffekt des Stahls zu aktivieren. Während des Aufheizens wurde die Temperatur mehrmals überprüft, um eine Erhitzung von mindestens 250°C zu erreichen.

2.4 Brandschutztechnische Ertüchtigung

Am 08. Juni 2021 erfolgte die Applikation der brandschutztechnischen Ertüchtigung durch Fachkräfte des Auftraggebers. Das Aufbringen erfolgte im horizontalen Einbauzustand. Die Arbeiten wurden über Kopf ausgeführt.

Die zu untersuchende brandschutztechnische Ertüchtigung umfasst drei Bestandteile:

- Glasgitter SikaWrap® - 350 G Grid der Firma Sika Schweiz AG – 4000 mm x 900 mm
- Untergrundvorbereitung Putzhaftgrund SikaCem® Pyrocoat Base der Firma Sika Schweiz AG
- Brandschutzputz SikaCem® Pyrocoat der Firma Sika Schweiz AG – Werkrockenmörtel auf Zementbasis

Nähere Informationen zur Zusammensetzung und Eigenschaften der Putze liegen der MFPA Leipzig GmbH nicht vor.

Am 08. Juni 2021 wurde zunächst der Untergrund vorbereitet. Dazu wurden die Stahllamellen so gereinigt, dass sie frei von Fett, Öl und Verunreinigungen sind. Anschließend wurde der Putzhaftgrund SikaCem® Pyrocoat Base einlagig mit einer Schichtdicke von ca. 1 mm aufgespritzt und mit einem Besen abgezogen.

Danach wurde im Bereich der Stahlbänder der SikaCem® Pyrocoat mit einer Schichtdicke von ca. 10 mm aufgespritzt. Die zwei Glasgitternetze mit den oben genannten Abmessungen mit einem Randabstand von 480 mm wurden mit einer Kelle in den SikaCem® Pyrocoat angedrückt. Anschließend erfolgte das Aufspritzen der zweiten Schicht des Brandschutzputzes SikaCem® Pyrocoat bis zum Erreichen der Gesamtschichtdicke von $d = 23 \text{ mm}$. Im Anschluss wurden Fehlstellen und Löcher durch einen Glattstrich geschlossen.

Die tatsächlich aufgetragenen Schichtdicken wurden entsprechend Norm geprüft und aufgezeichnet. Brandschutzputz und Betonplatte wurden anschließend keiner weiteren Nachbehandlung unterzogen.

2.5 Baustoffkennwerte

Zum Zeitpunkt der Prüfung entsprachen die Festigkeit und der Feuchtigkeitsgehalt der verwendeten Baustoffe annähernd dem Zustand, der bei der üblichen Verwendung zu erwarten ist. In Tabelle 1 sind für die geprüfte Konstruktion die verwendeten Baustoffe mit den vorhandenen Materialkennwerten und Baustoffklassen sowie Rohdichten und Feuchtegehalte aufgeführt.

Tabelle 1 Baustoffkennwerte der verwendeten Baustoffe zur Erstellung der Prüfkonstruktion

Baustoffbezeichnung	Hersteller	Dicke [mm]	Trocken- rohichte [kg/m ³]	Feuchte- gehalt [Gew.-%]	Baustoffklassifi- zierung Prüfzeichen
Betonplatte	BTG Betonwerk GmbH	140	2220	~ 4 %	A1 nach DIN 4102-1
Putzhaftgrund SikaCem® Pyrocoat Base	Sika Schweiz AG	1	-- 1)	-- 1)	A1 nach DIN 4102-1
SikaCem® Pyrocoat	Sika Schweiz AG	22	659,5	14,0	A1 nach DIN 4102-1

1) Kennwerte wurden nicht bestimmt

3 Beschreibung des Prüfaufbaus

3.1 Messstellen im und am Stahlbetonprobekörper

Die Temperaturerhöhung in der Stahlbetonplatte wurde entsprechend Prüfnorm DIN EN 13381-3:2015-06 mit 15 einzelnen Thermoelementen gemessen, welche sich mittig an der Längsbewehrung befanden. Außerdem waren an weiteren fünf Messstellen sogenannte Thermoleitern im Stahlbetonkörper angeordnet. An diesen Thermoleitern wurden in fünf verschiedenen Messebenen (15 mm, 30 mm, 45 mm, 60 mm und 75 mm) Thermoelemente vom Typ NiCr-Ni installiert. Zur Messung der Temperaturerhöhung in der sogenannten Interface-Zone zwischen der brandschutztechnischen Erüchtigung und dem Stahlbetonprobekörper wurden weitere 15 Thermoelemente an der Unterseite der Stahlbetonplatte montiert.

Die Anordnung aller Messstellen kann Anlage 1 entnommen werden.

3.2 Messtechnik auf der brandabgewandten Seite des Probekörpers

Zum Nachweis der Temperaturen auf der feuerabgewandten Seite des Prüfkörpers wurden insgesamt fünf Scheibenthermoelemente (OF1 bis OF5) Typ NiCr-Ni mit einem Durchmesser von $\varnothing = 12$ mm gemäß DIN EN 1363-1:2020-05 zur Messung der Oberflächentemperatur verwendet.

Ergänzend zu den Messstellen zur Überwachung des Durchwärmungsverhaltens wurden auf der brandabgewandten Seite vier potentiometrische Wegsensoren (WS1 bis WS4), zur Aufzeichnung des Verformungsverhaltens während dem Eintrag der maßgebenden Belastung sowohl vor als auch während des Brandversuches installiert.

3.3 Messtechnik zur Brandraumsteuerung

Die Aufheizung des Brandraums erfolgte nach der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK). Zur Messung der Temperaturen im Brandraum wurden 8 Platten-Thermometer gemäß DIN EN 1363-1:2020-05 im Abstand von 100 mm vom Prüfkörper installiert. Sie dienten der Steuerung der Brandraumtemperatur.

Die Druckmessung im Brandraum erfolgte gemäß DIN EN 1363-1:2020-05, Abschnitt 4.5.2 mit einem Differenzdruck-Messumformer vom Typ Halstrup Walcher circa 100 mm unterhalb der Deckenkonstruktion.

3.4 Messtechnik zur Überwachung des Lasteintrags

Zur Überwachung der eingetragenen Belastung wurde eine Kraftmessdose vom Typ HBM C6A mit Kalotte mit einem Messbereich bis 200 kN installiert.

3.5 Datensicherung und Speicherung

Vor und während des Brandversuchs wurden alle relevanten Messwerte in Messintervallen von 5 bzw. 10 Sekunden aufgezeichnet und mittels geeigneter EDV gespeichert. Die grafischen Auswertungen der Temperaturerhöhungen auf der brandabgewandten Seite des Probekörpers und die Verformungen können der Zusammenstellung der Prüfergebnisse in Anlage 2 entnommen werden.

3.6 Prüfkonstruktion / Aufbau auf dem Prüfstand

Der brandschutztechnisch ertüchtigte Probekörper wurde durch die MFPA Leipzig GmbH als horizontaler Raumabschluss in die lichte Öffnung eines Brandofens (Breite x Länge = 3000 mm x 4000 mm) eingebaut.

3.7 Belastung des Probekörpers

Unter Berücksichtigung der Breite des Stahlbetonprobekörpers von $b = 3000$ mm und der vorgegebenen geometrischen Zwangspunkte für die Lasteinleitungs- und Auflagerbedingungen wurden entsprechend DIN EN 13381-3:2015-06, Anhang E die Lasteinleitungspunkte wie im nachfolgenden Bild 1 positioniert.

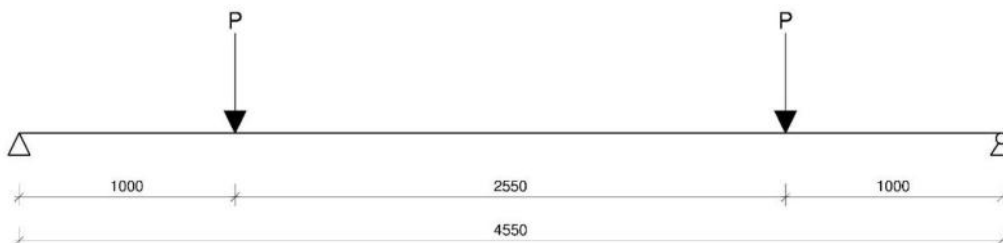


Bild 1 Schematische Darstellung der Lasteinleitung in den Prüfkörper

Die Belastung wurde entsprechend DIN EN 13381-3:2015-06 auf den Probekörper aufgebracht. Durch eine hydraulische Presse wurde die Last über ein Lastverteilungssystem (siehe Anlage 1) in die Deckenkonstruktion eingeleitet. Die Lasteinleitung in die Betonplatte erfolgte linienförmig über Stahlträger vom Typ HEB 180 sowie HEM 140.

3.7.1 Lastermittlung

Die Bestimmung der im Brandversuch aufzubringenden Belastung erfolgte durch den Auftraggeber. Ziel war es, den Feuerwiderstand unter einer Auslastung von 70% der Traglast der statisch verstärkten Stahlbetonplatte zu prüfen. Entsprechend der statischen Berechnung vom 26. Juli 2021 in Version 1.3 wurden der Probekörper sowie der ermittelten Eigenlast des Probekörpers von 5238 kg vor Beginn der Prüfung insgesamt mit $P = 51,56$ kN je Lasteinleitungspunkt als Linienlast über eine Plattenbreite von 3.000 mm beansprucht.

Insgesamt ergibt sich die über den hydraulischen Druckzylinder einzutragende Kraft F aus der Summe der einzuleitenden Belastung und dem vorhandenen Eigengewicht der Lastverteilungsträger auf dem Stahlbetonprobekörper (ca. $G_{\text{Stahlträger}} = 5,46 \text{ kN}$).

Die über den Hydraulikzylinder einzutragende Last betrug: $F = 2 \times 51,56 \text{ kN} - 5,46 \text{ kN} = 97,66 \text{ kN}$.

4 Prüfbeobachtungen

Die während der Feuerwiderstandsprüfung auf der unbeflammten Seite der Deckenkonstruktion und zusätzlich im Bereich der Stahlbetondeckenplatte ermittelten Temperaturerhöhungen über die Anfangstemperatur sowie die Temperaturen in der Brandkammer können Anlage 2 entnommen werden. Die Beobachtungen während der Feuerwiderstandsprüfung sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2 Beobachtungen während der Prüfung der tragenden, raumabschließenden Deckenkonstruktion am 28. Juli 2021

Prüfzeit [min:sec]	Beobachtungen während der Prüfung	Beobachtungsseite ¹⁾
-15:00	Last vollständig aufgebracht – Leichte Risse im Putz in Feldmitte und im Bereich der Lasteinleitung	F
0:00	Start der Prüfung	-
20:00	Risse parallel zur Linienlast werden im Abstand von ca. 100 - 150 mm deutlich sichtbar	F
70:00	Risse öffnen sich kontinuierlich	F
	Keine weiteren Beobachtungen	F/FA
125:00	Ende der Feuerwiderstandsprüfung	-

¹⁾ FA = Feuerabgewandt, F = Feuerzugewandt

5 Zusammenfassung der Prüfergebnisse

Am 28. Juli 2021 wurden an der MFGPA Leipzig GmbH eine Feuerwiderstandsprüfung über insgesamt 125 Minuten an einer Stahlbetondeckenplatte mit einer statischen und einer brandschutztechnischen Ertüchtigung entsprechend DIN EN 13381-3:2015-06 und DIN EN 1363-1:2020-05 durchgeführt.

Abweichend zu DIN EN 13381-3:2015-06 wurde der Versuch mit einer erhöhten statischen Belastung durchgeführt.

Konstruktiv wurde eine tragende Stahlbetondeckenplatte an der Unterseite durch 4 Memorystahllamellen verstärkt. Die brandschutztechnische Ertüchtigung bestand aus einem Putzhaftgrund und dem Brandschutzputz SikaCem® Pyrocoat. Die einseitige thermische Beanspruchung erfolgte von unten durch die Einheitstemperaturzeitkurve. Die brandschutztechnische Ertüchtigung wurde mit einer Putzschichtdicke (mit Haftgrund) von 23 mm aufgetragen.

Während des Brandversuchs hat sich die brandschutztechnische Ertüchtigung nicht vom Untergrund gelöst und es wurden keine Abplatzungen am Beton festgestellt. Die Grenzwerte hinsichtlich Tragfähigkeit (R), Raumabschluss (E) und Isolation (I) sowie Maximaltemperatur an der Bewehrung wurden über die gesamte Prüfdauer eingehalten.

6 Annehmbarkeit der Prüfergebnisse gemäß DIN EN 13381-3:2013-08, Abs. 11

Die Messergebnisse der einzelnen Thermoelemente des Probekörpers sind auf Ausfälle und Messfehler zu überprüfen. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 3 aufgeführt und zeigen keine

Ungültigkeit gemäß den Vorgaben in DIN EN 13381-3:2015-06, Abs. 11.1. Thermoelemente mit Messfehlern traten im Prüfverlauf nicht auf.

Die Auswertung der einzelnen Thermoelemente gemäß DIN EN 13381-3:2015-06, Abs. 11.2 zur Bestimmung der verschiedenen Mittelwerte befindet sich gemeinsam mit der Messauswertung in Anlage 2.

Tabelle 3 Annehmbarkeit der Prüfergebnisse gemäß DIN EN 13381-3:2015-06, Abs. 11.1

Bezeichnung der Thermoelemente	Messstelle	Messfehler Thermoelement-Nr.	Gültigkeit der Messergebnisse
OF1 – OF5	Unbeflammte Obere Betonoberfläche	-	gültig
U1 – U15	Beflammte untere Betonoberfläche	-	gültig
B1 – 15	Längsbewehrung	-	gültig
a – e	Im Beton in verschiedenen Messtiefen	-	gültig

7 Bemerkung gem. DIN EN 13381-3:2015-06, Abs. 12

Dieser Prüfbericht enthält die konstruktiven Details, die Prüfbedingungen, die erzielten Ergebnisse und die interpolierten Daten, die bei der Prüfung einer speziellen Form der Konstruktion zusammen mit einem Brandschutzsystem mit dem Verfahren DIN EN 13381-3:2015-06 erhalten wurden.

Alle Abweichungen hinsichtlich der Dicke und Dichte des Brandschutz, des Betons und der Art und Geometrie des Bewehrungsstahls könnten das Prüfergebnis ungültig machen.

8 Bemerkung gem. DIN EN 1363-1:2020-05, Abs. 12.1 w)

Dieser Prüfbericht beschreibt ausführlich das Verfahren der baulichen Ausführung, die Prüfbedingungen und die Ergebnisse, die mit dem hier beschriebenen spezifischen Bauteil erzielt wurden, nachdem dieses nach in EN 1363-1:2020-05 geprüft wurde. Jede wesentliche Abweichung hinsichtlich Größe, konstruktiver Einzelheiten, Belastungen, Spannungszustände, Randbedingungen außer den Abweichungen, die im betreffenden Prüfverfahren für den direkten Anwendungsbereich zulässig sind, ist nicht durch diesen Prüfbericht abgedeckt.

Aufgrund der Eigenart der Prüfungen der Feuerwiderstandsdauer und der daraus folgenden Schwierigkeiten bei der Quantifizierung der Unsicherheit bei der Messung der Feuerwiderstandsdauer ist es nicht möglich, einen festgelegten Genauigkeitsgrad des Ergebnisses anzugeben.

Die Ergebnisse der Prüfungen beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. Dieses Dokument ersetzt keinen Konformitäts- oder Verwendbarkeitsnachweis im Sinne der Bauordnungen (national/europäisch).

Leipzig, den 10. November 2021

Dipl.-Ing. Michael Juknat
Geschäftsbereichsleiter




Sebastian Treutler, M.Sc.
Prüfingenieur

9 Anlagen

Anlage 1 Aufbau und Messstellenanordnung

Anlage 2 Messergebnisse der Prüfung (23 mm Brandschutzputz) sowie Auswertung der Prüfergebnisse gemäß DIN EN 13381 3:2015 06, Abs.11

Anlage 3 Fotodokumentation Aufbau und Prüfung der Platte (23 mm Putz)

Anlage 1 Aufbau und Messstellenanordnung

Schnitt A-A:

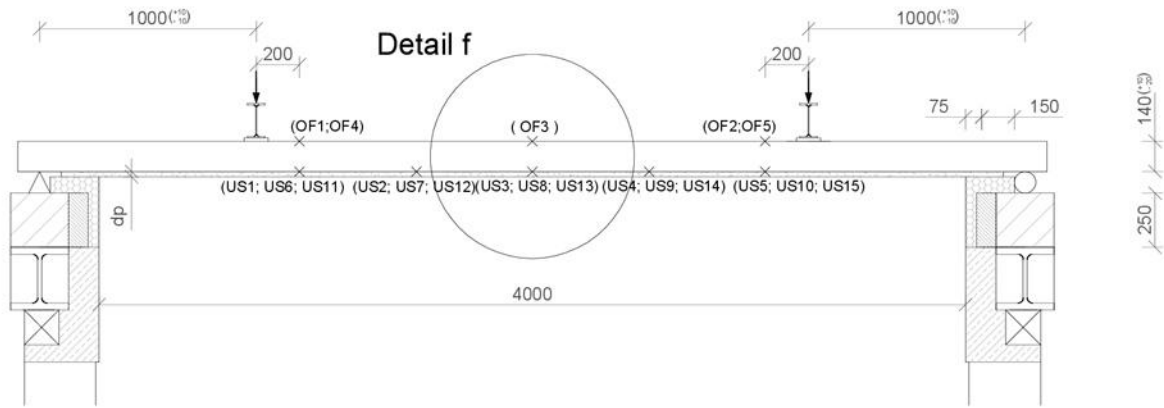


Abbildung A1.1 Einbausituation des Prüfkörpers

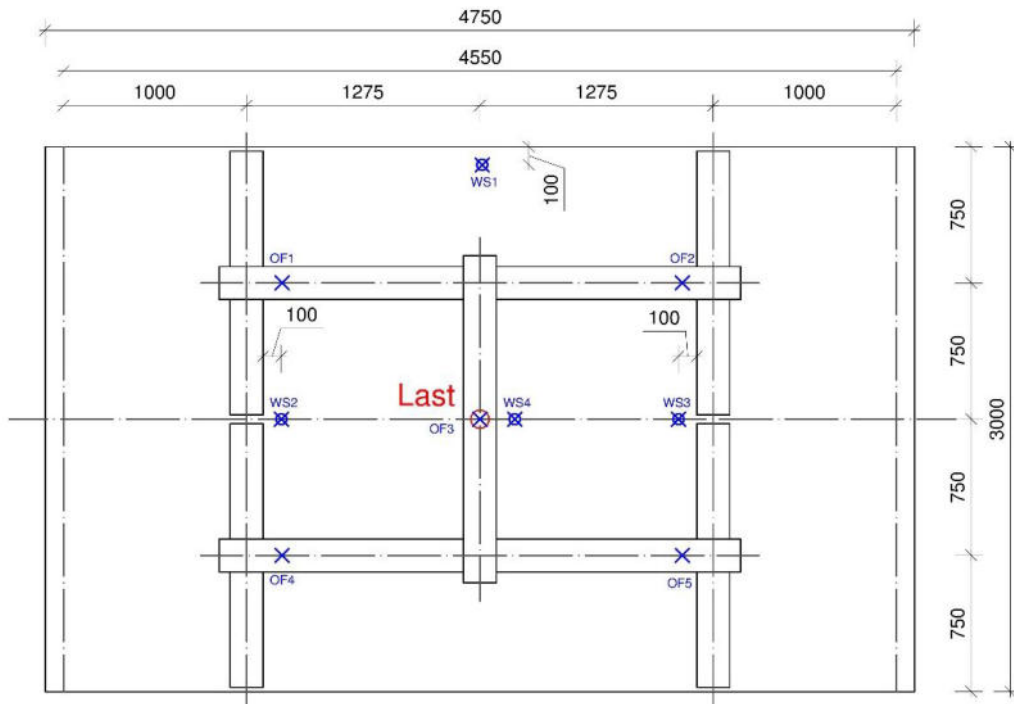


Abbildung A1.2 Anordnung der lastverteilenden Träger und der Messstellen auf der Oberfläche

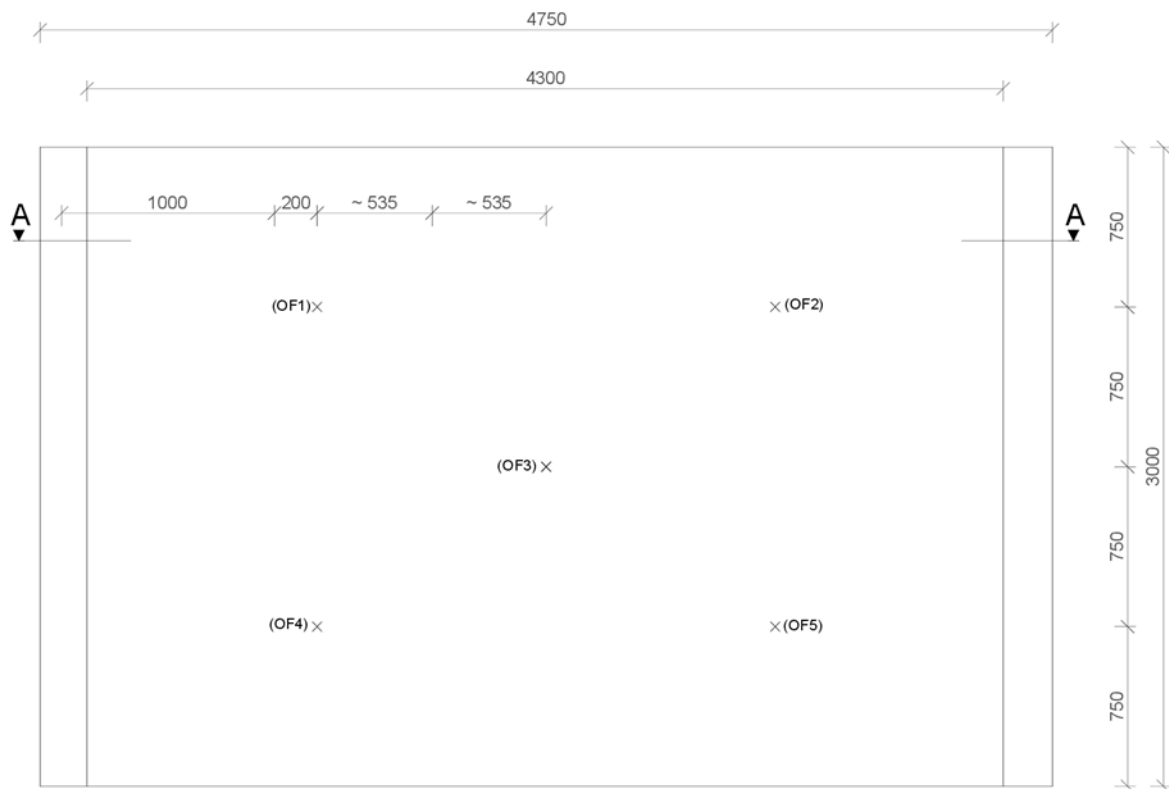


Abbildung A1.3 Anordnung der Oberflächenthermoelemente

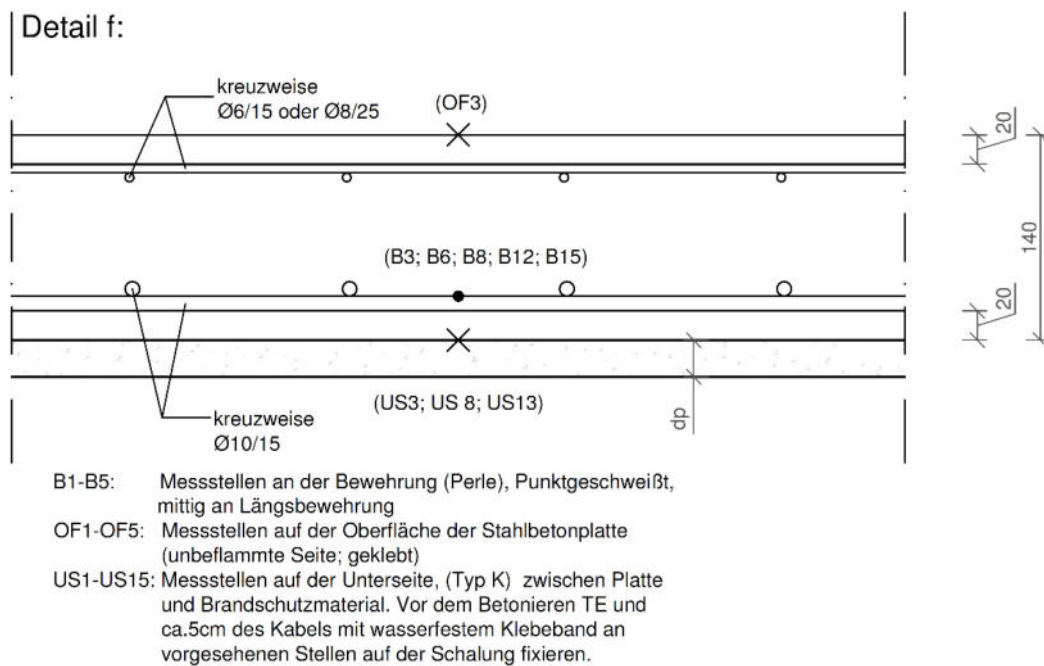


Abbildung A1.4 Anordnung Thermoelemente im Querschnitt

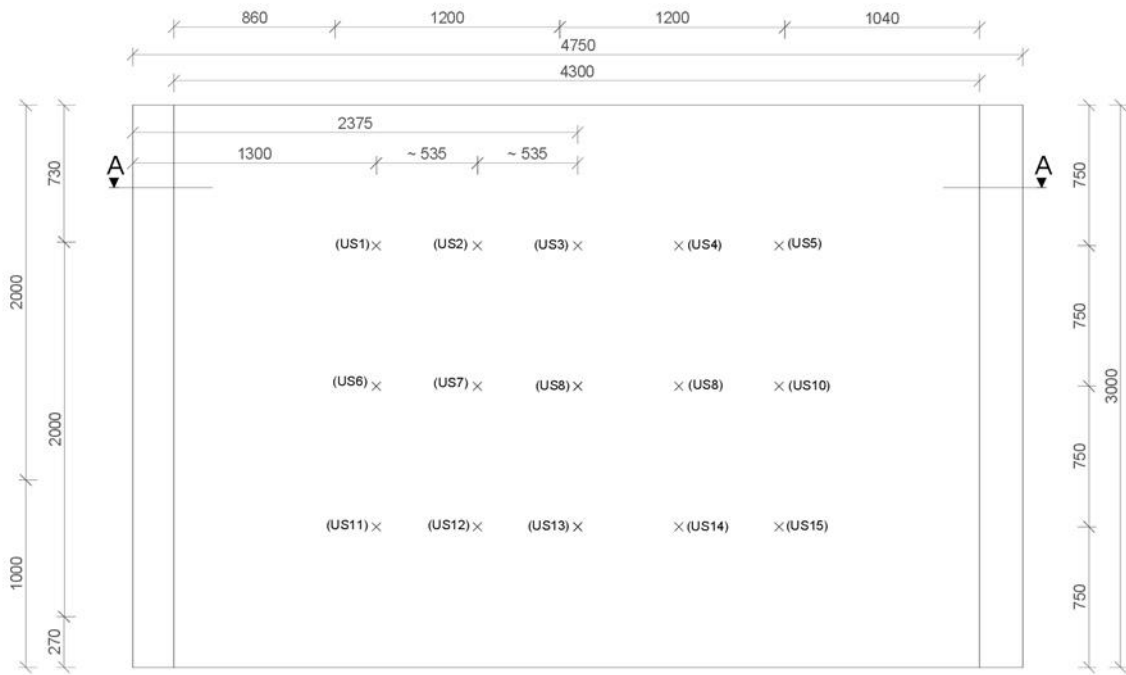


Abbildung A1.5 Anordnung der Thermoelemente zwischen Brandschutzputz und Betondecke

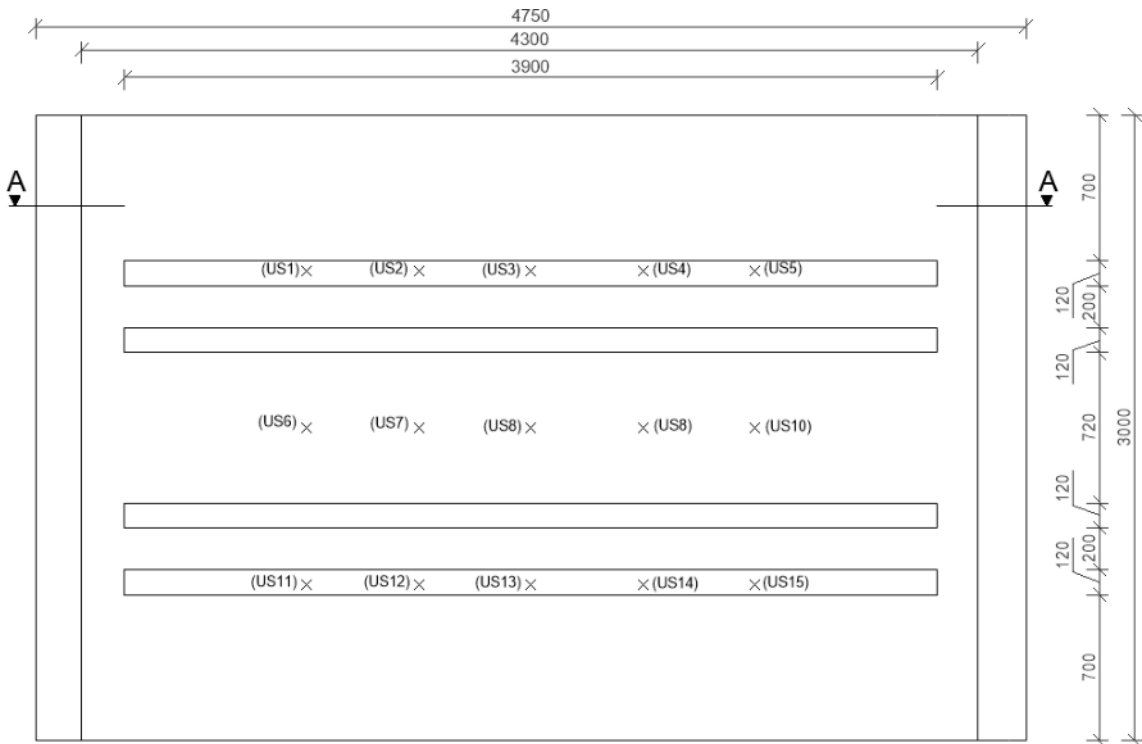


Abbildung A1.6 Anordnung der Stahllamellen

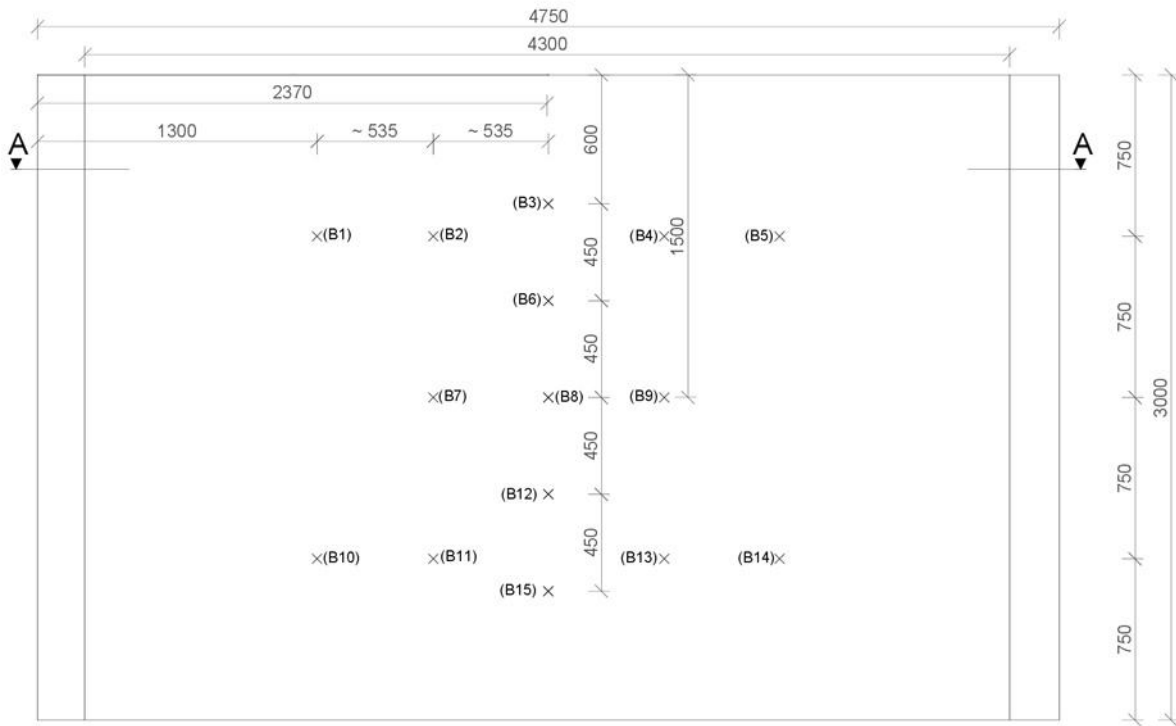


Abbildung A1.7 Anordnung der Thermoelemente an der brandraumseitigen Längsbewehrung

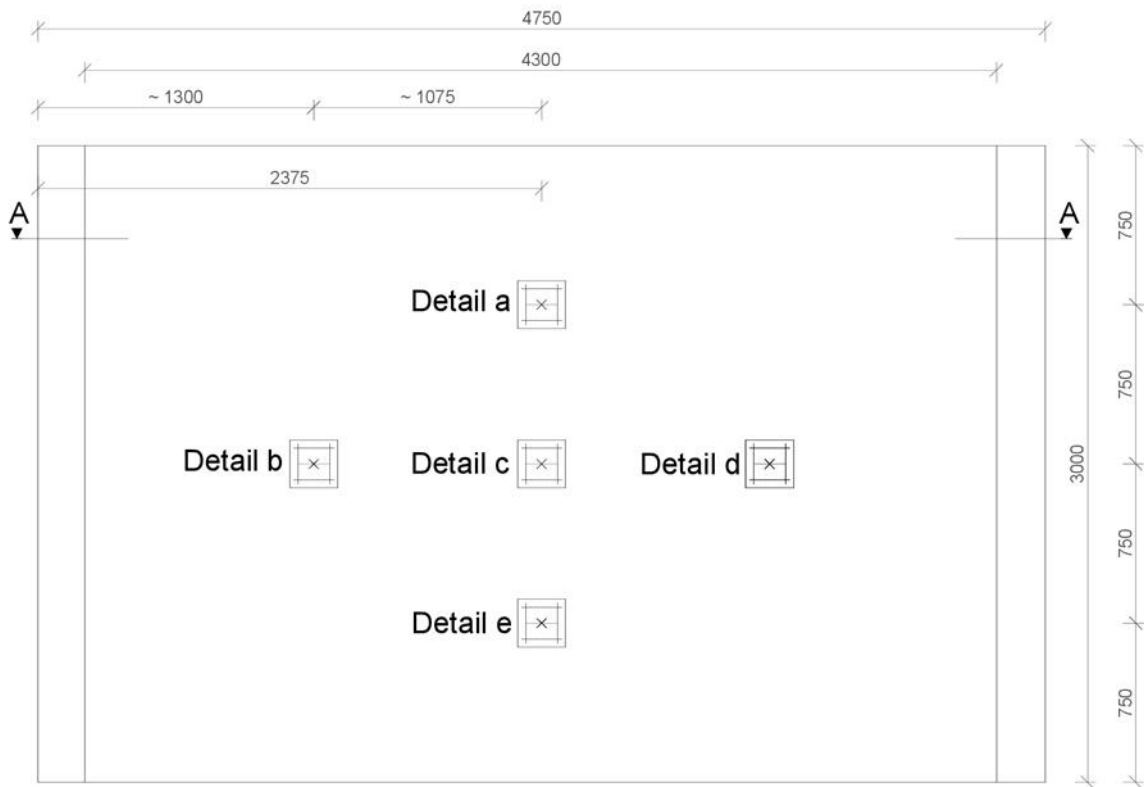
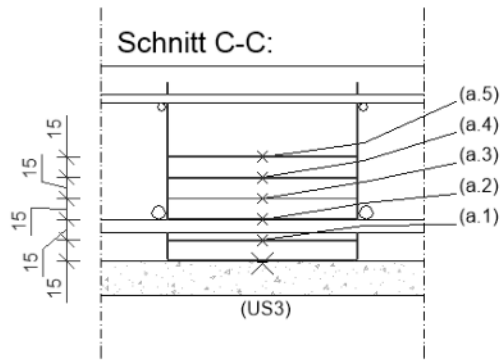
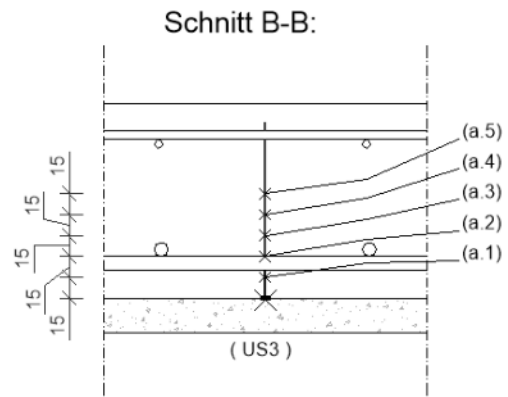
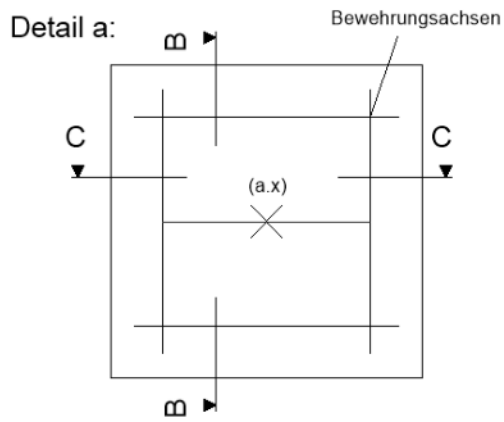


Abbildung A1.8 Anordnung Thermoleitern in der Stahlbetonplatte



a.1-a.5: Kugel-TE an Leiter befestigt (einbetoniert)

Detail b-e sind analog zu Detail a auszuführen.

Abbildung A1.9 Detaildarstellung Thermoleitern

Diagramm A2.3 Abweichung vom Integral der ETK

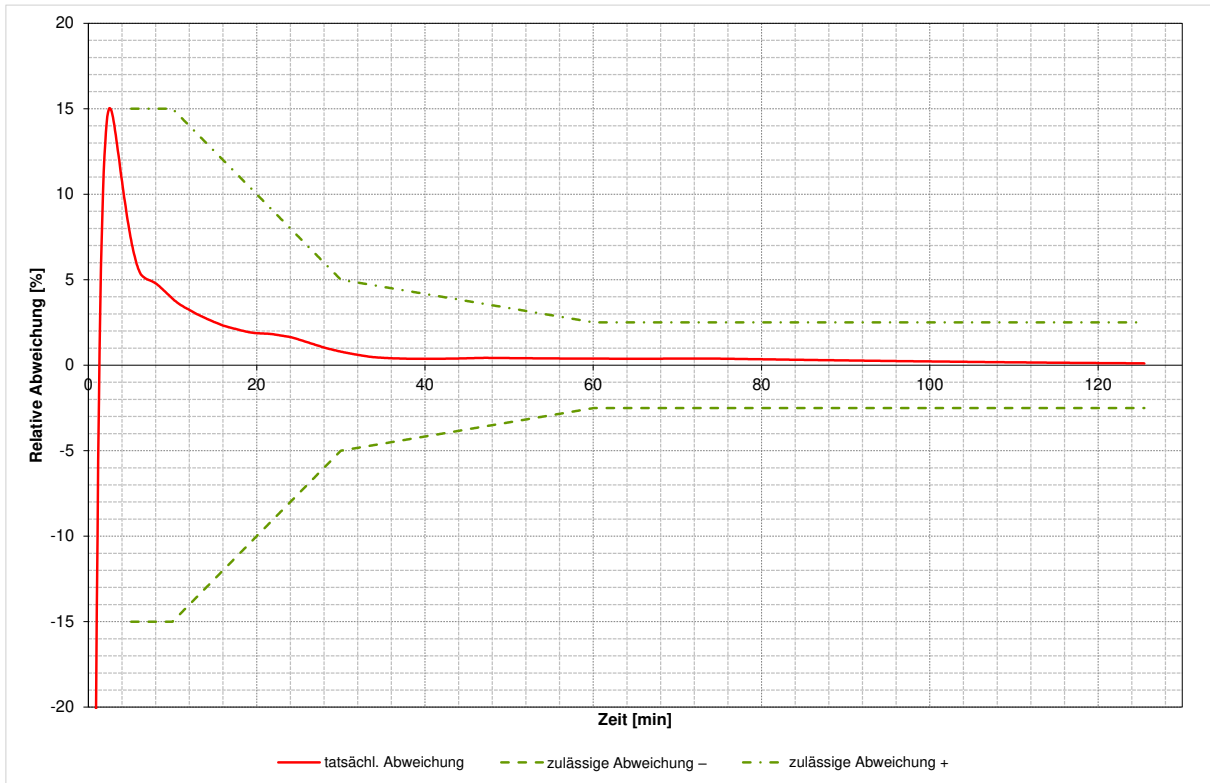


Diagramm A2.4 Druck im Brandraum

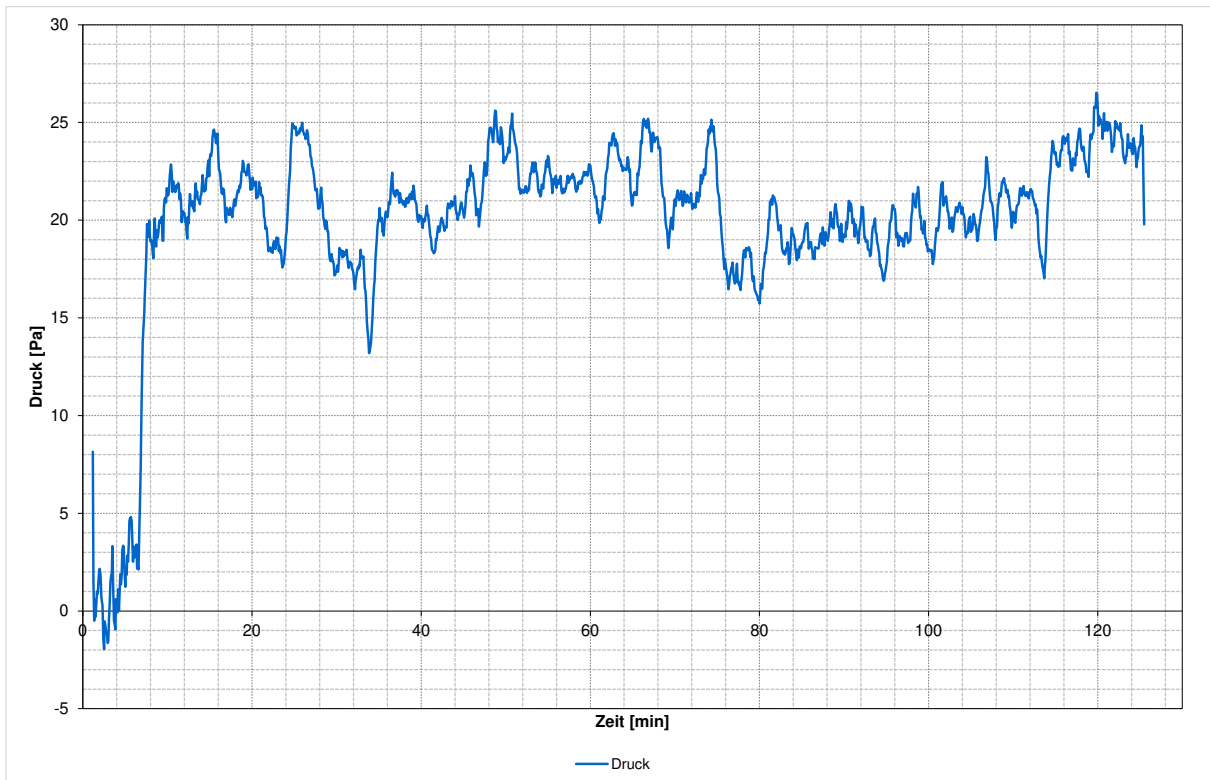


Diagramm A2.5 Belastung der Prüfkonstruktion

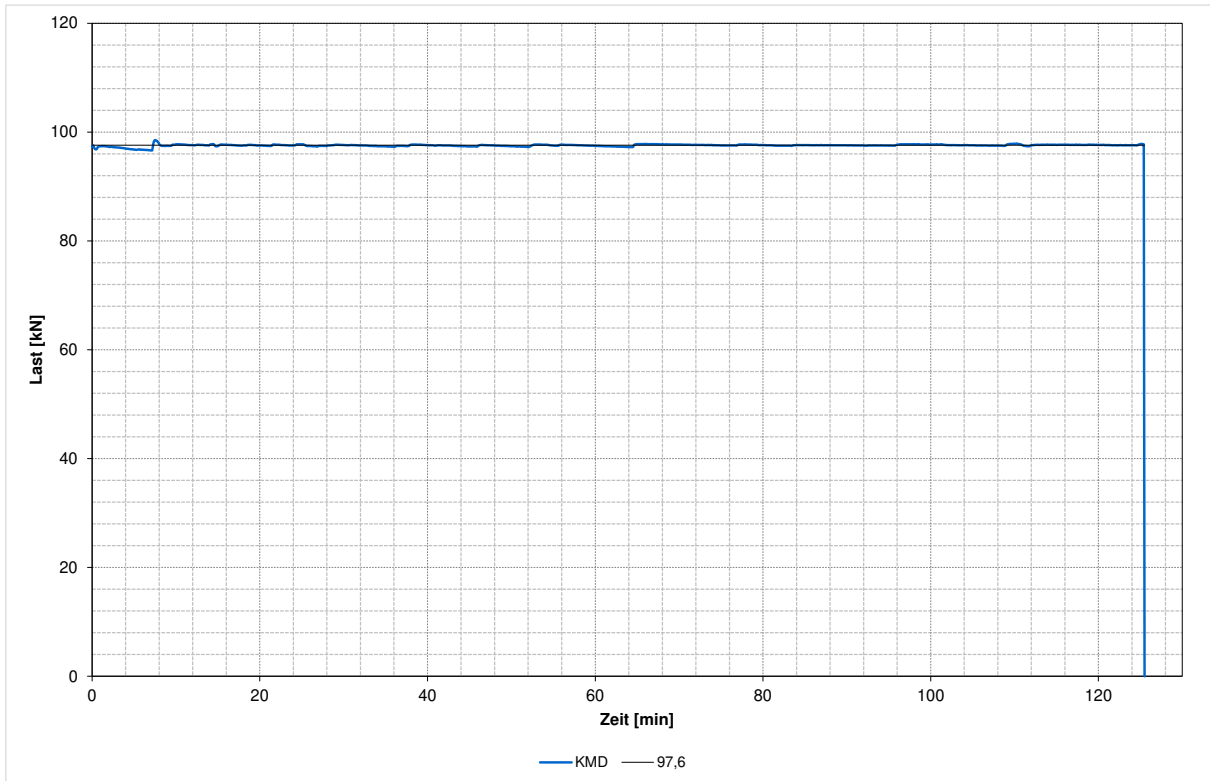


Diagramm A2.6 Verformung des Prüfkörpers während des Brandversuchs

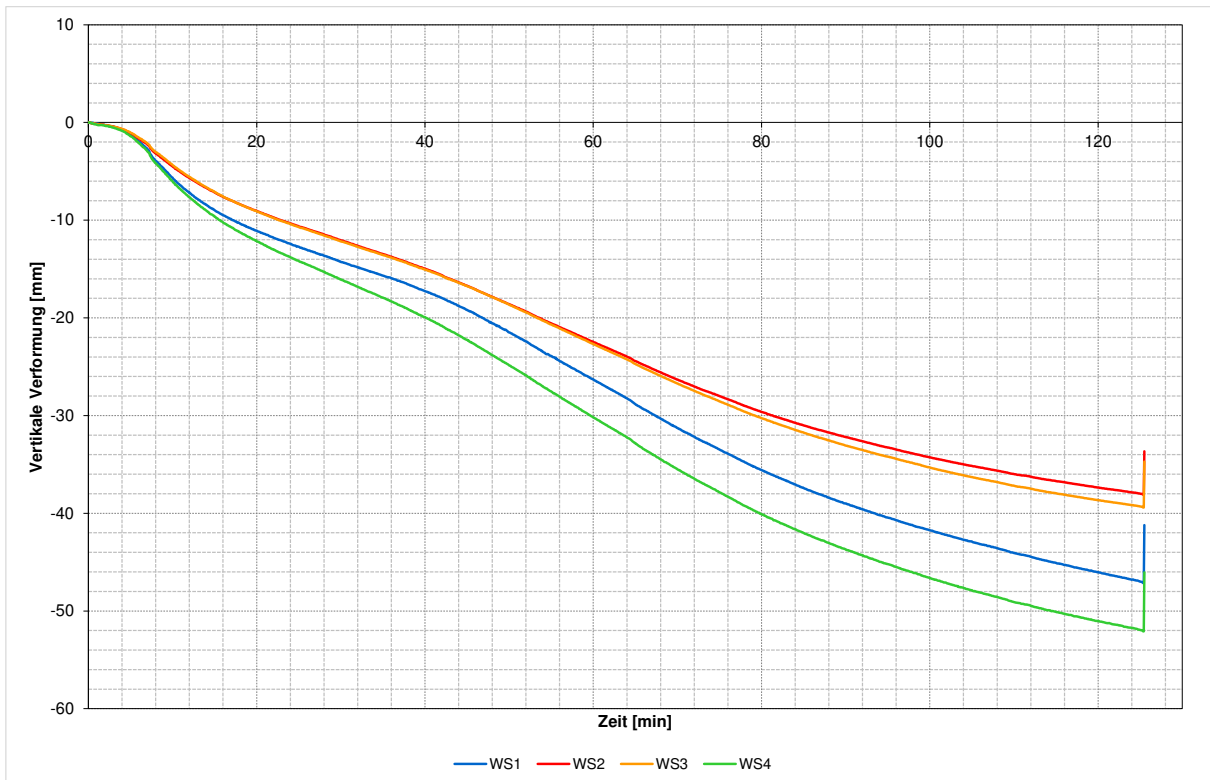


Diagramm A2.7 Verformungsgeschwindigkeit des Probekörpers

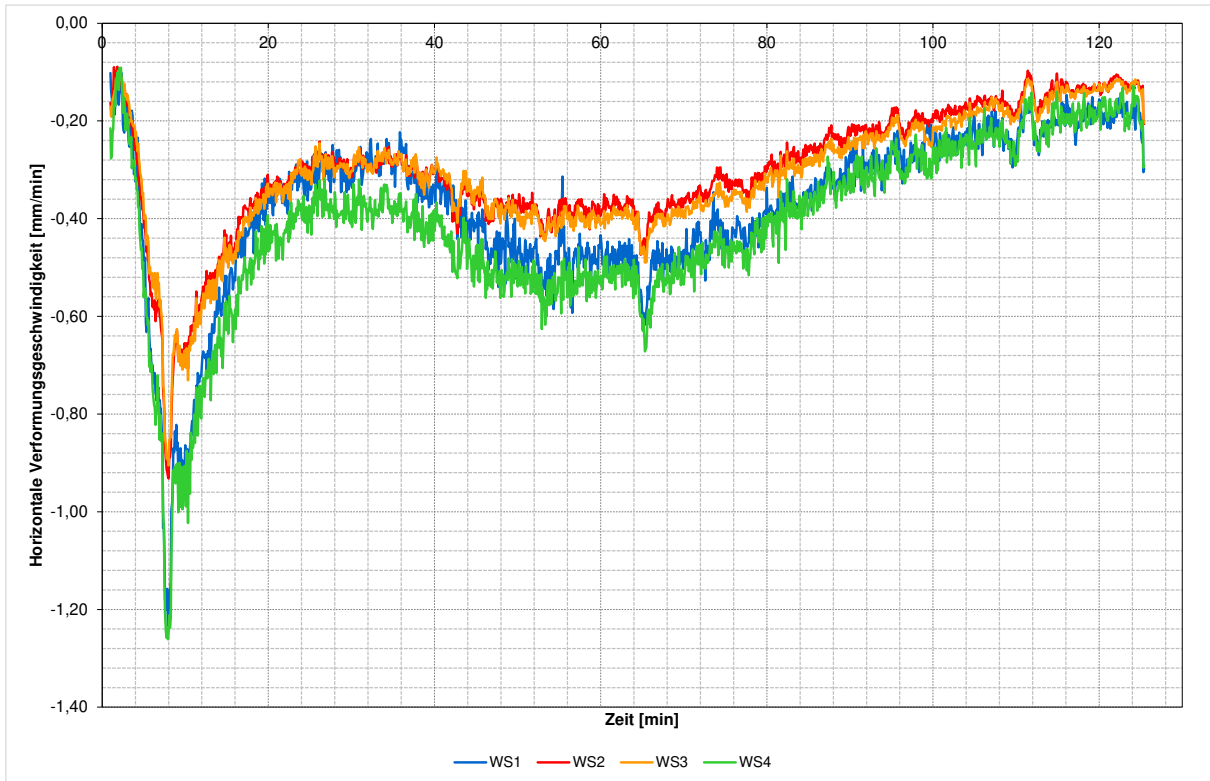


Diagramm A2.8 Temperaturerhöhung der brandabgewandten Oberfläche des Prüfkörpers

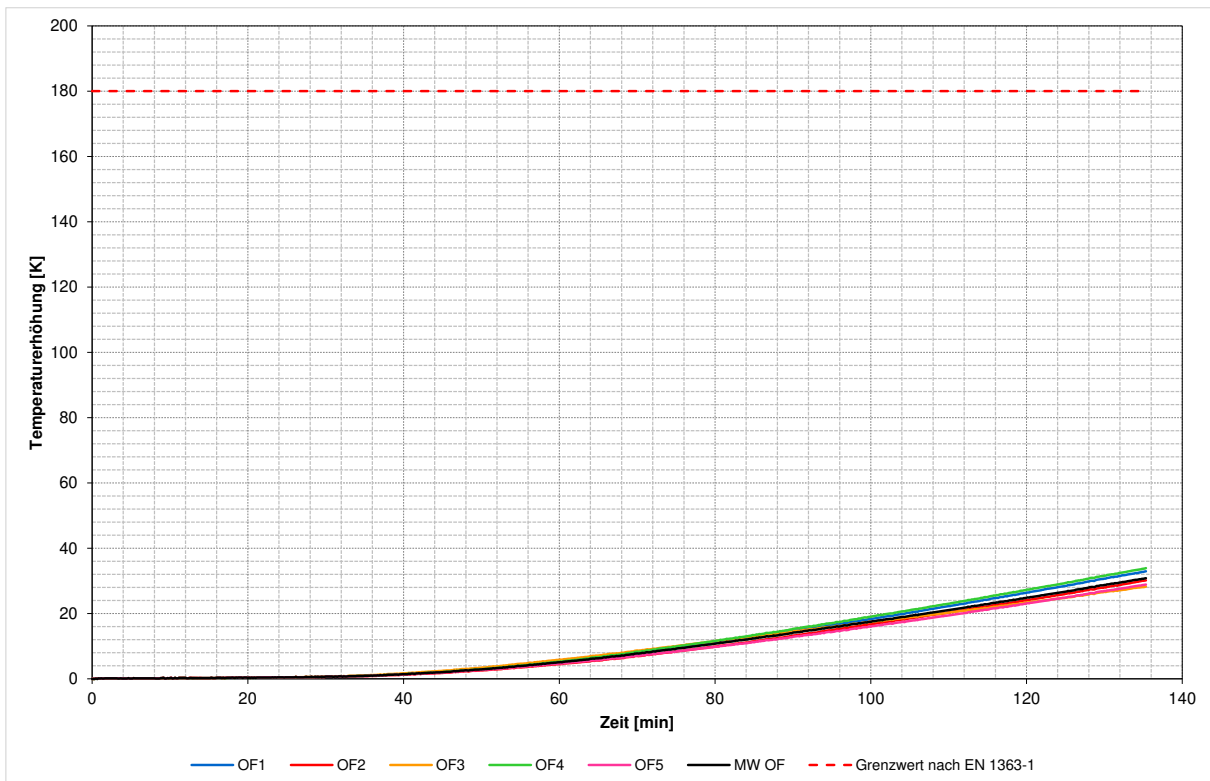


Diagramm A2.9 Temperaturen zwischen Putz und Betonplatte

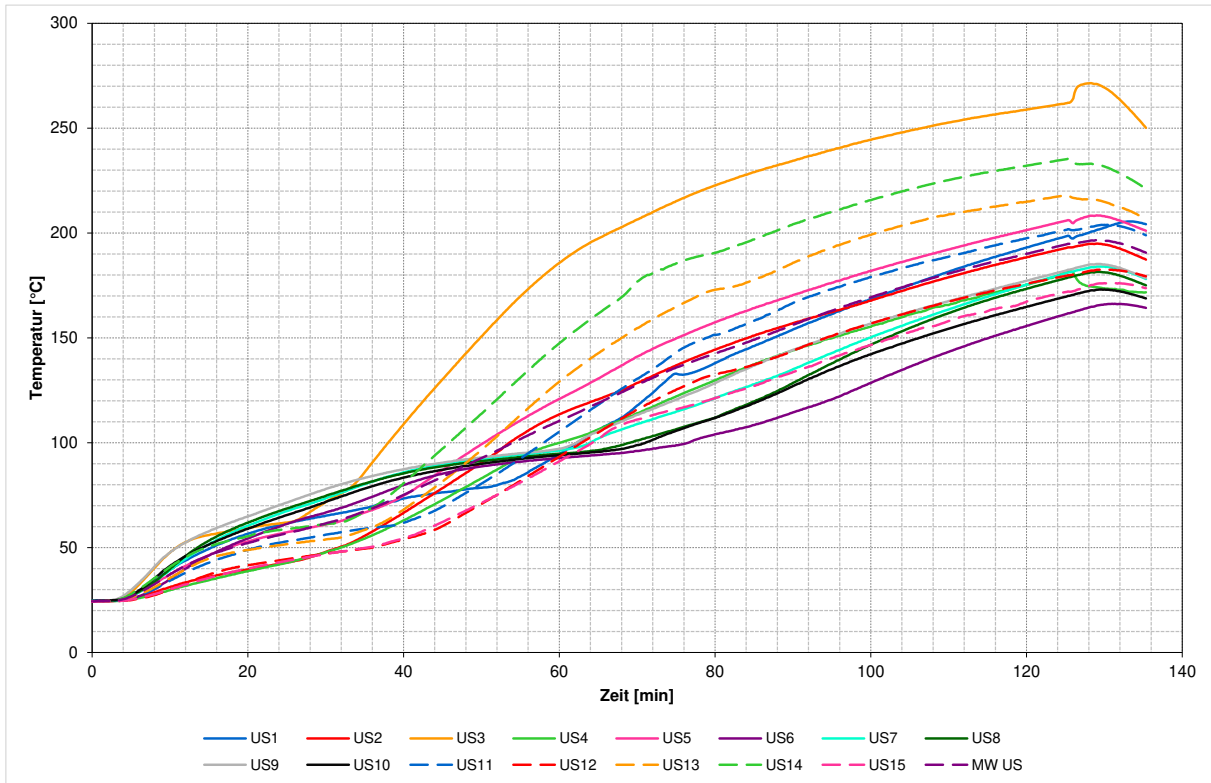


Diagramm A2.10 Temperaturen an der tragenden Längsbewehrung

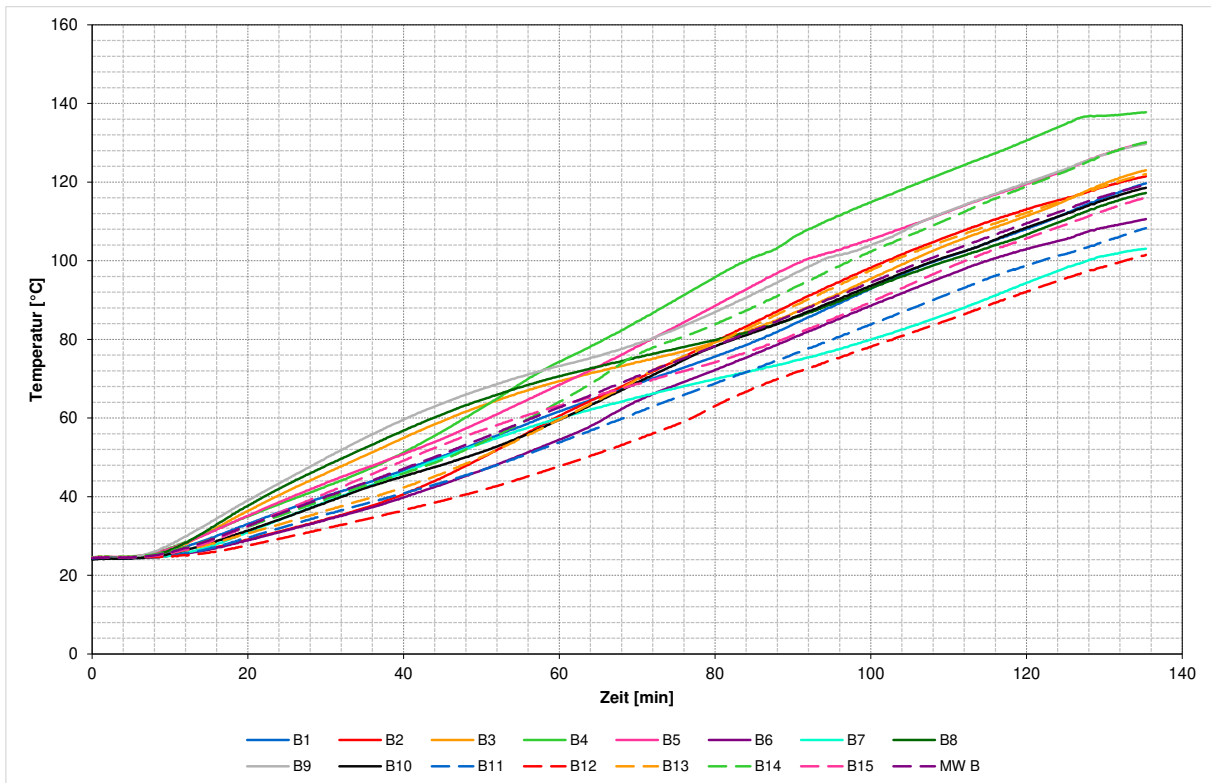


Diagramm A2.11 Temperaturen im Prüfkörper

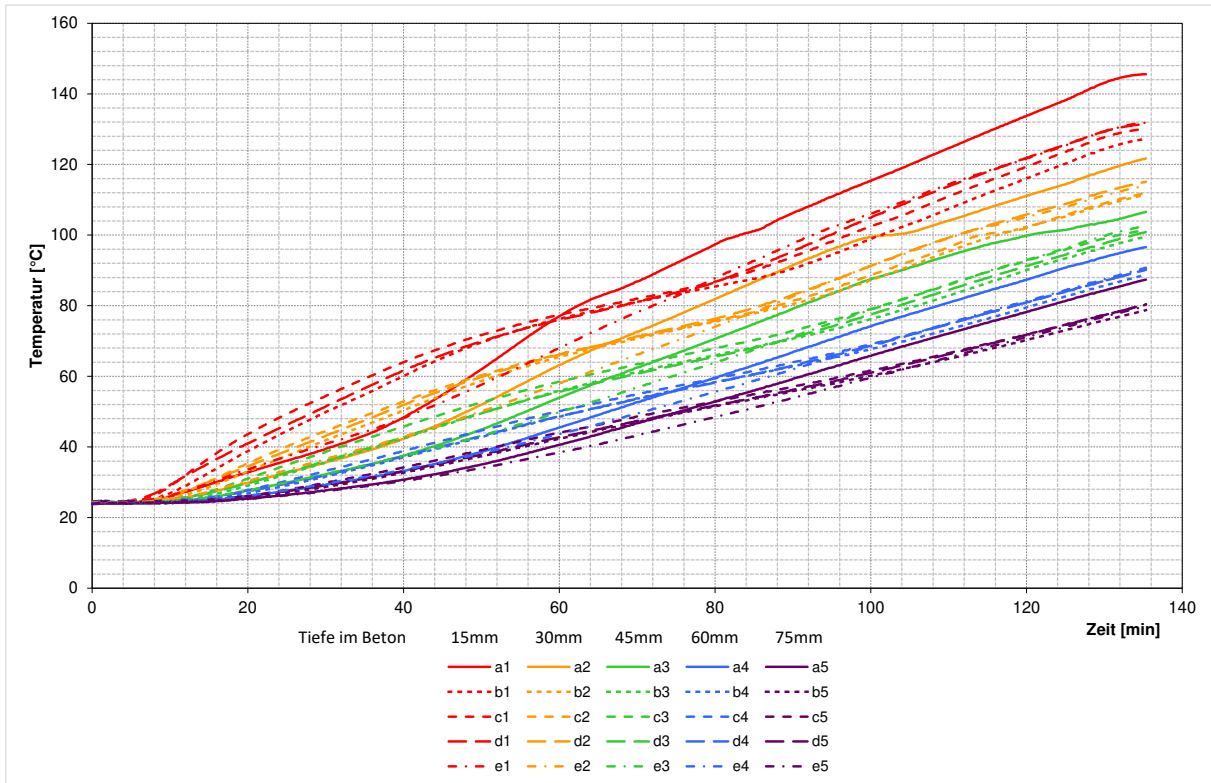
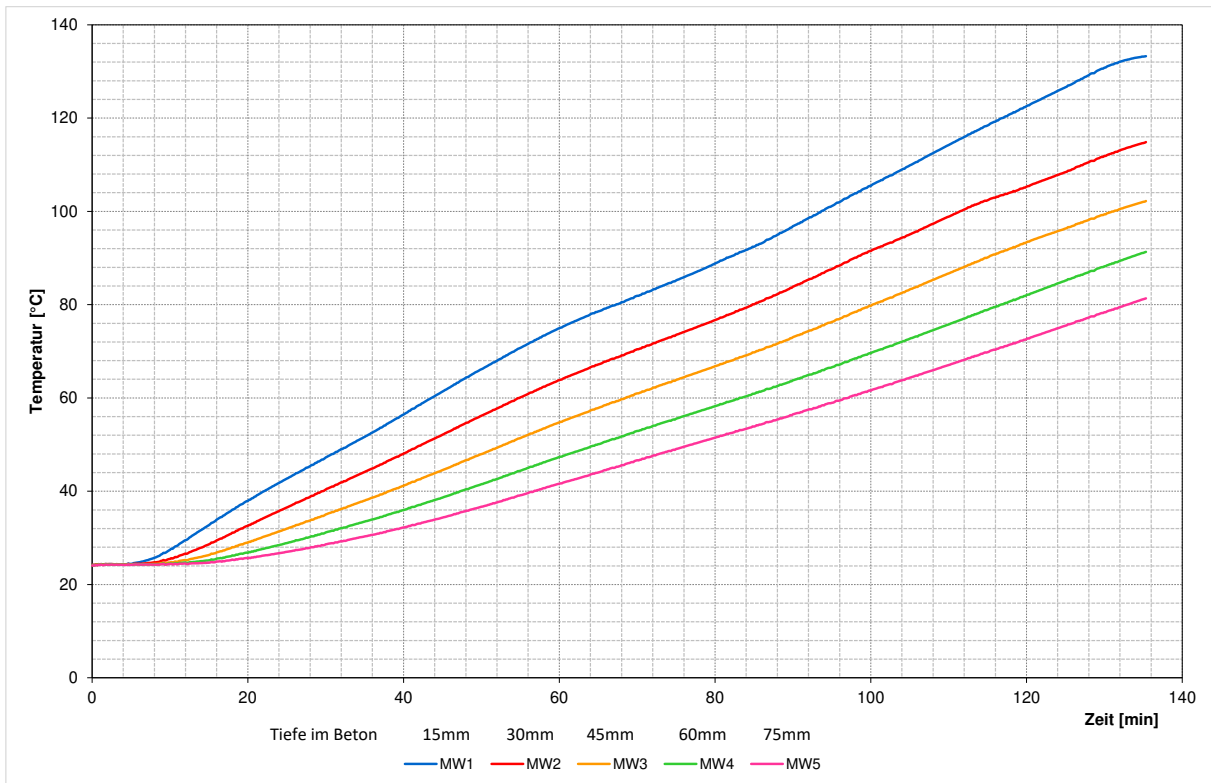


Diagramm A2.12 Mittelwerte der Temperaturen im Prüfkörper



Anlage 3 Fotodokumentation Aufbau und Prüfung der Platte (23 mm Putz)



Bild A3.1 Befestigung der ersten Lamelle – Durchhang vor Aktivierung des Memoryeffektes



Bild A3.2 Ansicht der Ankerreihen



Bild A3.3 Aktivierung der Lamellen



Bild A3.4 Prüfung der Vorspannung



Bild A3.5 Abschluss der Installation der statischen Verstärkung



Bild A3.6 Aufspritzen des Haftvermittlers



Bild A3.7 *Einkleben des Glasgitters*



Bild A3.8 *Aufbringen des Brandschutzputz*



Bild A3.9 *Ansicht des gelenkigen Auflagers vor dem Auflegen des Probekörpers*



Bild A3.10 *Einbausituation vor Prüfbeginn*



Bild A3.11 *Blick auf die feuerabgewandte Seite mit der Lasteinleitung*



Bild A3.12 *Blick in den Brandraum (1. Prüfminute)*



Bild A3.13 Beginnende Rissbildung (20. Prüfminute)



Bild A3.14 Rissbild (50. Prüfminute)



Bild A3.15 Rissbild (70. Prüfminute)

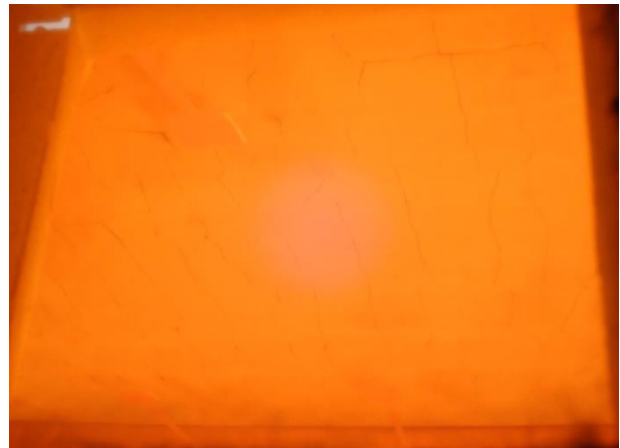


Bild A3.16 Rissbild (90. Prüfminute)

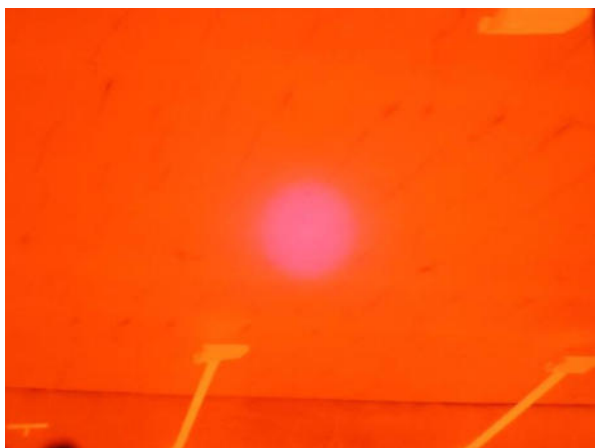


Bild A3.17 Rissbild (125. Prüfminute)



Bild A3.18 Blick auf die feuerabgewandte Seite (125. Prüfminute)



Mfpa Leipzig GmbH

Gesellschaft für Materialforschung
und Prüfungsanstalt für
das Bauwesen Leipzig mbH

Prüf-, Überwachungs- und Zerti-
fizierungsstelle für Baustoffe, Bau-
produkte und Bausysteme

Annerkannt nach Landesbauord-
nung (SAC02), notifiziert nach
Bauprodukten-
verordnung (NB 0800)

Zentrum für Innovation und Be-
rechnung

Geschäftsbereichsleiter:
Dr.-Ing. Susanne Reichel
Tel.: +49 (0) 341-6582-106
Fax: +49 (0) 341-6582-135
s.reichel@mfpa-leipzig.de

Arbeitsgruppe - FEM

Ansprechpartner*in
Dr.-Ing. Susanne Reichel
Tel.: +49 (0) 341-6582-106
s.reichel@mfpa-leipzig.de

Gutachterliche Stellungnahme Nr. GS 6.1/21-008-1

vom 10.11.2021

Gegenstand: Bewertung des Tragverhaltens von flächigen Stahlbeton-
Konstruktionen mit re-plate-Verstärkung unter einseitiger
Brandbeanspruchung gemäß Einheitstemperaturzeitkurve

Auftraggeber: **re-fer AG**
Riedmattli 9
6423 Seewen
Schweiz

Bearbeiter: Dr.-Ing. Susanne Reichel

Dieses Dokument besteht aus 30 Seiten, inkl. 1 Anlagen.

Dieses Dokument darf nur ungekürzt vervielfältigt und veröffentlicht werden. Als rechtsverbindliche Form gilt die deutsche Schriftform mit Originalunterschriften und Originalstempel des/der Zeichnungsberechtigten. Es gelten die Allgemeinen Geschäftsbedingungen (AGB) der Mfpa Leipzig GmbH.

Inhaltsverzeichnis

1 Zielstellung und Vorgehensweise	3
1.1 Beschreibung der Konstruktion	3
2 Literatur	5
2.1 Verwendete Normen, Richtlinien und Regelwerke	5
2.2 Referenzdokumente	5
2.2.1 Gutachten und Prüfberichte	6
3 Brandschutztechnisches Bemessungskonzept	7
3.1 Nachweisformat	7
3.2 Brandschutztechnische Ertüchtigung	7
3.2.1 Anwendungsgrenzen aus [G4]	10
3.2.2 Geplanter Aufbau des Brandschutzputzsystems	11
3.3 Zielstellung des Brandversuchs	11
4 Beurteilung der Leistungsfähigkeit	13
4.1 Brandversuch	13
4.1.1 Festlegung der Prüflast	13
4.1.2 Aufbau des Brandschutzputzsystems	14
4.1.3 Festlegung der Dicke der brandschutztechnischen Ertüchtigung	15
4.2 Begleitversuche	16
4.3 Versuchsergebnisse	17
4.3.1 Belastung im Brandversuch	17
4.3.2 Temperaturen	17
4.3.3 Haftvermögen	19
4.4 Beurteilung der Tragfähigkeit unter Brandbeanspruchung	20
4.4.1 Gültigkeit des Temperaturkriteriums	20
4.4.2 Einfluss des abgewandelten Aufbaus des Brandschutzputzsystems	20
4.4.3 Anwendbarkeit der Leistungseigenschaften aus [G4]	21
4.5 Zusammenfassung	22
5 Besondere Hinweise/Anwendungsgrenzen	23
6 Unterschriften	24
7 Anhang 1 - Bemessung	25

1 Zielstellung und Vorgehensweise

Die Firma MFPFA Leipzig GmbH wurde von der Firma re-fer AG beauftragt, auf Basis eines in [G1] dokumentierten Brandversuchs, eine Bewertung des Tragverhaltens von Stahlbeton-Konstruktionen mit re-fer-Verstärkung unter einseitiger Brandbeanspruchung nach Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) gemäß [N1] vorzunehmen.

Die Versuchsdurchführung sowie die Bewertung erfolgt auf Basis des in [G2] beschriebenen Untersuchungsprogramms. Im Rahmen des vorliegenden Dokuments werden flächige Stahlbeton-Konstruktionen mit paralleler Anordnung von re-plate-Lamellen und vollflächiger brandschutztechnischer Ertüchtigung betrachtet. Die Bewertung gilt demnach explizit nicht für

- flächige Stahlbeton-Konstruktionen mit paralleler und senkrechter Anordnung von re-plate-Lamellen (Lamellen-Kreuzungen),
- linienförmige Stahlbeton-Konstruktionen,
- Stahlbeton-Konstruktionen mit partieller Ertüchtigung,
- Stahlbeton-Konstruktionen mit re-bar-Verstärkung.

Das vorliegende Dokument dient der Vorlage beim Verein kantonaler Gebäudeversicherungen (VKG) bzw. Verein kantonaler Feuerversicherungen (VKF) mit dem Ziel der Aufnahme in das Brandschutzregister.

1.1 Beschreibung der Konstruktion

Die Firma re-fer AG entwickelt und produziert Verstärkungssysteme für das Bauwesen, bei denen memory[®]-steel zum Einsatz kommt. Hierbei handelt es sich um eine eisenbasierte Formgedächtnislegerung, die eine innovative Vorspanntechnik ermöglicht, die im Zusammenhang mit Neubauten und Vorfertigung sowie im Bereich der Bauwerkssanierung und -erhaltung genutzt werden kann.

Derzeit werden die Systeme re-plate und re-bar zur Verstärkung von Stahlbetonstrukturen angeboten. Während das System re-bar einen eingemörtelten Spannstahl aus memory[®]-steel beschreibt, der die Form von geripptem Betonstahl aufweist, ist re-plate ein Spannstahl aus memory[®]-steel in Form einer Lamelle, die extern an der Bestandskonstruktion appliziert wird. Der Querschnitt einer re-plate-Lamelle beträgt stets

- Breite: $b = 120,0mm$,
- Dicke: $t = 1,5mm$.

Das Material wird von der re-fer AG im Werk auf eine bleibende Verformung vorgedehnt, vorgelocht und als gerollte Lamellen auf die Baustelle geliefert. Anschließend wird die Lamelle mechanisch an beiden Enden mittels Hilti Direktbefestigung in der Bestandskonstruktion verankert. Hierfür werden Nägel des Typs X-CR 48 P8 S15 in Kombination mit dem Setzgerät Hilti DX 5 eingesetzt. In jedem Verankerungsbereich werden 12 Nägel in 2-er-Reihen angeordnet. Die Löcher vom Durchmesser $d = 4mm$ werden im re-plate vorgebohrt. Die Rand- und Lochabstände der Befestigungsmittel in der Lamelle betragen (Bezeichnungen analog [N2])

- Randabstand in Quer- und Längsrichtung: $e_1 = e_2 = 30mm$,
- Lochabstand in Querrichtung: $p_2 = 60mm$,

- Lochabstand in Längsrichtung: $p_1 = 50mm$.

Der Tragwiderstand der Verankerung unter Umgebungsbedingungen beträgt nach Angaben des Auftraggebers

$$V_{Rd,s} = 105kN. \tag{1}$$

Um re-plate zu aktivieren, bzw. vorzuspannen, wird der memory[®]-steel mit einem Gasbrenner oder Infrarot-Heizstrahler der re-fer AG erwärmt. Die unter Nutzung der verschiedenen Methoden erzielten Temperaturen und damit Vorspannungen in den re-plate-Lamellen sind in Tabelle 1 ausgewiesen.

	Heiztemperatur [°C]	Vorspannung [$\frac{N}{mm^2}$]
Gasbrenner	300-350	420
Infrarotstrahler	165	300

Tabelle 1: Verstärkungssystem re-plate: Vorspannung in Abhängigkeit der Aktivierungsmethode

Durch die Verankerung am Bauwerk wird die Rückverformung verhindert, sodass die fertig applizierte Lamelle als vorgespanntes, externes Zugband ohne Verbund wirkt. Die Nachweisführung unter Umgebungstemperatur erfolgt gemäß bzw. in Anlehnung an EN 1992-1-1 [N3].

2 Literatur

2.1 Verwendete Normen, Richtlinien und Regelwerke

Den Berechnungen liegen die folgenden Normen, Richtlinien und Regelwerke zugrunde:

- [N1] EN 1363-1:2012-10: Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- [N2] EN 1993-1-8:2005 + AC:2009: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen
- [N3] EN 1992-1-1:2004 + AC:2010: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [N4] EN 1992-1-2:2004 + AC:2008: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton - und Spannbetontragwerken - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall
- [N5] EN 1993-1-2:2005 + AC:2009: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall
- [N6] DIN EN 13381-3:2015-06: Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 3: Brandschutzmaßnahmen für Betonbauteile; Deutsche Fassung EN 13381-3:2015
- [N7] DIN EN 13381-4:2013-08: Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 4: Passive Brandschutzmaßnahmen für Stahlbauteile; Deutsche Fassung EN 13381-4:2013
- [N8] DIN 18550-1:2018-01: Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen – Teil 1: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-1:2016-09 für Außenputze
- [N9] DIN EN 998-1:2017-02: Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau - Teil 1: Putzmörtel; Deutsche Fassung EN 998-1:2016
- [N10] DIN EN 206:2017-01: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016
- [N11] DIN EN 1363-1:2020-05: Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 1363-1:2020

2.2 Referenzdokumente

Den Berechnungen liegen die folgenden Referenzdokumente sowie zusätzlichen Informationen zugrunde:

2.2.1 Gutachten und Prüfberichte

- [G1] Prüfbericht Nr. PB 3.2/21-032: Belasteter Brandversuch in Anlehnung an DIN EN 13381-3:2015-06 in Verbindung mit DIN EN 1363-1:2020-05 an einer großmaßstäblichen Betonplatte ($d = 140 \text{ mm}$) mit einer statischen Verstärkung und abschließender brandschutztechnischer Ertüchtigung unter einseitiger thermischer Beanspruchung durch die Einheitstemperaturzeitkurve – MFPA Leipzig GmbH; 10.11.2021

- [G2] Ergebnisbericht Nr. S6.1/20-003-1: Erarbeitung eines Prüfprogramms zur Charakterisierung des Tragverhaltens von Stahlbeton-Konstruktionen mit re-fer-Verstärkung im Brandfall – MFPA Leipzig GmbH; 13.01.2021

- [G3] Test Report No 5214025644: High-temperature behavior of prestressed Fe-SMA strips – Empa Dübendorf; 14.04.2021

- [G4] Beurteilungsbericht Nr. GS 6.1/18-076-1-r1: Bewertung des Feuerwiderstands des Brandschutzputzsystems Sika Cem[®] Pyrocoat im Zusammenhang mit flächigen Betonkonstruktionen gemäß DIN EN 13381-3:2015-06 – MFPA Leipzig GmbH; 14.06.2019

- [G5] Beurteilungsbericht Nr. GS 6.1/20-015-1: Bewertung des Feuerwiderstands des Brandschutzputzsystems Sika Cem[®] Pyrocoat im Zusammenhang mit linienförmigen Betonkonstruktionen gemäß DIN EN 13381-3:2015-06 – MFPA Leipzig GmbH; 11.05.2020

- [G6] Beurteilungsbericht Nr. GS 6.1/19-031-1: Bewertung des Feuerwiderstands des Brandschutzputzsystems Sika Cem[®] Pyrocoat im Zusammenhang mit Stahlkonstruktionen gemäß DIN EN 13381-4:2013-08 unter Berücksichtigung von EAD 350140-00-1106. – MFPA Leipzig GmbH; 10.07.2019

3 Brandschutztechnisches Bemessungskonzept

Aufgrund der Anordnung der re-plate-Lamellen als externes Zugband sind diese im Brandfall direkt der Beflammung ausgesetzt und weisen mit vernachlässigbarer zeitlicher Verzögerung die Brandraumtemperatur auf. Um die Feuerwiderstandsdauer des mit re-plate-Lamellen verstärkten Gesamtsystems zu erhöhen, soll eine brandschutztechnische Ertüchtigung unter Nutzung des Brandschutzputzsystems Sika Cem[®] Pyrocoat angeordnet werden.

Hinsichtlich der Feuerwiderstandsdauer wird ein maximaler Feuerwiderstand von 120min (R120) angestrebt.

3.1 Nachweisformat

Die Nachweisführung für die re-plate-Lamellen im Brandfall soll in Anlehnung an EN 1992-1-2, Kapitel 5 [N4] bzw. EN 1993-1-2, Kapitel 4.2.4 [N5] auf Basis eines Temperaturkriteriums erfolgen. Die Ermittlung der kritischen Temperatur erfolgte durch Dr. Elyas Ghafoori an der Empa Dübendorf und ist in [G3] dokumentiert. Da die tragende Funktion der re-plate-Lamellen auch im Brandfall erhalten bleiben soll, wird die kritische Temperatur als die Temperatur definiert, ab der die Vorspannung der re-plate-Lamellen verloren geht. Auf Basis von Versuchsergebnissen und theoretischen Überlegungen wird nach Angaben des Auftraggebers und gemäß [G3] die kritische Temperatur mit

$$\Theta_{cr,V} = 300^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

abgeschätzt.

Es ist folglich nachzuweisen, dass die Verstärkung durch re-plate-Lamellen auch im Brandfall weiterhin wirksam ist. Eine Umlagerung der Lasten allein auf die unverstärkte Stahlbetonkonstruktion ist nicht Bestandteil des brandschutztechnischen Bemessungskonzepts. Für den Nachweis des Gesamtsystems im Brandfall ist dennoch auch der Nachweis der ausreichenden Tragfähigkeit der unverstärkten Bestandskonstruktion zu führen. Gemäß [N4], Kapitel 5.2(4) beträgt die kritische Stahltemperatur für Bewehrungsstahl $\Theta_{cr,s} = 500^{\circ}\text{C}$.

Ist für eine mit re-plate-Lamellen verstärkte Stahlbetonkonstruktion eine bestimmte Feuerwiderstandsdauer nachzuweisen, muss diese derart brandschutztechnisch ertüchtigt werden, dass die kritische Temperatur $\Theta_{cr,V}$ der re-plate-Verstärkung während der nachzuweisenden Feuerwiderstandsdauer nicht überschritten wird. Da die kritische Temperatur geringer ist als diejenige des Bewehrungsstahls ($\Theta_{cr,V} = 300^{\circ}\text{C} < \Theta_{cr,s} = 500^{\circ}\text{C}$), ist aus Sicht des Verfassers bei vollflächiger Ertüchtigung kein gesonderter Nachweis des Bewehrungsstahls erforderlich, da dieser tiefer in der Konstruktion liegt und im Vergleich zur re-plate-Lamelle eine verzögerte Temperaturbeanspruchung erfährt.

3.2 Brandschutztechnische Ertüchtigung

Die Leistungseigenschaften des zur brandschutztechnischen Ertüchtigung geplanten Brandschutzputzsystems Sika Cem[®] Pyrocoat wurden in Kombination mit linienförmigen sowie flächigen Stahlbetonbauteilen experimentell gemäß DIN EN 13381-3 [N6] untersucht und ausgewertet und sind in [G4, G5] ausgewiesen.

Weiterhin liegen mit [G6] Versuchsergebnisse auf Basis von DIN EN 13381-4 [N7] und daraus abgeleitete Leistungseigenschaften für Sika Cem[®] Pyrocoat in Kombination mit Stahlkonstruktionen vor. Da das Haftvermögen zwischen Untergrund und brandschutztechnischer Ertüchtigung einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungseigenschaften im Brandfall haben kann, sind die Ergebnisse

und Anwendungsgrenzen aus [G6] in die in [G2] dokumentierte Konzeptionierung der Brandversuche eingeflossen.

Das Brandschutzputzsystem Sika Cem[®] Pyrocoat wurde in Kombination mit Stahlbetonkonstruktionen sowie Stahlkonstruktionen als Mehrschichtsystem im Sinne von [N6], Kapitel 1 bestehend aus

- Dünnschichtputz Sika Cem[®] Pyrocoat Base zur Untergrundvorbehandlung: zementbasierter Haftmörtel, Mörtelgruppe P III gemäß [N8] bzw. CS IV gemäß [N9],
- Brandschutzputz Sika Cem[®] Pyrocoat: Werkrockenmörtel auf Zementbasis, Mörtelgruppe CS II gemäß [N9]

geprüft. Bei großen Nennschichtdicken des Gesamtsystems kann es erforderlich sein, den Brandschutzputz in mehreren Lagen zu applizieren. Für die Bewertungen aus [G4, G5] wird auch ein mehrlagig aufgebracht Brandschutzputz als eine Schicht im Sinne des mehrschichtigen Systems gemäß [N6], Kapitel 1 gewertet.

Im Zusammenhang mit Stahlkonstruktionen wurden zudem an allen Probekörpern Untergrundvorbehandlungen durchgeführt. In diesem Zusammenhang erfolgte zunächst eine Vorbehandlung durch Sandstrahlen. Anschließend wurden die Oberflächen mit der Grundierung SikaCor[®] EG-1 beschichtet. Die nominelle Schichtdicke der Grundierung betrug $d_{N,Grund} = 80\mu m$.

Zusätzliche Befestigungs- und Verbindungssysteme, Bewehrungssysteme, Haftbeschleuniger, Grundierungen oder Deckanstriche kamen nicht zum Einsatz.

Für flächige Stahlbetonkonstruktionen wurden folgende Konfigurationen untersucht:

- große Betonplatte gemäß [N6], C30/37
 - Nennschichtdicken: $d_N = 10mm$, $d_N = 20mm$, $d_N = 40mm$,

Die gemäß [N6], Kapitel 9.3 zu berücksichtigenden Messstellen zur Bestimmung der Probekörpertemperatur umfassen unter anderem die zeitabhängige Temperatur im Interface zwischen Brandschutzputzsystem und Stahlbetonkonstruktion. Die zeitabhängigen charakteristischen Temperaturen gemäß [N6], Kapitel 13.1 und 3.1.14 für die entsprechenden Gruppen von Thermoelementen sind in den Abbildungen 1 bis 3 dargestellt.

Nennschichtdicke 10mm, Betonunterseite, charakteristische Temperatur

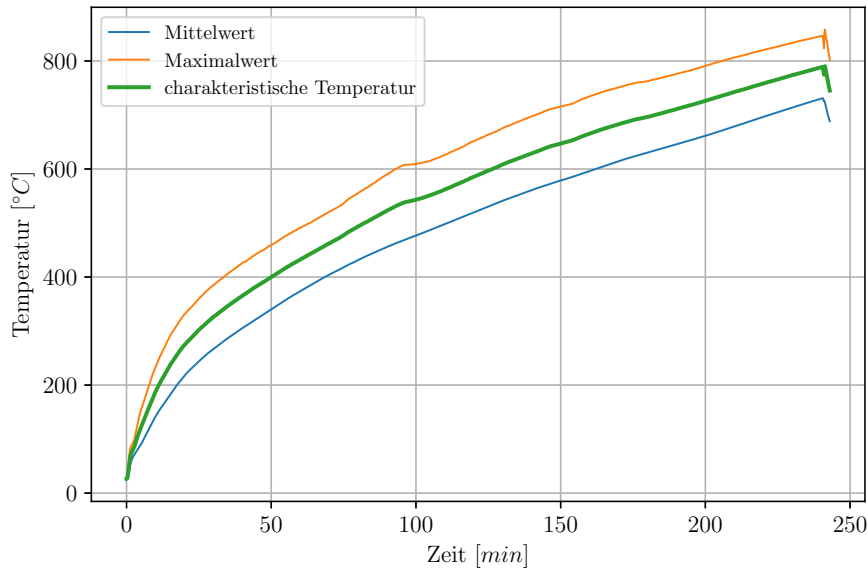


Abbildung 1: Brandversuche an großen Betonplatten aus C30/37 gemäß [N6], Tabelle 1 mit Brandschutzputzsystem Sika Cem® Pyrocoat, Nennschichtdicke $d_N = 10\text{mm}$, untere Betonoberfläche (be- flammt): Charakteristische Temperaturen gemäß [N6], Kapitel 13.1 und 3.1.14, aus [G4]

Nennschichtdicke 20mm, Betonunterseite, charakteristische Temperatur

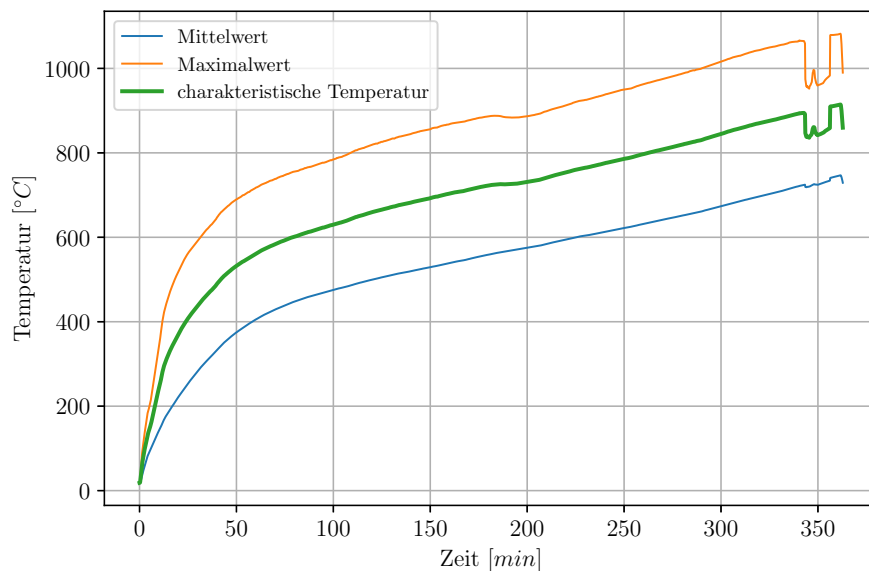


Abbildung 2: Brandversuche an großen Betonplatten aus C30/37 gemäß [N6], Tabelle 1 mit Brandschutzputzsystem Sika Cem® Pyrocoat, Nennschichtdicke $d_N = 20\text{mm}$, untere Betonoberfläche (be- flammt): Charakteristische Temperaturen gemäß [N6], Kapitel 13.1 und 3.1.14, aus [G4]

Nennschichtdicke 40mm, Betonunterseite, charakteristische Temperatur

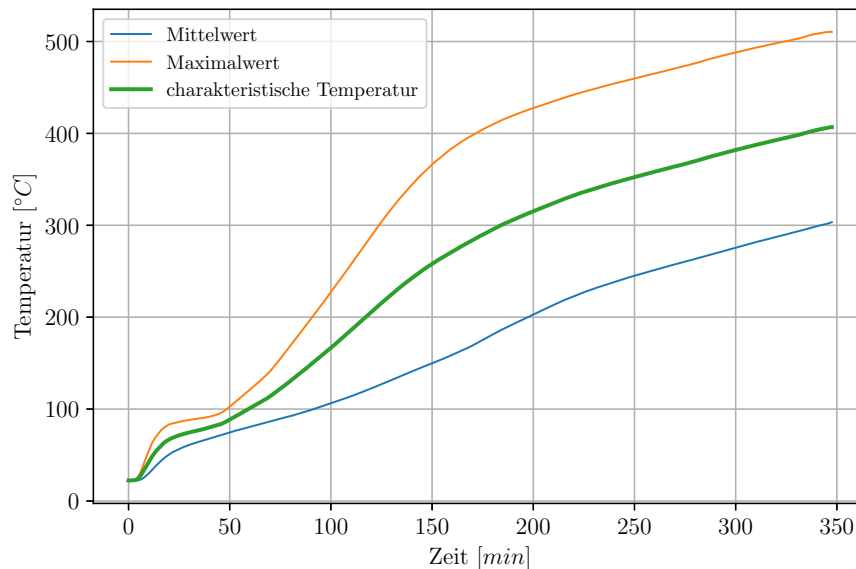


Abbildung 3: Brandversuche an großen Betonplatten aus C30/37 gemäß [N6], Tabelle 1 mit Brandschutzputzsystem Sika Cem[®] Pyrocoat, Nennschichtdicke $d_N = 40\text{mm}$, untere Betonoberfläche (beflammt): Charakteristische Temperaturen gemäß [N6], Kapitel 13.1 und 3.1.14, aus [G4]

Ein Verlust des Haftvermögens gemäß der Kriterien aus [N6], Kapitel 13.5 war in keinem der Versuche zu beobachten.

Im Zusammenhang mit Stahlkonstruktionen fließt der Einfluss des Haftvermögens über Korrekturfaktoren in die Leistungseigenschaften ein (vgl. [G6], Kapitel III.4).

Die in [G4] ausgewiesenen zeitabhängigen Temperaturen (vgl. auch Abbildungen 1 bis 3) sollen auch für die Nachweisführung der Verstärkung durch re-plate-Lamellen im Brandfall herangezogen werden. Unter Nutzung der vorhandenen Daten und für die kritische Temperatur $\Theta_{cr,V} = 300^\circ\text{C}$ wird der Zusammenhang zwischen Feuerwiderstandsdauer und Schichtdicke des Brandschutzputzsystems hergestellt. Die Anwendbarkeit der Ergebnisse aus [G4] auch für mittels re-plate-Lamellen verstärkte Konstruktionen wird im Nachgang unter Nutzung der Versuchsergebnisse aus [G1] bestätigt.

3.2.1 Anwendungsgrenzen aus [G4]

Die in [G4] ausgewiesenen Leistungseigenschaften von Sika Cem[®] Pyrocoat sind nur in den spezifizierten Anwendungsgrenzen gültig. Soll eine Übertragung der Ergebnisse auf verstärkte Konstruktionen durchgeführt werden, gelten die entsprechenden Anwendungsgrenzen analog.

Für die in [G4] ausgewiesenen Leistungseigenschaften für Sika Cem[®] Pyrocoat in Kombination mit flächigen Betonbauteilen gelten folgende Anwendungsgrenzen:

- Betonplatten und -wände mit horizontaler sowie vertikaler Ausrichtung und einseitiger Beflammlung durch die Einheitstemperaturzeitkurve gemäß [N1],
- Betone mit einer Rohdichte von $1979 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \leq \rho \leq 2677 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}$,
- Betone der Festigkeitsklassen C30/37 und C35/45 gemäß [N10, N3], keine Einschränkung hinsichtlich der Gesteinskörnung,

- nicht-vorgespannte und vorgespannte Konstruktionen, sofern die in [N3] angegebenen Regelungen eingehalten werden,
- zweischichtiges Brandschutzputzsystem bestehend aus Dünnschichtputz Sika Cem[®] Pyrocoat Base zur Untergrundvorbereitung und Brandschutzputz Sika Cem[®] Pyrocoat ohne zusätzliche Befestigungs- und Verbindungssysteme, Maschendraht oder Haftbeschleuniger,
- Schichtdicken des Brandschutzputzes von $9,7\text{mm} \leq d \leq 43,5\text{mm}$, Schichtdicke des Putzhaftgrunds mindestens 1mm
- Entschalungsmittel aus löslichen Ölen oder löslichen Emulsionen.

3.2.2 Geplanter Aufbau des Brandschutzputzsystems

Der für die Nutzung im Zusammenhang mit re-plate-Lamellen geplante Aufbau des Brandschutzputzsystems ist in Abbildung 4 dargestellt.

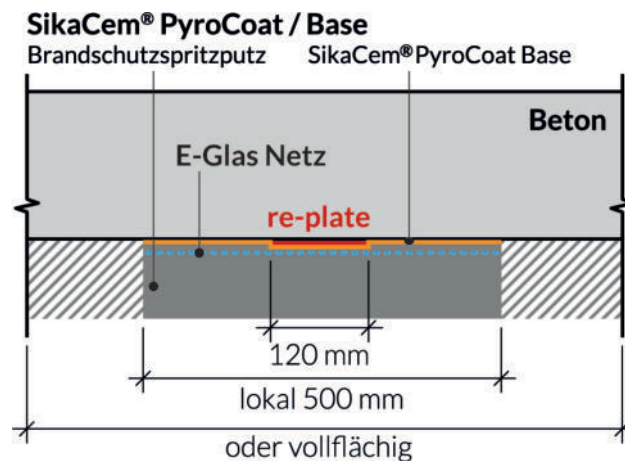


Abbildung 4: Verstärkungssystem re-plate: Geplanter Aufbau des Brandschutzputzsystems

Abweichend zu den bisher durchgeführten Versuchen und den in [G4] formulierten Anwendungsgrenzen soll das Brandschutzputzsystem in Kombination mit re-plate-Lamellen mit einem E-Glas-Netz bewehrt werden. Zudem ist im Gegensatz zu den Versuchen aus [G6] keine Untergrundvorbereitung der Stahl-Lamellen geplant.

Ein Einfluss beider Modifikationen im Aufbau des Brandschutzputzsystems auf die Wärmeleitfähigkeit und das Haftvermögen ist aus Sicht des Verfassers nicht ausgeschlossen.

Die in Abbildung 4 angedeutete partielle brandschutztechnische Ertüchtigung der Stahlbeton-Konstruktion nur im Bereich der re-plate-Verstärkung ist nicht Bestandteil der Untersuchungen im Rahmen des vorliegenden Dokuments.

3.3 Zielstellung des Brandversuchs

Aus den obigen Darlegungen können die folgenden Zielstellungen für den in [G1] dokumentierten Brandversuch abgeleitet werden:

1. Nachweis der Gültigkeit des Temperaturkriteriums bzw. der kritischen Temperatur $\Theta_{cr,V} = 300^\circ\text{C}$ im Bauteilversuch,

2. Nachweis der Anwendbarkeit der in [G4] ausgewiesenen Leistungseigenschaften des Brandschutzputzsystems Sika Cem[®] Pyrocoat auf mit re-plate-Lamellen verstärkte Stahlbetonkonstruktionen,
3. Untersuchung des Einflusses des E-Glas-Netzes und der veränderten Untergrundvorbereitung des Stahls auf das Haftvermögen des Brandschutzputzsystems.

4 Beurteilung der Leistungsfähigkeit

4.1 Brandversuch

Der in [G1] dokumentierte Brandversuch wurde anhand einer großen Betonplatte gemäß [N6], Tabelle 1 der Betonfestigkeitsklasse C30/37 durchgeführt, um eine direkte Vergleichbarkeit mit den bereits vorhandenen Versuchsergebnissen zu erzielen (vgl. [G4]).

Die re-plate-Verstärkung wurde in Form von 4 Lamellen angeordnet (siehe Abbildung 5).

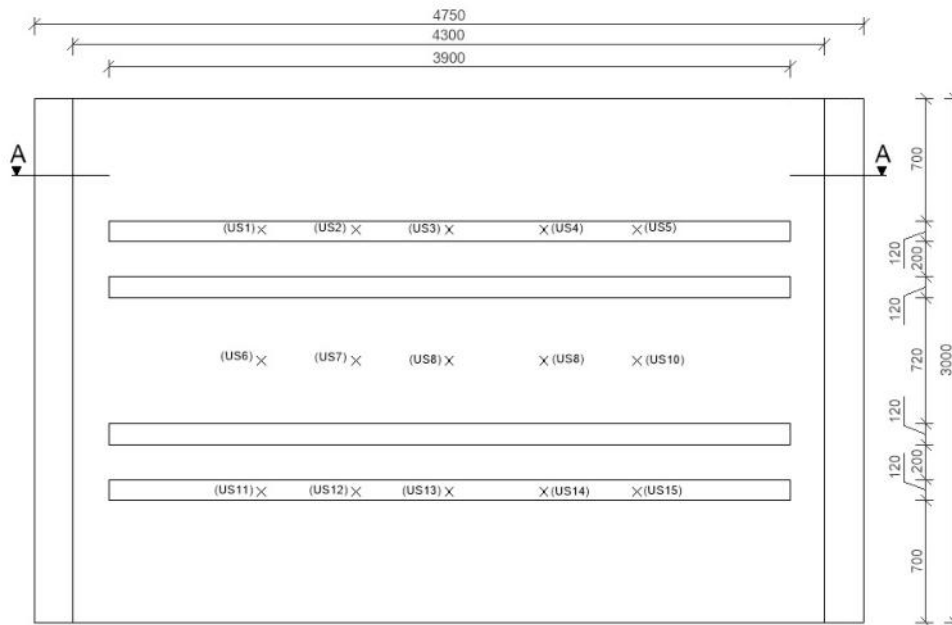


Abbildung 5: Verstärkungssystem re-plate: Probekörpergeometrie und Anordnung der re-plate-Lamellen

Der geringste im Brandversuch geprüfte Lamellenabstand von

$$x = 200\text{mm} \quad (3)$$

(lichter Abstand) bildet die Anwendungsgrenze der vorliegenden Beurteilung hinsichtlich des Mindestabstands der re-plate-Lamellen.

Mit einer Lamellenlänge von $L_V = 3900\text{mm}$ bei einer beflamten Länge der Betonplatte von $L_{exp} = 4000\text{mm}$ darf davon ausgegangen werden, dass auf der sicheren Seite liegend auch der Verankerungsbereich der re-plate-Lamellen der Beflammung ausgesetzt ist.

4.1.1 Festlegung der Prüflast

Die Geometrie des Prüfkörpers sowie die Bewehrungsanordnung und Lastaufbringung sind in [N6] festgelegt. Die Bemessung des mit re-plate-Lamellen verstärkten Probekörpers wurde durch den Auftraggeber durchgeführt und ist in Anhang 1 ausgewiesen. Demnach beläuft sich die Momententragfähigkeit unter Berücksichtigung von 4 re-plate-Lamellen auf

$$M_{Rd} = 115,4\text{kNm}. \quad (4)$$

Aufgrund der Teilsicherheitsbeiwerte für die außergewöhnliche Beanspruchungskombination Brand kann die äußere mechanische Beanspruchung $E_{d,fi}$ nie mehr als das 0,7-fache der Tragfähigkeit der Konstruktion unter Umgebungstemperatur betragen (vgl. z.B. [N4], Kapitel 2.4.2, Anmerkung 2 und [N5], Kapitel 2.4.2, Anmerkung 2). Die mechanische Beanspruchung im Brandversuch ergibt sich also aus der Nachweisführung für die Gesamtkonstruktion zu

$$E_{d,fi} = 0,7 \cdot R_d \quad (5)$$

und damit

$$M_{Ed,fi} = 0,7 \cdot M_{Rd} = 80,78 \text{ kNm}. \quad (6)$$

Gemäß [G1] weist der Probekörper eine Gesamtmasse von

$$G = 5238 \text{ kg} \quad (7)$$

auf, die bei einer Stützweite von $L_{sup} = 4,55 \text{ m}$ zu einem Moment aus Eigengewicht von

$$M_{Ed,g} = \left(\frac{G \cdot g}{L_{sup}} \right) \cdot \frac{L_{sup}^2}{8} = \left(\frac{5238 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{4,55 \text{ m}} \right) \cdot \frac{(4,55 \text{ m})^2}{8} = 29,22 \text{ kNm} \quad (8)$$

führt. Folglich ist eine zusätzliche mechanische Beanspruchung aufzubringen, die ein Moment

$$M_{Ed,test} = M_{Ed,fi} - M_{Ed,g} = 80,78 \text{ kNm} - 29,22 \text{ kNm} = 51,56 \text{ kNm} \quad (9)$$

erzeugt. Bei einem 4-Punkt-Biegeversuch mit einem Abstand der Lasten von den Auflagern von 1 m (vgl. [G1]) ergibt sich die Prüflast von

$$P = 51,56 \text{ kN} \quad (10)$$

pro Lasteinleitungspunkt.

4.1.2 Aufbau des Brandschutzputzsystems

Der tatsächlich geprüfte Aufbau des Brandschutzputzsystems ist in [G1] beschrieben und nachfolgenden zusammengefasst:

- Untergrundvorbereitung mit Dünnschichtputz Sika Cem[®] Pyrocoat Base: zementbasierter Haftmörtel, Mörtelgruppe P III gemäß [N8] bzw. CS IV gemäß [N9],
- im Bereich der re-plate-Lamellen Glasgitter SikaWrap[®]-350 G Grid, Randüberstand über re-plate-Lamellen 230 mm ,
- Brandschutzputz Sika Cem[®] Pyrocoat: Werkrockenmörtel auf Zementbasis, Mörtelgruppe CS II gemäß [N9].

Vor der Applikation des Brandschutzputzsystems wurden die re-plate-Lamellen mittels Universalverdünnung von Verunreinigungen, Fetten und Ölen befreit.

4.1.3 Festlegung der Dicke der brandschutztechnischen Ertüchtigung

Die erforderliche Dicke der brandschutztechnischen Ertüchtigung wird unter Nutzung der in [G4] dokumentierten Versuchsergebnisse für eine kritische Temperatur in der Interface-Zone von $\Theta_{cr,V} = 300^{\circ}\text{C}$ festgelegt. Grundlage bilden in Analogie zu [N6] die aus den Messwerten bestimmten charakteristischen Temperaturen in der Interfacezone für die untersuchten Nennschichtdicken der brandschutztechnischen Ertüchtigung (vgl. Abbildungen 1 bis 3). Obwohl die Nachweisführung für eine Brandbeanspruchungsdauer von 120min erfolgen soll, wird die brandschutztechnische Ertüchtigung auf eine Feuerwiderstandsdauer von nur 90min ausgelegt.

Die gesuchte Größe kann aus [G4], Abbildung 28 (vgl. Abbildung 6) abgelesen werden, die für eine kritische Temperatur von $\Theta_{cr,V} = 300^{\circ}\text{C}$ die Betontiefe, in der die entsprechende kritische Temperatur auftritt, in Abhängigkeit der Schichtdicke des Brandschutzputzsystems ausweist. Eine Betontiefe von 0mm entspricht hierbei der Interfacezone zwischen Beton und brandschutztechnischer Ertüchtigung. Abbildung 7 zeigt daraus entnommen den funktionalen Zusammenhang zwischen erforderlicher Schichtdicke des Brandschutzputzsystems und Brandbeanspruchungsdauer für die Interface-Temperatur von $\Theta_{cr,V} = 300^{\circ}\text{C}$. Die in [G4] spezifizierten Anwendungsgrenzen hinsichtlich der Schichtdicke sind als gestrichelte Linien eingezeichnet

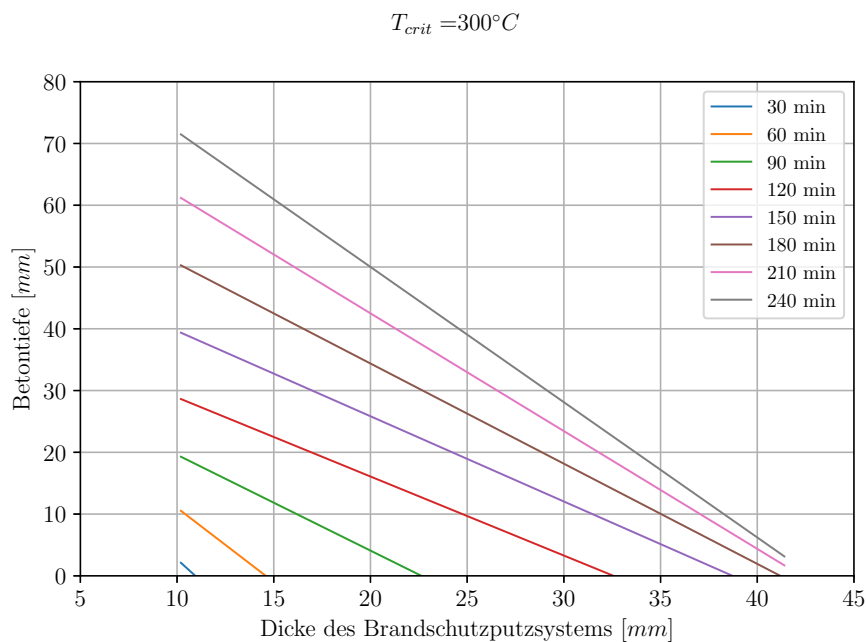


Abbildung 6: Brandversuche an großen Betonplatten gemäß [N6], Tabelle 1 mit Brandschutzputzsystem Sika Cem[®] Pyrocoat: Betontiefe und Schichtdicke für $T_{crit} = 300.0^{\circ}\text{C}$ gemäß [N6], Kapitel 13.2, aus [G4]

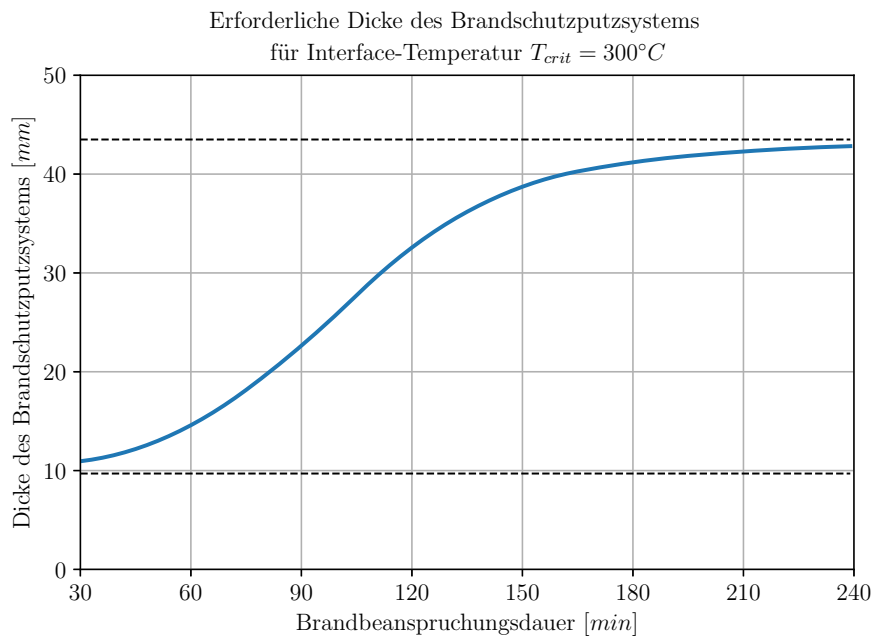


Abbildung 7: Erforderliche Schichtdicke des Brandschutzputzsystems in Abhängigkeit der Brandbeanspruchungsdauer für Interface-Temperatur $\Theta_{cr,V} = 300^{\circ}C$, abgeleitet aus [G4]

Für eine Feuerwiderstandsdauer von 90min ergibt sich eine erforderliche Dicke des Brandschutzputzsystems von

$$d_{pyro,R90} \approx 22mm. \tag{11}$$

4.2 Begleitversuche

Die gemäß [N6] zu bestimmenden Werkstoffeigenschaften der Bestandteile der Probekörper sind in den Tabellen 2 bis 4 ausgewiesen (vgl. [G1]). Die Auswertung der Prüfergebnisse im Hinblick auf die Eigenschaften des Brandschutzputzsystems erfolgt gemäß [N6], Kapitel 6.5.4.

Die Nennschichtdicke ist auf die reine Schichtdicke des Brandschutzputzes bezogen, sodass sich die Gesamtdicke des Brandschutzputzsystems aus der Summe der Schichtdicken des Brandschutzputzes (siehe Tabelle 3) und des Putzhaftgrunds ergibt.

Der Putzhaftgrund wurde einlagig aufgespritzt und mit einem Besen abgezogen, sodass sich eine Schichtdicke von 1mm ergab (vgl. auch [G1]).

Nennschichtdicke	Rohdichte Prüftag $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Feuchtegehalt Prüftag [M – %]	Trockenrohddichte $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	Prüfvorschrift
$d_N = 22mm$	2312,5	4,0	2220,0	[N6], 6.5.2

Tabelle 2: Brandversuche an großen Betonplatten aus C30/37 gemäß [N6], Tabelle 1 mit Brandschutzputzsystem Sika Cem[®] Pyrocoat und Verstärkung durch re-plate-Lamellen: Dicke, Dichte und Feuchtegehalt der Betonbalken

Nennschichtdicke	kleinster Messwert [mm]	größter Messwert [mm]	Mittelwert [mm]	Rechenwert [mm]	Prüfvorschrift
$d_N = 22\text{mm}$	21,8	24,3	22,7	22,7	[N6], B.2.2

Tabelle 3: Brandversuche an großen Betonplatten aus C30/37 gemäß [N6], Tabelle 1 mit Brandschutzputzsystem Sika Cem[®] Pyrocoat und Verstärkung durch re-plate-Lamellen: Dicke des Brandschutzputzsystems

Nennschichtdicke	Rohdichte Prüftag $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	Feuchtegehalt Prüftag [M – %]	Trockenrohddichte $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	Prüfvorschrift
$d_N = 22\text{mm}$	767,1	14,01	659,5	[N6], B.3.2 und B.4

Tabelle 4: Brandversuche an großen Betonplatten aus C30/37 gemäß [N6], Tabelle 1 mit Brandschutzputzsystem Sika Cem[®] Pyrocoat und Verstärkung durch re-plate-Lamellen: Dichte und Feuchtegehalt des Brandschutzputzsystems

Auf eine Auswertung der Betondichte gemäß [N6], Kapitel 6.5.4 wird aufgrund der von [N6] abweichenden Aufgabenstellung verzichtet.

4.3 Versuchsergebnisse

4.3.1 Belastung im Brandversuch

Daten, die durch Fortsetzung der Prüfung nach Entfernung der Last erhalten werden, können gemäß [N6], Kapitel 13.1 nur zur Beurteilung nicht tragender Böden und nicht tragender Wände verwendet werden.

Gemäß [N6], Kapitel 10.3 ist die mechanische Beanspruchung jedes Probekörpers konstant zu halten bis entweder eine Verformung von $\frac{L_{sup}}{30}$ (L_{sup} : Stützweite) erreicht wird oder die Durchbiegungsgeschwindigkeit den in [N11] angegebenen Wert überschreitet. Zudem ist gemäß [N6], Kapitel 10.7 die Prüfung zu beenden, sofern einer der in [N11], Kapitel 10.5 genannten Gründe vorliegt.

Eine Überschreitung der Durchbiegungsgeschwindigkeit oder der Grenzdurchbiegung trat gemäß [G1] nicht auf. Die mechanische Beanspruchung wurde mit dem Ende des Brandversuchs nach 125min Brandbeanspruchungsdauer entfernt.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass nach dem Aufbringen der mechanischen Beanspruchung, jedoch vor Beginn der Brandbeanspruchung bereits leichte Risse in der brandschutztechnischen Ertüchtigung zu beobachten waren.

4.3.2 Temperaturen

Für die Beantwortung der vorliegenden Fragestellung ist hauptsächlich der zeitabhängige Temperaturverlauf im Interface zwischen Brandschutzputzsystem und Stahlbetonkonstruktion relevant. Da sich gemäß [G1] die Messstellen

- US1, US2, US3, US4, US5, US11, US12, US13, US14 und US15

direkt unterhalb der re-plate-Lamellen befanden, während die Messstellen

- US6, US7, US8, US9 und US10

im unverstärkten Bereich der Betonplatte angeordnet waren, werden die charakteristischen Temperaturen gemäß [N6], Kapitel 13.1 und 3.1.14 für beide Untergruppen separat ermittelt (siehe Abbildungen 8 und 9)

Nennschichtdicke 22mm, Betonunterseite, re-plate, charakteristische Temperatur

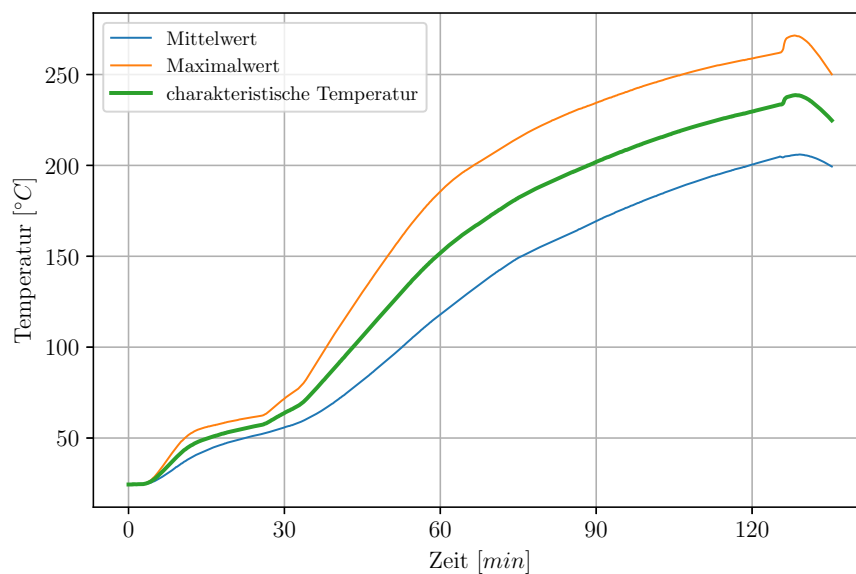


Abbildung 8: Brandversuche an großen Betonplatten aus C30/37 gemäß [N6], Tabelle 1 mit Brandschutzputzsystem Sika Cem[®] Pyrocoat und Verstärkung durch re-plate-Lamellen, Nennschichtdicke $d_N = 22\text{mm}$, untere Betonoberfläche (beflammt), re-plate-Lamellen: Charakteristische Temperaturen gemäß [N6], Kapitel 13.1 und 3.1.14

Nennschichtdicke 22mm, Betonunterseite, ungestört, charakteristische Temperatur

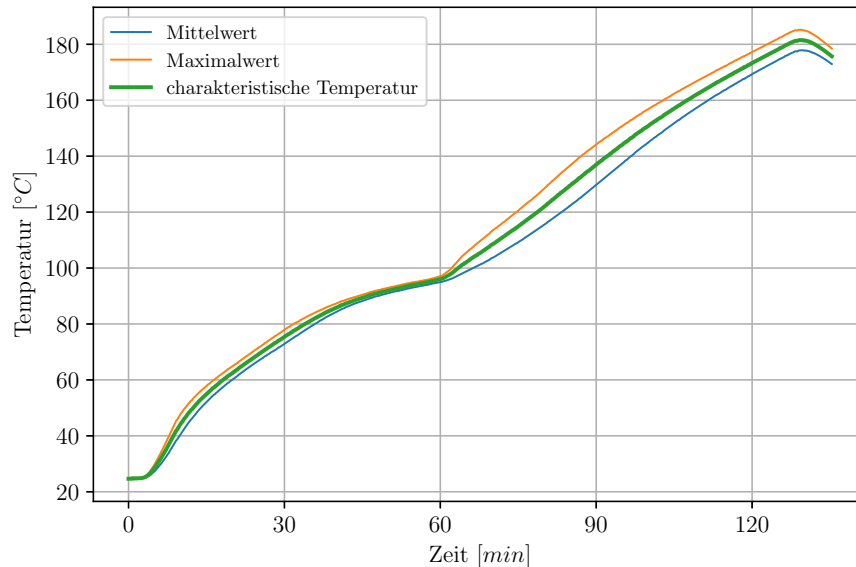


Abbildung 9: Brandversuche an großen Betonplatten aus C30/37 gemäß [N6], Tabelle 1 mit Brandschutzputzsystem Sika Cem[®] Pyrocoat und Verstärkung durch re-plate-Lamellen, Nennschichtdicke $d_N = 22\text{mm}$, untere Betonoberfläche (beflammt), unverstärkter Bereich: Charakteristische Temperaturen gemäß [N6], Kapitel 13.1 und 3.1.14

Die maximale, im Versuch festgestellte Temperatur an der re-plate-Lamelle beträgt

$$\Theta_{max, re-plate} = 271,48^\circ\text{C}. \quad (12)$$

4.3.3 Haftvermögen

Das Haftvermögen ist gemäß [N6], Kapitel 13.5 zu beurteilen. Demnach tritt ein Verlust des Haftvermögens auf, wenn wesentliche Ablösungen des Brandschutzputzsystems ($> 0,25\text{m}^2$) in Kombination mit einer Temperaturerhöhung in einigen Bereichen der Betonunterseite von mehr als 50% des Mittelwerts zu beobachten sind.

Gemäß der in [G1] dargelegten Prüfbeobachtungen wurden während des Brandversuchs keinerlei Ablösungen des Brandschutzputzsystems beobachtet.

Die Messergebnisse für die Temperaturen an der Betonunterseite sind hinsichtlich des Temperaturkriteriums aus [N6], Kapitel 13.5 in Abbildung 10 ausgewertet.

Nennschichtdicke 22mm, Betonunterseite, gesamt

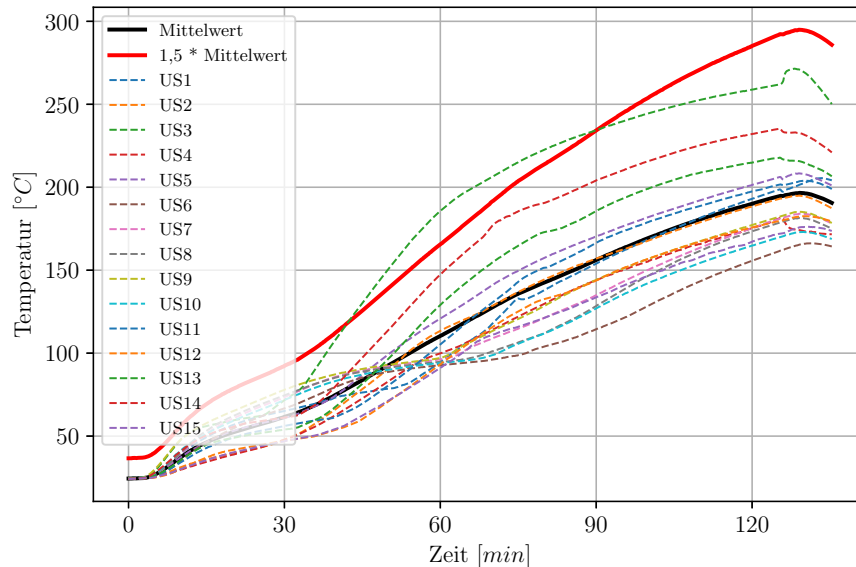


Abbildung 10: Brandversuche an großen Betonplatten aus C30/37 gemäß [N6], Tabelle 1 mit Brandschutzputzsystem Sika Cem[®] Pyrocoat und Verstärkung durch re-plate-Lamellen, Nennschichtdicke $d_N = 22\text{mm}$: Versuchsauswertung hinsichtlich des Haftvermögens gemäß [N6], Kapitel 13.5

In Abbildung 10 ist lediglich an einer Messstelle im Zeitraum zwischen 45 und 90min eine leichte Überschreitung des 1,5-fachen des Mittelwerts der Temperatur zu beobachten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass für die geprüfte Nennschichtdicke des Brandschutzmaterials während der gesamten Prüfdauer kein Verlust des Haftvermögens gemäß der Kriterien aus [N6], Kapitel 13.5 zu beobachten ist.

4.4 Beurteilung der Tragfähigkeit unter Brandbeanspruchung

4.4.1 Gültigkeit des Temperaturkriteriums

Gemäß [G3] und nach Angaben des Auftraggebers kann die kritische Temperatur der re-plate-Verstärkung mit $\Theta_{cr,V} = 300^\circ\text{C}$ abgeschätzt werden. Obwohl die brandschutztechnische Ertüchtigung auf Basis der Ergebnisse aus [G4] für diese Zieltemperatur und für eine Brandbeanspruchungsdauer von lediglich 90min ausgelegt war, wurde die kritische Temperatur im Bereich der re-plate-Lamellen auch nach einer Brandbeanspruchungsdauer von 125min nicht erreicht.

Eine deutliche Vergrößerung der Durchbiegungsgeschwindigkeit, die auf einen Funktionsverlust der Verstärkung aufgrund der Überschreitung der kritischen Temperatur hinweist, ist gemäß [G1] während des gesamten Brandversuchs nicht zu beobachten.

Aus gutachterlicher Sicht kann damit das Temperaturkriterium bis zur höchsten, an der re-plate-Verstärkung gemessenen Temperatur von $\Theta_{cr,V,test} = 271,48^\circ\text{C}$ als nachgewiesen angesehen werden.

4.4.2 Einfluss des abgewandelten Aufbaus des Brandschutzputzsystems

Ein Hinweis auf den Einfluss der Anordnung der re-plate-Verstärkung und der Glasgitter auf das Durchwärmungsverhalten kann aus dem Vergleich der Abbildungen 8 und 9 abgeleitet werden. Die

direkt unter den re-plate-Lamellen angeordneten Messstellen weisen in ihren Messergebnissen sowohl eine deutlich größere Streuung als auch höhere Maximal- und Mittelwerte auf als die Messstellen im unverstärkten Bereich. Eine messtechnische Ursache dieser Beobachtung ist jedoch nicht ausgeschlossen (vgl. auch [G4], Abbildung 37 bzw. Abbildungen 2 und 3).

Weiterhin ist, wie bereits erwähnt, festzustellen dass die Temperatur von $\Theta_{cr,V} = 300^{\circ}\text{C}$, für die die brandschutztechnische Ertüchtigung bei einer Brandbeanspruchungsdauer von 90min ausgelegt war, auch bei einer Brandbeanspruchungsdauer von 125min an keiner Messstelle erreicht wurde.

In Analogie zu den Beobachtungen aus [G4] wurde auch in [G1] kein Verlust des Haftvermögens beobachtet. Zudem ist die Rissbildung bei vergleichbarer Nennschichtdicke und deutlich höherer mechanischer Belastung für das statisch verstärkte System wesentlich weniger ausgeprägt.

Ein ungünstiger Einfluss der Anordnung der re-plate-Verstärkung und des Glasgitters auf das Durchwärmungsverhalten und das Haftvermögen des Brandschutzputzsystems wird folglich nicht festgestellt.

4.4.3 Anwendbarkeit der Leistungseigenschaften aus [G4]

Aufgrund der Anordnung der externen re-plate-Verstärkung wurden bei dem in [G1] dokumentierten Brandversuch deutlich höhere mechanische Beanspruchungen aufgebracht als bei den Brandversuchen, die den in [G4] ausgewiesenen Leistungseigenschaften zugrunde liegen. Die Tatsache, dass dennoch Verformungen in vergleichbarer Größenordnung beobachtet wurden, weist darauf hin, dass trotz der verschiedenen Bemessungsverfahren und Konstruktionen vergleichbare Beanspruchungszustände erzielt werden konnten.

Zudem sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Schichtdicke des Brandschutzputzsystems für den in [G1] dokumentierten Brandversuch für eine Brandbeanspruchungsdauer von lediglich 90min ausgelegt wurde. Mit Nutzung der in [G4] spezifizierten Daten ergibt sich für eine angestrebte Brandbeanspruchungsdauer von 120min eine erforderliche Schichtdicke von etwa 33mm. Mit dieser erhöhten Schichtdicke sind noch geringere Temperaturen im Interface zwischen Betonoberfläche und brandschutztechnischer Ertüchtigung zu erwarten, was sich positiv auf das Tragverhalten der re-plate-Lamellen im Brandfall auswirkt.

Aus gutachterlicher Sicht sind folglich die in [G4] ausgewiesenen Leistungseigenschaften auch für den Nachweis der brandschutztechnischen Ertüchtigung von mittels parallel angeordneter re-plate-Lamellen verstärkten, flächigen Betonkonstruktionen anwendbar.

4.5 Zusammenfassung

Auf Basis der obigen Feststellungen wird aus gutachterlicher Sicht empfohlen, für die Festlegung der erforderlichen Schichtdicke der brandschutztechnischen Ertüchtigung von mittels parallel angeordneter re-plate-Lamellen verstärkten, flächigen Betonkonstruktionen die in Abbildung 11 dargestellten Zusammenhänge zu nutzen.

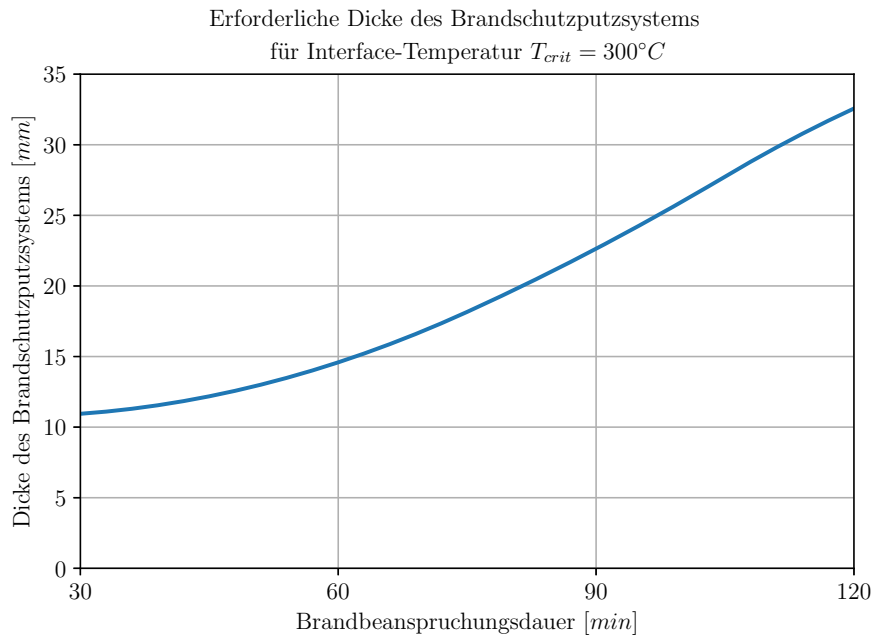


Abbildung 11: Erforderliche Schichtdicke des Brandschutzputzsystems von mittels parallel angeordneter re-plate-Lamellen verstärkten, flächigen Betonkonstruktionen, abgeleitet aus [G4]

5 Besondere Hinweise/Anwendungsgrenzen

Die vorliegende Beurteilung ist für Betonplatten und -wände mit horizontaler sowie vertikaler Ausrichtung und einseitiger Beflammung gültig, die mittels parallel angeordneter re-plate-Lamellen verstärkt sind. Der lichte Abstand zwischen 2 re-plate-Lamellen beträgt $\geq 200\text{mm}$.

Die vorliegende Beurteilung gilt für Betone mit einer Rohdichte von $1979 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \leq \rho \leq 2677 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}$.

Die vorliegende Beurteilung gilt für Betone der Festigkeitsklassen C30/37 und C35/45 gemäß [N10, N3]. Hinsichtlich der eingesetzten Gesteinskörnung gibt es keine Einschränkungen.

Sofern die in [N3] angegebenen Regelungen eingehalten werden, sind die vorliegenden Ergebnisse auch bei vorgespannten Konstruktionen anwendbar.

Die vorliegende Beurteilung gilt für ein zweischichtiges Brandschutzputzsystem bestehend aus Dünn-schichtputz Sika Cem[®] Pyrocoat Base zur Untergrundvorbereitung und Brandschutzputz Sika Cem[®] Pyrocoat. Im Bereich der Verstärkung ist ein Glasgitter SikaWrap[®]-350 G Grid mit einem Randüberstand über den re-plate-Lamellen von $\geq 230\text{mm}$ anzuordnen. Weitere zusätzliche Befestigungs- und Verbindungssysteme, Maschendraht oder Haftbeschleuniger sind nicht vorgesehen. Vor der Applikation des Brandschutzputzsystems sind die re-plate-Lamellen mittels Universalverdünnung von Verunreinigungen, Fetten und Ölen zu befreien.

Die vorliegende Beurteilung gilt für Schichtdicken des Brandschutzputzsystems von $9,7\text{mm} \leq d \leq 43,5\text{mm}$.

Die vorliegende Beurteilung gilt bei Verwendung von Entschalungsmitteln aus löslichen Ölen oder löslichen Emulsionen.

Die vorliegende Beurteilung gilt für Brandbeanspruchungsdauern $\leq 120\text{min}$.

6 Unterschriften

Die Ergebnisse der Prüfungen beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. Dieses Dokument ersetzt keinen Konformitäts- oder Verwendbarkeitsnachweis im Sinne der Bauordnungen (national/ europäisch).

Leipzig, den 10.11.2021

S. Reichel

Dr.-Ing. S. Reichel

Geschäftsbereichsleiterin & Bearbeiterin



7 Anhang 1 - Bemessung

re-fer AG
Riedmattli 9
6423 Seewen
Schweiz



memory®-steel

Brandversuche MFPA Leipzig

**Bemessung der Stahlbetonplatte für die Brandversuche mit
re-plate Verstärkung und Sikacem® Pyrocoat Brandschutzputz**

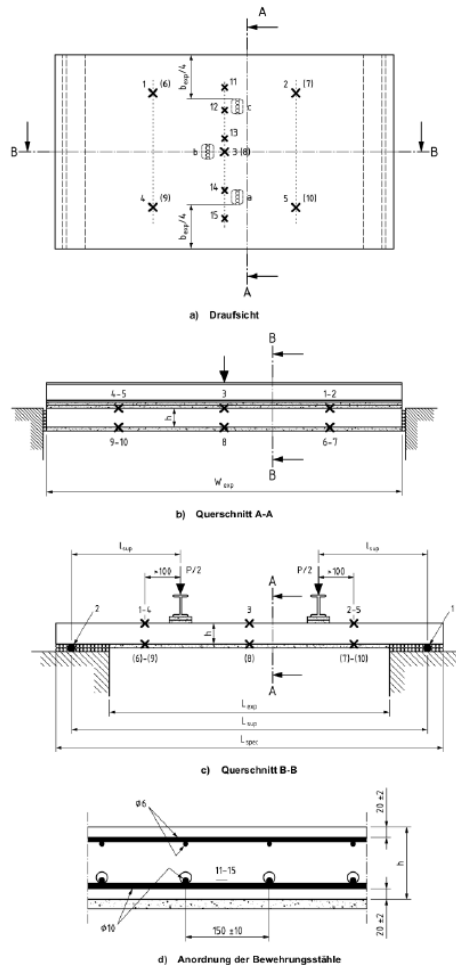
Version 1.2

Datum: 21. Juli 2021

Autoren: Julien Michels

1. Zusammenfassung, Abmessung der Platten und anvisierter Belastungszustand

Das folgende Dokument beinhaltet eine Bemessung der Probekörper für die Brandversuche an der MFPA Leipzig an mit memory®-steel re-plate Bändern verstärkten Betonplatten. Die Abmessungen der Platten sind dem vom MFPA Leipzig verfassten Prüfprogramm Nr. S6.1/20-003-1 vom 13.01.2021 entnommen (siehe Abbildung 1).



Legende

- 1 Rüttelger
- 2 Gelenklager
- X 10 Thermoelemente auf der Betonfläche
- a, b, c Thermoelemente-Gitter mit 5 Thermoelementen, siehe Bild 4
- 11 - 15 Thermoelemente auf den Bewehrungsstäben

$$l_{exp} \geq 4\,200 \text{ mm}$$

$$l_{exp} \geq 4\,000 \text{ mm}$$

$$W_{exp} \geq 3\,000 \text{ mm, siehe 6.2.1, Anmerkung}$$

$$(l_{exp} + 200) \text{ mm} \leq l_{exp} \leq l_{exp} + 500 \text{ mm}$$

$$(l_{exp} + 400) \text{ mm} \leq l_{spoc} \leq l_{exp} + 700 \text{ mm}$$

$$l_{exp} = (1\,000 \pm 10) \text{ mm}$$

$$h = (140 \pm 10) \text{ mm}$$

Abbildung 1 Grosse (links) und (kleine) Platte für die Brandversuche, basieren auf Angaben im Prüfprogramm Nr. S6.1/20-003-1 der MFPA Leipzig

memory®-steel Brandversuche MFPA Leipzig re-plate - Bemessung

Gemäss dem erwähnten Prüfprogramm wird die Betonplatte auf 70% der Traglast (Bemessungswert, unter Umgebungstemperatur) während dem Brandversuch belastet.

2. Verstärkung

Die grosse Platte wird mit **vier (4) re-plate** Bändern in der Mitte verstärkt. Abstand zwischen den Bändern (Kante zu Kante) beträgt 20 cm.

3. Materialkennwerte

Folgende Materialkennwerte wurden für die Bemessung herangezogen:

a) Beton:

- C30/37
- Bemessungswert der Druckfestigkeit: $f_{cd}=30/1.5 = 20 \text{ N/mm}^2$, Grenzdehnung Stauchen ϵ_{c2d} bei 0.2% (Reduktion bei Systemen ohne Verbund, basierend auf Literatur und Versuchen an der Empa)

b) Stahl:

- B500B, Zugfestigkeit $f_{sk} = 500 \text{ N/mm}^2$, $\epsilon_{uk} = 10\%$
- Bemessungswert der Zugfestigkeit (Fließgrenze): $f_{sd}=500 / 1.15 = 435 \text{ N/mm}^2$, $\epsilon_{us} = 10\%$

c) memory®-steel re-plate:

- Querschnitt 180 N/mm^2 Zugfestigkeit: 600 N/mm^2 (Zugversagen im reduzierten Verankerungsquerschnitt oder Abscheren der Nägel, basierend auf den neuesten Versuchen an der Empa Dübendorf. Als Verankerungswiderstand wird der Mindestwert 108 kN aus den bisherigen Versuchen herangezogen)
- Bemessungswert der maximalen Zugfestigkeit: $f_{rd}=600 / 1.3 = 462 \text{ N/mm}^2$, $\epsilon_{uk} = 10\%$ (Der Sicherheitsbeiwert von 1.3 geht aus den aktuellen Besprechungen mit dem DIBt betreffend Bauartgenehmigung hervor).

4. Bemessungsprinzip

Die Bemessung der verstärkten Stahlbetonplatte erfolgt auf Biegung mit den oben genannten Materialkennwerten. Drei Versagensarten sind möglich:

- Betonstauchen
- Zugbruch der innenliegenden Betonstahlbewehrung
- Zugbruch der re-plate Verstärkungsbänder in der Verankerung bei der vordersten Nagelreihe.

Da es sich beim angewendeten Verstärkungssystem um ein externes Zugband ohne Verbund zur Tragstruktur ausserhalb der Verankerungsbereiche handelt, ist die Berechnung des Spannungszuwachses im re-plate mit klassischer Querschnittsanalyse aufgrund fehlender

memory®-steel Brandversuche MFPA Leipzig re-plate - Bemessung

Dehnungskompatibilität zwischen externem Zugband und äussersten Betonfaser an der Plattenunterseite nur bedingt möglich. In der Literatur existieren diverse Annäherungsverfahren, welche eine Abschätzung der Verformung sowie der Traglasten von Spannbetontragwerken ohne Verbund ermöglichen.

Die Bemessung wird in diesem Fall jedoch gemäss einem System im Verbund durchgeführt. Dies ist durch das tiefe Elastizitätsmodul vom re-plate nach dem Vorspannen und bei zusätzlicher Belastung gerechtfertigt. Die Bemessung erfolgt anhand eines erstellten Excel-Tools mit den oben aufgelisteten Materialkennwerten.

5. Resultate

Verstärkungszustand:

Für den Verstärkungszustand beträgt die Vorspannung im re-plate 400 MPa. Mit 2 Bändern entsteht eine Gesamtdruckkraft $F_{P,0}$ auf den Querschnitt von $4 \times 400 \text{ MPa} \times 180 \text{ mm}^2 = 288 \text{ kN}$.

Folgende Vorspannungen entstehen im Querschnitt:

Normalkraft: $\sigma_N = 288'000 \text{ N} / (3'000 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}) = 0.58 \text{ MPa}$

Biegung: $\sigma_M = (288'000 \text{ N} \times 140/2 \text{ mm}) / (3000 \text{ mm} \times 140^2 \text{ mm}^2)/6 = 1.86 \text{ MPa}$

Die Druck- und Zugspannungen infolge des Eigengewichts des Betonquerschnitts belaufen sich auf:

$M_g = 0.3 \text{ m} \times 0.14 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 \times 4^2 / 8 = 21 \text{ kNm}$

$\sigma_g = 21 \text{ kNm} \times 10^6 / (3000 \text{ mm} \times 140^2 \text{ mm}^2)/6 = 2.14 \text{ MPa}$

Somit ergibt sich folgender Spannungszustand im Querschnitt:

Oberseite: $\sigma_o = -0.58 + 1.86 - 2.14 = -0.86 \text{ MPa}$

Unterseite: $\sigma_u = -0.58 - 1.86 + 2.14 = -0.3 \text{ MPa}$

Belastungszustand:

Massgebend für den maximalen Traglastwiderstand ist das Kriterium Betonstauchen in der oberen Druckzone bei 2 ‰ Grenzdehnung auf Druck.

Das berechnete maximale Moment für die Traglast beträgt (siehe Auszug Excel Tool):

$M_{R,d} = 115.4 \text{ kNm}$

Druckzonen höhe xc [mm]	Druckdehnung ε _c [-]	alpha R [-]	a [-]	Druckspannung σ _c [MPa]	Druckkraft F _c [kN]	Dehnung σ _s [-]	Spannung σ _s [MPa]	Zugkraft F _s [kN]	Dehnung ε _r [-]	Spannung σ _r [MPa]	Zugkraft F _r [kN]	Gleichgewicht ΔF [kN]	Moment M _R [kNm]	Δσ _c [MPa]
49.6	0.00050	0.22917	0.34091	15	511.9	0.00066	131.67	206.83	0.00091	423.71	305.07	0.00	57.83	63.71
25.4	0.00200	0.66667	0.37500	20	1015.3	0.00706	434.78	682.95	0.00903	461.54	332.31	0.00	115.40	101.54

70% x $M_{R,d}$:

$M_{R,d}^* = 80.8 \text{ kNm}$

memory®-steel Brandversuche MFPA Leipzig re-plate - Bemessung

Das Eigengewicht (Beton sowie eine 3 cm Pyrocoat-Schichtstärke) beträgt:

$$M_g = 21.8 \text{ kNm}$$

Durch extern aufgebrauchte Last M_F :

$$M_F = M_{Rd} - M_g = 80.8 - 21.8 = 59 \text{ kNm}$$

Der Spannungsniveau $\sigma_{p,L}$ im re-plate Band beträgt für diese Belastung maximal etwa 425 MPa (siehe Auszug Excel Tool). Der Spannungszuwachs $\Delta\sigma_L$ ab der Vorspannung $\sigma_{p,0}$ von etwa 360 MPa (Annahme 10% Relaxation im besagten Zeitraum) beträgt demnach etwa 65 MPa.

Der Hebelarm für die Belastung beträgt gemäss Abbildung 1 einen (1) Meter, die aufzubringende Last F demnach ca. 59 kN (5.9 to), welche als Linienlast über die Plattenbreite von 3'000 mm aufzubringen ist.