



Forschungsbericht zum Verbundforschungsvorhaben

Entwicklung einer europäischen Prüfnorm zur Bestimmung des Feuerwiderstands von Stahlzuggliedern mit reaktiver Brandschutzbeschichtung anhand belasteter Brandprüfungen

Akronym: FIRESTEMIC

Englischer Titel: Development of a European test standard for the determination of the fire resistance of steel tension members with intumescent fire protection coating based on loaded fire tests

Berichtszeitraum: 01.01.2020 bis 14.09.2022

Fördermittelgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
11019 Berlin

Projektträger: Projektträger Jülich (PTJ)

Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ), Gründungs-, Transfer- und Innovationsförderung

10923 Berlin

Datum: 31.01.2023

im WIPANO- Förderschwerpunkt
„Normung und Standardisierung“



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Verbundpartner

Projektbeteiligte

Förderkennzeichen

**Bundesanstalt für
Materialforschung und -
prüfung (BAM)**

Dr.-Ing. Sascha Hothan
Dr.-Ing. Dustin Häßler
Ing. Richard Fürst

03TNK012A

Unter den Eichen 87
12205 Berlin

[Verbundkoordinator]

**Sherwin-Williams Coatings
Deutschland GmbH**

Markus Wöhr
Robin Rohleder

03TNK012C

Rieter Tal
71665 Vaihingen/Enz

(vormals Sika Deutschland
GmbH, Kornwestheimer Str.
103-107, 70439 Stuttgart,
Werk Vaihingen)

Rudolf Hensel GmbH

Dipl.-Ing. (FH) Anja Peter

03TNK012B

Lauenburger Landstraße 11
21039 Börnsen

Kurzzusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, ein standardisiertes Prüf- und Bewertungsverfahren zur Bestimmung des Beitrags reaktiver Brandschutzsysteme (RBS) zum Feuerwiderstand von Stahlzuggliedern zu erarbeiten und dieses in ein Entwurfsdokument für eine europäische Prüfnorm zu überführen. Hierzu wurden einerseits bereits vorhandene Erfahrungen und Erkenntnisse genutzt und andererseits mittels Brandversuchen neue Prüfdaten zur Beantwortung bisher offengebliebener Aspekte zum Einfluss der Bauteilorientierung und Profilart erzeugt und ausgewertet. Dadurch wird die prüftechnische Grundlage für eine sichere, zulassungsbasierte Anwendung von reaktiven Brandschutzsystemen auf zugbeanspruchten Stahlbauteilen gelegt und ein einheitliches Sicherheitsniveau etabliert.

Der im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte Normentwurf wurde mit den Fachexperten der zuständigen nationalen und europäischen Normungsgremien diskutiert und abgestimmt. Das erarbeitete Prüf- und Auswertungsverfahren basiert auf der Durchführung von Brandversuchen an mechanisch belasteten Stahlzuggliedern mit RBS. Ergänzend sind unbelastete Brandversuche zur Beurteilung des Einflusses der Bauteilorientierung sowie der Eignung bei Schwelbrandbeanspruchung möglich. Die im Projekt durchgeführten experimentellen Untersuchungen liefern die Grundlage für den im Normenentwurf vorgeschlagenen Prüfaufbau der mechanisch belasteten und unbelasteten Brandversuche. Ferner konnte durch die Untersuchungen gezeigt werden, dass sich unter bestimmten Voraussetzungen die Prüfergebnisse von Stahlzuggliedern mit Kreisvollprofil ohne zusätzliche Brandversuche auf entsprechende Zugglieder mit Rechteckvollprofil übertragen lassen. Darüber hinaus konnte belegt werden, dass die Leistungsfähigkeit eines RBS aufgrund unterschiedlicher Bauteilorientierungen abnehmen kann und daher zwingend beim Anwendungsbereich des RBS zu berücksichtigen ist. Hierzu wird ein Temperaturdifferenzkriterium vorgeschlagen, bei dessen Einhaltung die Wirksamkeit des RBS bei von der horizontalen Referenzorientierung abweichenden Bauteilneigungen noch gleichwertig gegeben ist. Andernfalls bietet der Normenentwurf die Möglichkeit die reduzierte thermische Schutzwirkung des RBS im Assessment zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben wurden bereits auf einem wissenschaftlichen Symposium vorgestellt sowie in einer referierten Fachzeitschrift publiziert. Ferner wurden die Informationen zum Forschungsprojekt und dem Normenentwurf im Rahmen eines Anwenderworkshops interessierten Kreisen zugänglich gemacht. Der im Projekt ausgearbeitete Normenentwurf wird dem zuständigen europäischen Normungsgremien, CEN/TC 127/WG 1, zur Verfügung gestellt und dort zur Abstimmung gestellt.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	5
1 Aufgabenstellung.....	6
2 Voraussetzungen und Bedarf für eine neue Prüfnorm	6
2.1 Stahlzugglieder im Bauwesen	6
2.2 Aktuelle Normungssituation.....	8
2.3 Stand der Forschung.....	9
2.4 Bedarf bei den Unternehmen und Innovationsgehalt des Themas.....	10
2.5 Vorarbeiten	11
2.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	12
2.7 Bearbeitungszeitraum und Projekttreffen.....	12
3 Aufbereitung der Forschungsergebnisse und Erstellung eines Normenentwurfes (AP 1) 14	
4 Experimentelle Untersuchungen zur Profilart und Bauteilorientierung (AP 2)	15
4.1 Festlegung des Prüfprogramms und der zu testenden Probekörper.....	15
4.2 Planung und Herstellung der Probekörper.....	17
4.3 Aufbau und Vorbereitung des Zugbauteilprüfofens.....	20
4.4 Durchführung der Brandversuche.....	21
4.5 Ergebnisse und Empfehlungen	22
4.5.1 Brandraumtemperatur	22
4.5.2 Einfluss des Profilart.....	23
4.5.3 Einfluss der Bauteilorientierung	28
4.6 Brandversuch zum Anwenderworkshop	32
4.7 Empfehlungen für eine neue Prüfnorm	33
4.8 Zusammenfassung der Untersuchungen im AP 2	34
5 Weiterentwicklung und Präzisierung des Normenentwurfs (AP 3)	35
6 Vorstellung und Verbreitung des Normenentwurfs (AP 4).....	36
6.1 Fazit zum Forschungsprojekt	37
7 Verwendung der Zuwendungen.....	38
8 Literatur.....	39
9 Anhang.....	41
9.1 Fotos der Probekörper vor, während und nach den Brandversuchen	41
9.2 Brandraumthermoelemente.....	49
9.3 Durchgeführter Brandversuch beim Anwenderworkshop.....	54

Abkürzungsverzeichnis

aBG	Allgemeine Bauartgenehmigung
abZ	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BRT	Brandraumthermoelement
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
ETA	Europäische Technische Bewertung
ETK	Einheits-Temperaturzeitkurve
KVP	Kreisvollprofil
MS	Messstelle
RBS	Reaktives Brandschutzsystem
RVP	Rechteckvollprofil
TE	Thermoelement
TG	Task Group
TSD	Trockenschichtdicke des reaktiven Brandschutzsystems
vBG	Vorhabenbezogene Bauartgenehmigung
WG	Working Group
ZiE	Zustimmung im Einzelfall

Hinweis zu den im Bericht enthaltenen Abbildungen

Die Abbildungen der Firma Rudolf Hensel GmbH und der Firma Sherwin-Williams Coatings Deutschland GmbH wurden im Bericht mit einem Copyright-Symbol versehen. Alle anderen Abbildungen im Forschungsbericht wurden von der BAM zur Verfügung gestellt.

1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes ist es, die Erfahrungen und Erkenntnisse der bereits durchgeführten Forschungsvorhaben [7], [8], [10], [11] durch weitere Untersuchungen offengebliebener Aspekte zu ergänzen und beides so aufzuarbeiten, dass diese im Rahmen einer europäischen Norm in ein standardisiertes Prüf- und Bewertungsverfahren zur Bestimmung des Beitrags von reaktiven Brandschutzsystemen (RBS) zum Feuerwiderstand von Stahlzuggliedern überführt werden können. Die Untersuchungen und Erfahrungen von Fachexperten aus anderen EU-Mitgliedsstaaten werden hierbei einbezogen. Da verschiedene Fragestellungen in Bezug auf die Prüfung und Bewertung von RBS auf Stahlzuggliedern mit Vollprofil offen sind, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes zusätzliche Brandversuche durchgeführt. Im Fokus stehen dabei der Umgang mit unterschiedlichen Profilarten und Bauteilorientierungen. Diese beiden Aspekte haben einen signifikanten Einfluss auf den erforderlichen Prüfumfang sowie den daraus abzuleitenden Anwendungsbereich eines RBS. Zu diesen beiden Fragestellungen lag bisher keine oder nur eine unzureichende Datenbasis vor. Durch die im Projekt durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurde die Grundlage geschaffen, um Regelungen zur Übertragbarkeit von Ergebnissen zwischen Zuggliedern mit kreisförmigem und rechteckigem Vollprofil sowie zur Berücksichtigung des Einflusses der Bauteilorientierung zu erarbeiten.

Da es generell nicht möglich sein wird, alle denkbaren Anwendungsfälle von RBS auf Stahlzuggliedern mit Vollprofil experimentell mittels Brandversuchen zu untersuchen, wurde bei der Erarbeitung des Prüf- und Bewertungskonzeptes darauf geachtet, dass die Leistungsfähigkeit des RBS anhand ausgewählter mechanisch belasteter Brandprüfungen beurteilt werden kann. Insbesondere das Bewertungsverfahren, anhand dessen die erforderliche Trockenschichtdicke zum Erreichen einer bestimmten Feuerwiderstandsdauer der Stahlzugglieder ermittelt wird, zeigt dabei klar die Verbindung zwischen Prüfumfang und der Breite des möglichen Anwendungsbereiches des RBS auf. Ferner wurde ein modularer Aufbau des Prüf- und Bewertungskonzeptes gewählt, so dass die Option einer späteren stufenweisen Erweiterung des Anwendungsbereiches oder der Optimierung hinsichtlich der Trockenschichtdicke (TSD) besteht. Durch das Projekt wird auf europäischer Ebene die Grundlage für eine sichere, zulassungsbasierte Anwendung von reaktiven Brandschutzsystemen auf zugbeanspruchten Stahlbauteilen gelegt. Ferner wird dadurch ein einheitliches Sicherheitsniveau etabliert. Neben der Eröffnung neuer Märkte und Anwendungsbereiche erlaubt es den Herstellern ihre Produkte für die speziellen Anforderungen zu optimieren bzw. neue innovative Produkte zur Erhöhung des Feuerwiderstandes von Stahlzuggliedern zu entwickeln.

2 Voraussetzungen und Bedarf für eine neue Prüfnorm

2.1 Stahlzugglieder im Bauwesen

Im Bauwesen werden zugbeanspruchte Stahlbauteile, insbesondere filigrane Zugstab-systeme, in der Regel für Aussteifungsverbände, Abhängungen sowie als Unterspannung von Trägern eingesetzt. Die dafür verwendeten, meist kreisförmigen Vollprofile dienen häufig der Gesamtstabilisierung des Tragwerks. Ein Ausfall dieser Bauteile kann unter Umständen die Standsicherheit der Konstruktion gefährden.

Werden an die Tragkonstruktion Anforderungen an den Brandschutz gestellt, so gilt dies für alle tragenden Bauteile. Meist erreichen ungeschützte Stahlbauteile ohne zusätzliche Maßnahmen nicht die klassifizierte Feuerwiderstandsdauer von 30, 60 oder 90 Minuten. Um einem Festigkeitsverlust des Stahls infolge hoher Temperaturen vorzubeugen, können für den Brandfall wirksame Schutzmaßnahmen ergriffen werden. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlkonstruktionen ist der Einsatz von reaktiven Brandschutzsystemen (RBS). Aufgrund der relativ geringen erforderlichen Beschichtungsdicken und der profilfolgenden Applikation bieten diese Systeme den Vorteil, dass die optische Erscheinung der Konstruktion nahezu unverändert bleibt. Ferner ist ein nachträglicher Auftrag zur brandschutztechnischen Ertüchtigung möglich und es resultieren daraus in der Regel nur marginale Zusatzlasten für die Konstruktion. Die Verwendung von RBS hat sich deshalb im Stahlbau etabliert und wird mit stetig wachsender Nachfrage eingesetzt.

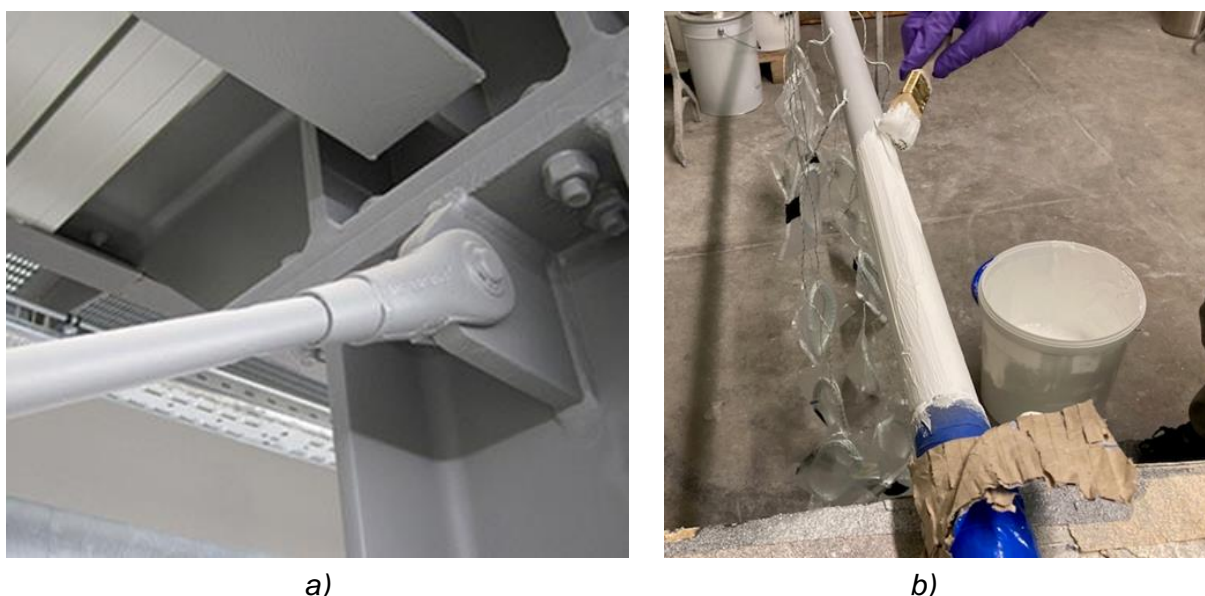


Abbildung 1: a) Typische Anwendung von Zugstabsystemen bzw. Stahlzuggliedern mit Anschlussbauteilen; b) Applikation des RBS mittels Pinsel (© Rudolf Hensel)

Da es sich sowohl bei Zugstabsystemen als auch bei den RBS um nichtgeregelte Bauprodukte handelt, wird deren Anwendung durch Zulassungen geregelt, z.B. durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ), allgemeine Bauartgenehmigungen (aBG) oder Europäische Technische Bewertungen (European Technical Assessment - ETA). Zur Erzielung einer entsprechenden Feuerwiderstandsklasse sind in den Zulassungen für RBS die erforderlichen Trockenschichtdicken (TSD) in Abhängigkeit von der Profilart, dem Profillfaktor, der Bemessungstemperatur sowie der mechanischen Beanspruchungsart angegeben. Grundlage für die Bestimmung der Trockenschichtdicken bilden im Allgemeinen Brandversuche an mechanisch belasteten und/oder unbelasteten Stahlbauteilen. In der Regel werden hierfür auf Biegung und/oder auf Druck beanspruchte Bauteile, d.h. Träger bzw. Stützen, unter dem Einfluss der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) nach DIN EN 13381-8 [1] getestet.

Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit RBS auf zugbeanspruchten Stahlbauteilen, insbesondere von Zugstabsystemen und deren teils komplexen Anschlussbauteilen, existiert derzeit weder in Deutschland noch in Europa ein normativ geregeltes Prüf- und Bewertungsverfahren, welches Brandprüfungen an mechanisch belasteten Zuggliedern vorsieht. In der Folge fehlt eine Grundlage, um den zulassungsbasierten Anwendungsbereich von RBS auf

Stahlzugglieder mit Vollprofil zu erweitern. In Deutschland erfolgte die Anwendung daher meist mit Hilfe einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) bzw. vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung (vBG), woraus sich jedoch nur eine projektbezogene Gültigkeit ergibt. Ferner ist hierfür meist eine gutachterliche Stellungnahme erforderlich, womit ein vergleichsweise hoher finanzieller und zeitlicher Aufwand verbunden ist. Des Weiteren resultieren aus dem Fehlen einer einheitlichen Prüf- und Bewertungsgrundlage unterschiedlich hohe Sicherheitsniveaus. Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) hat daher basierend auf wissenschaftlichen Untersuchungen verschiedene Randbedingungen definiert, welche die Anwendung von RBS auf Stahlzuggliedern mit Vollprofil im Rahmen der abZ bzw. aBG ermöglichen. Zusätzlich wurde ein Prüfprozedere festgelegt, welches es den Herstellern von RBS ermöglicht die Leistungsfähigkeit ihrer Produkte für die Anwendung auf Stahlzuggliedern mit Vollprofil mittels mechanisch belasteter Brandversuche nachzuweisen. Weiterführende Informationen sind in Abschnitt 2.2 beschrieben.

2.2 Aktuelle Normungssituation

Situation in Deutschland

Seit 2011 dürfen in Deutschland auf Grundlage nationaler Zulassungen RBS zur Erhöhung des Feuerwiderstands von Stahlzuggliedern mit offenem Profil¹ verwendet werden. Voraussetzung hierfür ist das erfolgreiche Durchlaufen des Prüfprozedere entsprechend den Zulassungsgrundsätzen des DIBt [4]. Grundlage dieser Regelung sind numerische Vergleichsuntersuchungen zwischen einem Träger und einem Zugglied mit gleicher Profilgeometrie [5], [6]. Eine Erweiterung des zulassungsbasierten Anwendungsbereiches von RBS auf Zugglieder mit geschlossenem Profil² ist derzeit nur theoretisch möglich, da die hierfür erforderlichen mechanisch belasteten Brandversuche an Trägern mit geschlossenem Profil im Prüfprozedere nach [4] in der Regel nicht vorgesehen sind. Seit 2015 ist im Rahmen einer nationalen Zulassung auch eine Anwendung von RBS auf Stahlzuggliedern mit Vollprofil³ möglich. Dies erfordert Brandversuche an mechanisch belasteten Zuggliedern mit RBS. Eine entsprechende nationale Prüfnorm existiert derzeit nicht. Die Durchführung der Brandversuche und die Bestimmung des Feuerwiderstands von Stahlzuggliedern mit RBS orientiert sich daher an den Untersuchungen nach [7] und [8]. Anhand der Versuchsergebnisse können die erforderlichen Trockenschichtdicken in Abhängigkeit von der angestrebten Feuerwiderstandsklasse ermittelt werden. Um auch für die Anschlussbauteile⁴ der Zugglieder und den Knotenbereich einen ausreichenden Feuerwiderstand sicherzustellen, werden diese Bauteile in der Praxis mit der gleichen Trockenschichtdicke beschichtet, wie die Stahlzugglieder selbst. Die spezielle Situation im Anschlussbereich der Zugglieder und die sich daraus für die RBS ergebenden Anforderungen sind derzeit normativ weder in Deutschland noch in Europa geregelt. Eine systematische wissenschaftliche Untersuchung fehlt bisher ebenfalls. Allerdings wurden an der BAM orientierende Brandversuche an zwei typischen Anschlusskonstruktionen von Zugstabsystemen mit RBS durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in [10], [11], und [18] dokumentiert. Es hat sich gezeigt, dass bei Verwendung einer einheitlichen Trockenschichtdicke für das Zugstabsystem und die Anschlussbauteile die schnellste Erwärmung beim Zugglied auftritt. Da die Untersuchungen ohne mechanische Zugbelastung

¹ Doppel-T-Profile sowie L-, T- und U-Profile

² Rechteck-, Quadrat- oder Kreishohlprofil

³ Rechteck-, Quadrat- oder Kreisvollprofil

⁴ Kontermutter, Gabelkopf, Knotenblech

durchgeführt wurden, lässt sich daraus jedoch noch keine Aussage zum Feuerwiderstand des Zugstabsystem im Brandfall ableiten.

Situation in Europa

In den Europäischen Technischen Bewertungen (ETA) ist der Einsatz von RBS auf Stahlzuggliedern unabhängig vom gewählten Profil nicht Bestandteil des Anwendungsbereichs. Ferner fehlt es an einem einheitlichen Prüf- und Bewertungsverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von RBS auf Zuggliedern und deren Anschlussbauteilen.

Im Normenausschuss CEN/TC 127/WG 1 – „Structural and separating elements“ gab es in den vergangenen Jahren bereits Bestrebungen eine Prüf- und Bewertungsnorm für RBS auf Stahlzuggliedern mit Vollprofil zu entwickeln. Die bestehende Normenreihe EN 13381, welche im Teil 8 [1] das Prüf- und Bewertungsverfahren für RBS auf Trägern und Stützen behandelt, wurde 2020 um den Teil 10 ergänzt. Für Produkte, die bereits erfolgreich nach EN 13381-8 [1] geprüft und bewertet wurden, bietet EN 13381-10 [2] unter bestimmten Voraussetzungen die Möglichkeit den Anwendungsbereich des RBS auf Stahlzugglieder mit Vollprofil zu erweitern. Hierzu sind ausschließlich Brandversuche an unbelasteten Bauteilen erforderlich, jedoch keine Brandprüfungen an mechanisch belasteten Zuggliedern. Da diese Vorgehensweise im Widerspruch zum nationalen Sicherheitsniveau in Deutschland steht, wonach der Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen unter mechanischer Belastung zu prüfen ist, wurde eine A-Abweichung erteilt, sodass eine Anwendung von EN 13381-10 [2] in Deutschland nicht möglich ist.

Deutschland und andere europäische Mitgliedsstaaten haben sich dafür ausgesprochen einen weiteren Normenteil zur erarbeiten, welcher den Beitrag von RBS zur Feuerwiderstandsdauer von Stahlzuggliedern mit Vollprofil anhand mechanischer belasteter Brandprüfungen bestimmt. Im Frühjahr 2018 wurde seitens des CEN/TC 127 ein Mandat zur Erarbeitung einer entsprechenden Prüfnorm an die Working Group (WG 1) erteilt. Die dafür innerhalb der Working Group (WG 1) gegründete Task Group (TG 17) steht unter dem Vorsitz von Dr.-Ing. Sascha Hothan (BAM). Die im Rahmen des Forschungsprojektes FIRESTEMIC durchgeführten Untersuchungen dienen dazu bisher noch offen Fragestellungen zum Einfluss der Bauteilorientierung und dem Profiltyp zu beantworten und unter Berücksichtigung vorhandener Forschungsergebnisse einen Normenentwurf zu erarbeiten.

2.3 Stand der Forschung

Hinsichtlich des Verhaltens und der Leistungsfähigkeit von RBS auf Stahlzuggliedern, insbesondere mit Vollprofil, existieren vergleichsweise wenig Informationen. Ungeachtet dessen werden RBS zur Erhöhung der Feuerwiderstandsdauer von zugbeanspruchten Stahlbauteilen in der Praxis eingesetzt. In Deutschland erfolgt dies in der Regel basierend auf einer ZiE bzw. vBG oder zum Teil auch zulassungsbasiert mittels einer aBG.

Der derzeitige Wissensstand bezüglich RBS auf zugbeanspruchten Stahlbauteilen stützt sich im Wesentlichen auf die an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) durchgeführten Untersuchungen [7], [8]. In zahlreichen Brandversuchen an Stahlzuggliedern mit RBS wurde der Einfluss verschiedener Parameter untersucht, d.h. Profilgeometrie, Trockenschichtdicke, Bauteilorientierung und Lastausnutzungsgrad. Es hat sich gezeigt, dass die thermische Schutzwirkung des RBS durch alle oben genannten Parameter beeinflusst wird

und gegenseitige Wechselwirkungen bestehen. Zur Optimierung der Leistungsfähigkeit der RBS empfiehlt es sich daher, die verschiedenen Parameter aufeinander abzustimmen. Ferner wurde festgestellt, dass es bei Profilen mit gekrümmter Bauteiloberfläche infolge der starken Volumenzunahme beim Aufschäumen des RBS zu einer Intensivierung der Rissbildung kommt. Dies führt im Allgemeinen zu einer Verschlechterung der thermischen Schutzwirkung und zu einem schnelleren temperaturbedingten Festigkeitsverlust des Stahls. Die für Stahlzugglieder häufig eingesetzten Kreisvollprofile mit ihrer filigranen Bauteilform und hohen Oberflächenkrümmung stellen somit besonders hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit eines RBS. Im Gegensatz zu den üblicherweise für Träger und Stützen verwendeten offenen und geschlossenen Profilen sind für Zugglieder mit Vollprofil wesentlich höhere Trockenschichtdicken erforderlich. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass für die Beurteilung der thermischen Schutzwirkung von RBS die Prüfung mechanisch belasteter Zugglieder zwingend erforderlich ist. Ausschließlich diese sind in der Lage den in der Realität vorhandenen dreidimensionalen Beanspruchungszustand des RBS abzubilden, d.h. Beanspruchung der Aufschäumung in Dicken-, Umfangs- und in Stablängsrichtung. Basierend auf den durchgeführten Brandversuchen wurde eine Verfahrensweise entwickelt, welches es ermöglicht, Stahlzugglieder mit RBS in eine Feuerwiderstandsklasse einzuordnen. Zu diesem Zweck wurden Leistungskriterien für den Zeitpunkt des Erreichens der Tragfähigkeit definiert. Eine Validierung des vorgeschlagenen Verfahrens ist bereits auf der Grundlage eines Vergleichs von numerischen Simulationsberechnungen und der in den Brandversuchen ermittelten Temperatur- und Verformungsergebnisse erfolgt.

Die im Rahmen der Forschung entwickelte Verfahrensweise, welche erstmalig auch den Einfluss des Lastausnutzungsgrades des Bauteils mitberücksichtigt, kann als Grundlage für die Erarbeitung einer neuen europäischen Prüf- und Bewertungsnorm für Stahlzugglieder mit RBS verwendet werden. Durch normative Regelungen wird ein einheitliches und vergleichbares Sicherheitsniveau geschaffen, welches es den Herstellern ermöglicht ihre vorhandenen Produkte für den speziellen Anwendungsbereich zu optimieren oder neue Systeme zu entwickeln.

In Deutschland haben die Untersuchungen der BAM bereits dazu geführt, dass RBS im Rahmen der nationalen Zulassung (abZ bzw. aBG) unter Beachtung der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Randbedingungen auf zugbeanspruchten Stahlbauteilen eingesetzt werden können [9]. Die Leistungsfähigkeit von RBS auf den Anschlussbauteilen von Zuggliedern, insbesondere der Gabelköpfe, sowie der Einfluss unterschiedlicher Bauteilorientierungen wurden ebenfalls an der BAM untersucht [10], [11] und [18]. Untersuchungen zu den mechanischen Hochtemperatureigenschaften des für Zugstabsysteme verwendeten Stahls stehen allerdings noch aus, d.h. Stähle mit höheren Festigkeiten als S355 sowie die für Gabelköpfe üblicherweise eingesetzten Materialien.

2.4 Bedarf bei den Unternehmen und Innovationsgehalt des Themas

Zahlreiche beim DIBt eingegangene Anfragen belegen, dass seitens der Planer, Ausführenden und Herstellern von RBS ein großes Interesse an einer Regelung der Anwendung von RBS auf Stahlzuggliedern aus Vollquerschnitten anhand von Zulassungen besteht. In Deutschland wurde hierauf bereits reagiert und zur Erlangung einer abZ bzw. aBG seitens des DIBt basierend auf [7] und [8] ein entsprechendes Prüfprozedere für RBS auf Stahlzuggliedern mit Vollprofil definiert. Auf europäischer Ebene fehlt es derzeit an einem normativ geregelten Prüf- und Bewertungsverfahren, welches auf Basis von Brandprüfungen mit mechanischer

Zugbeanspruchung die Anwendung von RBS auf Stahlzuggliedern mit Vollprofil im Rahmen einer ETA ermöglicht. Da die Hersteller im zunehmenden Maße den europäischen Markt erschließen möchten und daher für Ihre Produkte von den nationalen zu den europäischen Zulassungen übergehen, ist es umso wichtiger hierfür eine entsprechende Lösung zu erarbeiten. Aus der Sicht Deutschlands ist es erforderlich, dass das bereits durch vorhandene Prüf- und Bewertungsregelungen etablierte nationale Sicherheitsniveau in der europäischen Prüfnorm Berücksichtigung findet. Im Rahmen des nationalen Spiegelausschusses (NA 005-52-02 AA) wurden bereits entsprechende Eckpunkte durch Vertreter der Bauaufsicht (DIBt), Industrie (Hersteller von RBS) und Prüfinstitutionen formuliert [12].

2.5 Vorarbeiten

An der BAM sind bereits umfangreiche Erfahrungen hinsichtlich der Anwendung, Prüfung und Beurteilung von RBS zur Erhöhung der Feuerwiderstandsdauer von Stahlbauteilen vorhanden. Ferner belegen die von der BAM durchgeführten Forschungsvorhaben [5], [7], [8], [10] sowie die zahlreichen Veröffentlichungen [13], [14], [15], [16], [20] die für das geplante Projekt erforderliche fachliche Expertise hinsichtlich der Prüfung und Beurteilung des Feuerwiderstandes von Stahlzuggliedern mit RBS. Die Ergebnisse der Forschungsvorhaben wurden bereits im Abschnitt 2.3 vorgestellt.

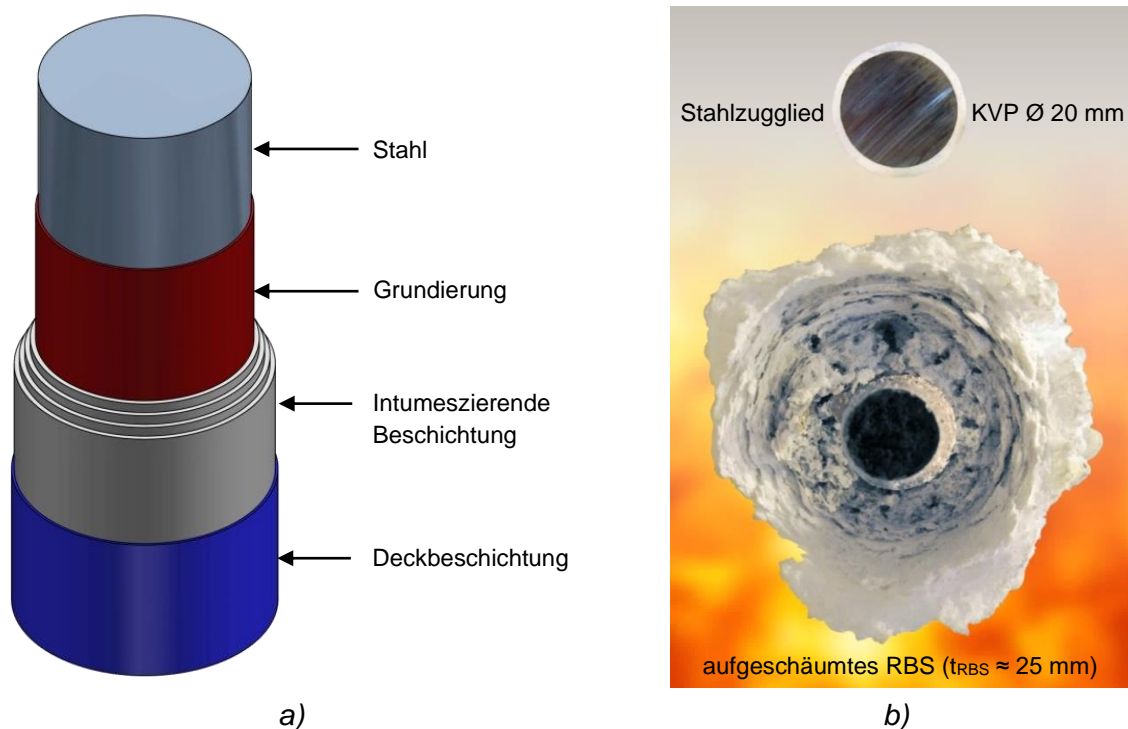


Abbildung 2: a) Schematischer Aufbau eines RBS auf einem Stahlbauteil [8]; b) Querschnitt eines Stahlzuggliedes vor und nach der Brandbeanspruchung

Darüber hinaus engagiert sich die BAM seit mehreren Jahren in der nationalen und europäischen Normungsarbeit. Eckpunkte für ein Prüf- und Bewertungsverfahren für reaktive Brandschutzsysteme auf Stahlzuggliedern [8] wurden bereits unter Mitwirkung der BAM im nationalen Spiegelausschusses (NA 005-52-02 AA) erarbeitet. Des Weiteren nehmen Mitarbeiter der BAM regelmäßig an den Sitzungen des Normungsausschusses CEN/TC 127/WG 1 teil. Dieses Gremium ist mit der Erstellung von europäischen Normen für die Prüfung und Bewertung von tragenden und raumabschließenden Bauteilen im Brandfall

betraut. Eine innerhalb der WG 1 eingerichtete Projektgruppe (TG 17) übernimmt die Erarbeitung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung des Beitrages von RBS zum Feuerwiderstand von Stahlzuggliedern mit Vollprofil anhand mechanisch belasteter Brandprüfungen. In dieses Gremium wurden die im Rahmen des Forschungsprojektes aufbereiteten Ergebnisse transferiert und europäisch gespiegelt.

Am Forschungsprojekt sind neben der BAM auch zwei Hersteller von RBS beteiligt, d.h. Rudolf Hensel GmbH sowie Sherwin-Williams Coatings Deutschland GmbH. Die Firmen sind ebenfalls in der nationalen und europäischen Normung engagiert und besitzen in Bezug auf die Anwendungsbereiche, Zusammensetzung und Leistungsfähigkeit ihrer Produkte ein umfangreiches Wissen. Ferner sind die Firmen mit dem nationalen und europäischen Zulassungsverfahren vertraut.

2.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Ausarbeitung des Normenentwurfes erfolgte in Zusammenarbeit mit den jeweils beteiligten nationalen und internationalen Normungsgremien, d.h. DIN NA 005-52-02 AA sowie CEN/TC 127/WG 1 und CEN/TC 127/WG 1/TG 17. Der Austausch mit den Mitgliedern dieser Gremien fand vorwiegend in Online-Besprechungen statt. Darüber hinaus wurde das DIBt gelegentlich über den Fortgang der Arbeiten am Normenentwurf informiert. Im Rahmen von Konferenzen und Tagungen wurde das Thema der Prüfung und Bewertung von RBS auf Stahlzuggliedern auch mit anderen Prüfstellen und universitären Institutionen besprochen.

2.7 Bearbeitungszeitraum und Projekttreffen

Die Bearbeitung des Projektes ist in vier Arbeitspaketen (AP) über einen Zeitraum von 24 Monaten (15.09.2020 – 14.09.2022) erfolgt, siehe Tabelle 1. Alle Projektpartner haben an den AP 1 bis 4 gemeinsam mitgewirkt. Eine Übersicht der im Projekt von den einzelnen Partnern geleisteten Arbeiten ist in Kapitel 7 angegeben. Im Rahmen des Projektes wurden zahlreiche Besprechungen zwischen den Projektpartnern sowie Treffen der nationalen und europäischen Normungsgremien durchgeführt, siehe Tabelle 2.

Tabelle 1: Zeit- und Ablaufplan für das Forschungsprojekt

Zeit	2020				2021												2022								
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
AP 1	Aufbereitung der Forschungsergebnisse und Erstellung eines Normenentwurfes																								
AP 2	Experimentelle Untersuchung zur Bauteilorientierung und Profilart																								
AP 3	Weiterentwicklung und Präzisierung des Normenentwurfes																								
AP 4	Vorstellung und Verbreitung des Normenentwurfes																								

Tabelle 2: Übersicht der durchgeführten Besprechungen und deren Inhalt

Datum	Bezeichnung	Projektteilnehmer	Inhalt
2020-09-18	NA 005-52-02 AA	BAM, RH	Update zum Normenentwurf
2020-11-02	Projekttreffen	BAM, SW, RH	Normenentwurf Version 5, Diskussion des Prüf- und Bewertungsverfahrens
2020-12-02	TG 17	BAM, RH	Normenentwurf Version 5, Vorstellung des Prüf- und Bewertungsverfahrens
2021-01-19	NA 005-52-02 AA	BAM, SW, RH	Diskussion mit der Spiegelgruppe, Update zum Normenentwurf
2021-02-09	TG 17	BAM, SW, RH	Normenentwurf Version 6, Vorstellung der überarbeiteten Textabschnitte
2021-02-26	Projekttreffen	BAM, SW, RH	Vorbereitung und Planung der Brandversuche
2021-03-16	NA 005-52-02 AA	BAM, SW, RH	Update zum Normenentwurf
2021-03-18	WG 1	BAM	Update zum Normenentwurf
2021-03-22	Projekttreffen	BAM, SW, RH	Aktualisierung des Projektzeitplans, Festlegungen zu den Probekörpern, Vorstellung der zu testenden Prüfprogramme (TP-A, B und C)
2021-04-29	Projekttreffen	BAM, SW, RH	Vorstellung der Ergebnisse aus dem Vorversuch, Update zum Stand der Probekörperherstellung
2021-06-08	TG 17	BAM, SW, RH	Ergänzung des Normenentwurf Version 6 mit einem Kapitel zu den Interpolationsmöglichkeiten
2021-06-30	Projekttreffen	BAM, SW, RH	Update zum Herstellungsprozess der Probekörper für AP 2
2021-09-08	Projekttreffen	BAM, SW, RH	Ergebnis der ersten Brandprüfung
2021-09-17	NA 005-52-02 AA	BAM, SW, RH	Update zum Normenentwurf
2021-10-01	WG 1	BAM	Update zum Normenentwurf
2021-12-03	Projekttreffen	BAM, SW, RH	Vorstellung der Ergebnisse aus den Brandversuchen sowie Bewertung des Einflusses der Bauteilorientierung und Profilarf
2022-02-28	TG 17	BAM, SW, RH	Normenentwurf Version 7, Vorstellung der überarbeiteten Textabschnitte und der Ergebnisse der an der BAM durchgeführten Brandversuche
2022-03-15	NA 005-52-02 AA	BAM, SW, RH	Update zum Normenentwurf
2022-03-29	WG 1	BAM, SW	Update zum Normenentwurf, Anfrage zum Start des „official work items“ an CEN/TC127
2022-04-21	Projekttreffen	BAM, SW, RH	Diskussion der Ergebnisse der Brandversuche, Besprechung der Veröffentlichung im Fire Safety Journal, Vorbesprechung zum Projekt-Workshop
2022-04-25	TG 17	BAM, SW, RH	Normenentwurf Version 8, Vorstellung der überarbeiteten Textabschnitte und Beschreibung der Kommentierungsphase
2022-06-10	Projekttreffen	BAM, RH	Besprechung zum Projekt-Workshop
2022-08-25	TG 17	BAM, SW	Normenentwurf Version 9, Vorstellung der überarbeiteten Textabschnitte
2022-08-29	Projekttreffen	BAM, RH, SW	Besprechung zum Projekt-Workshop, Vorstellung der Präsentationen
2022-09-02	Projekttreffen	BAM, SW	Vorstellung der Präsentation Nr. 3
2022-09-06	Workshop	BAM, RH, SW	Workshop - Feuerwiderstand von Stahlzuggliedern mit reaktiver Brandschutzbeschichtung
2022-09-22	TG 17	BAM, SW, RH	Umgang mit der Schwelbrandkurve und Daten zur Übertragung KVP und RVP
2022-10-05	WG 1	BAM, SW	Erteilung des „official work items“ für den Normenentwurf

BAM = Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

RH = Rudolf Hensel GmbH; SW = Sherwin-Williams Coatings Deutschland GmbH

3 Aufbereitung der Forschungsergebnisse und Erstellung eines Normenentwurfes (AP 1)

In diesem Arbeitspaketes erfolgte zunächst eine Strukturierung und Aufbereitung von Prüfdaten und Ergebnissen, welche bereits im Rahmen von an der BAM bereits durchgeführten Forschungsprojekten von RBS auf Stahlzuggliedern mit Vollprofil vorlagen. Hierzu wurden die Berichte und Veröffentlichungen [7, 8, 11, 12, 16, 18, 21] herangezogen. Die Prüfdaten beinhalten dabei sowohl mechanische (Kraft und Weg) als auch thermische Werte (Temperatur). Auf Basis der zusammengetragenen Ergebnisse und der Erfahrungen der beiden am Projekt beteiligten Beschichtungshersteller konnten erste Ansätze für geeignete Prüf- und Auswertungsprinzipien entwickelt werden. In die konzeptionellen Überlegungen zur Prüfnorm wurde auch das bereits vorhandene Positionspapier des NA 005-52-02 AA [12] und die darin beschriebenen Eckpunkte mit einbezogen. Darüber hinaus wurden auch die bereits bestehenden Normenteile EN 1363-1 [17] und EN 13381-8 [1] sowie die 2020 veröffentlichte Prüfnorm EN 13381-10 [2] bei der Ausarbeitung der einzelnen Kapitel der neuen Prüfnorm berücksichtigt. Allerdings zeigte sich bereits zu einem frühen Zeitpunkt, dass der Normenentwurf eigenständig sein muss und keine Abhängigkeiten zu den Normenteilen [1] und [2] aufweisen soll. Dies erlaubt, dass neue Produkte speziell für den Einsatz auf Stahlzuggliedern geprüft und beurteilt werden können. Zusätzlich zur Abstimmung zwischen den Projektpartnern wurden auch zahlreiche Besprechungen innerhalb der nationalen (NA 005-52-02 AA) und europäischen (CEN/TC 127/WG 1/TG 17) Normungsgremien durchgeführt. Die dabei stattgefundenen Fachdiskussionen lieferten wichtige Hinweise für die konzeptionellen und inhaltlichen Überlegungen zum Normenentwurf.

Am Ende des AP 1 konnte in Bezug auf den Normenentwurf ein Arbeitsstand (Dokument prEN 13381-XX: Version 6) erreicht werden, in dem ein erster Vorschlag für ein neuartiges Prüf- und Bewertungskonzept beschrieben ist. Das Dokument umfasst zu diesem Zeitpunkt bereits insgesamt 14 Kapitel und mehrere Anhänge mit Anwendungsbeispielen. Zudem war ein Großteil der im Normenentwurf enthaltenen Kapitel textlich so weit ausgearbeitet, dass im weiteren Projektverlauf eine intensive Diskussion mit den Mitgliedern der verschiedenen Normungsgremien stattfinden konnte. In Bezug auf die beiden noch offenen Fragestellungen zum Umgang mit verschiedenen Profilarten und der Bauteilorientierung fehlte es dem Dokument noch an entsprechenden Textbausteinen. Die Klärung dieser beiden Aspekte erfolgte durch die im AP 2 vorgesehenen Brandversuche, siehe Kapitel 4. Die Verbesserung und Weiterentwicklung des Normenentwurfs erfolgten im AP 3, siehe hierzu die Ausführungen in Kapitel 5.

4 Experimentelle Untersuchungen zur Profilart und Bauteilorientierung (AP 2)

Dieses Arbeitspaket dient der Erweiterung der experimentellen Datengrundlage, auf deren Basis die Entwicklung eines Prüf- und Bewertungsverfahrens für Stahlzugglieder mit RBS erfolgen kann. Anhand von Brandversuchen an mechanisch unbelasteten Zuggliedern mit RBS wird der Einfluss verschiedener **Bauteilorientierungen** (horizontal, schräg und vertikal) sowie der **Profilart** (kreisförmige und rechteckige Vollprofile) auf die thermische Schutzwirkung von RBS untersucht. Anhand der Ergebnisse werden entsprechende Empfehlungen für die zu erarbeitende Prüfnorm formuliert.

4.1 Festlegung des Prüfprogramms und der zu testenden Probekörper

Die Profilauswahl für die in den Brandversuchen zu testenden Probekörper erfolgte durch alle Verbundpartner gemeinsam. Kriterien bei der Profilauswahl waren einerseits die baupraktische Relevanz und zum anderen die Möglichkeit der Vergleichbarkeit der Probekörper untereinander. Um eine breitere Anwendung der Ergebnisse zu ermöglichen sowie generelle Phänomene und systematische Zusammenhänge aufzudecken, wurde das Prüfprogramm mit zwei unterschiedlichen reaktiven Brandschutzsystemen (RBS-I [19] und RBS-II [20]) durchgeführt. Es handelt sich dabei um kommerzielle Produkte auf Wasserbasis, welche vorwiegend im Innenbereich eingesetzt werden. Auf Basis der experimentellen Ergebnisse konnten allgemeingültige Empfehlungen für die Normung abgeleitet werden, die die Bestimmung der Leistungsfähigkeit beliebiger Produkte auf Stahlzuggliedern ermöglicht.

Zur Beantwortung der beiden Fragestellungen, d.h. Einfluss der Bauteilorientierung und Profilart auf die Leistungsfähigkeit von RBS, wurden drei verschiedene Prüfkfigurationen entwickelt, siehe Abbildung 3:

- **Testpaket A (TP-A)** zielt darauf ab, das Verhalten des RBS auf verschiedenen Stahlprofilen zu untersuchen und damit den Einfluss der Profilart zu bewerten. Hierzu wurden zwei unbelastete Probekörper mit Kreisvollprofil (KVP) und zwei Probekörper mit Rechteckvollprofil (RVP) in horizontaler Bauteilorientierung getestet. Für jeden Profiltyp wurden zwei verschiedene Durchmesser gewählt. Neben den vier unbelasteten Bauteilen wurde auch ein mechanisch belastetes Stahlzugglied mit RVP in horizontaler Einbaulage angeordnet. Der Lastausnutzungsgrad im Brandfall (μ_{fi}) für diese Bauteil betrug 0,65, was einem im Kaltfall zu 100% ausgelasteten Zugglied entspricht. Zusammen mit dem im TP-B getesteten mechanisch belasteten Zugglied mit KVP lässt sich ebenfalls der Einfluss des Profilfaktors beurteilen.
- **Testpaket B (TP-B)** untersucht den Einfluss der Bauteilorientierung. Dazu wurden vier unbelastete Probekörper mit KVP getestet, zwei in horizontaler und zwei in vertikaler Ausrichtung. Ferner wurden zwei verschiedene Stabdurchmesser verwendet. Zusätzlich wurde ein mechanisch belastetes Zugglied mit KVP in horizontaler Ausrichtung untersucht.
- **Testpaket C (TP-C)** fokussiert sich ebenfalls auf den Einfluss der Bauteilorientierung. Hierzu wurden acht unbelastete Probekörper mit KVP untersucht, zwei in vertikaler, zwei in horizontaler und vier in 45° geneigter Ausrichtung. Alle Probekörper sind an einer Seite mit einer zentralen Stahlbefestigungsplatte verbunden, wodurch ein sehr kompakter Versuchsaufbau erreicht wird.

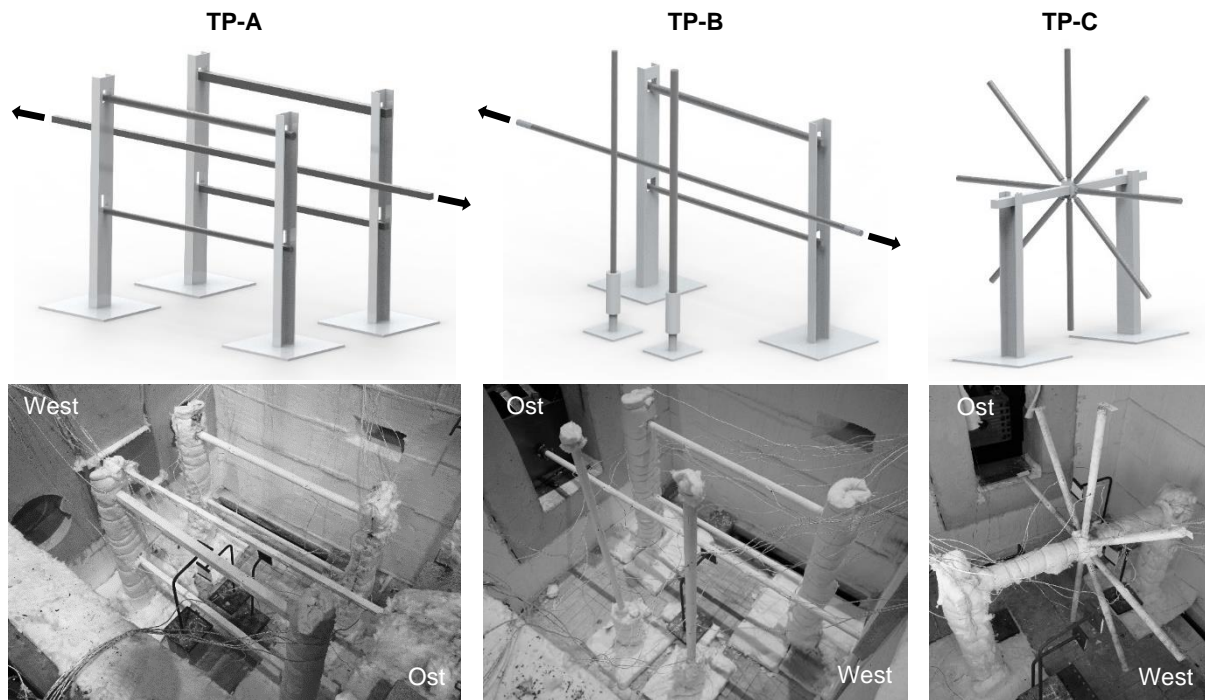


Abbildung 3: Prinzipdarstellungen und Fotos für die drei Testpakete

Tabelle 3: Beschreibung des Prüfprogramms und der darin enthaltenen Probekörper

Test-paket	Prüfmodus [mm]	Querschnitt [mm]	Stablänge/ brandbeanspruchte Stablänge [mm]	Bauteil- orientierung [-]	tatsächliche TSD		
					RBS-II ⁽²⁾ [mm]	RBS-II ⁽³⁾ [mm]	
TP-A	Zugbeanspruchung	30x30	2400/1750	horizontal	2,53	1,96	
	mechanisch unbelastet	D = 30	1200/1000		2,26	1,95	
		D = 40			2,10	1,54	
		30x30			2,65	1,89	
		40x40			2,16	1,44	
TP-B	Zugbeanspruchung	D = 30	2400/1750	horizontal	2,47	1,85	
	mechanisch unbelastet	D = 30	1200/1000		2,54	1,88	
		D = 40	1200/1050		2,56	1,41	
		D = 30			vertikal	2,35	1,84
		D = 40			2,41	1,48	
TP-C	mechanisch unbelastet	D = 30		600/600	horizontal	2,39	1,85
			vertikal		2,43	1,71	
					2,43	1,80	
			schräg ¹⁾		2,27	1,83	
					1,98	1,93	
					2,39	1,74	
					2,31	1,65	
2,75	1,72						

Hinweise:

¹⁾ Die schräg angeordneten Probekörper weisen eine Neigung von 45° gegenüber der Horizontalen auf.

²⁾ Die Soll-TSD beträgt 2,5 mm.

³⁾ Die Soll-TSD beträgt 1,9 mm für die Probekörper mit einer Querschnittsgröße von 30 mm und 1,5 mm für die Probekörper mit einer Querschnittsgröße von 40 mm.

4.2 Planung und Herstellung der Probekörper

Die Planung der Probekörper erfolgte durch die BAM auf Basis des entwickelten Prüfprogramms. Die Herstellung der Probekörper erfolgte durch die beteiligten Industriepartner und umfasste die Beschaffung der sandgestrahlten Stahlbauteile, der Probekörperthermoelemente und des RBS sowie die Applikation der Thermoelemente und der Brandschutzbeschichtung auf die Probekörper.

Für alle Probekörper wurde kaltverformter Stahl vom Typ S355J2 +C verwendet. Die tatsächliche Zugfestigkeit des Stahls sowie die im Brandversuch aufgebrachte Zugkraft sind in Tabelle 4 angegeben. Die mechanisch belasteten Zugglieder haben eine Stablänge von 2400 mm. An beiden Stabenden befindet sich ein 150 mm langes Gewinde (M30x2 mm). Die unbelasteten Probekörper haben eine Stablänge von 1200 mm (TP-A und TP-B) bzw. 600 mm (TP-C). Eine detaillierte Beschreibung der in den einzelnen Testpaketen verwendeten Probekörper ist in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 4: Angaben zur Stahlfestigkeit des für die Zugglieder verwendeten Stahls und der im Brandversuch aufgebrachten Zugbeanspruchung

Zugglieder [-]	Querschnitt [mm]	Stahl- bezeichnung [mm]	0,2%-Dehngrenze ($f_{p0,2}$) / Zugfestigkeit (f_u) [N/mm ²]	Lastausnutzungsgrad im Brandfall (μ_{fi}) [-]	Aufgebrachte Zugkraft [kN]
mit RBS-I	D = 30 30x30	S355J2C +C	601 / 635 678,5 ¹⁾ / 704 ¹⁾	0,65 ²⁾	276,1 396,9
mit RBS-II	D = 30 30x30	S355J2C +C	620 / 640 569 / 629	0,65 ²⁾	284,9 332,9

Hinweise:

Die Angaben zur Stahlfestigkeit wurden dem 3.1 Zeugnis der Bauteile entnommen.

¹⁾ Die Zugfestigkeit basiert auf zwei Materialprüfungen (Zugversuche), welche an der BAM nach EN ISO 6892-1 [3] durchgeführt wurden. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um Mittelwerte.

²⁾ Eine Lastausnutzung im Brandfall von $\mu_{fi} = 0,65$ entspricht einem im Kaltfall zu 100% ausgelasteten Bauteil.

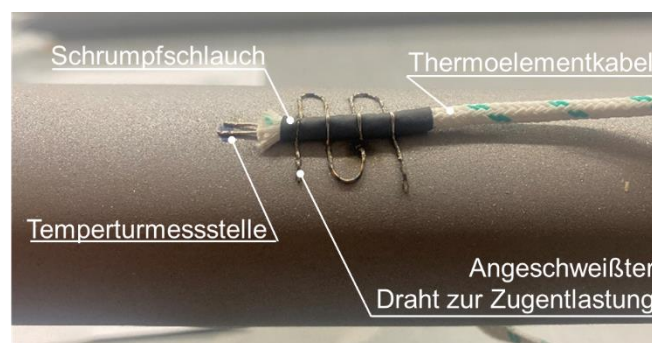


Abbildung 4: Detailansicht eines an ein sandgestrahltes Stahlprofil mit KVP angeschweißtes Thermoelement

Für jedes der beiden ausgewählten RBS wurden Probekörper für alle drei Testpakete hergestellt. Beide RBS besitzen eine gültige Europäische Technische Bewertung (ETA) für die Anwendung auf Stahlträgern und -stützen mit I-Profil und Hohlprofil [19], [20]. Die RBS wurden mit verschiedenen Trockenschichtdicken (TSD) getestet. Vor dem Aufbringen des RBS wurden alle Stahlbauteile sandgestrahlt (SA 2 ½). Anschließend wurden Thermoelemente (TE), welche zur Messung der Stahltemperatur während des Brandversuchs erforderlich sind, mittels Punktschweißen auf der Oberfläche der Stahlbauteile angebracht. Zusätzlich wurde entlang jedes Thermoelementkabels auf einer Länge von ca. 30 mm ein enganliegender dünner Draht angeschweißt, der als Zugentlastung fungiert und das Thermoelement fixiert.

Für die Thermoelemente wurden flexible mit Keramikfaser isolierte Elemente vom Typ K mit einer Temperaturbeständigkeit bis 1200 °C verwendet. Im Bereich der Temperaturmessstelle wurde ein Schrumpfschlauch über das Thermoelementkabel gezogen, um ein Ausfransen der Keramikfaserisolierung zu verhindern. Eine Detailansicht von einer Temperaturmessstelle ist in Abbildung 4 dargestellt.

Um die Stahltemperatur während des Brandversuchs in der Nähe der Stelle des Probenbruchs erfassen zu können verfügt jedes mechanisch belastete Zugglied über sieben Messstationen (MS). Aus Redundanzgründen bei der Temperaturmessung wurden pro Messstation zwei Thermoelemente angebracht. Die Position der Messstationen ist in Abbildung 5 dargestellt. Da an den unbelasteten Probekörpern kein Probenbruch auftritt und von einer vergleichsweise homogenen Temperaturverteilung entlang der Stablänge ausgegangen werden kann, wurde die Anzahl der Messstationen reduziert. Die unbelasteten Probekörper in TP-A und TP-B haben jeweils zwei Messstationen, siehe Abbildung 6. Die unbelasteten Probekörper in TP-C haben aufgrund der deutlich kürzen Stablänge jeweils nur eine Messstation, siehe Abbildung 7.

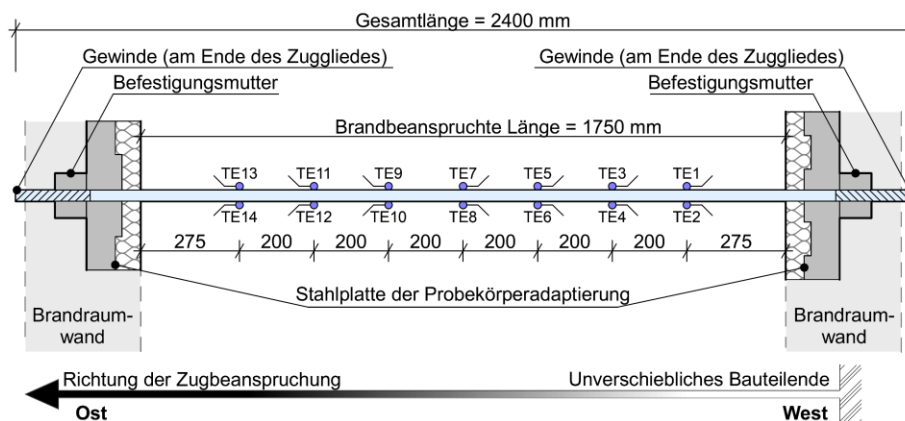


Abbildung 5: Position der Temperaturmessstellen für die mechanisch belasteten Zugglieder

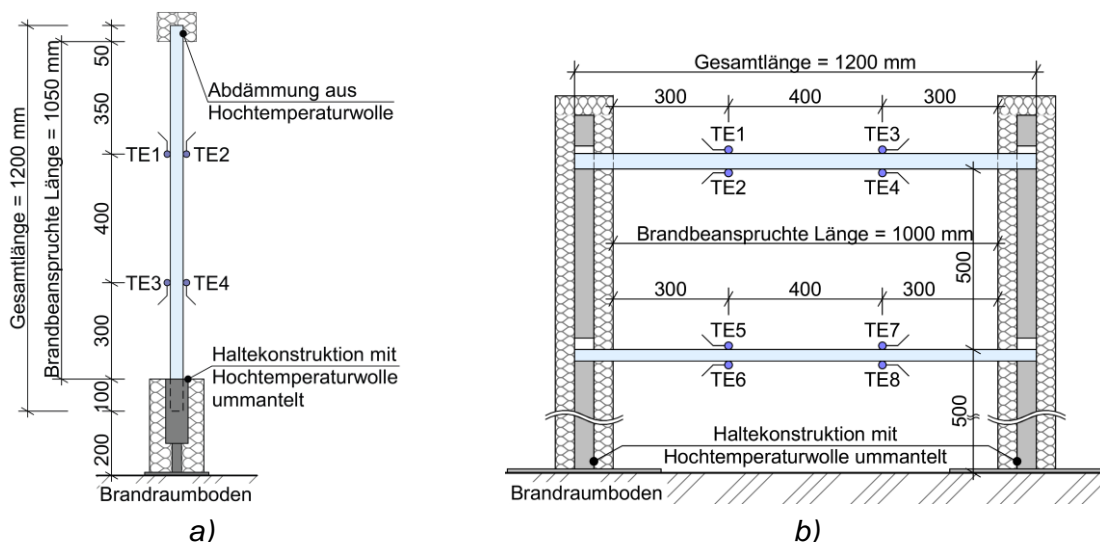


Abbildung 6: Position und Bezeichnung der Temperaturmessstellen für die im TP-A und TP-B verwendeten unbelasteten vertikalen (a) und horizontalen (b) Probekörper

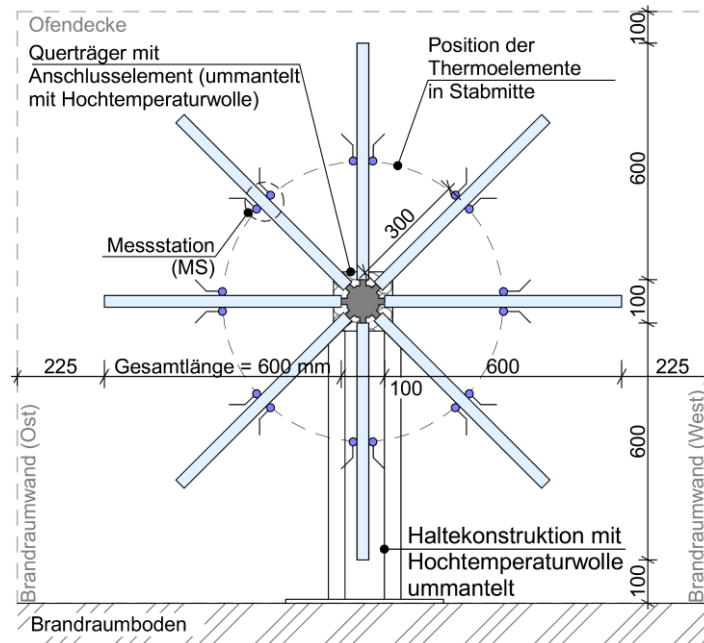


Abbildung 7: Position der Temperaturmessstellen für die unbelasteten Probekörper im TP-C

Bei der Firma Rudolf Hensel wurde nach dem Anbringen der Thermolemente die Grundierung in einer TSD von ca. 0,06 mm auf die Probekörper im Streichverfahren aufgetragen. Nach Trocknung der Grundierung wurde dann die reaktive Brandschutzbeschichtung in mehreren Schichten ebenfalls im Streichverfahren appliziert. Bei der Firma Sherwin-Williams wurde zuerst im Streichverfahren die Grundierung aufgetragen und danach die Thermolemente angebracht. Die Positionen für die Thermolemente wurden abgeklebt und nach dem Anbringen der Thermolemente ebenfalls grundiert. Danach erfolgte ebenfalls im Streichverfahren die Applikation der reaktiven Brandschutzbeschichtung. Bei allen Probekörpern wurde auf eine Deckbeschichtung verzichtet. Das infolge des Applikationsprozesses an den Thermolementen anhaftende Beschichtungsmaterial wurde im Vorfeld der Brandprüfungen entfernt, so dass das Aufschäumverhalten der Probekörper nicht beeinflusst wird.



a)



b)

Abbildung 8: Beispielhafter Zustand der Probekörper nach der Applikation des RBS:
a) RBS-I; b) RBS-II

Die beschichteten Probekörper wurden etwa vier bis fünf Wochen in einer trockenen Umgebung mit konstanter Luftfeuchte und Temperatur konditioniert. Nach der Konditionierungsphase wurde die TSD gemessen. Hierzu wurden vor und hinter den Temperaturmessstellen jeweils vier gleichmäßig in Umfangsrichtung verteilte TSD-Messungen durchgeführt. Dadurch konnte eine ausreichende Anzahl an Messpunkten erreicht und ein Eindruck von der Verteilung der TSD über den gesamten Probekörper erreicht werden. Exemplarisch sind in Abbildung 9 die TSD-Messpunkte an einem mechanisch belasteten Zugglied dargestellt. In Tabelle 3 ist für jede Probe der Mittelwert der gemessenen TSD angegeben.

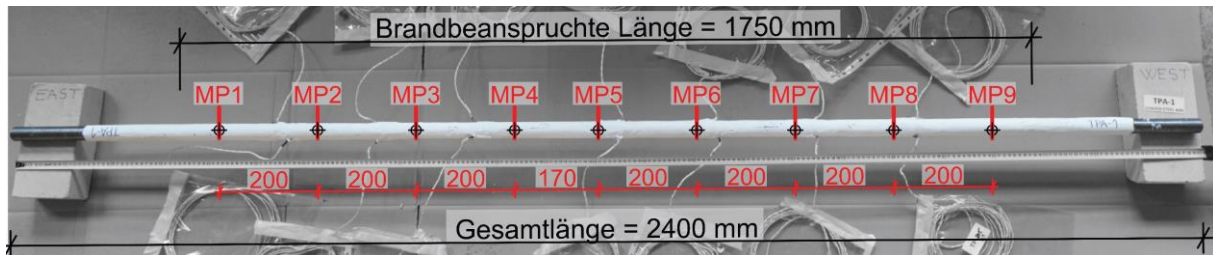


Abbildung 9: Messpunkte (MP) für die Ermittlung der tatsächlichen TSD des RBS am Beispiel eines mechanisch belasteten Zuggliedes (TP-A)

4.3 Aufbau und Vorbereitung des Zugbauteilprüfens

Zur Durchführung realmaßstäblicher Brandversuche an Stahlzuggliedern mit RBS verfügt die BAM mit dem Zugbauteilprüfens über einen speziellen Prüfstand. Mit dieser Prüfmaschine lassen sich Bauteile unter Brandbeanspruchung und mechanischer Zugbeanspruchung testen. Das Gerät besteht aus einem Belastungsrahmen mit zwei hydraulischen Antrieben und einem darin befindlichen Brandraum, siehe Abbildung 10. Die Innenmaße des Brandraums betragen 1,75 m × 1,8 m × 1,5 m (L×B×H). Zur Beheizung des Brandraumes sind auf der Westseite zwei Ölbrenner vorhanden. Der Brandraum ist in Teilen mit Feuerfestbeton und mit Hochtemperaturdämmstoff ausgekleidet. Die Brandraumtemperatur wird mit Hilfe von Plattenthermoelemente gemessen. Diese Brandraumthermoelemente (BRT) wurden in Form von Stativen auf dem Brandraumboden platziert oder von der Brandraumdecke als gerade Lanzen abgehängt. Die durch die BRTs gemessene Brandraumtemperatur wird zur Regelung der Leistung der Ölbrenner verwendet. Mittels zweier Videokameras, welche in der Brandraumdecke installiert werden können, sowie einer Fotokamera, welche vor ein Beobachtungsfenster in der nördlichen Brandraumwand positioniert werden kann, wurde das Verhalten der Probekörper während des Brandversuchs beobachtet und aufgezeichnet.

Im Zusammenhang mit der Vorbereitung des Zugbauteilprüfens wurden durch die BAM die zur Durchführung der Brandversuche erforderlichen Verbrauchsmaterialien beschafft, z.B. Brandraumthermoelemente, Hochtemperaturdämmstoff, Vermiculit-Platten, Probekörperadapter und Heizöl. Ferner wurden an dem für die Brandversuche zum Einsatz kommenden Zugbauteilprüfens mehrere Vorversuche durchgeführt, um die Verteilung der Brandraumtemperaturen sowie die Verformung des Belastungsrahmen zu ermitteln.

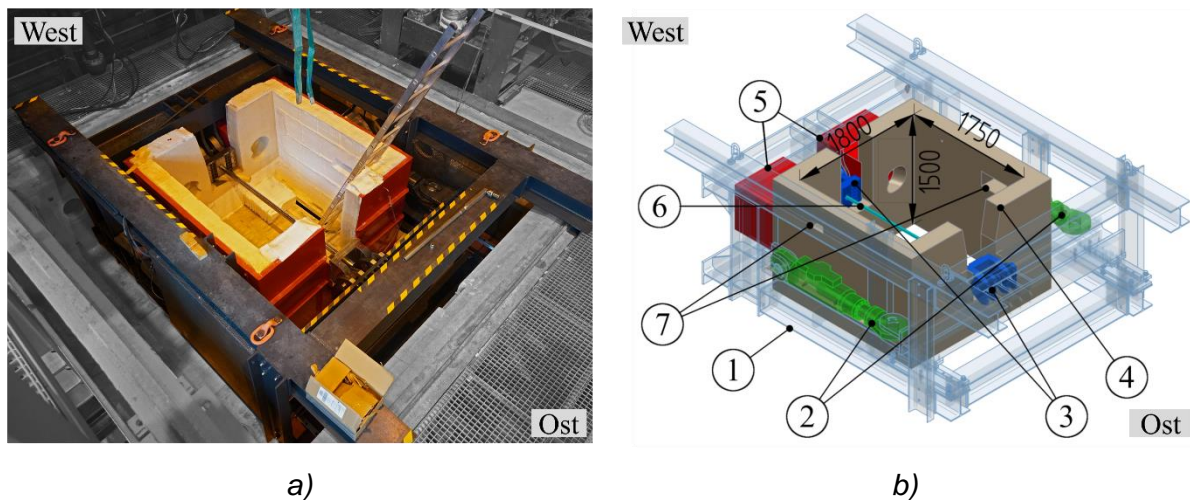


Abbildung 10: a) Zugbauteilprüfofen; b) 3D-Modell des Zugbauteilprüfofens; in beiden Darstellungen fehlen Teile der Brandraumwand bzw. der Brandraumdecke; Legende: 1 – Belastungsrahmen aus Stahl; 2 – Hydraulikzylinder; 3 – Adapter zum Verbinden des Belastungsrahmens mit dem mechanisch belasteten Zugglied; 4 – Brandraumwand; 5 – Ölbrenner; 6 – mechanisch belastetes Zugglied; 7 – Beobachtungsfenster

4.4 Durchführung der Brandversuche

Um Abschattungseffekte zu vermeiden, wurde bei der Anordnung der Probekörper im Brandraum darauf geachtet, dass ein Mindestabstand von 300 mm zwischen den einzelnen Bauteilen besteht. Darüber hinaus wurde zur Vermeidung von Randeffekten ein Abstand von mindestens 300 mm zwischen den Probekörpern und den Wänden, dem Boden bzw. der Decke des Brandraumes vorgesehen. Die im TP-A und TP-B getesteten mechanisch belasteten Zugglieder wurden in Ost-West-Richtung in der Mitte des Brandraumes positioniert, d.h. 550 mm von den Ölbrennerachsen und jeweils 750 mm vom Brandraumboden und der -decke entfernt. Die unbelasteten Probekörper in TP-A und TP-B wurden seitlich neben dem belasteten Zugglied angeordnet, siehe Abbildung 3. Analog zum mechanisch belasteten Zugglied wurden auch die unbelasteten Probekörper im TP-C in Ost-West-Richtung in der Mitte des Brandraumes angeordnet, siehe Abbildung 3, da hieraus das Optimum einer gleichmäßigen Temperaturverteilung resultiert. Alle unbelasteten Probekörper wurden mit Hilfe spezieller Haltekonstruktionen positioniert. Um die Haltekonstruktionen aus Stahl während des Brandversuchs vor einer zu schnellen Erwärmung und damit einem Stabilitätsverlust zu schützen, wurden diese mit einer 38 mm dicken Schicht aus Hochtemperaturdämmstoff ummantelt.

Der Vergleich der Ergebnisse für die mechanisch belasteten und unbelasteten Probekörper setzt eine möglichst gleiche Brandbeanspruchung in den Versuchen voraus. Um die Brandraumtemperatur in der Nähe der Probekörper zu messen, wurde an jedem Bauteil mindestens ein BRT in einem Abstand von ca. 100 mm (+/- 50 mm) angeordnet. Die Brandbeanspruchung erfolgte in den Versuchen nach der in EN 1363-1 [17] definierten Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK). Für die Regelung der Brandraumtemperatur wurde der Mittelwert aus allen in einem Brandversuch angeordneten BRT verwendet. Die Beurteilung der Brandraumtemperaturen sowie ein Vergleich mit der ETK ist in Abbildung 11 und Tabelle 5 angegeben.

Das Aufbringen der mechanischen Zugbeanspruchung (F_{Zug}) auf die im TP-A und TP-B getesteten Zugglieder erfolgte mittels der beiden Hydraulikzylinder des Zugbauteilprüfofens,

siehe Abbildung 10. Die Lastübertragung auf die Probekörperadapter des Zugbauteilprüfens erfolgte mittels spezieller Stahlmuttern (M60x3 mm), welche an beiden Gewindeenden des mechanisch belasteten Zuggliedes montiert wurden. Die Höhe der aufzubringenden Zugkraft wurde nach Gleichung (1) berechnet. Hierzu wurden die tatsächliche Streckgrenze des Stahls bei Raumtemperatur ($f_{p0,2,20^{\circ}\text{C}}$), die Querschnittsfläche des geprüften Zuggliedes ($A_{\text{Querschnitt}}$) und der Lastnutzungsgrad im Brandfall (μ_{fi}) verwendet. Die für die Prüflastberechnung verwendeten Werte sind in Tabelle 4 angegeben.

$$F_{\text{Zug}} = f_{p0,2,20^{\circ}\text{C}} \cdot A_{\text{Querschnitt}} \cdot \mu_{fi} \quad (1)$$

Vor dem Start der Brandbeanspruchung wurde die berechnete Zugkraft in mehreren Schritten von 50 kN auf das mechanisch belastete Zugglied aufgebracht. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 50 kN/min. Nach dem Aufbringen der letzten Belastungsstufe wurden die Weg- und Kraftwerte der Hydraulikzylinder für 15 Minuten beobachtet, um festzustellen, ob sich ein stabiler Zustand eingestellt hat. Im Anschluss daran wurden die Ölbrenner eingeschaltet und mit der Brandbeanspruchung begonnen. Die Zugbeanspruchung wurde über den gesamten Brandversuch bis zum Bruch des mechanisch belasteten Zuggliedes konstant gehalten. Wenige Minuten nach dem Probenbruch wurde der Brandversuch beendet. Während des Brandversuchs wurden die Zugkraft, der Weg der Hydraulikzylinder sowie die Brandraum- und Probekörpertemperatur fortlaufend gemessen und aufgezeichnet. Nach dem Brandversuch wurde der gemessene Maschinenweg des Zugbauteilprüfens um die Nachgiebigkeit des Belastungsrahmens korrigiert, so dass ausschließlich die Verformung des Zuggliedes verbleibt. Die lastabhängige Nachgiebigkeit des Belastungsrahmens wurde anhand eines Kalibrierversuchs an einer massiven Zugstange (Durchmesser 60 mm) aus hochfestem Stahl ermittelt.

Das Aufschäumverhalten des RBS auf den Probekörpern wurde mittels der beiden Videokameras und der Fotokamera während des Brandversuchs fortlaufend aufgezeichnet. Im Anhang des Berichts (Kapitel 9) sind für jeden Brandversuch ausgewählte Bilder aus den Videos zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Darüber hinaus erfolgte vor und nach dem Brandversuch eine Fotodokumentation der Probekörper. Außerdem wurde im Nachgang der Brandprüfung mit einem dünnen Draht die Schaumhöhe des RBS gemessen. Die Messungen erfolgten an ähnlichen Positionen wie die Bestimmung der TSD, siehe Abbildung 9. Bei den Probekörpern mit RVP wurde die Schaumhöhe sowohl auf den Bereichen mit gerader Oberfläche als auch im Kanten- bzw. Eckbereich gemessen, siehe Abbildung 17. Die Ergebnisse der Schaumhöhenmessungen sind in Tabelle 7 angegeben.

4.5 Ergebnisse und Empfehlungen

4.5.1 Brandraumtemperatur

Um die Leistung der beiden Ölbrenner zu steuern und dem Verlauf der ETK zu folgen, wurde die gemittelte Brandraumtemperatur aller in einem Brandversuch verwendeten BRT verwendet. Sofern einzelne BRT während der Brandversuchs kein oder ein falsches Signal gesendet haben, wurden diese von der Berechnung der gemittelten Brandraumtemperatur ausgeschlossen. Beispielhaft sind in Abbildung 11 die gemessenen Brandraumtemperaturen dargestellt. Bei allen durchgeführten Brandversuchen zeigten sowohl die einzelnen als auch die gemittelte Brandraumtemperaturen keine signifikante Abweichung von der vorgegebenen ETK, siehe Tabelle 5. Die maximale Temperaturdifferenz lag bei weniger als 50 K und nahm

mit zunehmender Prüfdauer ab. Damit wurden nicht nur die Grenzabweichungen nach EN1363-1 [17] erfüllt, sondern aufgrund der sehr geringen Temperaturunterschiede auch eine sehr gute Vergleichbarkeit für die getesteten Probekörper erreicht.

Tabelle 5: Maximale und minimale Temperaturunterschiede zwischen den Messwerten der BRTs und der vorgegebenen ETK.

Testpaket [-]	RBS [-]	Maximale / Minimale Temperaturunterschiede [K] zwischen den Messwerten der BRTs und der vorgegebenen ETK für verschiedene Zeitpunkte der Brandversuche									
		5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	45 min	
TP-A	I	102/-70	76/-31	65/-16	53/-17	55/-13	47/-9	50/-9	44/-14	34/-16	
	II	111/-24	84/-16	79/0	64/-6	47/-11	42/-8	43/-9	34/-14	26/-18	
TP-B	I	61/-35	72/-12	55/-12	48/-13	44/-11	37/-10	31/-6	22/-6	14/-7	
	II	99/9	60/2	47/6	28/-12	28/-11	21/-12	9/1	11/-2	-	
TP-C	I	65/-27	31/-29	34/-21	27/-23	21/-23	21/-23	17/-24	17/-22	12/-24	
	II	56/-43	46/-13	30/-17	15/-29	10/-34	17/-25	17/-20	26/-9	-	

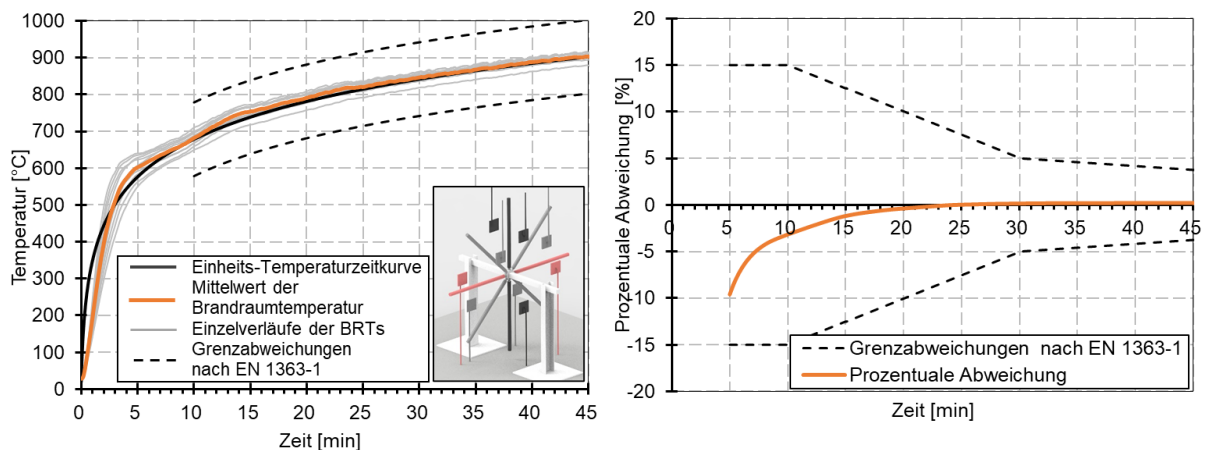


Abbildung 11: Brandraumtemperaturen und BRT-Anordnung für das TP-C mit dem RBS-I

4.5.2 Einfluss des Profilart

Der Einfluss der Profilart wurde durch eine Gegenüberstellung von Probekörpern mit KVP und RVP untersucht, d.h. unbelastete Probekörper aus TP-A sowie mechanisch belastete Zugglieder aus TP-A und TP-B. Dabei wurde beachtet, dass die Vergleiche nur auf Basis von gleichen TSD und einem identischem Profilfaktor erfolgen. Für beide Profilarten, d.h. KVP und RVP, war ein ähnliches Erwärmungsverhalten zu beobachten. In der Regel erwärmten sich die Probekörper mit KVP schneller als die Proben mit RVP. Besonders deutlich zeigt sich dies bei den getesteten mechanisch belasteten Zuggliedern, siehe Abbildung 13. Infolgedessen trat der Probenbruch beim Zugglied mit KVP etwa 10 Minuten früheres auf als beim Zugglied mit RVP. Ein Vergleich der Stahltemperatur sowie dem Zeitpunkt des Probenbruchs ist in Tabelle 6 angegeben.

In Abbildung 13 ist die Stablängsverformung der mechanisch belasteten Zugglieder dargestellt. Während des Brandversuchs steigt aufgrund der steigenden Stahltemperaturen auch die Längsverformung an. Der Probenbruch des Zuggliedes kündigt sich durch einen schnellen Anstieg der Stablängsverformung an, welcher auf große plastische Dehnungen im Einschnürungsbereich zurückzuführen ist, siehe Abbildung 12. Infolge der großen Stablängsverformung kommt es zu Querrissen im bereits aufgeschäumten RBS. Aufgrund des

gewählten Lastausnutzungsgrades im Brandfall ($\mu_{fi} = 0,65$) trat der Probenbruch bei einer Stahltemperatur von ca. 500 °C auf.



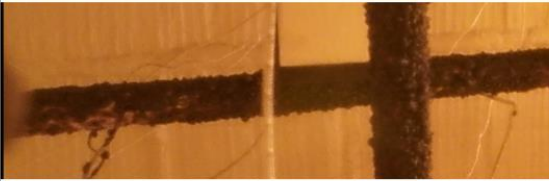











Zeit	Mechanisch belastetes Zugglied mit Kreisvollprofil (D=30 mm) und RBS-I (tatsächliche TSD = 1,85 mm)	Mechanisch belastetes Zugglied mit Rechteckvollprofil (b×h=30×30 mm ²) und RBS-I (tatsächliche TSD = 1,96 mm)
1 Minute		
5 Minuten		
10 Minuten		
20 Minuten		
30 Minuten		
Vor dem Probenbruch	 33 Minuten	 42 Minuten
Nach dem Probenbruch	 34 Minuten	 43 Minuten

Abbildung 12: Fotodokumentation der mechanisch belasteten Zugglieder mit KVP und RVP zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Brandversuchs

Dies deckt sich gut mit den Materialuntersuchungen in [14], in der die Abnahme der Stahlfestigkeit bei erhöhter Temperatur anhand von Materialzugversuchen untersucht wurde. Die getesteten Zugglieder mit KVP weisen zum Zeitpunkt des Probenbruchs eine geringere Stahltemperatur (bis zu 57 K) auf als die mit RVP. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die in den 3.1 Zertifikaten angegebenen sowie die ermittelten Stahlfestigkeiten von den tatsächlichen Werten der untersuchten Stahlzugglieder abweichen, was zu unterschiedlichen tatsächlich vorliegenden Lastausnutzungsgraden in den Versuchen führen würde. Bei gleichen

im Brandversuch vorliegenden tatsächlichen Lastausnutzungsgraden muss die Versagens-temperatur ebenfalls gleich sein. Ferner muss beachtet werden, dass die angegebene Probenbruchtemperatur nicht direkt an der Bruchstelle bestimmt wurde, sondern an der nächstgelegenen Messstelle (MS).

Tabelle 6: Vergleich der Stahltemperatur der getesteten mechanisch belasteten Zugglieder

Querschnitt [-]	Profilfaktor [m ⁻¹]	Tatsächliche TSD [mm]	Stahltemperatur zu verschiedenen Zeitpunkten des Brandversuchs [K]					Stahltemperatur zum Zeitpunkt des Probenbruchs [°C]	Zeitpunkt des Probenbruchs [min:sek]
			5 min	10 min	20 min	30 min	40 min		
RBS-I									
30x30 mm	133	2,53	131	188	265	382	487	521	44:30
D30 mm	133	2,47	146	207	313	454	-	495	34:42
RBS-II									
30x30 mm	133	1,96	153	218	297	399	504	528	42:48
D30 mm	133	1,85	169	232	320	434	-	471	33:06

Hinweis: Es handelt sich jeweils um die im Brandversuch aufgetretene maximale Stahltemperatur aus alle Messstellen.

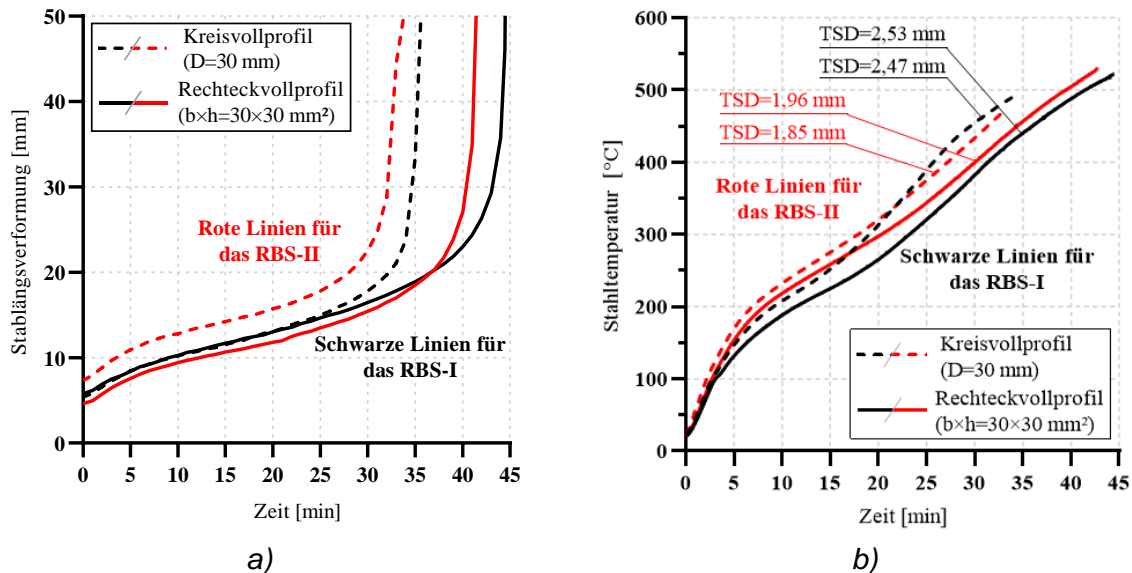


Abbildung 13: Vergleich der Messdaten für die getesteten mechanisch belasteten Zugglieder: a) Stablängsverformung; b) Stahltemperatur bis zum Probenbruch für die MS, die am nächsten zur Bruchstelle liegt

Die unbelasteten Probekörper aus dem TP-A bestätigen die schnellere Erwärmung der Stahlprofile mit KVP gegenüber den RVP, siehe Abbildung 14 und Abbildung 15. Um den Einfluss einer leicht unterschiedlichen TSD (siehe Tabelle 3) bei der Auswertung zu berücksichtigen, wurden die gemessenen Stahltemperaturen analog zu dem in EN 13381-8 [1] beschriebenen Verfahren (Anhang D) angepasst. Dabei wird die Zeit bis zum Erreichen einer bestimmten Stahltemperatur durch das Verhältnis der jeweiligen TSD korrigiert, siehe Gleichung (2).

$$t_{\text{angepasst},i} = t_i \cdot \frac{TSD_{\text{Referenz}}}{TSD_{\text{vorhanden},i}} \quad (2)$$

- TSD_{Referenz} Der Probekörper mit der höchsten TSD wird als Referenzprobe ausgewählt.
- $TSD_{\text{vorhanden},i}$ Die tatsächlich vorhandene TSD des zu korrigierenden Probekörpers.
- t_i Zeit bis zum Erreichen einer bestimmten Stahltemperatur des zu korrigierenden Probekörpers.
- $t_{\text{angepasst},i}$ Angepasster Zeitwert des Probekörpers mit geringerer TSD im Vergleich zur Referenzprobe.

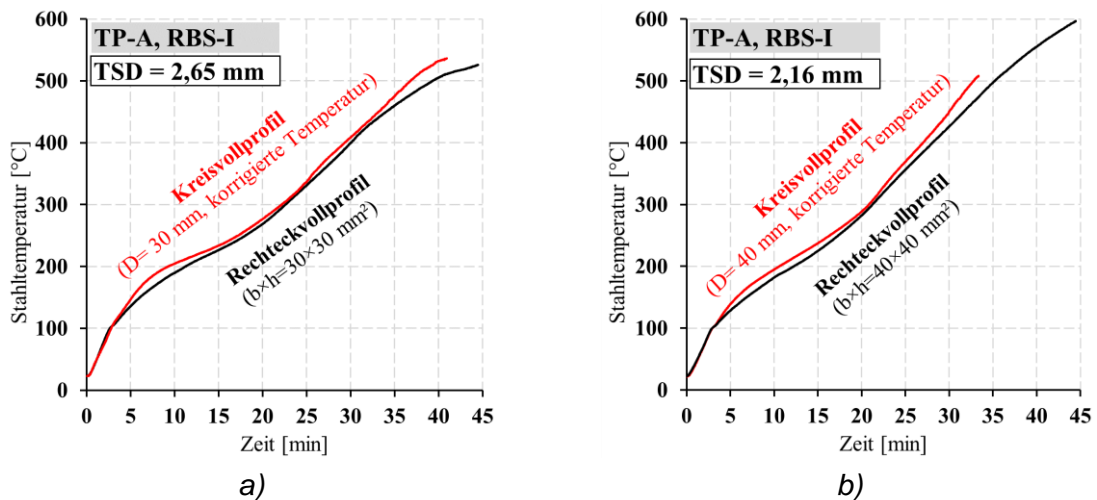


Abbildung 14: Vergleich des Einflusses verschiedener Stahlprofiltypen auf den maximal gemessenen Stahltemperaturverlauf der unbelasteten Probekörper (TP-A mit RBS-I): a) Probekörper mit einem Querschnitt von 30 mm; b) Probekörper mit einem Querschnitt von 40 mm. (Hinweis: Am Ende des Brandversuchs versagten an dem Probekörper mit KVP mehrere Thermoelemente, weshalb die Temperaturmessungen früher endet.)

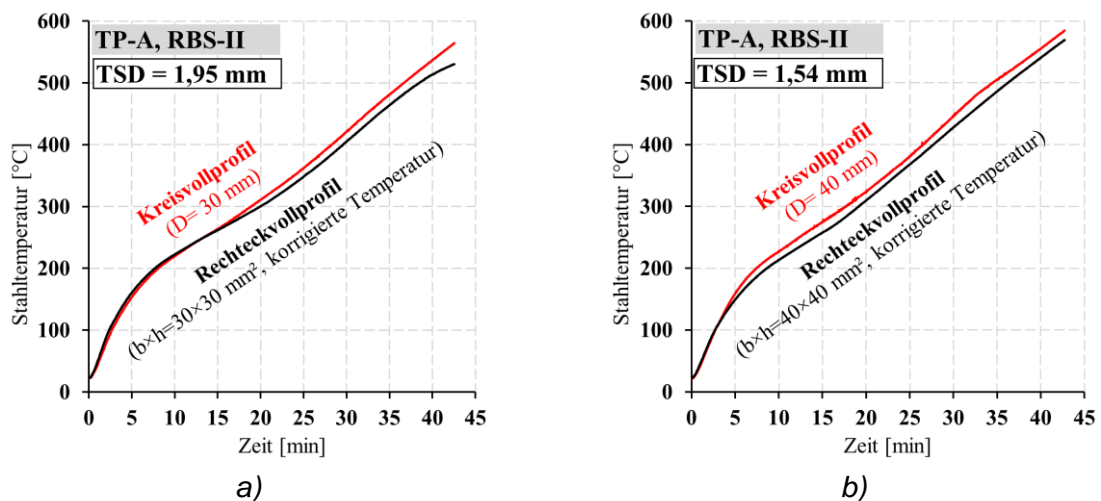


Abbildung 15: Vergleich des Einflusses verschiedener Stahlprofiltypen auf den maximal gemessenen Stahltemperaturverlauf der getesteten unbelasteten Probekörper (TP-A mit RBS-II): a) Probekörper mit einem Querschnitt von 30 mm; b) Probekörper mit einem Querschnitt von 40 mm.

Neben den gemessenen Stahltemperaturen wurde auch der Einfluss des Stahlprofiltyps auf das Aufschäumverhalten des RBS untersucht. Hierzu wurde die Schaumhöhe des RBS nach den Brandversuchen an allen Probekörpern mittels eines dünnen Drahtes gemessen. In Stablängsrichtung zeigte sich eine nahezu gleichmäßige Schaumhöhe bei den getesteten Probekörpern, siehe Abbildung 16. Bei den Probekörpern mit RVP wurde an den Bauteilkanten, d.h. Eckbereichen, eine um ca. 30 % geringere Schaumhöhe als in den Bereichen mit glatter Oberfläche festgestellt, siehe Abbildung 17 und Tabelle 7. Auch bei den Probekörpern mit KVP waren vereinzelt Bereiche mit reduzierter Schaumhöhe vorhanden. Dies ist auf die Bildung von Längsrissen infolge des Aufschäumvorgangs zurückzuführen.

Tabelle 7: Schaumhöhe des RBS nach dem Brandversuch

Querschnitt	TSD [mm]	Position der Messpunkte ¹⁾								Mittelwerte		Schaumhöhenreduzierung ²⁾ [%]
		ebene Bauteilflächen				Kanten des RVP				t ₁ -t ₄ [mm]	t _a -t _d [mm]	
		t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t _a	t _b	t _c	t _d			
Mechanisch belastete Zugglieder: RBS-I												
30x30 mm	2,53	13,4	13,0	15,4	16,5	8,2	11,1	7,3	9,3	14,6	9,0	38,4
D30 mm	2,47	9,7	20,2	20,0	16,4	-	-	-	-	16,6	-	-
Mechanisch belastete Zugglieder: RBS-II												
30x30 mm	1,96	15,8	14,9	11,6	13,9	11,3	7,9	8,1	9,3	14,1	9,2	34,7
D30 mm	1,85	14,8	12,6	12,6	14,4	-	-	-	-	13,6	-	-
Unbelastete horizontale Probekörper (TP-A): RBS-I												
30x30 mm	2,65	18,7	18,0	17,7	18,7	13,7	11,0	6,5	11,7	18,3	10,7	41,3
D30 mm	2,26	20,0	16,0	17,3	13,7	-	-	-	-	16,8	-	-
40x40 mm	2,16	22,7	19,7	0,0*	24,7	14,7	0,0*	28,7	14,0	22,4	19,1	14,7
D40 mm	2,10	11,7	16,0	11,7	15,0	-	-	-	-	14,3	-	-
Unbelastete horizontale Probekörper (TP-A): RBS-II												
30x30 mm	1,89	19,7	17,7	12,3	19,0	12,3	9,3	9,0	13,0	17,2	10,9	36,4
D30 mm	1,95	21,3	21,0	7,3	15,0	-	-	-	-	16,2	-	-
40x40 mm	1,44	18,0	11,3	13,7	20,3	11,7	4,0*	14,0	8,0	15,8	11,2	29,2
D40 mm	1,54	20,7	0,0*	24,3	16,7	-	-	-	-	20,6	-	-
Unbelastete vertikale Probekörper (TP-B): RBS-I												
D30 mm	2,35	16,4	18,2	14,0	16,8	-	-	-	-	17,2	-	-
D40 mm	2,41	15,6	17,0	10,6	10,8	-	-	-	-	13,5	-	-
Unbelastete vertikale Probekörper (TP-B): RBS-II												
D30 mm	1,85	17,8	15,0	18,2	15,0	-	-	-	-	16,5	-	-
D40 mm	1,48	21,3	0,0*	26,8	19,5	-	-	-	-	22,5	-	-
Unbelastete horizontale Probekörper (TP-B): RBS-I												
D30 mm	2,54	17,8	17,4	15,2	13,8	-	-	-	-	16,1	-	-
D40 mm	2,56	10,8	15,0	17,2	16,2	-	-	-	-	14,8	-	-
Unbelastete horizontale Probekörper (TP-B): RBS-II												
D30 mm	1,88	16,3	18,8	10,6	19,5	-	-	-	-	16,3	-	-
D40 mm	1,44	22,4	0,0*	17,4	23,0	-	-	-	-	20,9	-	-

Hinweis:

¹⁾ Die Schaumhöhe wurde an den Messpunkten entsprechend Abbildung 9 ermittelt.

²⁾ Die Schaumhöhenreduzierung wurde auf Basis der prozentualen Differenz zwischen den mittleren Schaumhöhen im Bereich der ebenen Oberflächen der Probekörper mit RVP (Mittelwerte von t₁ bis t₄) und der mittleren Schaumhöhe im Eckbereich der Probekörper mit RVP (Mittelwerte von t_a bis t_d) berechnet.

* Während des Brandversuchs hat sich ein tiefer Längsriss im RBS gebildet. Die in diesem Bereich gemessenen Werte wurde nicht in die Berechnung der mittleren Schaumhöhe einbezogen.

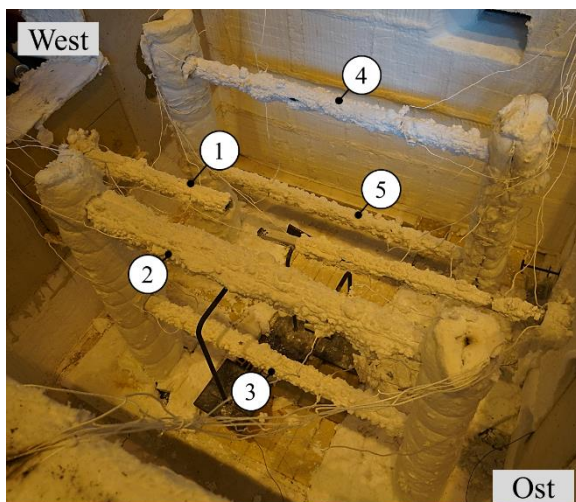


Abbildung 16: In den Zugbauteilprüföfen eingebaute Probekörper (TP-A mit RBS-I) nach dem Brandversuch (1 – belastetes Zugglied mit RVP 30x30 mm; 2 – unbelasteter Probekörper mit RVP 40x40 mm; 3 – unbelasteter Probekörper mit RVP 30x30 mm; 4 – unbelasteter Probekörper mit KVP D40 mm; 5 – unbelasteter Probekörper mit KVP D30 mm)

Da bei gleichem Profilmfaktor sowie gleicher TSD die beiden getesteten RBS auf den Probekörpern mit RVP eine bessere thermische Schutzleistung gezeigt haben als auf den Probekörpern mit KVP, wurde für die zu entwickelnde neue Prüfnorm [23] vorgeschlagen, dass die Prüfergebnisse von Zuggliedern mit KVP ohne zusätzliche Brandversuche auf entsprechende Bauteile mit RVP übertragen werden können. Hierbei muss beachtet werden, dass die Zugglieder mit RVP hinsichtlich des Querschnittes mindestens genau so groß sind, wie die KVP und auch der Wert des Profilmfaktors die des KVP nicht übersteigt, siehe Kapitel 5.

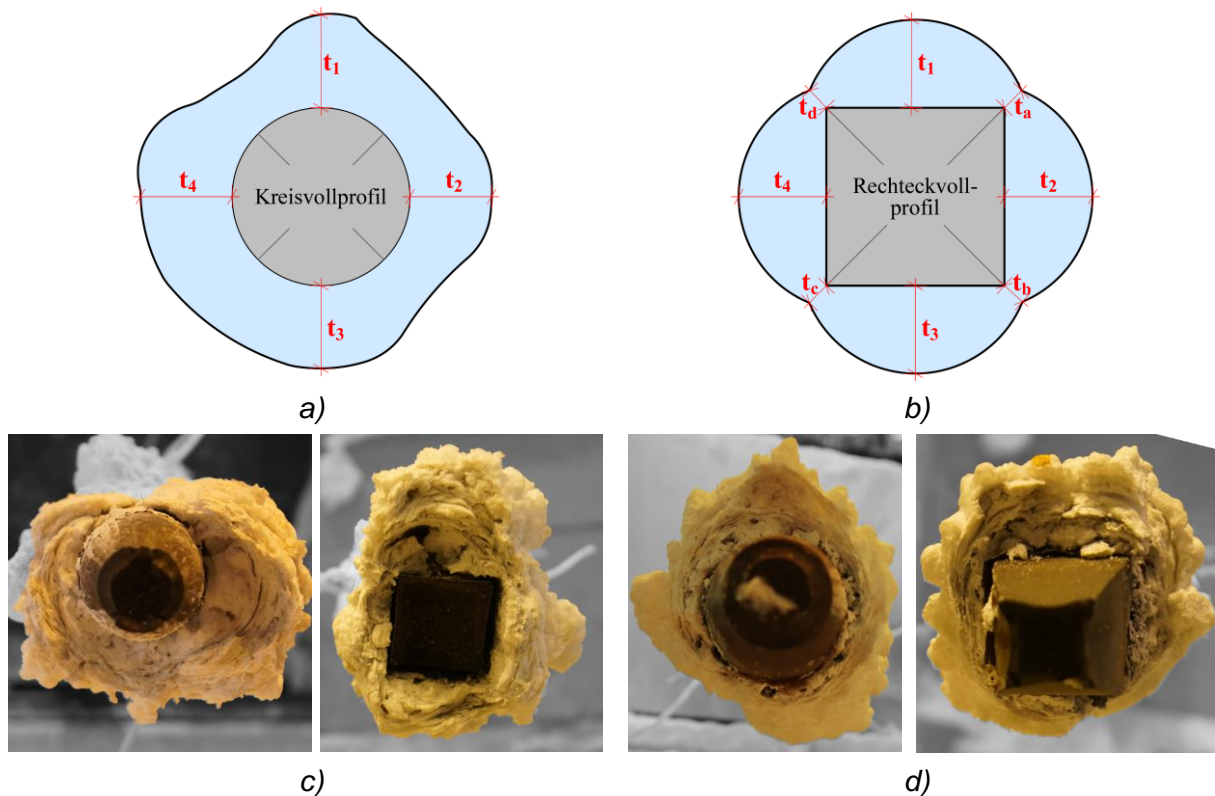


Abbildung 17: Querschnitt der mechanisch belasteten Stahlzugglieder mit RBS nach dem Brandversuch c) – RBS-I und d) – RBS-II sowie schematische Darstellung der Messpunkte für die Schaumhöhe a) und b)

4.5.3 Einfluss der Bauteilorientierung

Für die Beurteilung des Einflusses der Bauteilorientierung auf die Leistungsfähigkeit von RBS wurden die getesteten unbelasteten Probekörper mit KVP aus dem TP-B und TP-C ausgewertet. Im TP-B wurden zwei verschiedene TSD und zwei Stabdurchmesser untersucht. Die Ergebnisse in Abbildung 19 zeigen, dass sich die thermische Schutzwirkung bei beiden getesteten RBS zwischen horizontaler und vertikaler Bauteilorientierung kaum unterscheidet. Um die vorhandenen Unterschiede in der tatsächlich vorhandenen TSD beim Vergleich der Probekörper zu berücksichtigen, wurde die gemessenen Stahltemperaturverläufe analog zu dem in EN 13381-8 [1] beschriebenen Verfahren (Anhang D) angepasst. Eine detaillierte Beschreibung findet sich in Abschnitt 4.5.2. Im Hinblick auf die Bildung von Längsrisen im Schaum des RBS hat sich gezeigt, dass diese sowohl bei horizontaler als auch vertikaler Bauteilorientierung auftreten können, wodurch die thermische Schutzwirkung in der Regel erheblich reduziert wird. Welche der beiden getesteten Bauteilorientierungen sich in Bezug auf die Rissbildung kritischer verhält, muss für jedes RBS anhand von Brandprüfungen ermittelt werden. So zeigten die in vertikaler und horizontaler Bauteilorientierung getesteten Probe-

körper mit KVP D30 mm keine Längsrissbildung, wohingegen die im gleichen Brandversuch getesteten Probekörper mit KVP D40 mm einen breiten Längsriss aufwiesen, siehe Abbildung 18. Allerdings muss beachtet werden, dass sich die Probekörper in TP-B vergleichsweise nahe an den Austrittsöffnungen der Ölbrenner befanden, weshalb eine hieraus bedingte Beeinflussung des Aufschäumverhaltens nicht ausgeschlossen werden kann.

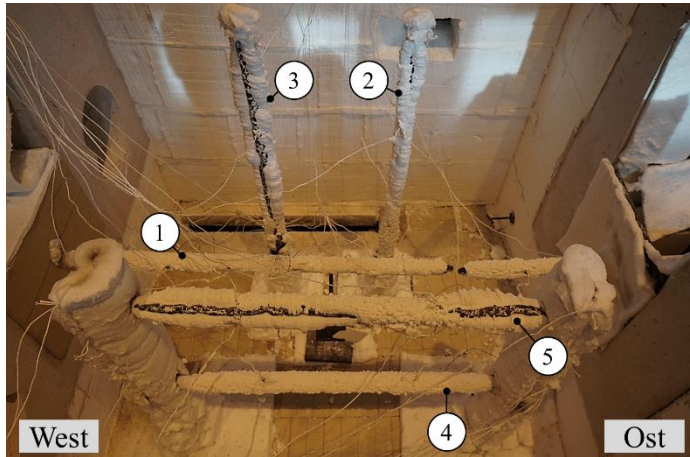
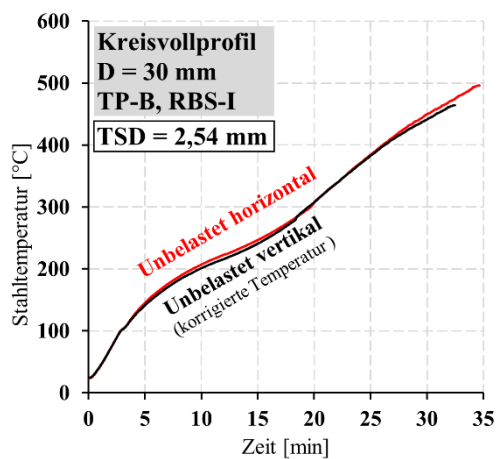
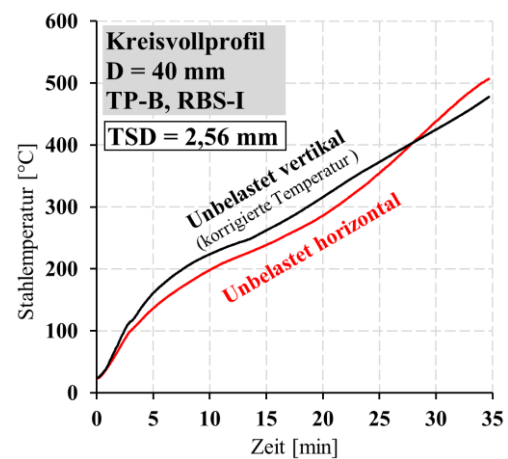


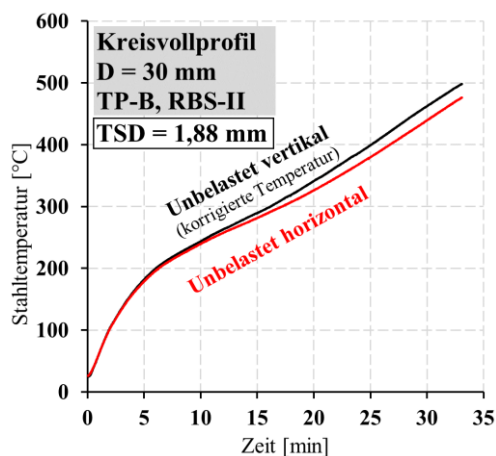
Abbildung 18: In den Zugbauteilprüföfen eingebaute Probekörper (TP-B mit RBS-II) nach dem Brandversuch (1 – belastetes Zugglied mit KVP D30 mm; 2 – unbelasteter vertikaler Probekörper mit KVP D30 mm; 3 – unbelasteter vertikaler Probekörper mit KVP 40 mm; 4 – unbelasteter horizontaler Probekörper mit KVP D30 mm; 5 – unbelasteter horizontaler Probekörper mit KVP D40 mm)



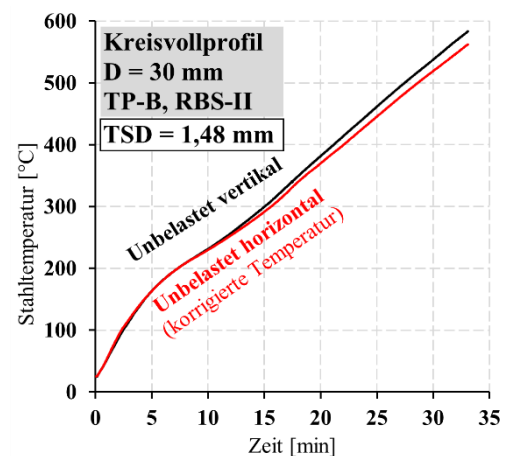
a)



b)



c)



d)

Abbildung 19: Vergleich des Einflusses der Bauteilorientierung auf den maximalen gemessenen Stahltemperaturverlauf der in TP-B getesteten unbelasteten Probekörper: (a) Probekörper mit KVP D30 mm und RBS-I; (b) Probekörper mit KVP D40 mm und RBS-I; (c) Probekörper mit KVP D30 mm und RBS-II; (d) Probekörper mit KVP D40 mm und RBS-II.

Im TP-C wurde zur Untersuchung des Einflusses der Bauteilorientierung auf die thermische Schutzwirkung von RBS ein spezieller Probekörper, bestehend aus acht unbelasteten Einzelstäben mit KVP D30 mm, getestet. Neben der horizontalen und vertikalen Stabausrichtung wurden auch eine Stabneigung 45° untersucht. Um möglichst vergleichbare Versuchsbedingungen zu erzielen, d.h. gleichmäßige Brandeinwirkung und Brandraumtemperatur, wurde der Probekörper parallel zu den Brennerachsen in der Mitte des Zugbauteilprüfofens angeordnet. Ferner wurde zur Verbesserung der Auswertbarkeit der Prüfergebnisse ein möglichst kompakter Aufbau des Probekörpers gewählt, bei dem alle Einzelstäbe über eine zentrale Befestigungsplatte miteinander verbunden sind, siehe Abbildung 7. Dadurch liegen alle Messpunkte zur Bestimmung der Stahltemperaturen der Einzelstäbe in einem Radius von 350 mm vom Prüfkörpermittelpunkt.

Die gemessenen Stahltemperaturen sind in Abbildung 20a (RBS-I) und Abbildung 20c (RBS-II) dargestellt. Es handelt sich hierbei jeweils um den gemittelten Stahltemperaturverlauf einer Messstation. Ferner wurden die Temperaturkurven der Einzelstäbe im Hinblick auf die tatsächlich vorhandenen TSD entsprechend des in EN 13381-8 [1] beschriebenen Verfahren (Anhang D) angepasst. In Tabelle 8 ist die gemittelte Stahltemperatur für jede getestete Staborientierung zu verschiedenen Zeiten des Brandversuchs angegeben.

Tabelle 8: Vergleich der für jede Bauteilorientierung gemittelten Stahltemperaturen des TP-C

Time	RBS-I			RBS-II		
	Stahltemperatur für die horizontale Referenzorientierung ¹⁾ [°C]	Berechnete Temperaturabweichung zur Referenzorientierung [K]		Stahltemperatur für die horizontale Referenzorientierung ¹⁾ [°C]	Berechnete Temperaturabweichung zur Referenzorientierung [K]	
		Horizontal	Vertikal		45° geneigt	Horizontal
[min]						
5	144	-8	-9	156	+9	+7
10	200	-3	-6	225	+6	+5
15	235	-5	-4	269	+15	+8
20	278	-8	-3	312	+26	+12
25	334	-14	-7	362	+38	+16
30	388	-15	-9	416	+51	+21
35	430	-11	+4	474	+55	+24
40	462	-3	+6	532	+56	+20
45	498	+3	+5	-	-	-

¹⁾ Die Stahltemperatur der horizontal getesteten Einzelstäbe wurde als Referenz ausgewählt, weil diese Bauteilorientierung auch für die mechanisch belasteten Zugglieder getestet wurde.

Legende:

“-“ Langsamere Erwärmung im Vergleich zu den Einzelstäben mit horizontaler Bauteilorientierung.

+“ Langsamere Erwärmung im Vergleich zu den Einzelstäben mit horizontaler Bauteilorientierung.

Aufgrund der zentralen Position des im TP-C getesteten Probekörpers im Brandraum sowie dem kompakten Probekörperaufbau konnten die Unterschiede zwischen den gemessenen Brandraumtemperaturen und der ETK deutlich reduziert werden, siehe Tabelle 5. Dies bietet eine hervorragende Grundlage, um die gemessenen Stahltemperaturen der Einzelstäbe hinsichtlich der verschiedenen Bauteilorientierungen zu vergleichen. Da die Brandversuche an den mechanisch belasteten Zuggliedern in horizontaler Bauteilorientierung erfolgten, wurde diese Stabausrichtung auch als Referenz für den Vergleich der unbelasteten Einzelstäbe im TP-C ausgewählt. Wie bereits bei den Probekörpern des TP-B hatten auch im TP-C die unterschiedlichen Bauteilorientierungen nur einen geringen Einfluss auf die thermische Schutzwirkung der beiden getesteten RBS. Sofern kein Längsriss im Schaumkörper des RBS auftritt bzw. dieser im Verlauf des Brandversuchs wieder zuschäumt, sind die Stahl-

temperaturen der in 45° geneigter und vertikaler Bauteilorientierung getesteten Einzelstäbe mit denen in horizontaler Stabausrichtung vergleichbar, siehe RBS-I in Tabelle 8. Im Fall des RBS-II bildete sich an einem der vertikalen Einzelstäbe ein großer Längsriss im Schaum aus, wodurch die thermische Schutzwirkung deutlich abnahm und daraus ein schneller Anstieg der Stahltemperatur resultierte, siehe Abbildung 20 und Tabelle 8.

Im Allgemeinen ist es schwierig, die Rissneigung und ihre Auswirkung auf die thermische Schutzwirkung des RBS vorherzusagen. Die Bildung von Längsrissen ist abhängig vom Produkt selbst und verschiedenen weiteren Faktoren, wie der Geometrie des Stahlprofils, der aufgetragenen TSD, der Art der mechanischen Beanspruchung und dem Lastausnutzungsgrad im Brandfall sowie der Bauteilorientierung. Daher muss geprüft werden, ob ein RBS von unterschiedlichen Bauteilorientierungen eher unbeeinflusst bleibt oder ob hieraus eine Reduzierung der thermischen Schutzwirkung resultiert. Diese Überprüfung kann anhand eines Brandversuchs analog zu dem im TP-C getesteten unbelasteten Probekörper erfolgen. Dieser Vorschlag wurde in den Entwurf der neuen Prüfnorm [23] aufgenommen, siehe Abschnitt 4.7.

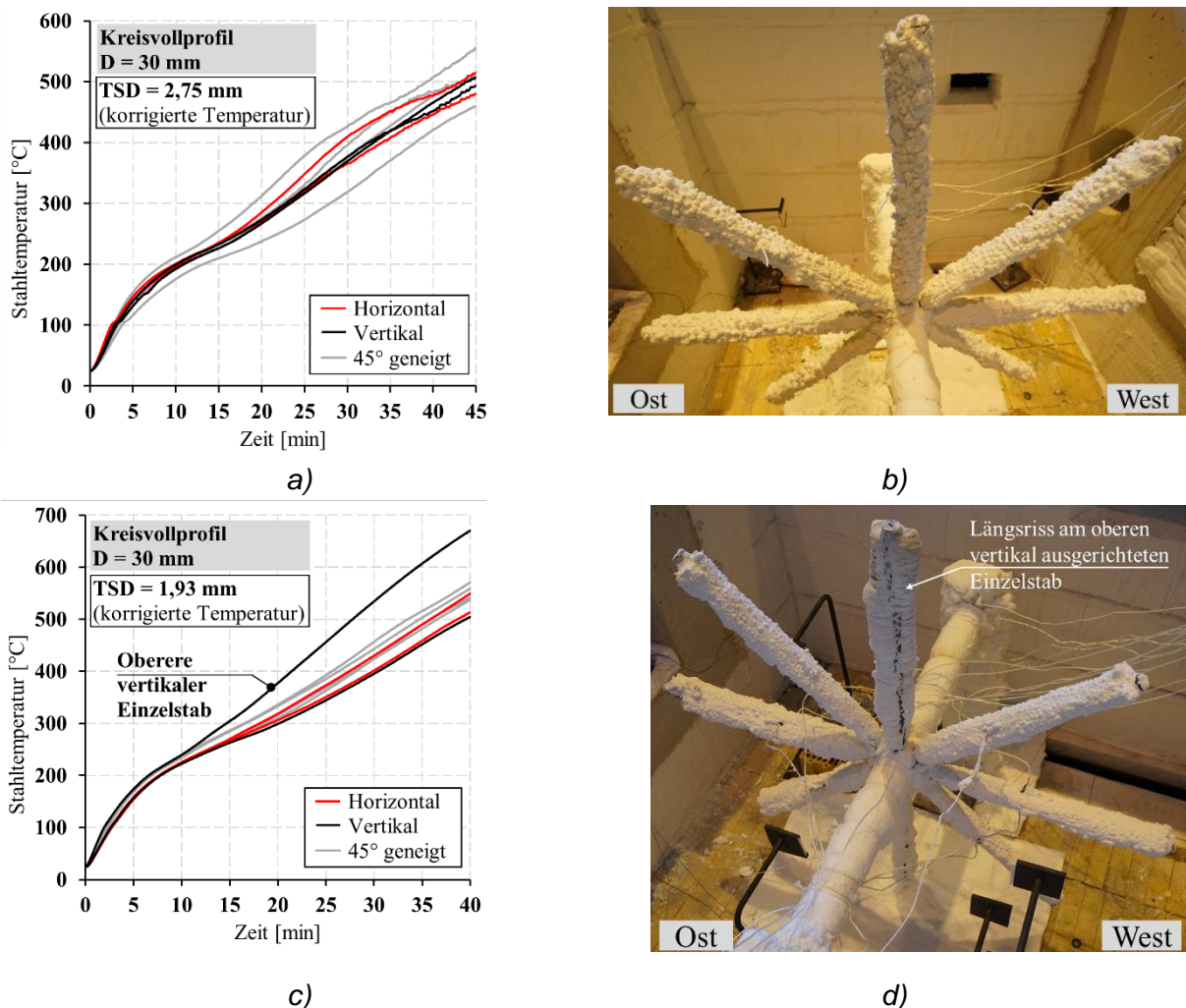


Abbildung 20: Vergleich der für jeden Einzelstab gemittelten Stahltemperaturen aus dem TP-C: a) Temperaturverlauf für die Einzelstäbe mit KVP D30 mm und RBS-I; b) Probekörper nach dem Brandversuch; c) Temperaturverlauf für die Einzelstäbe mit KVP D30 mm und RBS-II; d) Probekörper nach dem Brandversuch mit Blick auf den Längsriss des oberen vertikalen ausgerichteten Einzelstab

4.6 Brandversuch zum Anwenderworkshop

Im Rahmen des am 6. September 2022 an der BAM durchgeführten Anwenderworkshops wurde zu Demonstrationszwecken ein weiteres mechanisch belastetes Stahlzugglied mit RBS getestet. Es handelte sich um ein KVP mit einem Stabdurchmesser von 40 mm. Der Aufbau und die Durchführung des Brandversuchs sowie die Maße des Bauteils sind identisch mit den im TP-B getesteten mechanisch belasteten Probekörper mit KVP. Für das beim Anwenderworkshop getestete Zugglied wurde kaltverformter Stahl der Festigkeitsklasse S355 J2C +C verwendet. Laut 3.1 Zeugnis besitzt der verwendete Stahl eine tatsächliche 0,2%-Dehngrenze ($f_{p0,2}$) von 632 N/mm² und eine Zugfestigkeit (f_u) von 651 N/mm². Mit einem Lastausnutzungsgrad im Brandfall von $\mu_{fi} = 0,65$ ergibt sich eine Prüflast von 516 kN. Das Stahlzugglied wurde mit dem RBS-II beschichtet. Der Mittelwert der tatsächlich applizierten TSD von 1,68 mm basiert auf einer angestrebten Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten bei einer Bemessungstemperatur von 500 °C. Im Anhang des Forschungsberichtes, d.h. Kapitel 9.3, finden sich Bilder des Versuchsaufbaus, des Aufschäumverhaltens des RBS während des Brandversuchs sowie die gemessenen Stablängsverformungen und Temperaturen. Es zeigte sich ein gleichmäßiges Aufschäumverhalten des RBS entlang der Stabachse. Der Probenbruch ereignete sich in der 33. Minute des Brandversuchs in der Nähe der westlichen Brandraumwand. Das Versagen des Bauteils an dieser Stelle ist auf einen lokalen Längsriss im Schaumkörper auf der Stabunterseite zurückzuführen, wodurch die Stahltemperaturen dort schneller angestiegen sind als in anderen Stabbereichen. Die Teilnehmer des Workshops haben mit großem Interesse den Brandversuch verfolgt und einen eingehenden Einblick in die Prüfung von Stahlzuggliedern mit RBS erhalten.

Um die Genauigkeit der Schichtdickenmessung auf Bauteilen mit kreisrundem Querschnitt beurteilen zu können, hat die BAM an dem beim Anwenderworkshop getesteten Stahlzugglied mit KVP mehrere Vergleichsmessungen durchgeführt. Hierfür wurde das bereits an der BAM vorhandene Messgerät Deltascope MP30E-S mit der Sonde EGB2 sowie das im Rahmen des Forschungsprojektes neu beschaffte Dualscope FMP40 mit der Sonde FA14 verwendet. Beide Sonden sind kalibriert und besitzen einen Messbereich von 0 bis 5 mm. Die Beschichtungsdicke, d.h. Grundierung mit intumeszierendem Anstrich, wurde mit jedem Gerät an vier entlang der Stablänge ausgewählten Messstationen mit jeweils vier gleichmäßig in Stabumfangsrichtung angeordneten Messpunkten ermittelt. Die Messungen wurden jeweils dreimal durchgeführt, d.h. Messreihe A bis C. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 9 angegeben. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass beide Messgeräte in der Lage sind, auch auf kreisrunden Querschnitten die Beschichtungsdicke mit hoher Genauigkeit zu bestimmen. Bei beiden Messgeräten sind die Unterschiede der Messreihen in der Regel kleiner als 0,1 mm. Die Ursachen für die Abweichungen sind jedoch weniger auf das Messgerät selbst, sondern vielmehr auf die aus dem Pinselauftrag resultierende Rauigkeit der RBS-Oberfläche und mögliche Schiefstellungen beim Auflegen der Sonde auf dem Probekörper zurückzuführen. Mit dem kleinen Messkopf der EGB2 und EKB10 Sonde lässt sich im Allgemeinen ein vollflächiger Kontakt zur Probekörperoberfläche herstellen. Allerdings ist es dadurch auch schwieriger die Sonde rechtwinklig zur Oberfläche auszurichten. Der größere Messkopf der FA14 Sonde lässt sich bei gekrümmten Oberflächen nicht vollflächig auflegen, wodurch nur ein teilweiser Kontakt mit dem Probekörper besteht. Dadurch ist es möglich die Sonde leicht zu kippen, was den Messwert um etwa $\pm 0,05$ mm verändert. Anhand der exemplarisch ermittelten Messwerte wird deutlich, dass die Beschichtungsdicke des RBS auf dem Probekörper deutlich größeren Streuungen unterworfen ist als die Unterschiede, welche sich aufgrund des eingesetzten Messgerätes ergeben.

Table 9: Vergleich der gemessenen Beschichtungsdicken

Messstation	Messreihe	Deltascope MP30E-S mit Sonde EGB2				Dualscope FMP40 mit Sonde FA14				Beschichtungsdifferenz Deltascope – Dualscope			
		t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄
[-]	[-]	[mm]				[mm]				[mm]			
1	A	1,61	1,70	1,25	1,10	1,66	1,73	1,38	1,04	-0,05	-0,03	-0,13	0,06
2		1,60	1,41	1,54	1,72	1,70	1,54	1,55	1,74	-0,10	-0,13	-0,01	-0,02
3		1,81	1,85	1,58	1,91	1,91	1,92	1,75	2,18	-0,10	-0,07	-0,17	-0,27
4		1,37	1,28	1,86	0,90	1,58	1,60	2,10	1,11	-0,21	-0,32	-0,24	-0,21
1	B	1,64	1,62	1,22	1,05	1,71	1,55	1,37	1,07	-0,07	0,07	-0,15	-0,02
2		1,61	1,48	1,49	1,71	1,68	1,55	1,56	1,76	-0,07	-0,07	-0,07	-0,05
3		1,80	1,84	1,61	1,92	1,96	1,92	1,77	2,13	-0,16	-0,08	-0,16	-0,21
4		1,44	1,37	1,85	0,89	1,5	1,6	2,06	1,06	-0,06	-0,23	-0,21	-0,17
1	C	1,59	1,69	1,26	1,01	1,69	1,69	1,29	1,15	-0,10	0,00	-0,03	-0,14
2		1,60	1,51	1,52	1,69	1,65	1,42	1,37	1,69	-0,05	0,09	0,15	0,00
3		1,82	1,86	1,62	1,93	1,9	1,8	1,76	1,99	-0,08	0,06	-0,14	-0,06
4		1,43	1,23	1,86	0,90	1,52	1,58	1,98	1,05	-0,09	-0,35	-0,12	-0,15

Messstation	Messreihe	Deltascope MP30E-S mit Sonde EKB10				Dualscope FMP40 mit Sonde FA14				Beschichtungsdifferenz Deltascope – Dualscope			
		t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄
[-]	[-]	[mm]				[mm]				[mm]			
1	A	1,64	1,69	1,25	1,01	1,66	1,73	1,38	1,04	-0,02	-0,04	-0,13	-0,03
2		1,62	1,45	1,49	1,72	1,70	1,54	1,55	1,74	-0,08	-0,09	-0,06	-0,02
3		1,78	1,95	1,51	2,00	1,91	1,92	1,75	2,18	-0,13	0,03	-0,24	-0,18
4		1,32	1,50	1,80	0,85	1,58	1,60	2,10	1,11	-0,26	-0,10	-0,30	-0,26
1	B	1,65	1,68	1,22	1,04	1,71	1,55	1,37	1,07	-0,06	0,13	-0,15	-0,03
2		1,62	1,57	1,43	1,72	1,68	1,55	1,56	1,76	-0,06	0,02	-0,13	-0,04
3		1,73	1,94	1,63	2,02	1,96	1,92	1,77	2,13	-0,23	0,02	-0,14	-0,11
4		1,33	1,48	1,87	0,79	1,5	1,6	2,06	1,06	-0,17	-0,12	-0,19	-0,27
1	C	1,65	1,63	1,24	1,04	1,69	1,69	1,29	1,15	-0,04	-0,06	-0,05	-0,11
2		1,66	1,51	1,41	1,74	1,65	1,42	1,37	1,69	0,01	0,09	0,04	0,05
3		1,76	1,99	1,70	2,03	1,9	1,8	1,76	1,99	-0,14	0,19	-0,06	0,04
4		1,28	1,54	1,92	0,84	1,52	1,58	1,98	1,05	-0,24	-0,04	-0,06	-0,21

4.7 Empfehlungen für eine neue Prüfnorm

Die Ergebnisse aus den durchgeführten realmaßstäblichen Brandversuchen werden dazu verwendet, um einen Entwurf für eine neue europäische Prüfnorm zu entwickeln [23]. Dieses neue Dokument beschreibt Prüf- und Bewertungsverfahren zur Bestimmung des Beitrags von RBS zum Feuerwiderstand von Stahlvollprofilen unter Zugbeanspruchung auf der Grundlage von mechanisch belasteten Brandversuchen. Für den Entwurf der Prüfnorm werden nachfolgende Empfehlungen vorgeschlagen:

- Hinsichtlich des Stahlprofiltyps wird empfohlen, dass die Ergebnisse von mechanisch belasteten Zuggliedern mit KVP ohne zusätzliche Brandversuche auf entsprechende Zugglieder mit RVP übertragen werden können. Diese Regelung gilt nicht in umgekehrter Richtung. Weiterhin ist zu beachten, dass der Profilmfaktor bzw. die Querschnittsgröße, die applizierte TSD, die Bauteilorientierung sowie die Lastausnutzung im Brandfall identisch sein müssen. Da es sich bei der vorgeschlagenen Regel um eine Vereinfachung handelt, die die bessere thermische Schutzwirkung auf Zuggliedern mit RVP vernachlässigt, besteht auch die Möglichkeit, für diesen Profiltyp eigene Brandversuche durchzuführen und die Ergebnisse in eine separate Bewertung einzubeziehen.

- Im Hinblick auf die Bauteilorientierung wird vorgeschlagen, das thermische Verhalten des RBS durch zusätzliche Brandversuche mit unbelasteten Probekörpern zu bewerten. Hierfür ist ein spezieller Probekörper nach TP-C zu verwenden. Zum einen können hierdurch vergleichbare Prüfbedingungen sichergestellt werden und zum anderen wird der Prüfaufwand durch das gleichzeitige Prüfen von acht identischen unbelasteten Einzelstäben in drei verschiedenen Bauteilorientierungen, d.h. horizontaler, vertikaler und 45° geneigter Anordnung, auf ein Minimum reduziert. Sofern die Differenz der Stahltemperatur zwischen den horizontal angeordneten unbelasteten Einzelstäben und den 45° geneigten bzw. vertikal ausgerichteten Einzelstäben weniger als 50 K beträgt, können die Ergebnisse der in horizontaler Position getesteten mechanisch belasteten Zugglieder auf alle anderen Bauteilorientierungen übertragen werden. Andernfalls ist eine Anpassung erforderlich, um die reduzierte thermische Schutzwirkung des RBS zu berücksichtigen, die sich aus der von der horizontalen Ausrichtung abweichenden Bauteilorientierung ergibt. Hierzu wurde ein entsprechendes Berechnungsverfahren vorgeschlagen. Dabei werden im Auswerteverfahren die gemessenen Stahltemperaturen der in horizontaler Position geprüften mechanisch belasteten Zugglieder erhöht, wodurch sich höhere TSD für den Einsatz des getesteten RBS für andere Bauteilorientierungen ergeben.

4.8 Zusammenfassung der Untersuchungen im AP 2

In [7], [8] und [11] wurde die thermische Schutzwirkung von RBS und deren Beitrag zum Feuerwiderstand von Stahlzugstäben mit Vollprofil untersucht. Die im AP 2 vorgestellten Arbeiten dienen als Ergänzung zu den oben genannten Untersuchungen und konzentrieren sich insbesondere auf den Einfluss des **Profiltyps** sowie der **Bauteilorientierung**. Zwei konventionelle Brandschutzbeschichtungen auf Wasserbasis (RBS-I und RBS-II) wurden mit unterschiedlichen TSD auf zwei verschiedene Stahlprofiltypen (KVP und RVP) aufgetragen und auf zwei verschiedenen Querschnitten (30 mm und 40 mm) getestet. Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem AP 2 lassen sich in den folgenden Punkten zusammenfassen:

1. Der Einfluss des **Profiltyps** auf die thermische Schutzwirkung von RBS wurde anhand von Brandversuchen an mechanisch belasteten und unbelasteten Probekörpern mit KVP und RVP untersucht. Für beide Profiltypen wurden Probekörper mit identischen Profilmassfaktor und der gleichen TSD getestet. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich die Probekörper mit KVP schneller erwärmen als vergleichbare Probekörper mit RVP, was durch eine lokal reduzierte Schaumhöhe sowie die Bildung von Längsrissen während des Aufschäumvorgangs erklärt werden kann. Die Probekörper mit RVP zeigten im Allgemeinen eine gleichmäßige Schaumhöhe im Bereich der ebenen Bauteiloberflächen. An den Querschnittskanten bzw. -ecken ist die Schaumhöhe meist um ca. 30 % reduziert. In der Regel kann bei einer Erhöhung der Querschnittsgröße infolge des sich damit verringenden Profilmassfaktors eine Reduktion der TSD vorgenommen werden. Dies hat für sich genommen noch keine Erhöhung der Stahltemperatur zur Folge. Allerdings erhöht eine geringere TSD die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Längsrissen und verringert die Möglichkeit des Zuschäumens eines entstehenden Risses, d.h. Rissheilungsvermögen [8], wodurch die thermische Schutzwirkung des RBS abnimmt. Aufgrund der besseren Leistungsfähigkeit der beiden geprüften RBS auf den Probekörpern mit RVP wird für den Entwurf der neuen Prüfnorm [23] vorgeschlagen, dass die Prüfergebnisse von Zuggliedern mit KVP ohne zusätzliche Brandversuche auf entsprechende Zugglieder mit RVP übertragen werden können.

2. Der Einfluss der **Bauteilorientierung** auf die thermische Schutzwirkung von RBS wurde anhand von unbelasteten Probekörpern mit KVP bei horizontaler, vertikaler und 45° geneigter Anordnung untersucht. In TP-B wurden zwei horizontale und zwei vertikale Probekörper mit einem Stabdurchmesser von 30 mm und 40 mm getestet. Ferner wurden in TP-C Probekörper bestehend aus jeweils acht Einzelstäben mit einem Stabdurchmesser von 30 mm in vertikaler, horizontaler und 45° geneigter Bauteilorientierung geprüft. Sofern kein Längsriss im Schaumkörper des RBS auftrat bzw. dieser im Verlauf des Brandversuchs wieder zuschäumte, konnte auch bei verschiedenen Bauteilorientierungen kein signifikanter Unterschied in der thermischen Schutzwirkung der RBS festgestellt werden. Das Vorhandensein von Längsrissen führte zu einer starken Abnahme der Leistungsfähigkeit des RBS, wodurch die Erwärmung des Probekörpers erheblich beschleunigt wurde. Die Bildung eines Längsrisses erfolgte meist zufällig, weshalb das Risiko einer Rissbildung und die damit verbundenen Auswirkungen auf die thermische Schutzwirkung zu berücksichtigen sind. Neben dem Produkt selbst wird die Rissbildung durch verschiedene weitere Faktoren beeinflusst, wie z.B. der Geometrie des Stahlprofils, der applizierten TSD, der Art der mechanischen Beanspruchung und der Höhe der Lastausnutzung im Brandfall sowie der Bauteilorientierung. Folglich muss mittels Brandversuchen geprüft werden, ob die Leistungsfähigkeit eines RBS durch unterschiedliche Bauteilorientierungen unbeeinflusst wird. Falls ja, ist dies beim Anwendungsbereich zu berücksichtigen. Es wird daher empfohlen eine Brandprüfung analog zum unbelasteten Probekörper im TP-C durchzuführen. Basierend auf den Ergebnissen kann dann eine Erhöhung der TSD erforderlich werden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen finden Eingang in die Erarbeitung des Entwurfs für die neue europäische Prüfnorm EN 13381-XX [23]. Dabei werden insbesondere die beiden Aspekte Profiltyp und Bauteilorientierung in das Prüf- und Bewertungsverfahren eingearbeitet. Auf den Stand des Normenentwurfs wird im Abschnitt 5 detailliert eingegangen.

5 Weiterentwicklung und Präzisierung des Normenentwurfs (AP 3)

In dieser Projektphase wird der im AP 1 ausgearbeitete Normenentwurf weiterentwickelt und ergänzt. Insbesondere die Hinweise der Mitglieder aus den nationalen und europäischen Normungsgremien wurden hierfür einbezogen. Die Überarbeitungen waren dabei sowohl inhaltlicher als auch redaktioneller Natur und betrafen Texte, Abbildungen und Tabellen. Insgesamt konnte dadurch die Lesbarkeit des Dokuments und das Verständnis der einzelnen Vorgaben zum Prüf- und Auswertungsverfahren verbessert werden. Darüber hinaus wurden die im Rahmen des AP 2 (siehe Kapitel 4) gewonnenen Erkenntnisse zum Einfluss der Bauteilorientierung und der Profilart in das Dokument eingearbeitet. In Bezug auf die Bauteilorientierung wurde ein standardisierter Prüfaufbau vorgeschlagen und in den Normenentwurf aufgenommen. Dieser orientiert sich weitestgehend an den im AP 2 durchgeführten Brandversuchen. Zudem wurde ein Vorschlag für eine maximale Temperaturdifferenz ($\Delta T \leq 50 \text{ K}$) vorgeschlagen, bis zu der die Gleichwertigkeit zwischen der horizontalen Referenzorientierung, welche auch in den mechanisch belasteten Brandversuchen vorliegt, und davon abweichenden Bauteilneigungen gegeben ist. Bei einem größeren Temperaturunterschied bietet der Normenentwurf eine Verfahrensweise, wie eine reduzierte thermische Schutzwirkung infolge der Bauteilorientierung im Assessment berücksichtigt werden kann. Im Hinblick auf die Profilart wird im Normenentwurf vorgeschlagen, dass die Ergebnisse aus Brandprüfungen an Stahlzuggliedern mit Kreisvollprofil (KVP) auf Rechteckvollprofile (RVP),

hierzu zählen auch Quadratvollprofile (QVP), übertragen werden können. Folglich können die für KVP erstellten Tabellen zur erforderlichen Trockenschichtdicke des RBS auf RVP angewendet werden. Bei dieser Vorgehensweise sind keine Brandversuche an Stahlzuggliedern mit RVP erforderlich. Allerdings wird gefordert, dass die kleinste Kantenlänge des RVP mindestens genauso groß sein muss, wie der Durchmesser des KVP. Eine alleinige Betrachtung des Profilmessers ist daher nicht ausreichend. Darüber hinaus bietet der Normenentwurf auch die Möglichkeit ein eigenes Prüfprogramm mit RVP durchzuführen und auszuwerten, wodurch die bessere thermische Schutzwirkung des RBS für diese Profilart abgebildet werden kann.

Das Inhaltsverzeichnis des überarbeiteten Normenentwurfs prEN 13381-XX: Version 9 ist in Tabelle 10 angegeben. Generell bietet der Normenentwurf durch das variable Prüfprogramm ein hohes Maß an Flexibilität. Im Dokument sind zudem detailliert die Brandprüfungen und deren Randbedingungen beschrieben. Auch hinsichtlich der Auswertung der Prüfdaten, d.h. Assessment, ist im Normenentwurf ein schlüssiges Konzept enthalten, welches auch die Aspekte zur Bauteilorientierung und Profilart berücksichtigt. Darüber hinaus wurden im Anhang des Dokumentes zahlreiche Beispiele aufgenommen, um die Vorgehensweise des neuartigen Prüf- und Bewertungskonzeptes zu erklären und zum besseren Verständnis beizutragen.

Tabelle 10: Inhaltsverzeichnis des erstellten Normenentwurfs

prEN 13381-XX: Version 9: Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part XX: Applied protection to solid steel bars in tension based on mechanically loaded fire tests			
Kapitel	Seite	Kapitel	Seite
Foreword	4	13 Application of the test and assessment results to different profile types	31
1 Scope	7	14 Report of the assessment	32
2 Normative References	7		
3 Terms and definitions, symbols and abbreviations	8	Annex A (informative) Example of different test sets and the resulting scope of application based on the assessment	33
4 Test equipment	12	Annex B (informative) Example of an assessment	35
5 Test programme	13	Annex C (normative) Linear interpolation analysis	40
6 Installation of the specimens	17	Annex D (informative) Procedure to consider the influence of the bar orientation on the thermal performance of fire protection system	52
7 Conditioning of the specimens	18		
8 Application of instrumentation	18	Bibliography	54
9 Test procedure	21		
10 Test results	22		
11 Assessment	23		
12 Method to transfer results between Influence of different steel bar orientations	28		

6 Vorstellung und Verbreitung des Normenentwurfs (AP 4)

Ziel dieses Arbeitspaketes war es die Ergebnisse des Forschungsprojektes den interessierten Kreisen zugänglich zu machen. Hierzu wurde am 6. September 2022 an der BAM ein Anwenderworkshop durchgeführt. An der Veranstaltung nahmen Vertreter der Bauaufsicht, Hersteller, Planer, Ausführende, Prüfer sowie Wissenschaftler teil. Die Teilnehmer konnten sich in vier Vorträgen zum Thema „Feuerwiderstand von Stahlzuggliedern mit reaktiver Brandschutzbeschichtung“ informieren. Durch den Projektpartner Rudolf Hensel GmbH wurde zunächst in das Thema eingeführt und die Besonderheiten bei der Anwendung von RBS auf Stahlzuggliedern mit Vollprofil erläutert. Anschließend konnten die Teilnehmer bei einem

Brandversuch im Zugbauteilprüfofen das Verhalten eines RBS auf einem mechanisch belasteten Stahlzugglied mit Kreisvollprofil beobachten. Danach stellte der Projektpartner Sherwin-Williams Coatings Deutschland GmbH das Prüfprogramm und die Probekörperherstellung im FIRESTEMIC Projekt vor. Nachfolgend wurden durch die BAM anhand von zwei weiteren Vorträgen die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen, d.h. insbesondere die Erkenntnisse zum Profiltyp und der Bauteilorientierung, sowie der entwickelte Normenentwurf vorgestellt. Die von Seiten der Workshopteilnehmer gestellten Nachfragen führten zu einer intensiven und konstruktiven Fachdiskussion. Das große Interesse am Workshop und die positiven Rückmeldungen seitens der Teilnehmer belegen die Wichtigkeit des durchgeführten Forschungsprojektes und sind zugleich Motivation die Anstrengungen bei der Überführung des Normenentwurf in eine offizielle Prüfnorm weiterzuerfolgen.

Auf wissenschaftlicher Ebene wurden die Ergebnisse des Forschungsprojekts im Rahmen eines Beitrages zum Stahlbau-Kalender 2022 [24] und beim „Symposiums Heißbemessung“ in Braunschweig vorgestellt [25]. Um die Forschungsergebnisse auch international zugänglich zu machen, wurde zudem ein englischsprachiger Beitrag im „Fire Safety Journal“ ausgearbeitet und eingereicht [26]. Die referierte Veröffentlichung wurde von Seiten der Zeitschrift positiv bewertet, so dass der Artikel voraussichtlich Ende 2022 oder Anfang 2023 erscheinen wird. Über die Projektlaufzeit hinaus ist angedacht Anfang 2023 einen weiteren englischsprachigen Zeitschriftenbeitrag zu erarbeiten, welcher den entwickelten Normenentwurf und die darin beschriebenen Prüf- und Auswertungsmethoden im Detail vorstellt.

Aufgrund des weit fortgeschrittenen Arbeitsstandes des Normenentwurfes wurde von CEN/TC 127/WG 1 im März 2022 die Entscheidung getroffen bei CEN/TC 127 einen Antrag zum Beginn des "official work items" zu stellen. CEN/TC 127 hat daraufhin eine offizielle Abstimmung bei den nationalen Normungsgremien eingeleitet. In der Sitzung der WG 1 im Oktober 2022 wurde mitgeteilt, dass sich eine Mehrheit für die Einrichtung des „official work item“ ausgesprochen hat. Dies eröffnet die Möglichkeit in der WG 1 ein „Enquiry“, d.h. Vorabstimmung zum Normenentwurf mit der Möglichkeit der inhaltlichen und redaktionellen Kommentierung, durchzuführen. Wird das Dokument mehrheitlich akzeptiert kann nach Einarbeitung von Kommentaren ein „Final Vote“, d.h. offizielle finale Abstimmung, erfolgen. Fällt diese Abstimmung ebenfalls positiv aus, so kann die Norm ggf. nach redaktioneller Überarbeitung durch CEN veröffentlicht werden. Für die beschriebenen Abstimmung ist ein Zeitraum von mindestens 1 Jahr vorgesehen. Die Mitglieder der TG 17, insbesondere die am Forschungsprojekt beteiligten Personen, werden den Abstimmungsprozess begleiten und eingereichte Kommentare in den Normenentwurf einarbeiten.

6.1 Fazit zum Forschungsprojekt

Die Ziele des Forschungsvorhabens FIRESTEMIC, d.h. Klärung der Fragen zum Profiltyp und der Bauteilorientierung sowie Erarbeitung eines Normenentwurfs, wurden erreicht. Durch das Projekt wurde ein Beitrag zur Förderinitiative WIPANO im Förderschwerpunkt „Normung und Standardisierung“ geleistet.

Bei erfolgreicher Umsetzung des Vorhabens besteht die Möglichkeit den Einsatzbereich reaktiver Brandschutzsysteme für die Anwendung auf Stahlzuggliedern zu erweitern, welche auch von den beiden am Forschungsprojekt beteiligten Firmen genutzt werden kann. Die bisher in Deutschland häufig anzutreffende Verfahrensweise, den Einsatz von reaktiven Brandschutzsystemen auf Stahlzuggliedern mittels einer Zustimmung im Einzelfall zu regeln, könnte dann weitestgehend entfallen. Dies wäre mit einer erheblichen Kosten- und

Zeitersparnis verbunden. Ferner wäre es dadurch möglich für alle typischerweise im Bauwesen auftretenden mechanischen Beanspruchungsarten, d.h. Biegung, Druck und Zug, eine normativ geregelte Brandprüfung durchzuführen und dadurch den zulassungsbasierten Anwendungsbereich für diese Bauteile zu komplettieren. Dies würde die Akzeptanz der Produkte bei Planern, Bauherren und Gutachtern weiter erhöhen.

Langfristig ist denkbar, dass vorhandene Produkte entsprechend optimiert werden, um alle im Bauwesen vorliegenden Beanspruchungsarten abzudecken oder ggf. neue Produkte entwickelt werden, die diesen Zweck erfüllen.

7 Verwendung der Zuwendungen

1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.

Projektziele	Erzielte Ergebnisse und hierfür verwendete Zuwendungen
<ul style="list-style-type: none"> • Aufarbeitung von vorhandenen die Erfahrungen und Erkenntnissen zur Überführung in ein standardisiertes Prüf- und Bewertungsverfahren zur Bestimmung des Feuerwiderstands von Stahlzuggliedern mit reaktivem Brandschutzsystem • Durchführung von experimentellen Untersuchungen zur Bauteilorientierung und den Umgang mit unterschiedlichen Profilarten • Erstellung eines Entwurfes für eine europäische Prüfnorm • Mitwirkung an den nationalen und europäischen Normungsgremien • Verbreitung des Wissens durch einen Anwenderworkshop • Veröffentlichung der Ergebnisse 	<ul style="list-style-type: none"> • Alle Partner: Daten aus bereits durchgeführten Brandversuchen wurden aufbereitet und daraus ein geeignetes Prüf- und Bewertungsverfahren entwickelt • RH/SW: Herstellung der Probekörper für die experimentellen Untersuchungen • BAM: Durchführung und Auswertung der Brandversuche zur Bauteilorientierung und Profilart • Alle Projektpartner: Erstellung eines Normenentwurfes und Abstimmung mit den relevanten Normungsgremien • Alle Partner: Durchführung eines Anwenderworkshops und Information interessierter Kreise • Alle Partner: Erstellung von wissenschaftlichen Veröffentlichungen (siehe Publikationsliste) und dem Abschlussbericht • Die Zuwendungen an die Projektpartner wurden für die Planung, Durchführung und Auswertung der Brandversuche, die Erarbeitung des Normenentwurfes sowie die Veröffentlichung der Ergebnisse verwendet. Details sind den jeweiligen Erfolgskontrollberichten zu entnehmen.

2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,

Der zahlenmäßige Nachweis und die einzelnen Positionen sind im Verwendbarkeitsnachweis der einzelnen Partner aufgelistet.

3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,

Informationen hierzu sind dem Erfolgskontrollbericht der einzelnen Partner unter Punkt 6 zu entnehmen.

4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,

Informationen hierzu sind für jeden Partner dem Erfolgskontrollbericht (siehe Punkt 3) und der Anlage zum Verwertungsplan zu entnehmen.

5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen,

Es sind keine neuen Ergebnisse von anderen Stellen bekannt geworden.

6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6.

Die Projektergebnisse wurden in Rahmen von Tagungsbeiträgen, referierten Zeitschriftenartikeln und einem Anwenderworkshop vorgestellt. Die einzelnen Veröffentlichungen sind in Kapitel 6 beschrieben und der Publikationsliste zusammengefasst.

8 Literatur

- [1] DIN EN 13381-8: Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen – Teil 8: Reaktive Ummantelung von Stahlbauteilen. DIN - Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth Verlag, 2013.
- [2] EN 13381-10: Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 10: Applied protection to solid steel bars in tension, 2020.
- [3] EN ISO 6892-1:2019: Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature, 2019.
- [4] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Zulassungsgrundsätze für reaktive Brandschutzsysteme auf Stahlbauteilen. Fassung November 1997. DIBt Mitteilungen, H. 4, Berlin, Ernst & Sohn, 1998.
- [5] Hothan, S.: Numerische Voruntersuchungen zur Anwendung von reaktiven Brandschutzsystemen auf zugbeanspruchten Stahlbauteilen. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, 2010.
- [6] Hothan, S.: Grundlagen zur Erweiterung des Anwendungsbereiches für reaktive Brandschutzsysteme auf Stahlbauteilen im nationalen Zulassungsverfahren. DIBt Mitteilungen, H. 42, S. 187-189, Berlin, Ernst & Sohn, 2011.
- [7] Hothan, S.; Häßler, D.: Numerische und versuchstechnische Untersuchung zur Anwendung von reaktiven Brandschutzsystemen auf Zuggliedern aus Stahl. Forschungsbericht, Vh 7539, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, 2015.
- [8] Häßler, D.: Verhalten reaktiver Brandschutzsysteme auf kreisförmigen Zuggliedern aus Blank- und Baustahl. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2016.
- [9] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Erste Zulassung für ein reaktives Brandschutzsystem (RBS) auf Stahlzuggliedern mit Kreisprofil erteilt. DIBt-Newsletter, H. 5, S. 4, Berlin, 2015.
- [10] Häßler, M.; Häßler, D.; Hothan, S.; Krüger, S.: Performance of intumescent fire protection coatings on steel tension rod systems. Proceedings of the 10th International Conference on Structures in Fire, S. 649-654, Belfast, 2018.
- [11] Häßler, D.; Häßler, M.; Hothan, S.; Krüger, S.: Leistungsfähigkeit reaktiver Brandschutzsysteme auf Zugstabsystemen und deren Anschlusskonstruktionen. Stahlbau, H. 11, S. 1049-1056, Berlin, Ernst & Sohn, 2018.
- [12] NA 005-52-02 AA: German Proposal for determining the fire resistance of steel tension bars with fire protection systems based on mechanically loaded fire tests. DIN - Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2015.
- [13] Hothan, S.; Häßler, D.: Zur Anwendung reaktiver Brandschutzsysteme auf Stahlzuggliedern. Bauphysik, H. 6, S. 275-285, Berlin, Ernst & Sohn, 2012.
- [14] Häßler, D.; Hothan, S.: Mechanische Hochtemperatureigenschaften von Stahlzuggliedern aus kaltverformten Blankstahl der Festigkeitsklasse S355. Stahlbau, H. 5, S. 332-340, Berlin, Ernst & Sohn Verlag, 2015.

- [15] Häßler, D.; Hothan, S.: Fire tests of reactive fire protection systems applied to steel tension members with solid circular section. Proceedings of the 9th International Conference on Structures in Fire (SiF 16), S. 1099-1106, Princeton (USA), DEStech Publications, Inc., 2016.
- [16] Häßler, D.; Hothan, S.: Reaktive Brandschutzsysteme für Stahlbauteile. 18. EIPOS-Sachverständigentage Brandschutz, S. 26-44, Dresden, EIPOS GmbH, 2017.
- [17] EN 1363-1: Fire resistance tests – Part 1: General Requirements. CEN - European Committee for Standardization, 2020.
- [18] Häßler, M.; Häßler, D.; Hothan, S.; Krüger, S.: Fire tests of steel tension rod systems with intumescent coating. Journal of Structural Fire Engineering, S. 1-11, Emerald Publishing Limited, 2019.
- [19] ETA-20/1197: European Technical Assessment for the reactive fire protection system "Sika® Unitherm®-120 Steel W New". Element Materials Technology, Zekeringstraat 33, 2020.
- [20] ETA-16/0251: European Technical Assessment for the reactive fire protection system "HENSOTHERM® 421 KS". Exova (UK) Limited trading as Warrington certification, Warrington, 2017.
- [21] Häßler, D.; Hothan, S.: Performance of intumescent fire protection coatings on structural steel tension members with circular solid and hollow sections, Fire Safety Journal, 2022, 0379-7112. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103605>.
- [22] aBG Nr. Z-19.51-2349: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für das reaktive Brandschutzsystem „HENSOTHERM® 421 KS“ zur Anwendung auf Stahlzuggliedern. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2019
- [23] prEN 13381-xx: Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part xx: Applied protection to solid steel bars in tension based on mechanically loaded fire tests. Draft Version 9, August 2022. (unpublished proposal)
- [24] Hothan, S.; Häßler, D.: Reaktive Brandschutzsysteme. Stahlbau-Kalender 2022: Türme und Maste, Brandschutz, Ernst & Sohn Verlag, S. 367- 400, 2022.
- [25] Fürst, R.; Häßler, D.; Peter, A.; Rohleder, R.; Hothan, S.: European test standard for intumescent coatings applied to steel tension bars with solid section. Symposium Heißbemessung, Braunschweig, 2022.
- [26] Fürst, R.; Häßler, D.; Hothan, S.: Influence of the profile type and bar orientation on the performance of intumescent coatings applied to steel tension bars. Fire Safety Journal, 2022, 0379-7112. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103678>

9 Anhang

9.1 Fotos der Probekörper vor, während und nach den Brandversuchen

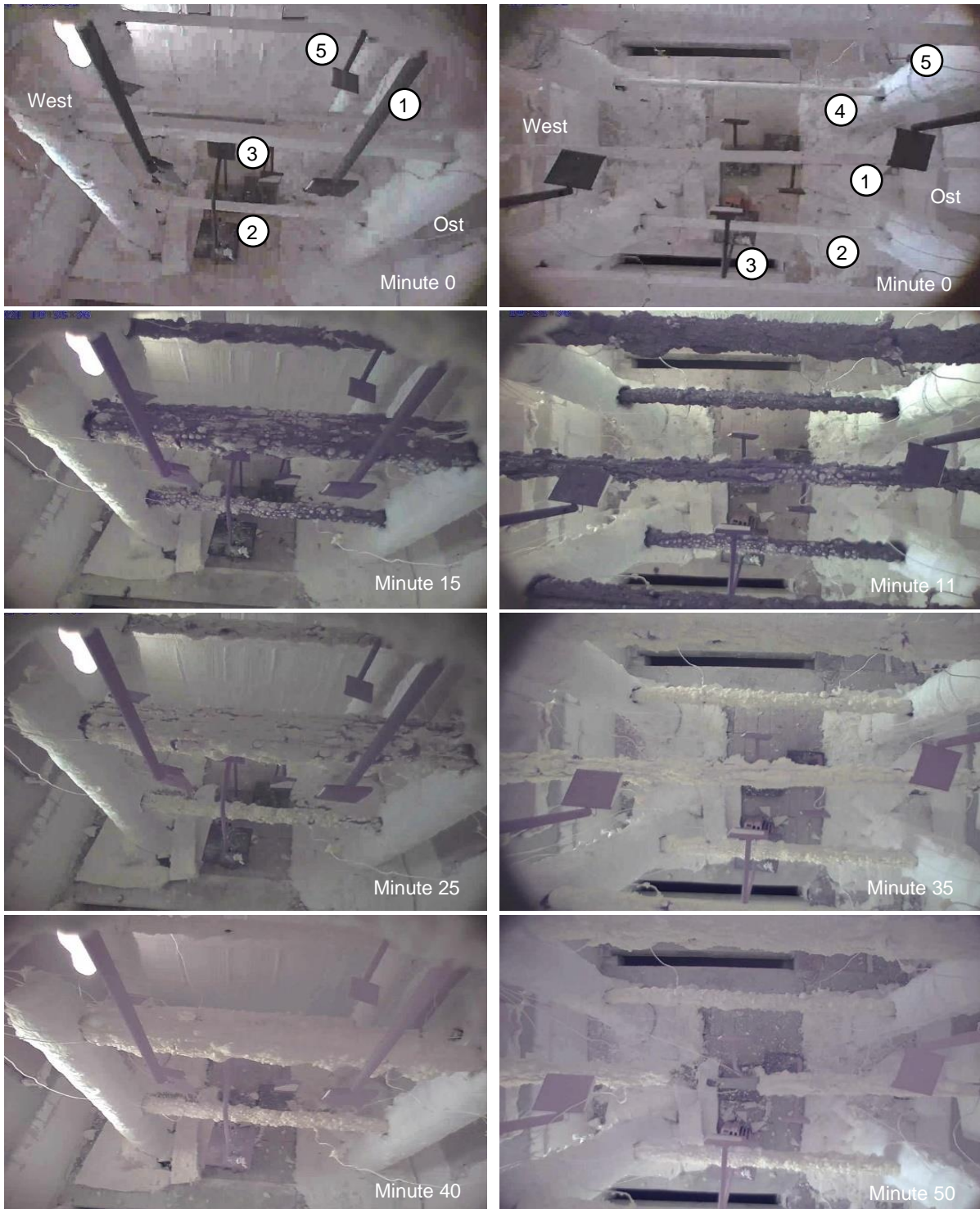


Abbildung 21: Brandversuch TP-A mit RBS-I, Aufnahmen aus dem Brandversuch
Links: Aufnahmen von seitlich oben; Rechts: Aufnahmen von oben



Abbildung 22: Brandversuch TP-B mit RBS-I, Aufnahmen aus dem Brandversuch.
Links: Aufnahmen von seitlich oben; Rechts: Aufnahmen von oben

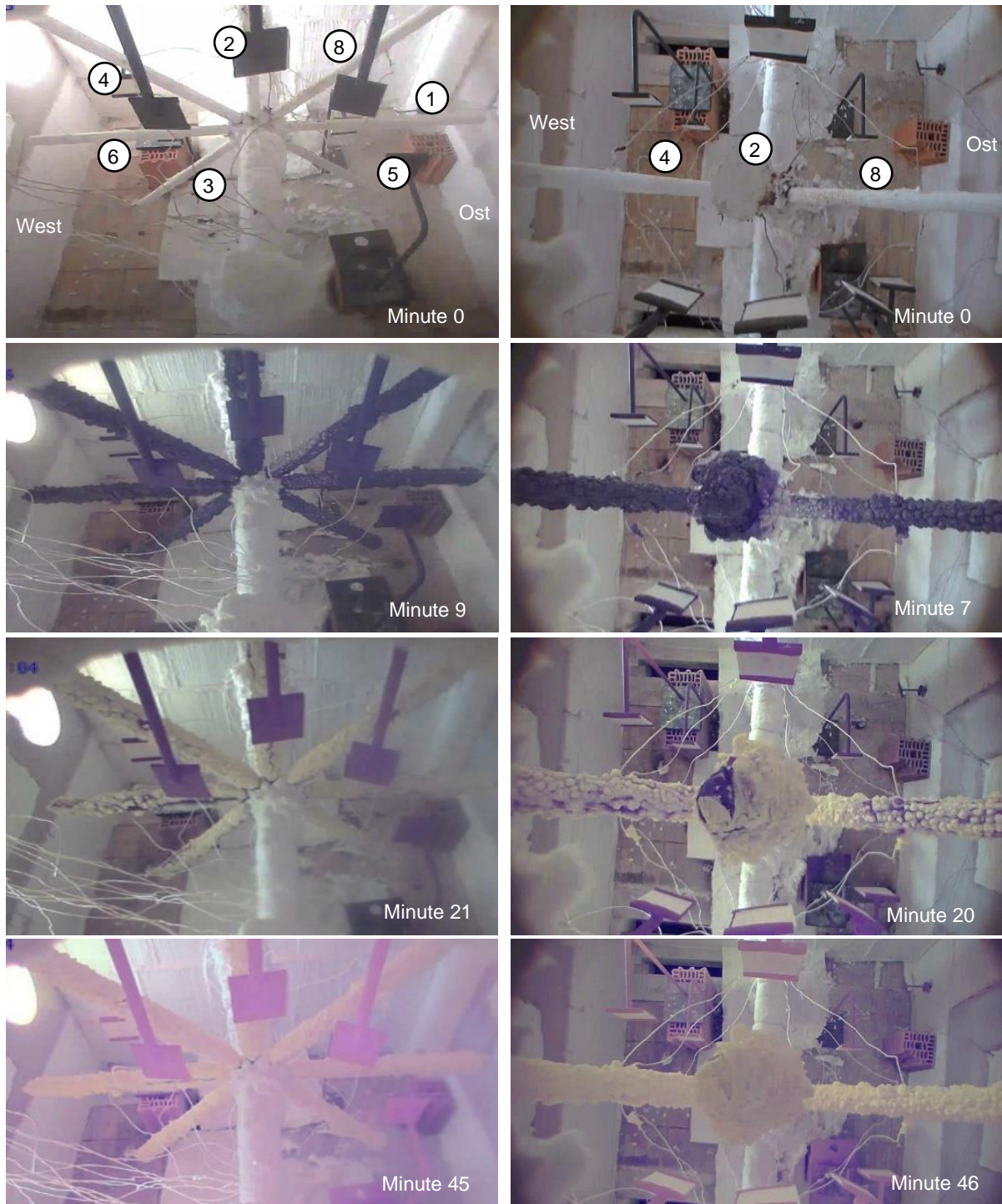


Abbildung 23: Brandversuch TP-C mit RBS-I, Aufnahmen aus dem Brandversuch
Links: Aufnahmen von seitlich oben; Rechts: Aufnahmen von oben



Abbildung 24: Brandversuch TP-A mit RBS-II, Aufnahmen aus dem Brandversuch
Links: Aufnahmen von seitlich oben; Rechts: Aufnahmen von oben



Abbildung 25: Brandversuch TP-B mit RBS-II, Aufnahmen aus dem Brandversuch
Links: Aufnahmen von seitlich oben; Rechts: Aufnahmen von oben

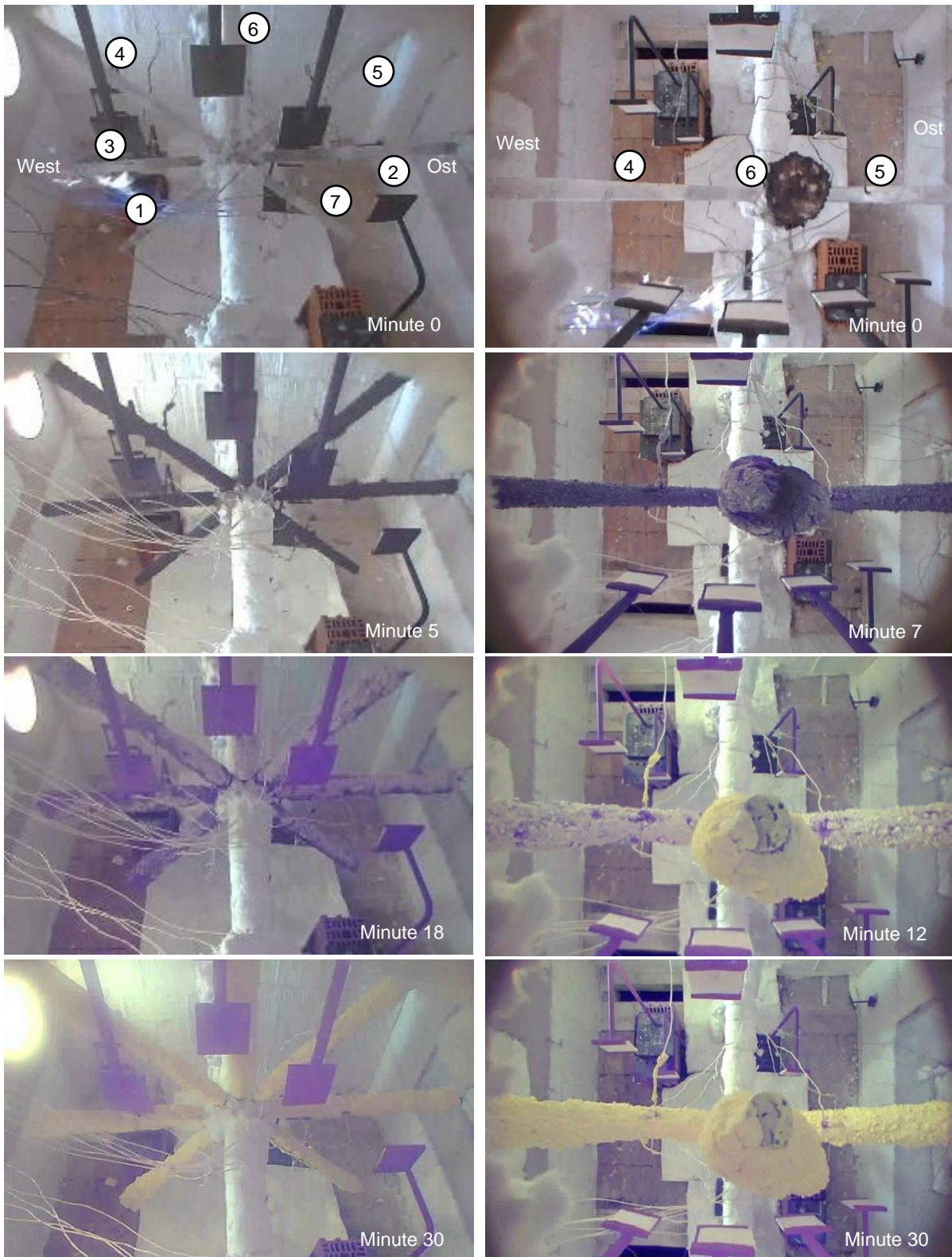


Abbildung 26: Brandversuch TP-C mit RBS-II, Aufnahmen aus dem Brandversuch.
Links: Aufnahmen von seitlich oben; Rechts: Aufnahmen von oben

Vor dem Brandversuch

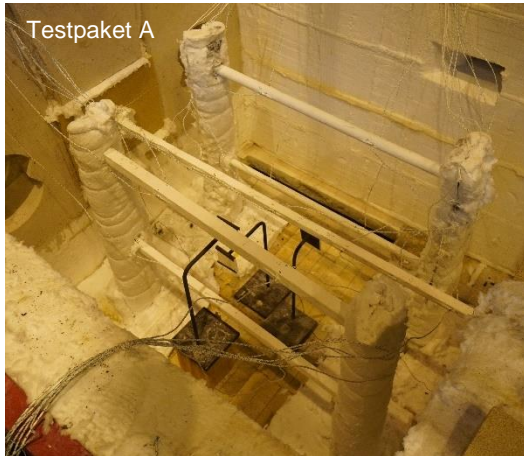


Nach dem Brandversuch



Abbildung 27: Blick auf die Probekörper mit RBS-I vor und nach dem Brandversuch

Vor dem Brandversuch



Nach dem Brandversuch

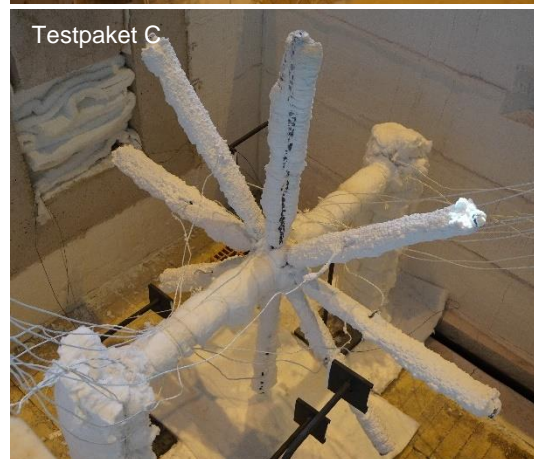


Abbildung 28: Blick auf die Probekörper mit RBS-II vor und nach dem Brandversuch

9.2 Brandraumthermoelemente

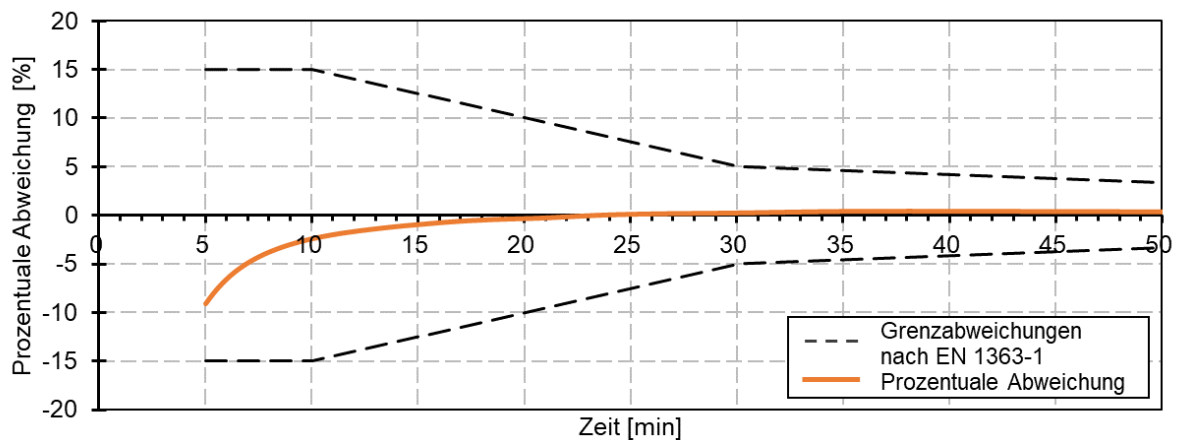
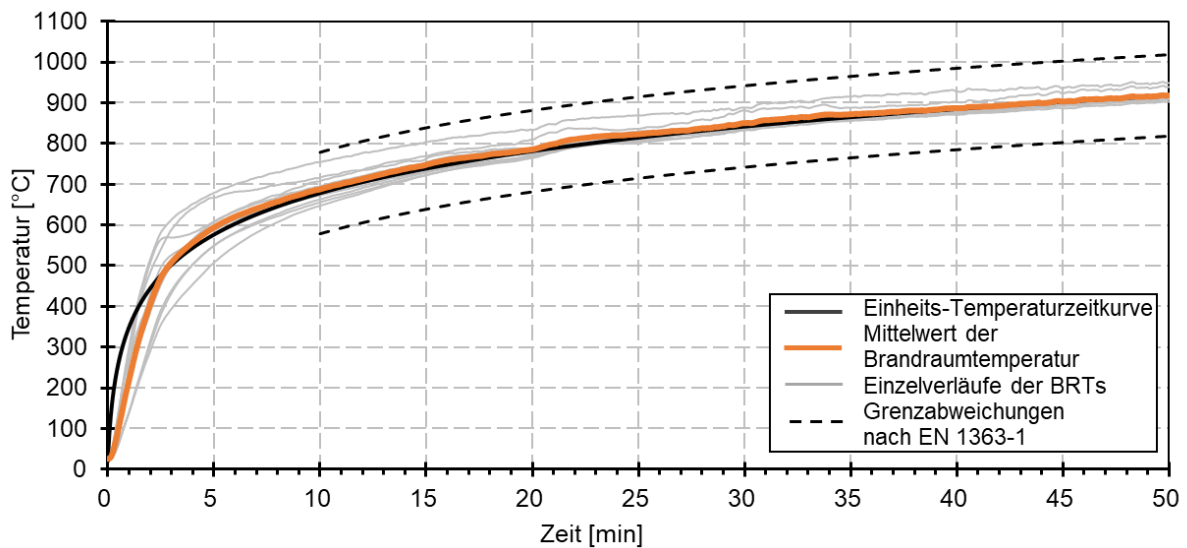
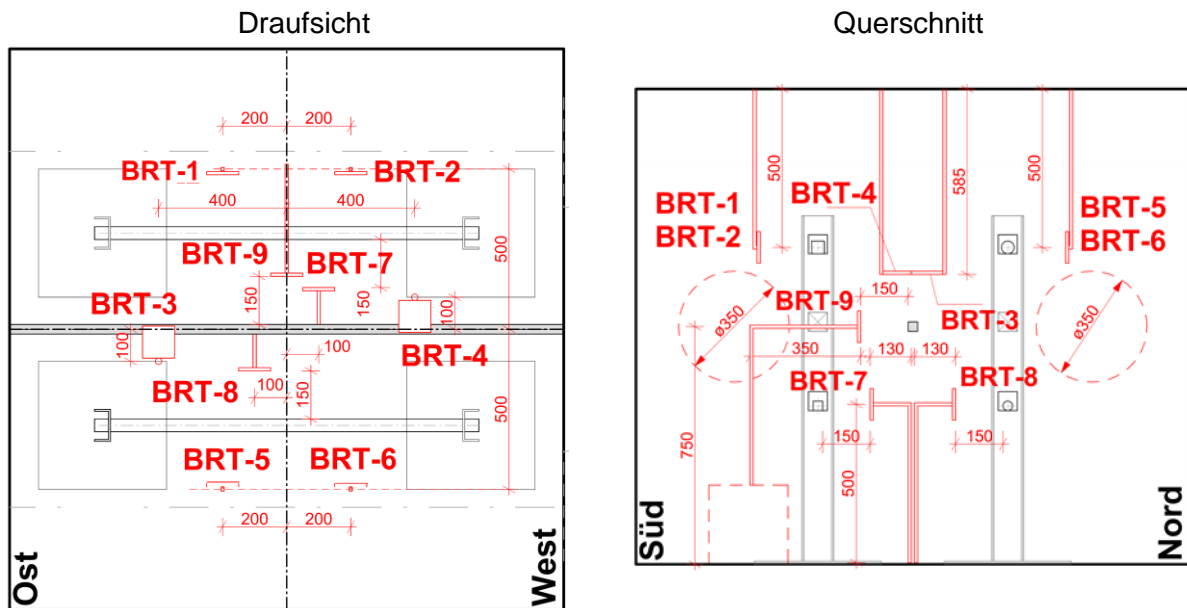


Abbildung 29: Brandversuch TP-A mit RBS-I; Position der Brandraumthermoelemente sowie Gegenüberstellung der gemessenen Brandraumtemperaturen und der in EN 1363-1 angegebenen Grenzabweichungen

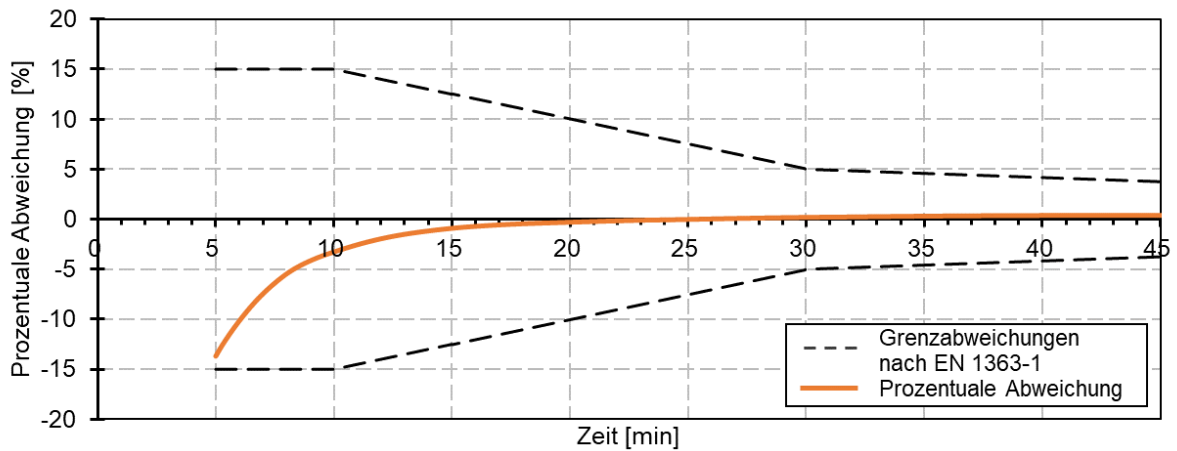
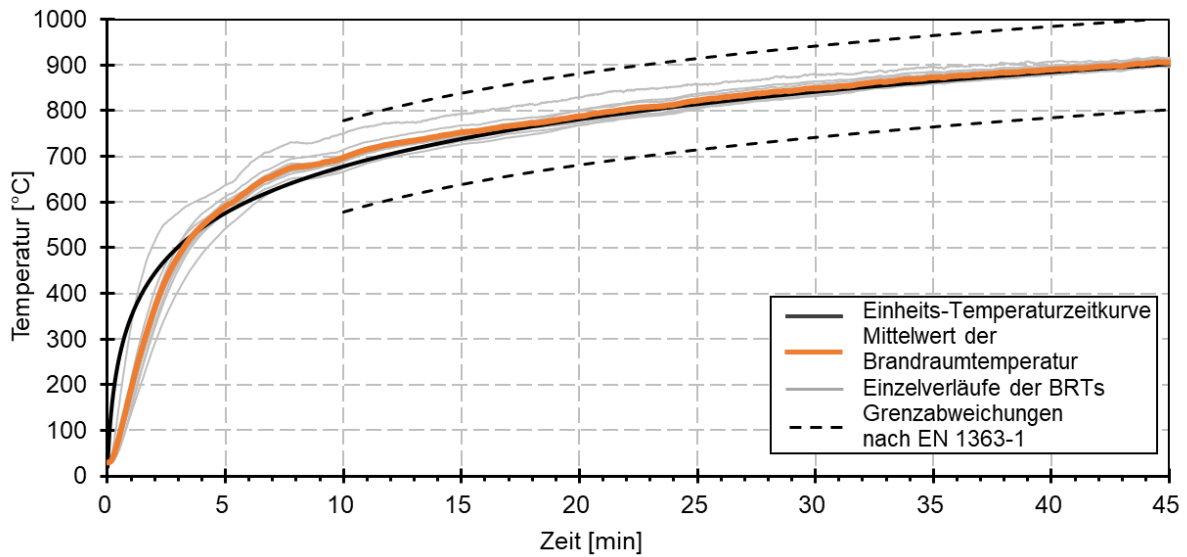
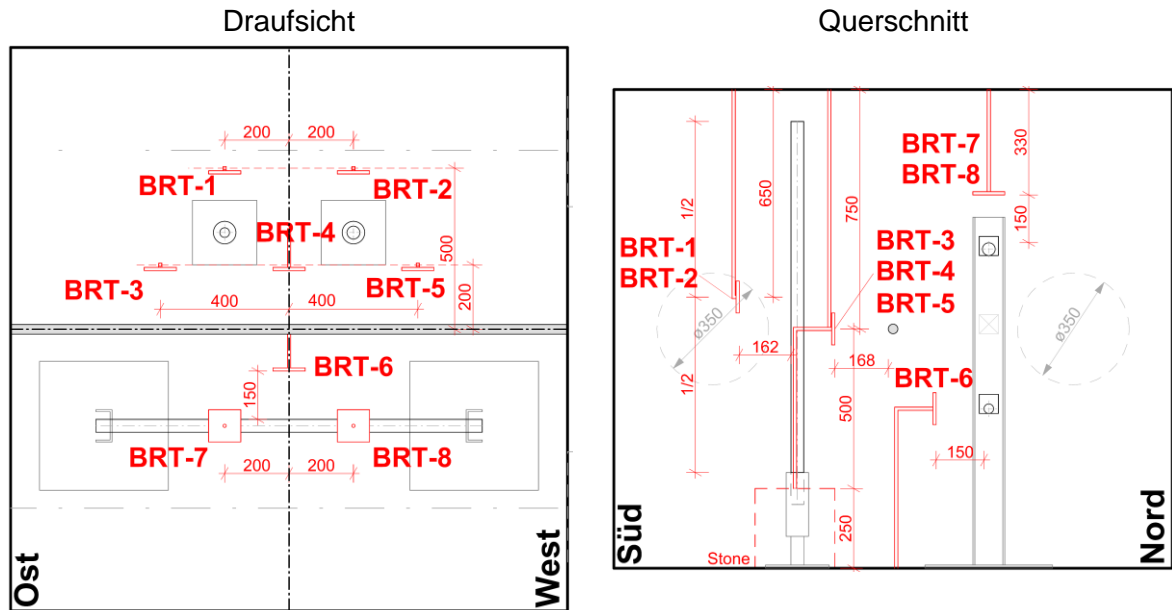


Abbildung 30: Brandversuch TP-B mit RBS-I; Position der Brandraumthermoelemente sowie Gegenüberstellung der gemessenen Brandraumtemperaturen und der in EN 1363-1 angegebenen Grenzabweichungen

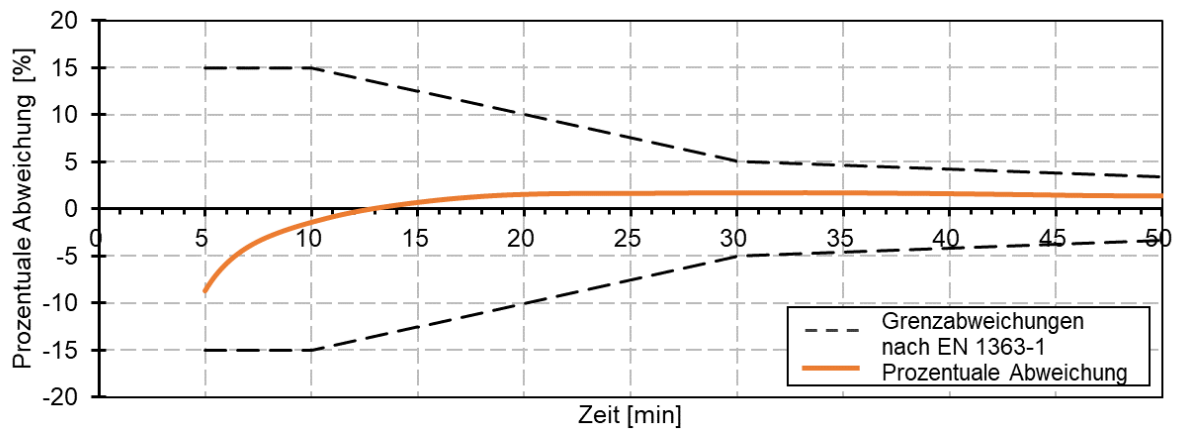
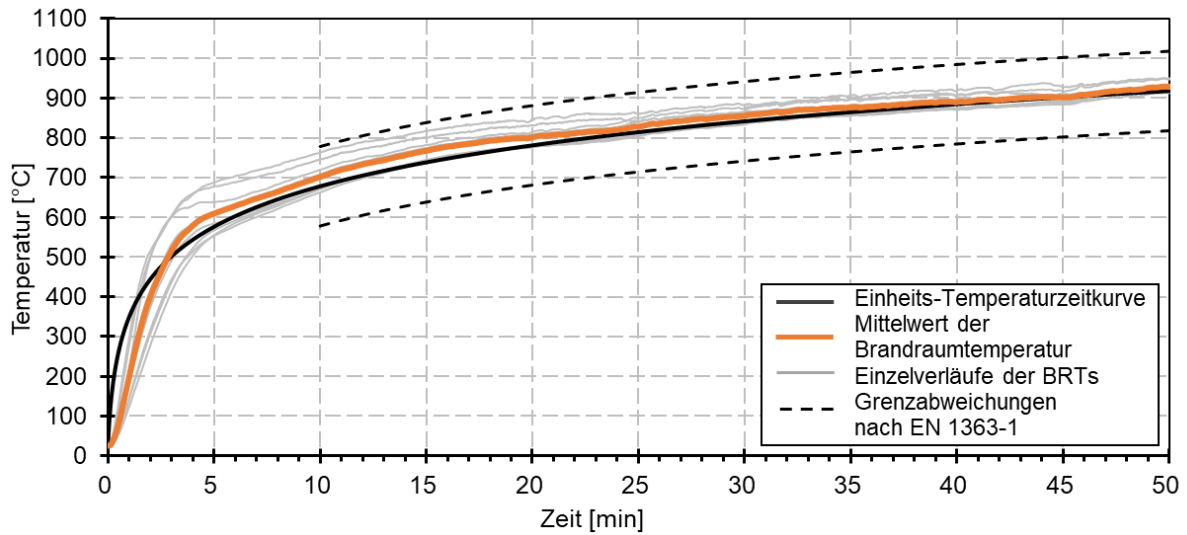
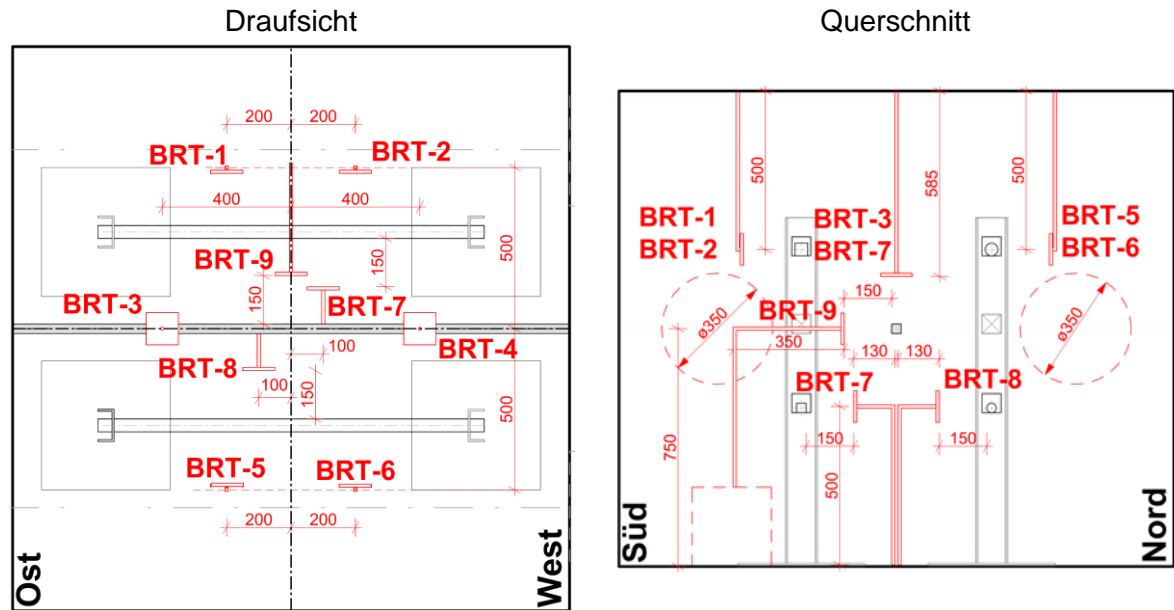


Abbildung 31: Brandversuch TP-A mit RBS-II; Position der Brandraumthermoelemente sowie Gegenüberstellung der gemessenen Brandraumtemperaturen und der in EN 1363-1 angegebenen Grenzabweichungen

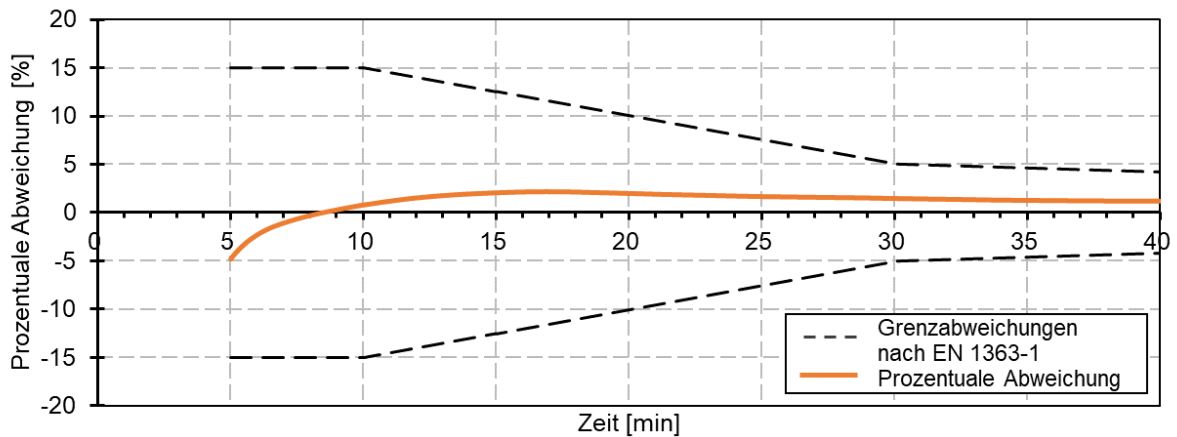
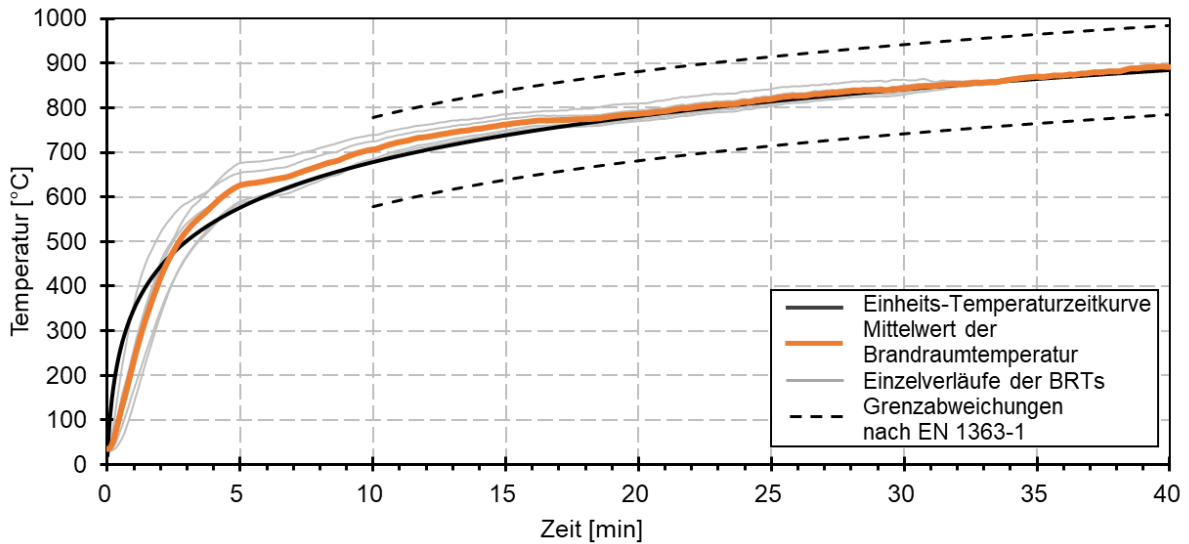
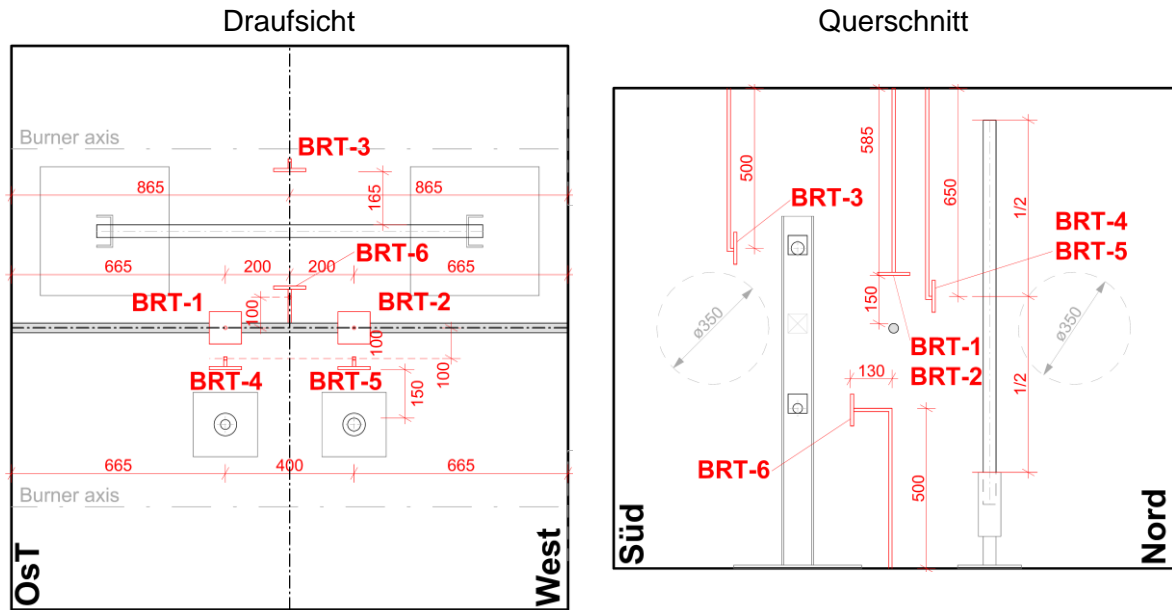


Abbildung 32: Brandversuch TP-B mit RBS-II; Position der Brandraumthermoelemente sowie Gegenüberstellung der gemessenen Brandraumtemperaturen und der in EN 1363-1 angegebenen Grenzabweichungen

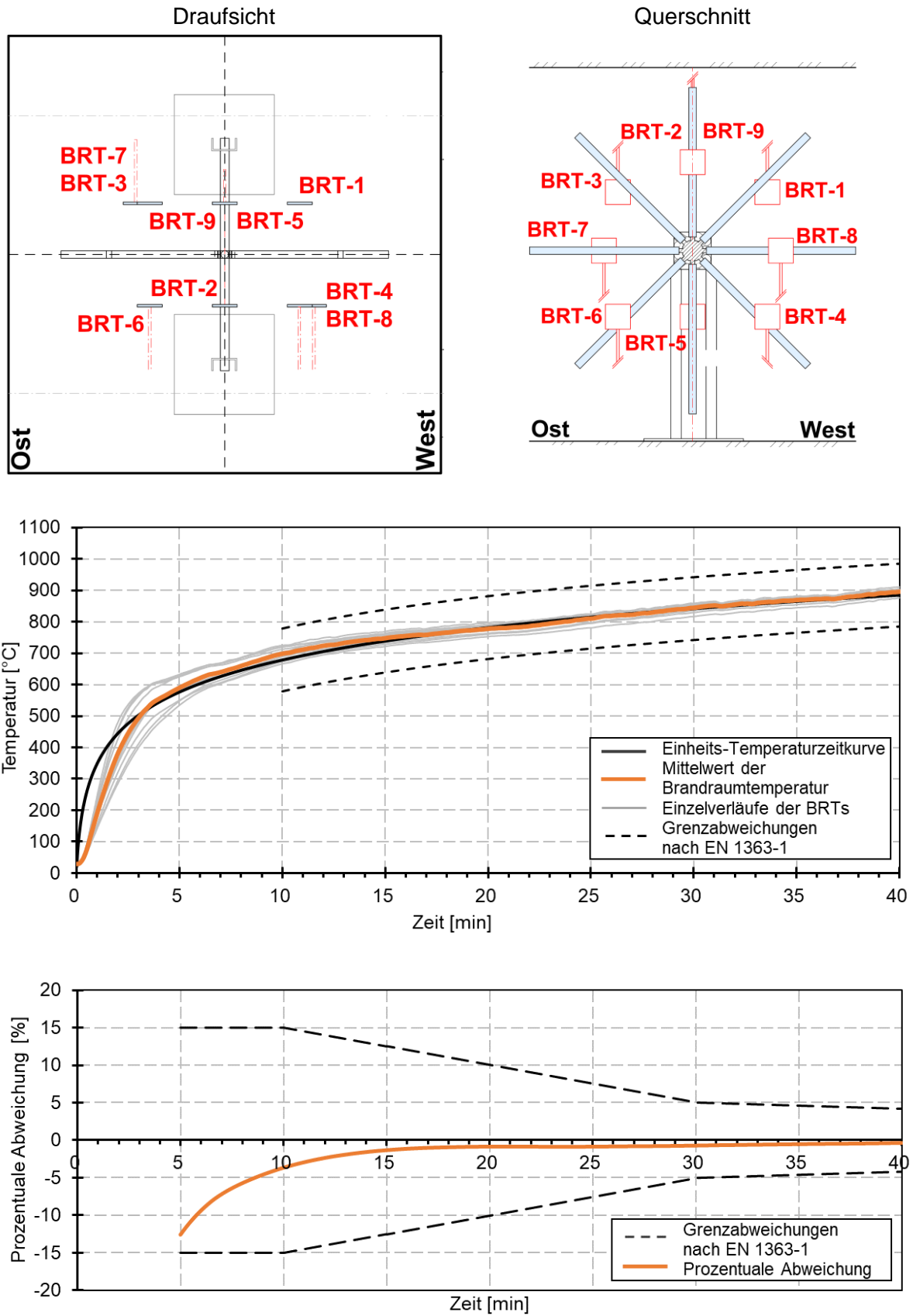


Abbildung 33: Brandversuch TP-C mit RBS-II; Position der Brandraumthermoelemente sowie Gegenüberstellung der gemessenen Brandraumtemperaturen und der in EN 1363-1 angegebenen Grenzabweichungen

9.3 Durchgeführter Brandversuch beim Anwenderworkshop

Vor dem Brandversuch



Nach dem Brandversuch



Abbildung 34: Blick auf den beim Anwenderworkshop getesteten Probekörper mit RBS-II

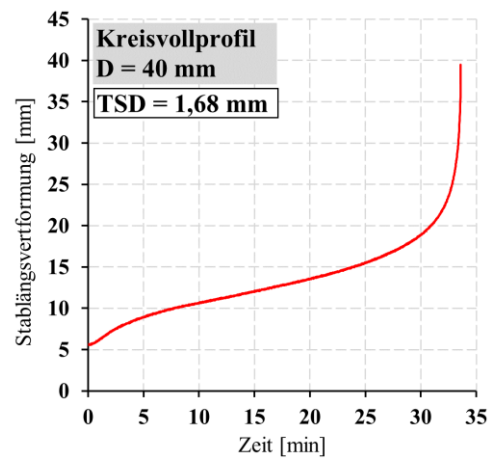
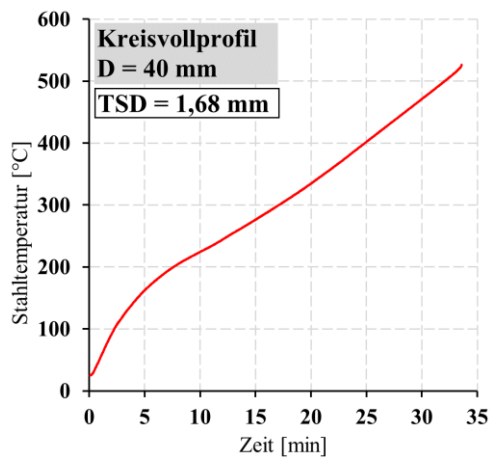


Abbildung 35: Gemessener Verlauf für die maximale Stahltemperatur und die Stablängsvertormung des getesteten Zugliedes

Während des Brandversuchs

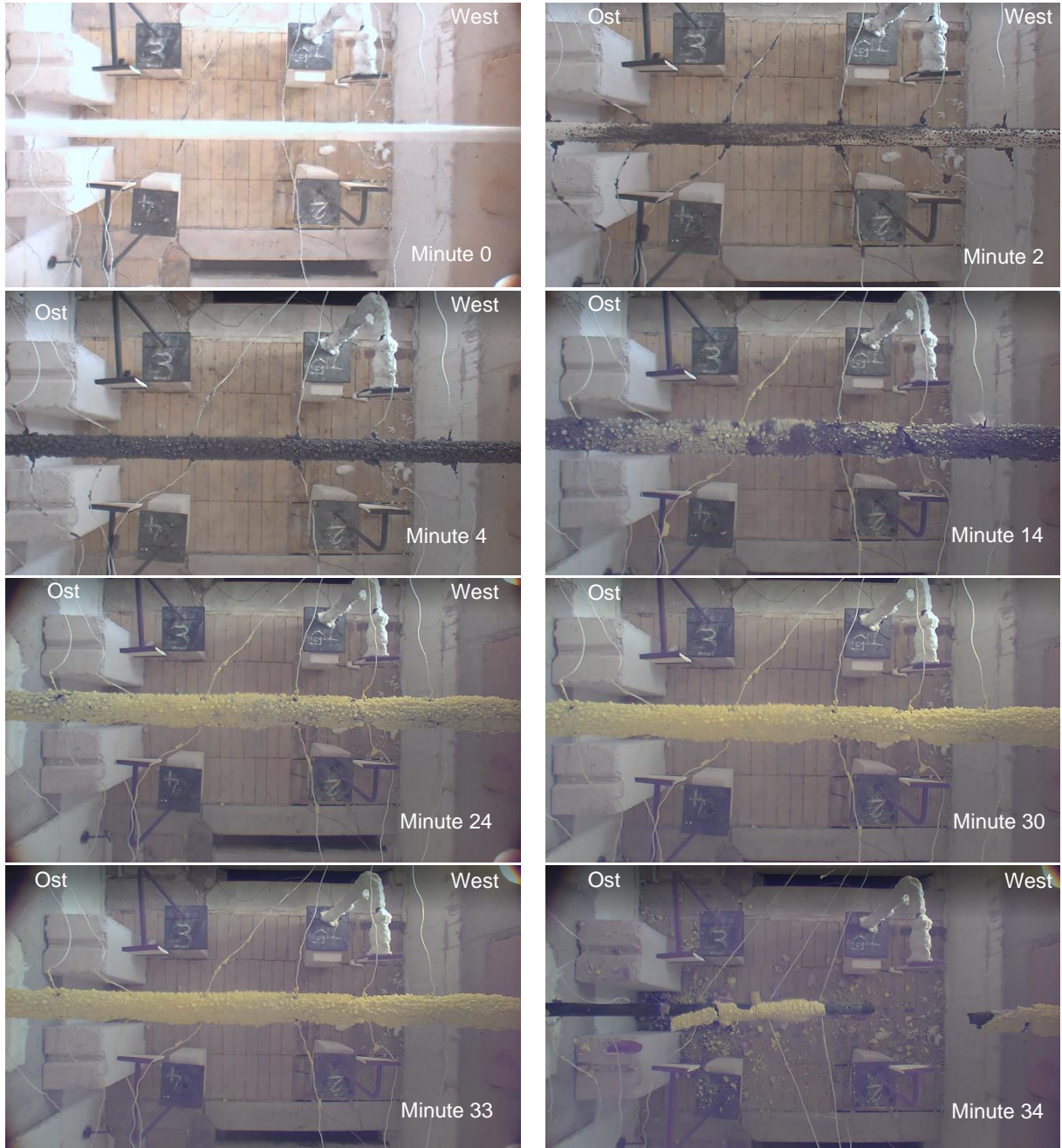


Abbildung 36: Blick auf den beim Anwenderworkshop getesteten Probekörper mit RBS-II (Videokamera direkt oberhalb des Probekörpers)

Während des Brandversuchs

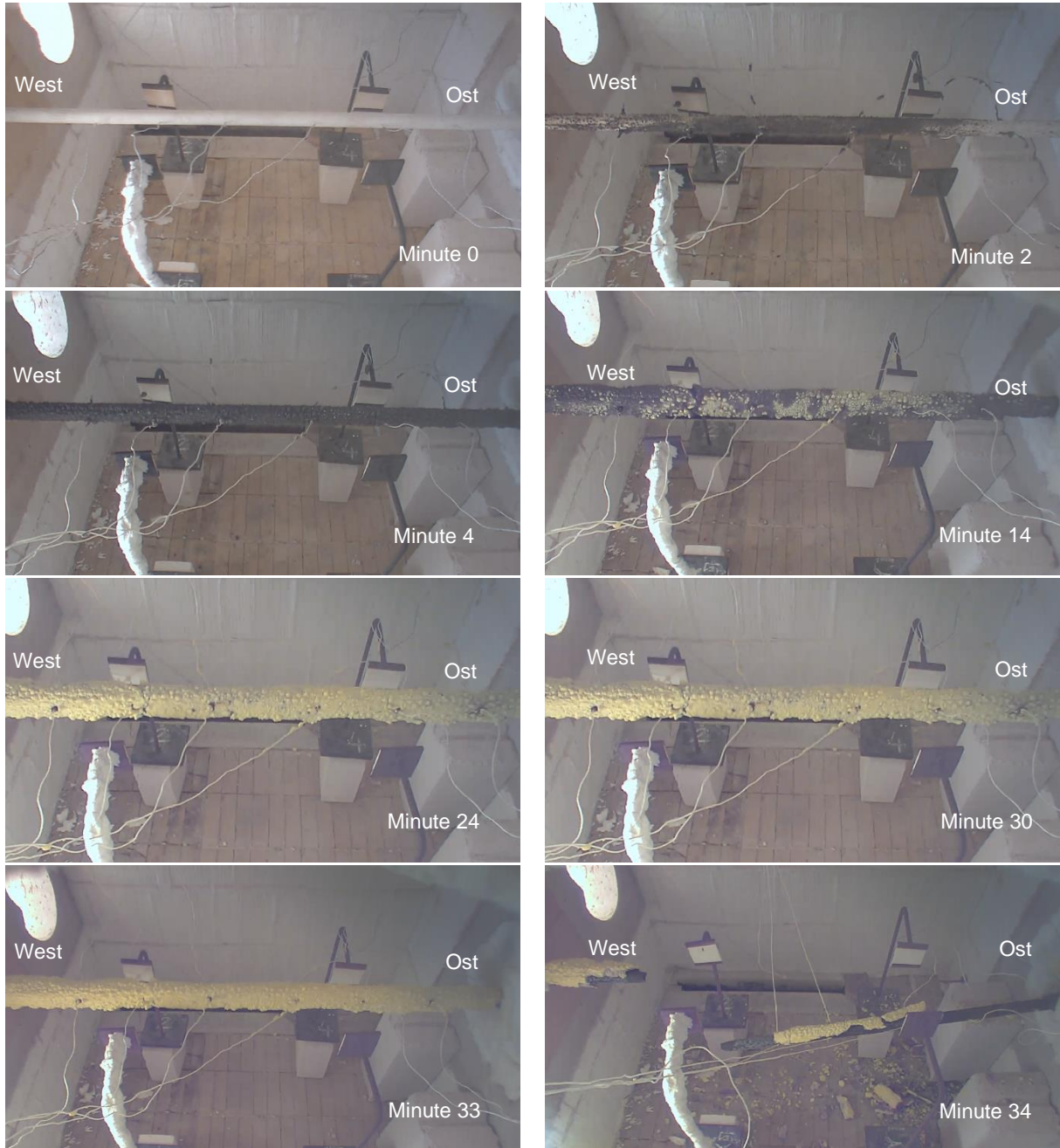


Abbildung 37: Blick auf den beim Anwenderworkshop getesteten Probekörper mit RBS-II (Videokamera seitlich oberhalb des Probekörpers)

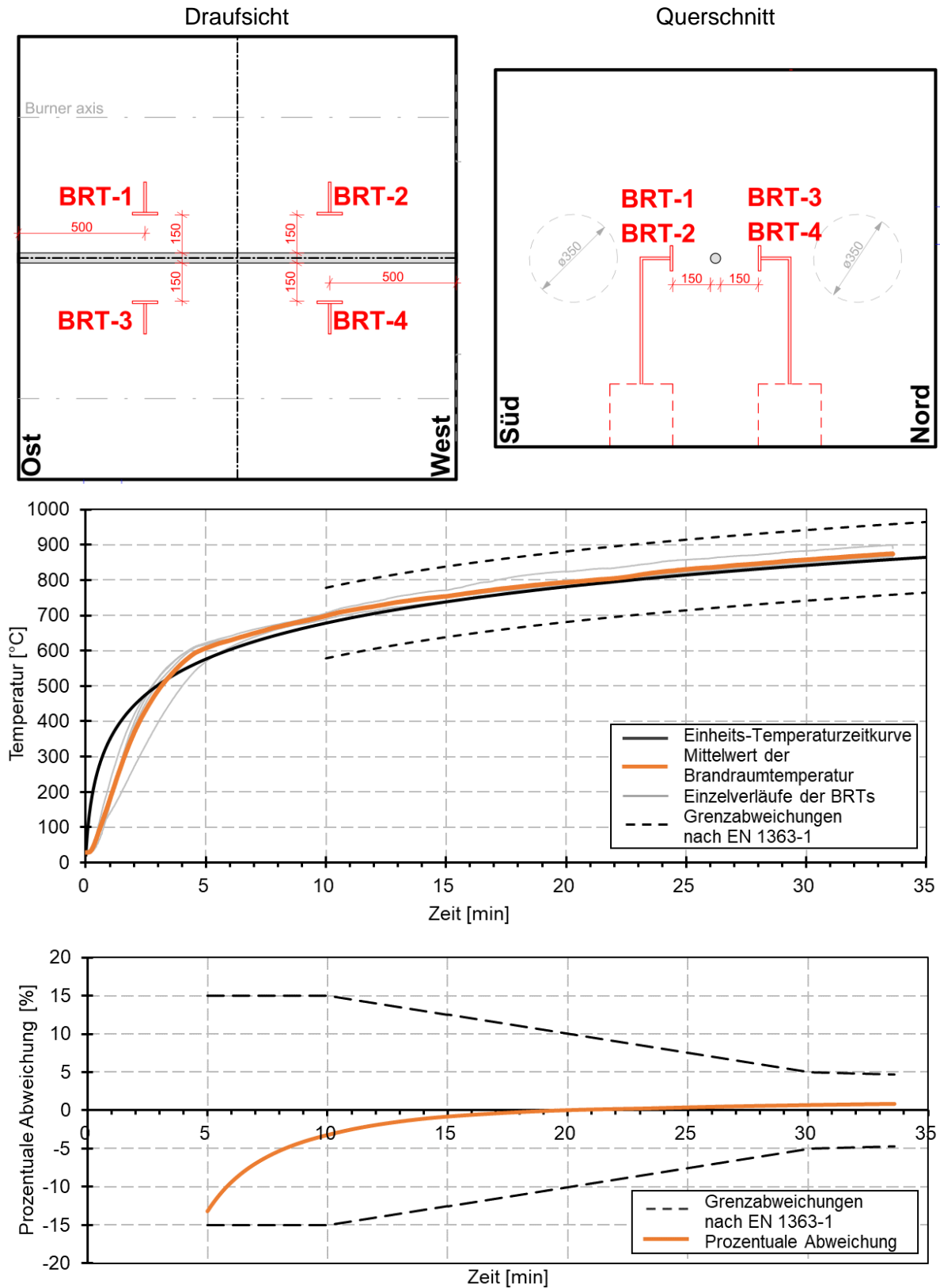


Abbildung 38: Brandversuch beim Workshop (Position der Brandraumthermoelemente sowie Gegenüberstellung der gemessenen Brandraumtemperaturen und der in EN 1363-1 angegebenen Grenzabweichungen)