

Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln im Brandfall

Tl.2. Brandversuche zur Bestätigung der
theoretischen Erkenntnisse

T 3079

T 3079

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2005, ISBN 3-8167-6876-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.IRBbuch.de

Technische Universität Berlin

FAKULTÄT VI – Bauingenieurwesen und Angewandte Geowissenschaften
Institut für Bauingenieurwesen – Fachgebiet Baukonstruktionen
Holz- und Mauerwerksbau, Darstellungsmethoden

Forschungsbericht

Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmiteln im Brandfall **Teil 2: Brandversuche zur Bestätigung der theoretischen Erkenntnisse**

gefördert durch
die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V.
mit Mitteln des Deutschen Instituts für Bautechnik - Berlin und
der Berliner Stiftung zur Förderung des Holzbaus

DGfH, E-2002/03

Univ.-Prof. a. D. Dipl.-Ing. C. Scheer
Dr.-Ing. Mandy Peter
Dr.-Ing. Daniel Povel
cand.-Ing. Stefan Maack

Berlin, September 2004

Zusammenfassung

Die derzeitigen Regelungen zur Bemessung der Tragfähigkeit von ungeschützten Holzverbindungen mit stabförmigen Verbindungsmitteln im Brandfall basieren überwiegend auf empirisch gewonnenen Daten. In einem vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) über die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (DGfH) geförderten Forschungsvorhaben, „Stabförmige Verbindungsmittel im Brandfall, Grundlagenuntersuchungen“ [14], wurde ein theoretisches Modell zur Ermittlung der Tragfähigkeit zweischnittiger, auf Abscheren beanspruchter Stabdübelverbindungen im Brandfall entwickelt. Mit Hilfe des entwickelten Modells konnten mit FE-Berechnungen die Temperaturentwicklung innerhalb einer Verbindung im Brandfall abgebildet werden. Auf der Grundlage der Temperaturverläufe wurden Algorithmen zur Tragfähigkeitsbestimmung für den Brandfall erarbeitet. Aus den Ergebnissen umfangreicher Berechnungen wurde ein allgemeingültiges, praxisgerechtes Bemessungskonzept zweischnittiger, auf Abscheren beanspruchter Stabdübelverbindungen im Brandfall abgeleitet. Es sieht vor, die Tragfähigkeit der Verbindung für eine vorgegebene Feuerwiderstandsdauer direkt aus der charakteristischen Tragfähigkeit unter Normaltemperaturen zu ermitteln.

Zur Bestätigung der theoretischen Erkenntnisse als Voraussetzung für eine Umsetzung in die zukünftige Brandschutznormung wurden an der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) in Berlin Versuchsreihen an zweischnittigen Holzverbindungen mit Stabdübeln durchgeführt. Schwerpunkt der Untersuchungen bildeten Versuche an Verbindungsgeometrien mit einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten. Zusätzlich wurden zwei Probekörper für eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten bemessen und geprüft.

Anhand der Brandversuche konnte das entwickelte Bemessungskonzept verifiziert werden, so dass es möglich und empfehlenswert ist, das Verfahren in die zukünftige Brandschutznormung zu integrieren. Die Untersuchungen zeigen zudem, dass es sinnvoll ist, das Verfahren auch auf andere Verbindungsarten zu erweitern. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen belegen, dass für Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln bei Kenntnis der Temperaturverteilung innerhalb der Verbindung die üblichen Bemessungsverfahren verwendet werden können und damit häufig ausreichende Tragfähigkeiten auch ungeschützter Verbindungen im Brandfall für Feuerwiderstandszeiten von 30 bis 60 Minuten nachgewiesen werden können. Damit würde sich der konstruktive Aufwand im Vergleich zu bisher geschützt auszuführenden Verbindungen wesentlich verringern.

Abstract

The current regulations for determining the load-bearing capacity of unprotected timber connections comprised of rod-shaped connecting elements in the event of fire are based on data gained by empirical studies. The research project „rod-shaped connecting elements in case of fire, a basic study” [14] is funded by the Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) and coordinated by the Deutsche Gesellschaft fuer Holzforschung e.V. (DGfH). In this project a theoretical model was developed in order to ascertain the load-bearing capacity of double-shear drift bolt joints when exposed to shear in case of fire. The development of this model allowed for the representation of temperature increase within a joint by means of RD calculations in the event of fire. On the basis of the temperature development algorithms for the assessment of the load-bearing capacity in case of fire were elaborated. Resultant from extensive calculations a universally valid, practicable assessment concept was evolved for double-shear drift bolt joints exposed to shear in case of fire. It enables the determination of the load-bearing capacity of the specific connection for a given fire resistance period duration from the characteristic load-bearing capacity under normal temperature.

For the verification of the theoretical findings as a precondition for the encoding of the future fire-protection standards a series of experiments was carried out by the Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) Berlin on double-shear wooden joints with drift bolts. Focal point of the research were experiments dealing with connecting geometry exposed to fire for 30 minutes. In addition two specimens were assessed and tested for 60 minutes fire resistance duration.

The fire experiments verified the developed concept for fire assessment making it thus possible and recommendable to integrate this method into the future fire protection standards. The research has moreover shown that an expanded application of the method on other forms of joints would be useful. The studies carried out in this project prove that the usual assessment methods are equally applicable to pinned connections in case of prior knowledge of the temperature dispersal within the joint. It is therefore frequently possible to prove sufficient load-bearing potential of unprotected joints in the event of fire for a fire resistance duration of 30 or 60 minutes. The construction expenditure compared to the one which was previously needed for protected joints would thus be considerably less.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Formelzeichen und Abkürzungen	VII
1 Einführung	1
1.1 Ausgangssituation und Problembeschreibung	1
1.2 Ziel des Forschungsvorhabens	3
2 Konzeption der Brandversuche	4
2.1 Allgemeines	4
2.2 Geometrie der Probekörper	4
2.3 Bestimmung der aufzubringenden Beanspruchung im Brandfall	5
2.3.1 Rohdichte des Holzes	6
2.3.2 Zugfestigkeit des Stahls	7
2.3.3 Beanspruchbarkeit der Verbindungen im Brandfall	7
3 Versuchsvorbereitung	9
3.1 Aufbau und Herstellung der Probekörper	9
3.1.1 Vorfertigung der Holzelemente	9
3.2 Befestigung der Thermoelemente an den Stabdübeln	11
3.3 Zusammenbau der Probekörper	12
3.4 Anordnung der Thermoelemente	15
3.5 Klimatisierung der Probekörper	15
4 Versuchsdurchführung	16
4.1 Allgemeines	16
4.2 Versuchseinrichtung	16
4.3 Kaltversuche	19
4.4 Brandbeanspruchung nach DIN EN 1363-1 (ISO 834-1)	22
4.5 Brandversuche	23
5 Auswertung der Versuche	26
5.1 Allgemeines	26
5.2 Temperaturverlauf im Brandraum	26
5.3 Temperaturen innerhalb der Verbindungen	27
5.3.1 Temperaturverläufe in den Stabdübeln	27

5.3.2	Temperaturverläufe im Holz	35
5.4	Abbrandraten des Holzes	40
5.5	Tragfähigkeiten der Verbindungen	41
6	Beurteilung des Bemessungsvorschlags	47
7	Zusammenfassung und Ausblick	50
	Literaturverzeichnis	52
Anhang A:	Zugversuche Stabdübel	53
Anhang B:	Ermittlung der Rohdichte des Holzes	57
Anhang C:	Geometrie der Probekörper	59
Anhang D:	Lage und Bezeichnung der Thermoelemente	67
Anhang E:	Kaltversuche – Tragfähigkeiten und Verformungen der Verbindungen	75
Anhang F:	Temperaturverläufe in der Brandkammer	83
Anhang G:	Temperaturmesswerte der Probekörper	97
Anhang H:	Brandversuche – Verformungen der Verbindungen	125
Anhang I:	Verformung der Verbindungsmittel	139

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Temperaturverteilung innerhalb einer Holz-Stabdübel-Verbindung nach einer Brandbeanspruchungsdauer von 30 Minuten	1
Bild 2:	Tragfähigkeitsreduzierung für Stabdübel \varnothing 12 mm, Stahlsorte S235 und Holz mit einer Rohdichte von 410 kg/m^3 (Mittelholzdicke \geq Seitenholzdicke t_1) nach [14]	2
Bild 3:	Einzelkomponenten des Prüfkörpers vom Typ IIa	9
Bild 4:	CT-Aufnahme eines Seitenholzes	
Bild 5:	Computer-Tomograph mit Probekörper	10
Bild 6:	Seitenholz mit Thermoelementen	
Bild 7:	Thermoelement mit Holzhülse	10
Bild 8:	Stabdübel \varnothing 20 mm mit Nut (0,5 x 0,5 mm) und Anfasung	11
Bild 9:	Stabdübel mit angelötetem Thermoelement (links) und eine nachbearbeitete Kontaktstelle (rechts)	12
Bild 10:	Zusammenbau von Seitenholz A mit dem Mittelholz (links) und Verlegung der Thermodrähte und Füllholz mit Fichtenholzleisten (rechts)	13
Bild 11:	Zusammenbau von Seitenholz C mit dem Mittelholz	14
Bild 12:	Zusammengebauter Probekörper (Typ IIa)	14
Bild 13:	Versuchsaufbau (Seitenansicht)	17
Bild 14:	Offener Deckenprüfofen	
Bild 15:	Halterungen für die Probekörper	17
Bild 16:	Dreiteilung der Abdeckung des Prüfofens	18
Bild 17:	Prüfofen (Kaltversuch)	
Bild 18:	Deckensegment mit Thermoelementen	19
Bild 19:	Belastungsrampe nach DIN EN 26891:1991 (Belastungsverfahren)	20
Bild 20:	Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN EN 1363-1 (ISO 834-1) [6]	22
Bild 21:	modifizierte Belastungsrampe nach DIN EN 26891:1991 (Belastungsverfahren) zur Durchführung der Brandversuche	23
Bild 22:	Geöffneter Prüfofen mit Versuchskörper nach Abschluss des Brandversuchs	24
Bild 23:	Gegenüberstellung der mit Hilfe der Fourier-Transformation geglätteten Temperaturverläufe von Plate-Elementen und Mantelthermoelementen	27
Bild 24:	Elementierung eines Verbindungsausschnitts vom Probekörper Typ III	28
Bild 25:	Elementierung eines Stabdübels mit Angabe des Pfades der Temperatureauswertung	29

Bild 26:	Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen \varnothing 12 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ I für unterschiedliche Branddauern	30
Bild 27:	Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen \varnothing 12 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ II für unterschiedliche Branddauern	30
Bild 28:	Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen \varnothing 12 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ III für unterschiedliche Branddauern	31
Bild 29:	Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen \varnothing 20 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ IV für unterschiedliche Branddauern	31
Bild 30:	Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen \varnothing 20 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ V für unterschiedliche Branddauern	32
Bild 31:	Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen \varnothing 20 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ VI für unterschiedliche Branddauern	32
Bild 32:	Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) und um 50 K erhöhte modifizierte Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK _{mod})	34
Bild 33:	Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen \varnothing 20 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ IV für unterschiedliche Branddauern bei Erhöhung der ETK um 50 K (ETK _{mod})	34
Bild 34:	Vergleich der berechneten und gemessenen Holztemperaturen des Probekörpers Typ I mit einem Abstand zum Verbindungsmittel von 12 mm für unterschiedliche Branddauern	36
Bild 35:	Vergleich der berechneten und gemessenen Holztemperaturen des Probekörpers Typ II mit einem Abstand zum Verbindungsmittel von 12 mm für unterschiedliche Branddauern	37
Bild 36:	Vergleich der berechneten und gemessenen Holztemperaturen des Probekörpers Typ III mit einem Abstand zum Verbindungsmittel von 12 mm für unterschiedliche Branddauern	37
Bild 37:	Vergleich der berechneten und gemessenen Holztemperaturen des Probekörpers Typ IV mit einem Abstand zum Verbindungsmittel von 20 mm für unterschiedliche Branddauern	38

Bild 38:	Vergleich der berechneten und gemessenen Holztemperaturen des Probekörpers Typ V mit einem Abstand zum Verbindungsmittel von 20 mm für unterschiedliche Branddauern	38
Bild 39:	Vergleich der berechneten und gemessenen Holztemperaturen des Probekörpers Typ VI mit einem Abstand zum Verbindungsmittel von 20 mm für unterschiedliche Branddauern	39
Bild 40:	Isothermenflächen mit Mantelthermoelement für einen Prüfkörperausschnitt Typ III für eine Brandbeanspruchungsdauer von 30 Minuten	40
Bild 41:	Mittelholz Probekörper Typ II	41
Bild 42:	Mittelholz Probekörper Typ IV	41
Bild 43:	Versagensfälle zweischnittiger auf Abscheren beanspruchter Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln	42
Bild 44:	Mittelholz Probekörper Typ III mit Stabdübeln \varnothing 12 mm	43
Bild 45:	Vergleich der Mittelwerte der Versagenszeiten von Prüfkörper a und b je Verbindungsgeometrie für die Probekörper Typ I bis V mit den angestrebten Feuerwiderstandsdauern	45

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Verbindungsgeometrien der Probekörper unter Angabe der Versuchsdauer	5
Tab. 2:	Mittelwerte der Streckgrenze und Zugfestigkeit des verwendeten Stahls aus Zugversuchen nach DIN EN 10002-1:2001-12 und charakteristische Werte nach DIN EN 10025:1994-03	7
Tab. 3:	Berechnete Tragfähigkeiten der Probekörper im Brandfall nach [14] unter Angabe der Brandbeanspruchungsdauern	7
Tab. 4:	charakteristische, erwartete und erreichte Tragfähigkeiten und Verformungen der Verbindungen in Versuchen unter Normaltemperatur	21
Tab. 5:	Berechnete Tragfähigkeiten der Probekörper im Brandfall nach [14] unter Angabe der Vorbelastung und der Brandbeanspruchungsdauern	24
Tab. 6:	erreichte Versagenszeiten und aufgetretene Verformungen der Verbindungen im Brandversuch mit Angabe der angestrebten Feuerwiderstandsdauer	41
Tab. 7:	Maßgebende Versagensfälle der Verbindungen nach K.W. Johansen	42
Tab. 8:	Normierte Seitenholzdicke nach [13]	47
Tab. 9:	Bemessungsgeraden für die Tragfähigkeitsreduzierung im Brandfall für zweischnittige Stabdübelverbindungen nach [13]	47
Tab. 10:	Mindestabstände von Stabdübeln im Brandfall nach [13]	48
Tab. 11:	Vergleich der Tragfähigkeiten des Bemessungskonzepts nach [13] mit den in den Brandversuchen aufgebrauchten Belastungen und den erreichten Versagenszeiten	48

Formelzeichen und Abkürzungen

Die verwendeten Formelzeichen bestehen in der Regel aus einem Hauptzeiger und einem oder mehreren Fußzeigern, welche den Hauptzeiger näher definieren. Hier werden nur häufig verwendete Formelzeichen aufgeführt. Weitere in dieser Arbeit verwendete Formelzeichen werden unmittelbar nach der Formel, in der sie verwendet werden, erläutert.

Große lateinische Buchstaben

R	Tragfähigkeit
T	Temperatur

Kleine lateinische Buchstaben

b	Breite
f	Festigkeit
h	Höhe
l	Länge
t	Zeitdauer
u	Feuchtegehalt; Umfang

Griechische Buchstaben

η	Reduktionsfaktor
λ	Wärmeleitfähigkeit
ρ	Rohdichte

Fußzeiger

c	Druck
conn	Verbindung
d	Bemessungswert
fi	Brandbeanspruchung
k	charakteristisch
max	Maximalwert
min	Minimalwert
t	Zug
u	Bruch; feucht
0	parallel
0,05	5%-Quantile
0,2	20%-Quantile

1 Einführung

1.1 Ausgangssituation und Problembeschreibung

In Deutschland sowie den anderen europäischen Ländern werden in Abhängigkeit vom Bauwerkstyp Mindestanforderungen an die Feuerwiderstandsdauer der Konstruktion gestellt. Dementsprechend gehört zur Bemessung eines Tragwerks unter Normaltemperaturen in der Regel auch eine Brandschutzbemessung. Die derzeitigen Regelungen zur Ermittlung der Tragfähigkeit von ungeschützten Holzverbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln im Brandfall basieren überwiegend auf empirisch gewonnenen bzw. auf in Versuchsreihen ermittelten Daten. In einem vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) über die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (DGfH) geförderten Forschungsvorhaben, „Stabförmige Verbindungsmittel im Brandfall, Teil 1: Grundlagenuntersuchungen“ [14], wurde ein theoretisches Modell zur Ermittlung der Tragfähigkeit ungeschützter zweischrittiger, auf Abscheren beanspruchter Stabdübelverbindungen im Brandfall entwickelt. Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Untersuchungen wurde ein praxistgerechtes Bemessungskonzept für Brandbeanspruchungsdauern von 30 und 60 Minuten erarbeitet. Das Bemessungsverfahren sieht im Ergebnis eine Reduzierung der Tragfähigkeit unter Normaltemperatur zur Bestimmung der Beanspruchbarkeit im Brandfall vor.

Mit Hilfe von Finite-Element-Berechnungen konnten genaue Temperaturverteilungen von Stabdübelverbindungen für verschiedene Branddauern ermittelt werden (Bild 1). Die Untersuchungen zeigten, dass das Holz durch Aufnahme der durch den Stabdübel eingeleiteten Wärmeenergie diesen „kühlt“ und die Stahltemperaturen daher nicht so hoch werden wie ursprünglich erwartet.

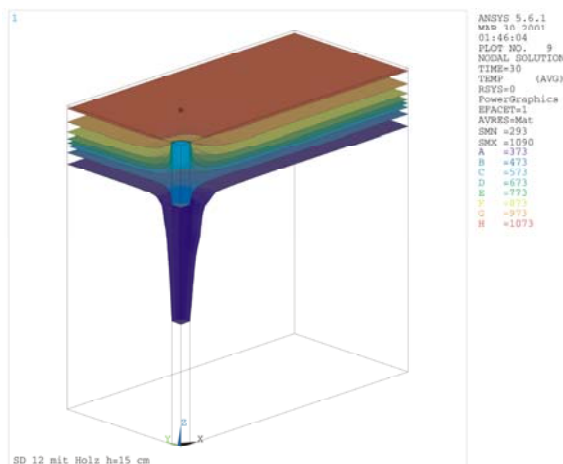


Bild 1: Temperaturverteilung innerhalb einer Holz-Stabdübel-Verbindung nach einer Brandbeanspruchungsdauer von 30 Minuten

Es wurde weiter nachgewiesen, dass unter Berücksichtigung der anzunehmenden Temperaturverteilung im Stahl und im Holz und den damit verbundenen Abminderungen der Werkstofffestigkeiten eine Bemessung der Verbindungen auf der Grundlage der Theorie von Johanson [10] wie im Kaltfall erfolgen kann. Das Bemessungsverfahren sieht vor, die Tragfähigkeit $R_{k,fi}$ im Brandfall, durch eine Reduzierung der Beanspruchbarkeit R_k unter Normaltemperaturen zu ermitteln. Die ermittelte Tragfähigkeit kann direkt dem Bemessungswert der Beanspruchung im Brandfall gegenübergestellt werden.

$$R_{k,fi} = \eta_{conn} \cdot R_k \quad (1)$$

mit:

R_k charakteristischer Wert der Tragfähigkeit auf Abscheren unter Normaltemperaturen

$R_{k,fi}$ charakteristischer Wert der Tragfähigkeit auf Abscheren im Brandfall

η_{conn} Faktor zur Tragfähigkeitsreduzierung im Brandfall

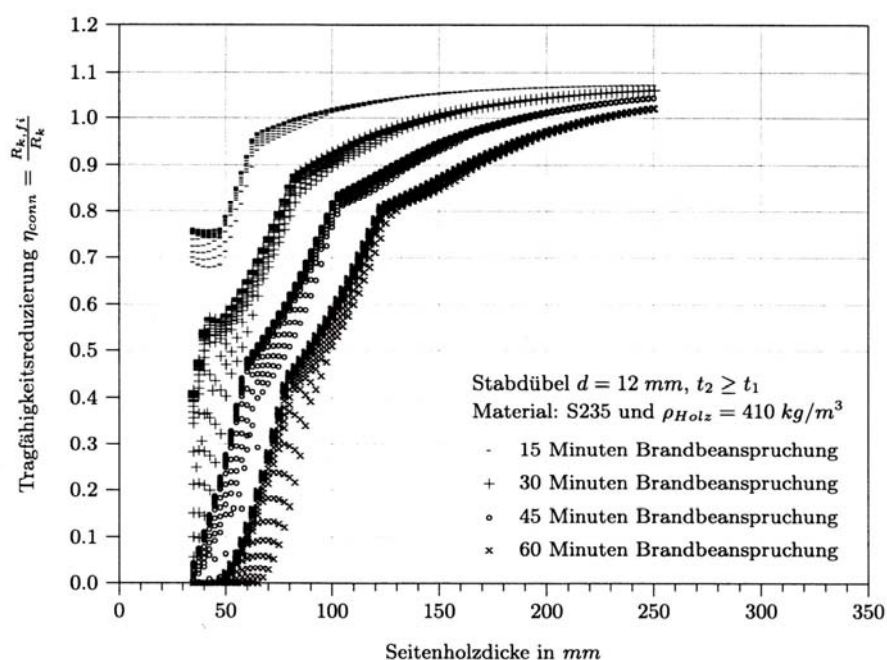


Bild 2: Tragfähigkeitsreduzierung für Stabdübel $\varnothing 12 \text{ mm}$, Stahlsorte S235 und Holz mit einer Rohdichte von 410 kg/m^3 (Mittelholzdicke \geq Seitenholzdicke t_1) nach [14]

Diese Erkenntnisse sind allerdings noch nicht in die derzeitigen Regelungen des überarbeiteten Eurocodes sowie dem Anwendungsdokument zur DIN 4102-22:2004-11 eingeflossen, da zum Zeitpunkt der Bearbeitung des Eurocodes eine experimentelle

Überprüfung der Erkenntnisse noch nicht erfolgt war. Bei einer Bestätigung des Bemessungskonzepts anhand von Brandversuchen ist es möglich und aufgrund der praxisgerechten Anwendbarkeit empfehlenswert, dieses Verfahren in die zukünftige Brandschutznormung aufzunehmen.

Die Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass bei Kenntnis der Temperaturverteilung innerhalb einer Verbindung die unter Normaltemperaturen üblichen Bemessungsverfahren verwendet werden können und damit häufig ausreichende Tragfähigkeiten auch ungeschützter Verbindungen im Brandfall für Feuerwiderstandszeiten von 30 bis 60 Minuten nachgewiesen werden können. Damit würde sich der konstruktive Aufwand bei bisher geschützt ausgeführten Verbindungen wesentlich verringern.

Des Weiteren könnten bei Bestätigung der theoretischen Erkenntnisse die entwickelten Verfahren auch auf andere Verbindungsarten erweitert werden. Diese Entwicklung würde einen wesentlichen Beitrag zur Minimierung von kostenintensiven Versuchen zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Holzverbindungen im Brandfall leisten.

1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Anhand von Brandversuchen soll das in Teil 1 „Grundlagenuntersuchungen“ des Forschungsvorhabens entwickelte Bemessungskonzept für stiftförmige Verbindungsmittel im Brandfall verifiziert werden. Hierzu ist es zum Einen erforderlich, die mit dem theoretischen Modell ermittelten Temperaturverteilungen innerhalb von zweischnittigen Holz-Holz-Stabdübelverbindungen zu bestätigen. Eine Verifizierung des thermischen Modells ermöglicht eine Erweiterung des Verfahrens auf andere Verbindungsarten. Zum Anderen sollen in den Versuchen die auf der Grundlage des Temperaturprofils berechneten Tragfähigkeiten zur Bestätigung des Bemessungskonzepts nachgewiesen werden. Dieses Verfahren ist die Voraussetzung zur Aufnahme des Konzepts in die zukünftigen Regelungen zum Nachweis der Tragfähigkeiten von Holzverbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln im Brandfall.

2 Konzeption der Brandversuche

2.1 Allgemeines

Im Rahmen des Versuchsprogramms wurde die Tragfähigkeit zweischnittiger, auf Abscheren beanspruchter Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall untersucht. Die Belastungsversuche erfolgten an 6 verschiedenen Verbindungsgeometrien. Je Verbindungsgeometrie wurden zwei Probekörper getestet, so dass insgesamt 12 Brandversuche durchzuführen waren.

Zur Durchführung von Brandversuchen an Holz-Stabdübelverbindungen existieren derzeit auf nationaler und europäischer Ebene keine Regelungen. Grundlage für die Umsetzung der Versuchsreihen bildeten daher die Allgemeinen Anforderungen für Feuerwiderstandsprüfungen nach DIN EN 1363-1:1999-10 [6]. Die Kalibrierung der Randbedingungen für die Aufbringung einer konstanten Zugkraft während des Brandversuches auf den Probekörper erfolgte in Anlehnung an das Belastungsverfahren nach DIN EN 26891:1991 [9] "Holzbauwerke; Verbindungen mit mechanischen Verbindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens".

2.2 Geometrie der Probekörper

Zur Verifizierung der Ergebnisse sowie zum Nachweis der Allgemeingültigkeit des theoretischen Modells war es erforderlich, die Prüfungen unter Variation verschiedener Parameter der Verbindungsgeometrien durchzuführen. Variiert wurden die Anzahl und die Durchmesser der Verbindungsmittel sowie die Dicke der Seiten- und Mittelhölzer. Die Umsetzung der notwendigen Parameterstudie erfolgte mit den in der Tab. 1 aufgeführten Probekörpertypen. Schwerpunkt der Studie bildeten Untersuchungen bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten. Zum Nachweis der Gültigkeit des Modells bis zu einer Branddauer von 60 Minuten wurde ein zusätzlicher Versuch geplant und durchgeführt.

Die Ermittlung der Tragfähigkeit des theoretischen Modells basiert auf der Grundlage, dass die für eine Bemessung unter Normaltemperaturen erforderlichen Rand- und Zwischenabstände für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten weiterhin ausreichend sind. Die Geometrie der Probekörper wurde unter Zugrundelegung der Mindestabstände für Holz-Stabdübelverbindungen nach DIN 1052:2004-08 geplant. Für eine Brandbeanspruchungsdauer von 60 Minuten gilt das Bemessungsverfahren unter Ausfüh-

rung erhöhter Rand- und Zwischenabstände. Die Geometrien der einzelnen Prüfkörper können den Zeichnungen des Anhangs C entnommen werden.

Tab. 1: Verbindungsgeometrien der Probekörper unter Angabe der Versuchsdauer

Typ des Probekörpers	Durchmesser d der SDü in mm	Länge ℓ der SDü in mm	Anzahl n der SDü in Stk.	Dicke t_1 des Seitenholzes in mm	Dicke t_2 des Mittelholzes in mm	Branddauer t_{fi} in min
I	12	200	8	50	100	30
II	12	200	16	50	100	30
III	12	280	16	70	140	30
IV	20	280	8	70	140	30
V	20	400	8	100	200	30
VI ⁽¹⁾	20	400	8	100	200	60

⁽¹⁾ entspricht dem Probekörper Typ V unter Erhöhung der Randabstände für eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten

2.3 Bestimmung der aufzubringenden Beanspruchung im Brandfall

Dem theoretischen Modell zur Ermittlung der Tragfähigkeiten zweischrittiger, auf Abscheren beanspruchter Holz-Stabdübelverbindungen im Brandfall wurden entsprechend den Regelungen des Eurocodes EN 1995-1-2 die 20%-Quantilwerte der Materialkennwerte für Holz und Stahl zugrunde gelegt. Somit entspricht die errechnete Tragfähigkeit rechnerisch ebenso einem 20%-Quantilwert. Da nur eine begrenzte Anzahl von Brandversuchen durchführbar ist, soll als Ergebnis dieses Forschungsprojekts zur Verifizierung des entwickelten Bemessungsverfahrens ein ausreichender Abstand zwischen den Tragfähigkeiten aus der Anwendung des Bemessungskonzepts und den maximal aufnehmbaren Belastungen nachgewiesen werden, um somit die Gültigkeit unter Einhaltung des national und europäisch geforderten Sicherheitsniveaus für einen Nachweis im Brandfall zu bestätigen. Zu diesem Zweck ist es erforderlich, in den Brandversuchen die rechnerisch nach [14] maximal aufnehmbare Beanspruchbarkeit für die jeweilige Feuerwiderstandsdauer als Belastung auf den Probekörper aufzubringen.

Im Vorfeld der Versuchsreihen wurden zur Ermittlung der maximal aufnehmbaren Beanspruchungen der Verbindungen für Feuerwiderstandsdauern von 30 und 60 Minuten Untersuchungen zur Bestimmung der Materialkennwerte an den verwendeten Holz- und Stahlkomponenten durchgeführt. Der Bemessungswert der Tragfähigkeit einer

zweischnittigen Holz-Stabdübelverbindung ist nach [1] von der Rohdichte des Holzes, dem Stabdübeldurchmesser und der Zugfestigkeit des verwendeten Stahls abhängig. Anhand dieser Daten konnten die für die einzelnen Brandversuche erwarteten Tragfähigkeiten mit dem im Teil 1 entwickelten theoretischen Modell ermittelt werden, um die Belastung des Prüfkörpers während des Brandversuchs entsprechend dieser Beanspruchbarkeit zu steuern.

2.3.1 Rohdichte des Holzes

Zur Herstellung der Probekörper wurde homogenes Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24h nach DIN 1052:2004-08 verwendet. Zur Sicherstellung praxisnaher Bedingungen entsprach das Material dem Standardlieferprogramm eines Brettschichtholzherstellers. Es wurde durch die Fa. Finnforest Merk bezogen. Verarbeitet wurden Fichtenholzlamellen, die mit Resorcin-Phenolleim zusammengefügt wurden.

Die Ermittlung der mittleren Rohdichte erfolgte an Holzproben aus den Versuchskörpern. Die Untersuchungen wurden an der Technischen Universität Berlin durchgeführt. Bestimmt wurde die Rohdichte des Holzes nach DIN 52182:1976-09 [4] „Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte“ anhand von Darrtrocknung. Für eine Holzfeuchte von 12% wurden der Minimal-, der Maximal- sowie der Mittelwert der Rohdichten bestimmt, siehe Anhang B.

$$\rho_{\min} = 406 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\max} = 529 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{mean}} = 457 \text{ kg/m}^3$$

Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL24h weist nach DIN 1052:2004-08 eine charakteristische Rohdichte von 380 kg/m^3 auf. Anhand der Untersuchungen wurde für alle Probekörper eine Rohdichte größer 406 kg/m^3 ermittelt, so dass davon auszugehen ist, dass das verwendete Brettschichtholz im Hinblick auf die Rohdichteigenschaften mindestens der Festigkeitsklasse GL28h mit einem charakteristischen Wert der Rohdichte von 410 kg/m^3 zuzuordnen ist. Der Ermittlung der Tragfähigkeit der Kaltversuche als auch der im Brandfall zu erwartenden maximalen Tragfähigkeit der Verbindungen wurde demzufolge eine Rohdichte von 410 kg/m^3 zugrunde gelegt. Da dieser Wert in etwa dem Minimalwert der untersuchten Probekörper entspricht, wird mit dieser Vorgehensweise zudem sichergestellt, dass, mit Hinblick auf die Streuung der Rohdichte des Holzes, jede Verbindung die geforderte Tragfähigkeit erreicht.

2.3.2 Zugfestigkeit des Stahls

Die Herstellung der Stabdübel erfolgte aus Stahlsträngen der Stahlsorte S 235 nach DIN EN 10025:1994-03. Zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften wurden Stahlzugversuche nach DIN EN 10002-1:2001-12 mit einer Prüfmaschine der Fa. Instron des Typs 8502 durchgeführt. Als Ergebnis dieser Untersuchungen wurden die Mittelwerte der Streckgrenze sowie der Zugfestigkeit bestimmt. Sie sind in Tab. 2 zusammengestellt. Zum Vergleich sind die charakteristischen Materialkennwerte nach DIN EN 10025 angegeben. Um Einflüsse aus der Streuung des Materials auf die Tragfähigkeit im Brandfall gering zu halten, wurden die aus den verschiedenen Stahlsträngen gefertigten Stabdübel gleichmäßig auf die zu prüfenden Probekörper verteilt.

Tab. 2: Mittelwerte der Streckgrenze und Zugfestigkeit des verwendeten Stahls aus Zugversuchen nach DIN EN 10002-1:2001-12 und charakteristische Werte nach DIN EN 10025:1994-03

Durchmesser d in mm	Mittelwerte aus Versuchen		Charakteristische Werte nach DIN EN 10025:1994-03	
	Streckgrenze $f_{y,mean}$ in N/mm ²	Zugfestigkeit $f_{u,mean}$ in N/mm ²	Streckgrenze $f_{y,k}$ in N/mm ²	Zugfestigkeit $f_{u,k}$ in N/mm ²
12	324	457	240	360
20	305	421		

2.3.3 Beanspruchbarkeit der Verbindungen im Brandfall

Mit dem in Teil 1 des Forschungsprojekts entwickelten thermischen Modell wurde die Temperaturentwicklung für die zu prüfenden Verbindungen der Tab. 1 in Abhängigkeit der Geometrie und der jeweiligen Feuerwiderstandsdauer berechnet.

Tab. 3: Berechnete Tragfähigkeiten der Probekörper im Brandfall nach [14] unter Angabe der Brandbeanspruchungsdauern

Probekörpertyp	Branddauer t_{fi} in min	Tragfähigkeit $R_{k,fi}$ nach [14] in kN
I	30	59,0
II	30	110,1
III	30	140,2
IV	30	141,6
V	30	183,3
VI	60	114,1

Auf der Grundlage des Temperaturprofils und der nach den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 ermittelten Materialkennwerte für das Brettschichtholz und den Stahl wurden durch Anwendung der Lösungsalgorithmen nach Teil 1 Kapitel 4 die zu erwartenden Tragfähigkeiten für die angestrebten Feuerwiderstandsdauern bestimmt.

3 Versuchsvorbereitung

3.1 Aufbau und Herstellung der Probekörper

Die einzelnen Komponenten aus denen die Probekörper zusammengesetzt wurden sind beispielhaft für den Typ IIa in Bild 3 abgebildet. Zu sehen sind die Seitenhölzer, das Mittel- und das Füllholz, Haltebleche, Passbolzen, Stabdübel und Thermoelemente. Nicht dargestellt sind Kleinteile wie Schrauben, Muttern, Unterlegscheiben und Kabelbinder.

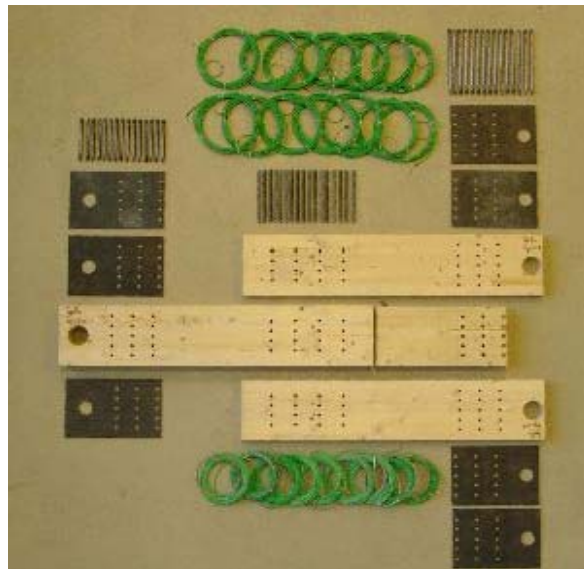


Bild 3: Einzelkomponenten des Prüfkörpers vom Typ IIa

Der Zusammenbau der Probekörper lässt sich in drei wesentliche Abschnitte unterteilen:

- Vorfertigung der Holzelemente
- Befestigung der Thermoelemente an den Stabdübeln
- Zusammenbau des Probekörpers

3.1.1 Vorfertigung der Holzelemente

In die Holzbauteile wurden zunächst die Bohrungen für die Stabdübel und die Nuten zur Aufnahme der Thermoelemente eingebracht. Die Temperaturen im Holz während des Brandversuchs wurden mit Mantelthermoelementen gemessen. Es wurden Ele-

mente mit Durchmessern von 1,5 mm verwendet. Die maximale Bohrtiefe zur Aufnahme der Elemente betrug 100 mm, der erforderliche Bohrlochdurchmesser 1,65 mm. Aufgrund des im Vergleich zur Bohrtiefe geringen Bohrdurchmessers würden sich durch Verziehen des Bohrers große Abweichungen zur geplanten Bohrachse ergeben. Um die Thermolemente möglichst präzise an die vorgesehenen Messstellen zu platzieren, wurden die Bohrungen zweistufig ausgeführt. Die erste Stufe erfolgte bis in eine Bohrtiefe von max. 80 mm mit einem Bohrdurchmesser von 5 mm. In der zweiten Stufe wurde der Kanal durch Aufbohren auf die entgültige Messtiefe mit einem Bohrdurchmesser von 1,65 mm fertiggestellt. Die Bohrtiefe für die zweite Stufe betrug 20 mm.

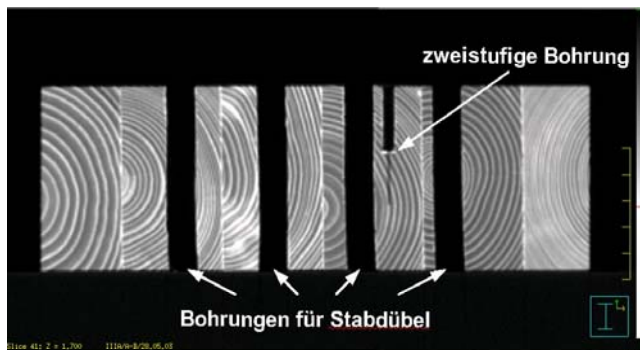


Bild 4: CT-Aufnahme eines Seitenholzes



Bild 5: Computer-Tomograph mit Probekörper

Kontrollaufnahmen mit einem Computer-Tomographen ergaben eine maximale Abdrift des Bohrkanals aus der vorgesehenen Bohrachse von 1,9 mm bei einer Bohrtiefe von 100 mm. Bild 4 zeigt einen Schnitt durch das Seitenholz entlang einer Bohrachse zur Aufnahme eines Thermoelements.

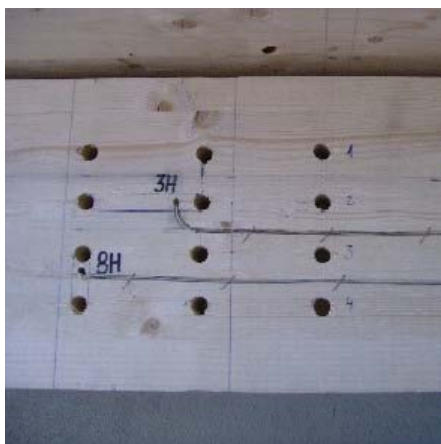


Bild 6: Seitenholz mit Thermoelementen

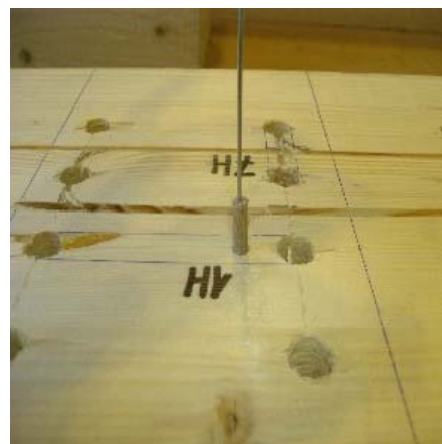


Bild 7: Thermoelement mit Holzhülse

Zur Aufnahme der Thermodrähte ist in die Seiten- und Mittelhölzer im Bereich der Scherfuge zusätzlich eine Nut eingefräst worden. In dieser Nut wurden die Drähte geschützt aus der Brandkammer herausgeführt, siehe Bild 6. Die Abmessungen der Kanäle orientierten sich an der Anzahl der zu verlegenden Thermoelemente pro Kanal. Zur Einhaltung des zulässigen Knickradius der Thermoelemente wurden die Ränder der Bohrlöcher für die Thermoelemente sowohl für die Messpunkte im Holz als auch am Stahl ausgerundet, siehe Bild 7.

3.2 Befestigung der Thermoelemente an den Stabdübeln

Zur Erfassung der Temperaturverläufe innerhalb der Verbindungsmittel über die Zeit wurden an einzelnen Stabdübeln bis zu 4 Mantelthermoelemente in unterschiedlichen Abständen zur beflamnten Oberfläche angeordnet. Der Abstand der Messpunkte von der Oberfläche erstreckte sich je nach Art der Verbindungsgeometrie von oberflächennahen Bereichen mit einer Tiefe von 10 mm bis zu einer maximalen Tiefe von 200 mm. Um Messfehler einzuschränken wurden bis zu 5 Thermoelemente mit gleichem Abstand zur Brandoberfläche je Verbindungsgeometrie und Probekörper angeordnet. Zur Gewährleistung einer optimalen Aufzeichnung der Temperaturen wurden die Thermoelemente an den Stabdübeln mit dem Hartlötverfahren befestigt. Als Lötmedium wurde Silberlot 1020 XFC der Firma Wolfram Hommelsheim GmbH mit einer Dicke von 1,5 mm verwendet. Der Schmelzpunkt des Silberlots lag nach Herstellerangaben zwischen 620 und 660°C. Somit konnte gewährleistet werden, dass der Kontakt der Messspitze des Thermoelements mit dem Stabdübel während des gesamten Versuchs sichergestellt war, da die erwarteten Temperaturen mit ca. 460°C unter dem Schmelzpunkt des Lötmittels lagen.

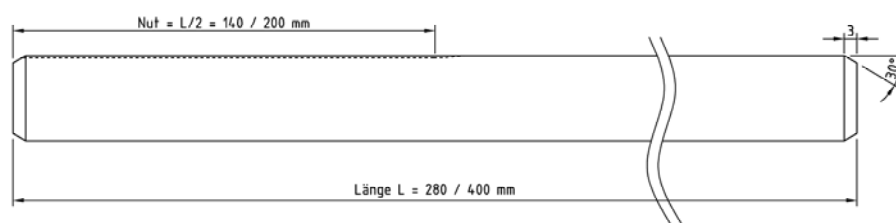


Bild 8: Stabdübel \varnothing 20 mm mit Nut (0,5 x 0,5 mm) und Anfasung

In die Stabdübel wurden für den Einbau der Thermoelemente Nuten eingefräst. Breite und Tiefe der Nut betragen 0,5 mm, die Länge entsprach jeweils der halben Stabdü-

bellänge. Das Einfräsen einer Nut in die Stabdübel konnte bezüglich der auftretenden Spannungen im Stabdübel als unkritisch angesehen werden, da die Fehlflächen der Nuten am Stabdübelquerschnitt weniger als 0,4 % der ursprünglichen Querschnittsfläche betragen. Weiterhin wurden die Stabdübel so eingebaut, dass die Nuten in der Spannungsnulllinie der durch das Biegemoment hervorgerufenen Spannungen lagen.

Bild 9 zeigt die an einem Stabdübel angelöteten Thermoelemente. In einer Nut wurden zwei Thermoelemente befestigt. Die Lötstellen mussten in einem zweiten Schritt nachbearbeitet werden, um durch eine glatte Oberfläche einen optimalen Kontakt zum Holz zu gewährleisten.

Da während des Hartlötens die Gefahr des Ausglühens der Messspitze des Thermoelements bestand, wurde durch eine Temperaturmessung während des Lötvorgangs sichergestellt, dass eine Temperatur von 700°C nicht überschritten wurde.



Bild 9: Stabdübel mit angelötetem Thermoelement (links) und eine nachbearbeitete Kontaktstelle (rechts)

3.3 Zusammenbau der Probekörper

Begonnen wurde der Zusammenbau der Probekörper mit dem Seitenholz A. Im ersten Schritt erfolgte der Einbau der Holzthermoelemente. Die Bohrlöcher für die Thermoelemente lagen in durch die Lochleibungsspannungen der Stabdübel belasteten Bereichen. Zur Vermeidung ungünstiger Spannungsumlagerungen mussten die Vorbohrungen mit Hülsen ausgefüllt werden, siehe Bild 7. Die Hülsen bestanden aus Buchenholz und wurden entsprechend der Bohrtiefe der Bohrung vorgefertigt.

Im nächsten Schritt wurden die Stabdübel mit den Thermoelementen eingebaut. Die Fixierung der Thermoelemente in der Nut des Holzes erfolgte mit Klammern. Nachdem die Thermoelemente im Seitenholz befestigt wurden, konnte das Mittelholz mit dem Seitenholz A zusammengefügt werden. Der Zusammenbau erfolgte mit Hilfe von Gewindestangen, die durch die nicht mit Stabdübeln besetzten Löcher geführt wurden, siehe Bild 10. Durch das Anspannen der Mutter wurde die erforderliche Kraft zum Zusammenpressen der Bauteile aufgebracht.

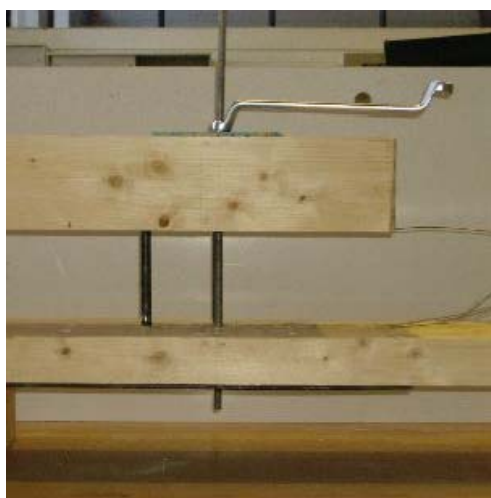


Bild 10: Zusammenbau von Seitenholz A mit dem Mittelholz (links) und Verlegung der Thermodrähte und Füllholz mit Fichtenholzleisten (rechts)

Die erwarteten Verformungen der Verbindungen während der Versuche machten konstruktive Maßnahmen zum Schutz der Thermoelemente erforderlich, die ein Abreißen der Elemente verhindern sollten. Hierzu wurden die Thermoelemente im Bereich des Füllholzes wellenförmig verlegt, um die sich einstellenden Verformungen der Verbindung während des Versuches aufnehmen zu können, siehe Bild 10. Zwischen dem Füllholz und den Seitenhölzern ist ein Abstand in der Dicke der Bleche der Holz-Stahlblechverbindung von 6 mm belassen worden. In diesem Spalt wurden die gebündelten und wellenförmig verlegten Thermoelemente angeordnet. Den dichten Abschluss zur Brandkammer bildeten auf das Füllholz aufgenagelte Fichtenholzleisten. Das Füllholz schloss bündig mit dem Mittelholz ab, siehe Bild 10.

Bild 11 zeigt das Zusammenfügen von Seitenholz C mit dem Mittelholz. Analog dem Seitenholz A erfolgt das Zusammensetzen mit Hilfe einer Gewindestange. Anschließend wurden die Stahlbleche, über die der Probekörper mit dem Prüfrahmen verbunden war, eingebaut. Während des Einbaus der Passbolzen in den Probekörper verblie-

ben die Gewindestangen im angespannten Zustand im Probekörper, um ein Aufklaffen der zu prüfenden Verbindung zu verhindern. Im letzten Schritt wurden die Gewindestangen entfernt und die fehlenden Stabdübel eingesetzt.



Bild 11: Zusammenbau von Seitenholz C mit dem Mittelholz

In Bild 12 ist beispielhaft ein zusammengebauter Probekörper des Typs IIa abgebildet. Der Prüfkörper enthielt insgesamt 23 Thermoelemente und hatte ein Gesamtgewicht von ca. 85 kg. Eine anschließend durchgeführte Funktionsprüfung der Thermoelemente an allen Probekörpern ergab eine Ausfallrate von weniger als 8 % der verbauten Elemente infolge des Einbaus. Fehlerhafte Thermoelemente konnten durch diese Prüfung schon im Vorfeld erkannt und aus der Messung herausgenommen werden.

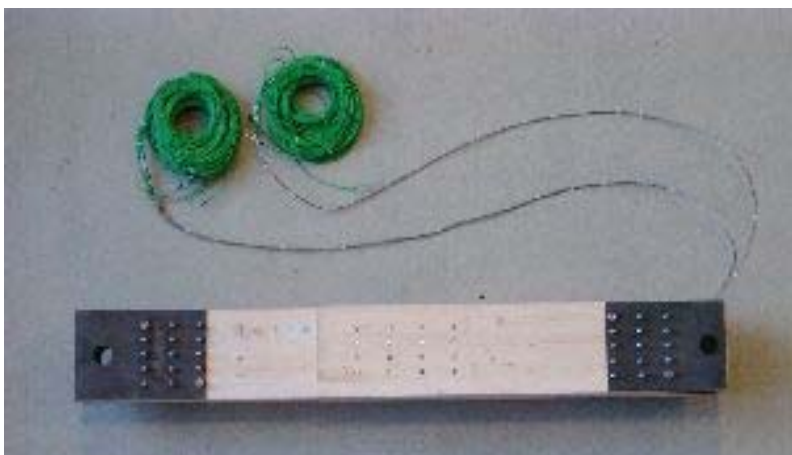


Bild 12: Zusammengebauter Probekörper (Typ IIa)

3.4 Anordnung der Thermoelemente

Die Messung der Temperaturen in der zu prüfenden Verbindung wurde mit Mantelthermoelementen vom Typ K der Klasse 2 der Herstellerfirmen Fisher-Rosemount GmbH & Co. und Omega Newport Electronics GmbH vorgenommen. Die verwendeten Elemente können lt. Herstellerangaben im Temperaturbereich zwischen -40°C und 1200°C bei einer Grenzabweichung von $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ eingesetzt werden. Die Elemente hatten eine Länge l_1 von 3000 mm, die sich anschließende Ausgleichsleitung eine Länge l_2 von 5000 mm. Es wurden je nach Art der Lage der Messpunkte, im Holz oder im Stahl, zwei Varianten von Thermoelementen verwendet. Elemente, die im Holz zur Anwendung kamen, hatten einen Durchmesser von 1,5 mm. Zur Temperaturmessung im Stahl wurden Thermoelemente mit einem Durchmesser von 0,5 mm verwendet. Aufgebaut sind die Thermoelemente aus einer Hülle aus rostfreiem Stahl in dem sich die Thermopaare befinden. Die Isolierung der Thermopaare gegeneinander und gegen die Ausgleichsleitung wurde durch ein Isolationsmaterial bestehend aus Magnesiumoxid sichergestellt. Die Messstelle des Mantelthermoelementes befindet sich an der Spitze.

In Abhängigkeit von der Verbindungsgeometrie wurden in die Probekörper zwischen 9 und 26 Mantelthermoelemente eingebaut. Die Aufnahme der Temperaturen im Holz erfolgte mit 9 bis 10 Thermoelementen, die im Stahl der Stabdübel mit 12 bis 16 Elementen. Die Thermoelemente im Probekörper wurden in verschiedenen Bereichen angeordnet. Kriterien für die Lage der Messpunkte im Holz waren sowohl die erwartete Abbrandgrenze als auch der Übergang vom Seiten- zum Mittelholz. Zur Aufnahme der Stahltemperaturen wurden auf dem Stabdübel Thermoelemente in unterschiedlichen Abständen zur Brandoberfläche befestigt. Die Lage und Bezeichnungen der verschiedenen Thermoelemente sind im Anhang D im Detail aufgeführt.

3.5 Klimatisierung der Probekörper

Zur Herstellung der Probekörper wurde trockenes Brettschichtholz verwendet. Die Konditionierung der Probekörper erfolgte im montierten Zustand in einer Klimakammer an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin. Eingelagert wurden die Probekörper 14 Tage bei einem Normklima von 65 % relativer Luftfeuchte und einer mittleren Temperatur von 20°C . Zwischen dem Einbau des Probekörpers in die Prüfeinrichtung und dem Brandversuch lagen aus organisatorischen Gründen 24 Stunden. Die durch diese zeitliche Verzögerung entstandene Veränderung der Holzfeuchte kann vernachlässigt werden.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Allgemeines

Die Brandversuche wurden an der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) in Berlin durchgeführt. Die Planung und Konstruktion der Versuchseinrichtung erfolgte unter Mitwirkung des Fachgebiets Baukonstruktionen der Technischen Universität Berlin.

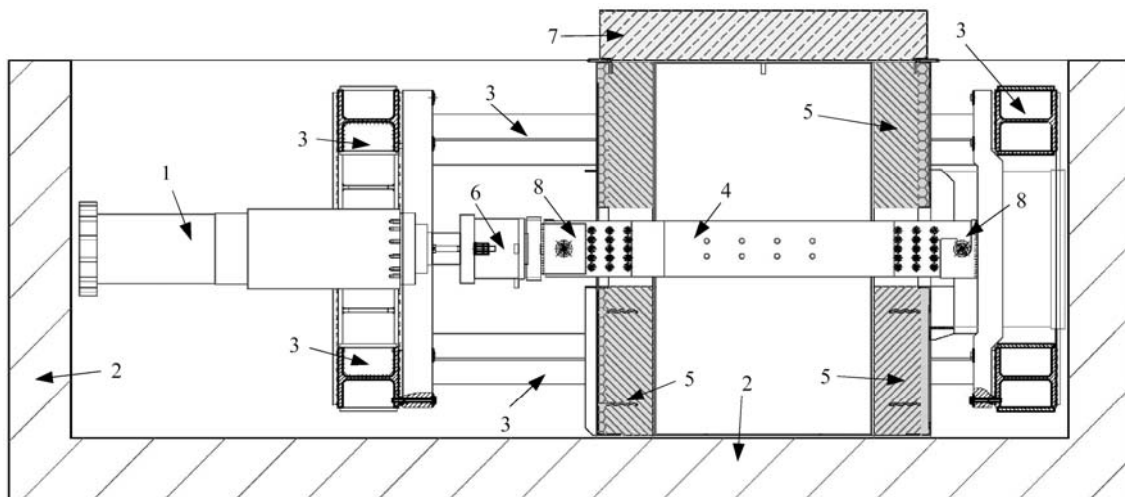
Insgesamt wurden 12 Brandversuche mit 6 verschiedenen Verbindungsgeometrien durchgeführt. In Abhängigkeit der Größe der Beanspruchung für die erwartete Feuerwiderstandsdauer, vgl. Abschnitt 2.3.3, ergaben sich unterschiedliche Versagenszeiten der Verbindungen. Im Vorfeld der Versuchsserie wurden 2 Vorversuche unter Brandbeanspruchung durchgeführt. Da durch die Probekörper zusätzliche Brandlasten in den Prüfstand eingebracht werden, war es erforderlich, in einem ersten Vorversuch die Steuerung der Brennerleistung zu kalibrieren. Der zweite Vorversuch wurde zur Überprüfung des gesamten Versuchsaufbaus einschließlich aller Aufzeichnungsgeräte durchgeführt.

Zusätzlich erfolgte im Vorfeld der Brandversuche für jede Verbindungsgeometrie ein Zugversuch unter Normaltemperatur (Kaltversuch). Die Messergebnisse der Kaltversuche dienen einer späteren Beurteilung der in den Brandversuchen erreichten Tragfähigkeiten der Verbindungen.

4.2 Versuchseinrichtung

Der Versuchsaufbau, der in Bild 13 schematisch dargestellt ist, besteht aus einem Prüfrahmensystem und dem Brandofen, die in einen Deckenprüfofen eingebaut wurden. Im Zentrum der Versuchsanordnung befindet sich der Prüfofen mit dem Probekörper. Der Prüfofen ist von einem Rahmen umgeben, der über einen Hydraulikzylinder die erforderliche Zugkraft auf den Probekörper aufbringt. Prüfofen und Prüfrahmensystem sind nicht kraftschlüssig miteinander verbunden. Der Prüfrahmensystem wurde als Stahlrahmenkonstruktion bestehend aus I-Profilträgern erstellt. Die gesamte Tragkonstruktion ist auf eine maximale Zugbelastung von 400 kN bei einer Nachgiebigkeit von 0,9 mm / 100 kN ausgelegt. Zur Aufnahme des Probekörpers ist an einer Seite des Rahmens eine hakenförmige Halterung an eine massive Stahlplatte geschweißt, die mit der Rahmenkonstruktion verschraubt wurde, siehe Bild 15. Die Form der Halterung ermöglicht einen einfachen Ein- und Ausbau des Probekörpers. Zur Aufnahme der Belastungseinrichtung wurde eine Stahlplatte mit einer mittigen Öffnung am Prüfrahmensystem befestigt.

Die Belastungseinrichtung besteht aus einem servo-hydraulisch betriebenen Zylinder mit hydrostatischer Lagerung. Der Nennhub des Zylinders beträgt 500 mm. Über den gesamten Versuch wurde eine konstante Zugkraft auf die Probekörper aufgebracht. Die Realisierung dieser Forderung erfolgte mit Hilfe einer Kraftmessdose, die zwischen Zugzylinder und Probekörper befestigt ist.



- | | | |
|--------------------|-------------------|-------------------------------|
| 1 – Zugzylinder | 4 – Probekörper | 7 – Deckenelement |
| 2 – Deckenprüföfen | 5 – Brandofen | 8 – Anschluss an den Prüfrahm |
| 3 – Prüfrahm | 6 – Kraftmessdose | |

Bild 13: Versuchsaufbau (Seitenansicht)



Bild 14: Offener Deckenprüföfen

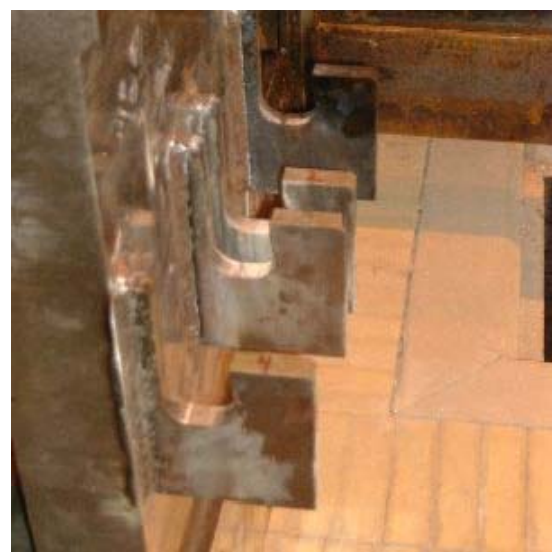


Bild 15: Halterungen für die Probekörper

Der Prüfofen, Bild 14, besteht aus vier fest montierten Wandelementen sowie drei Deckenelementen. Die Dreiteilung der Prüfofenabdeckung, siehe Bild 16, wurde aus zwei Gründen vorgenommen. Zum Einen dient sie der Positionierung der Thermoelemente zur Steuerung der Brandbeanspruchung. Seitlich neben den Verbindungsmittelgruppen befinden sich zur Temperaturmessung Plate-Elemente. Da die Prüfkörper Gesamtbreiten von 200, 280 und 400 mm aufweisen und die Plate-Elemente fest mit dem Deckensegment verbunden sind, wurden zur Sicherstellung eines einheitlichen Abstands der Elemente zur Verbindungsmittelgruppe von 100 mm drei mittlere Deckensegmente gefertigt, siehe Bild 18. Zum Anderen ermöglicht die Dreiteilung des Deckenelements einen schnelleren Ausbau und somit ein rascheres Ablöschen des Prüfkörpers nach Abschluss des Brandversuchs, da zum Ausbau nur das mittlere Deckenelement und nicht die gesamte Deckenfläche entfernt werden musste. Das unverzügliche Ablöschen ist im Hinblick auf die Genauigkeit bei der Bestimmung der Abbrandraten von maßgeblicher Bedeutung.

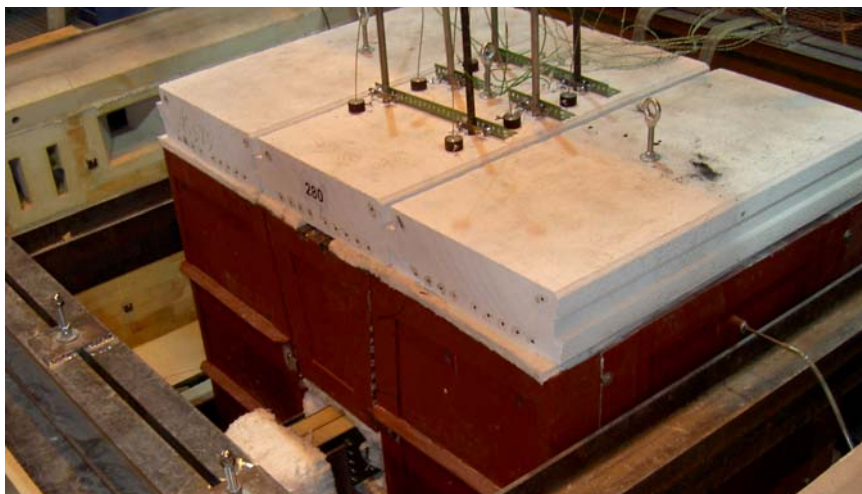


Bild 16: Dreiteilung der Abdeckung des Prüfofens

In das Wandelement an der Längsseite des Versuchsstandes ist ein isoliertes Sichtfenster integriert, durch das eine Videoaufzeichnung des gesamten Versuchs erfolgen konnte, siehe Bild 17.

Zum Anschluss des Prüfkörpers an die Belastungseinrichtung wurden zwei Wände mit schlitzförmigen Öffnungen versehen, siehe Bild 17. Sowohl die unterschiedlichen Geometrien als auch die Gewährleistung der zwängungsfreien Verformung der zu prüfenden Verbindung machten den Einsatz einer flexiblen Isolierung im Bereich der Wandöffnungen erforderlich. Verwendet wurde eine Steinwolle, die mehrlagig um den zu schützenden Bereich gewickelt wurde. Durch die Umwicklung wurde, bei gleichzeitig ausreichender Flexibilität gegenüber den auftretenden Verformungen am Probekörper, die geforderte Dichtigkeit sowie die notwendige Isolierung des Prüfofens erreicht.

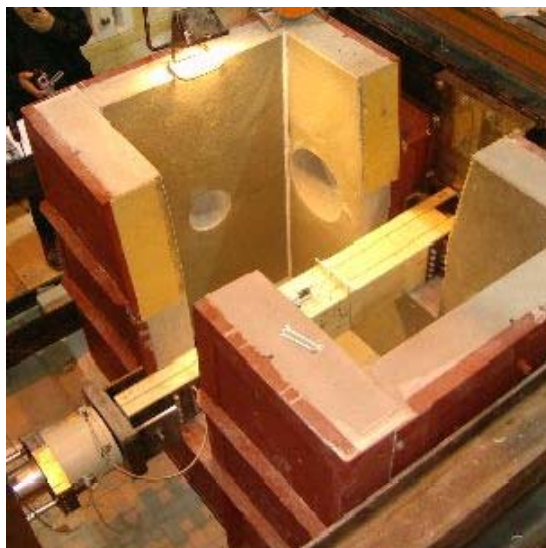


Bild 17: Prüfofen (Kaltversuch)



Bild 18: Deckensegment mit Thermoelementen

Die Brenneröffnungen sind in Höhe der Probekörper angeordnet und in Richtung der Längsachse der Probekörper ausgerichtet. Durch die konstruktive Ausbildung einer Mindesttiefe der Brennerschächte konnte eine direkte Beflammung der zu prüfenden Verbindung verhindert werden.

4.3 Kaltversuche

Zur Bewertung der in den Brandversuchen erreichten Tragfähigkeiten der Verbindungen wurden Kaltversuche an baugleichen Prüfkörpern durchgeführt. Für die Ermittlung der erwarteten Tragfähigkeiten unter Normaltemperaturen sowie im Brandfall wurden im Vorfeld der Versuchsreihe die Zugfestigkeit und die Streckgrenze des Stahls sowie die Rohdichte des verwendeten Holzes bestimmt. Untersuchungen zur Ermittlung der Lochleibungsfestigkeiten wurden nicht durchgeführt. Diese wurde anhand der an den Proben bestimmten Rohdichten und des Verbindungsmitteldurchmessers entsprechend der in DIN 1052:2004-08 angegebenen Beziehung zugrunde gelegt.

$$f_{h,0} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho \quad (2)$$

mit:

d Durchmesser des Stabdübels in mm

ρ aus Darrtrocknung ermittelte Rohdichte des Holzes der Probekörper in kg/m^3

Für die einzelnen Prüfkörper wurden nach DIN 1052:2004-08 die für die Kaltversuche erwarteten Tragfähigkeiten R_{est} anhand der Verbindungsgeometrie, der in den Voruntersuchungen bestimmten Rohdichte sowie der Streckgrenze und der Zugfestigkeit des Stahls ermittelt. Die berechneten Tragfähigkeiten R_{est} gelten für die minimal ermittelte Rohdichte aller Probekörper. Die Ermittlung einer wahrscheinlichen Tragfähigkeit der Verbindungen in den Versuchen unter Normaltemperaturen erfolgt näherungsweise für eine um 20% erhöhte charakteristische Tragfähigkeit R_k . Den Versuchen wurde für alle Probekörper einheitlich als wahrscheinlich zu erwartende Tragfähigkeit $R_{max,est}$ die 1,2-fache charakteristische Tragfähigkeit zugrunde gelegt. Die in den Kaltversuchen erwarteten sowie die charakteristischen Tragfähigkeiten sind in Tab. 4 für die einzelnen Verbindungstypen zusammengestellt.

$$R_{max,est} = 1,2 \cdot R_k \quad (3)$$

mit:

$R_{max,est}$ maximal zu erwartende Tragfähigkeit der Verbindung unter Normaltemperaturen in kN

R_k charakteristischer Wert der Tragfähigkeit nach DIN 1052:2004-08 für Brettschichtholz der Festigkeitsklasse GL28h und eine Stahlsorte S235 in kN

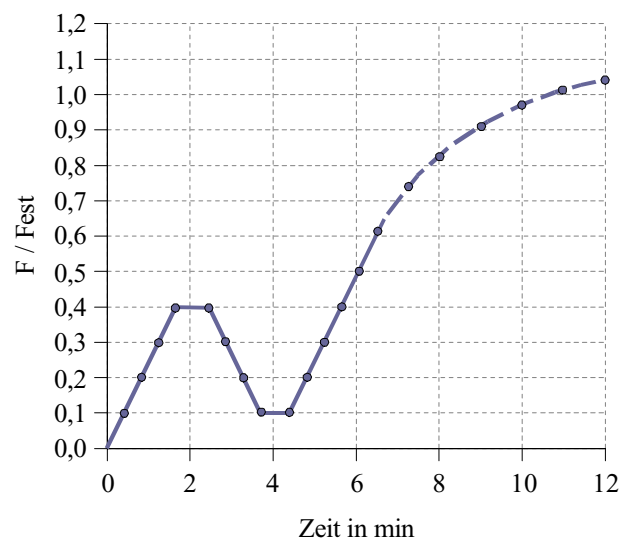


Bild 19: Belastungsrampe nach DIN EN 26891:1991 (Belastungsverfahren)

Gemäß DIN EN 26891:1991-07 [9] für Holzbauwerke wurden für die verschiedenen Verbindungsgeometrien der Probekörper die Tragfähigkeiten sowie deren Verformungsverhalten unter Normaltemperaturen ermittelt. Die Belastung des Probekörpers erfolgte durch eine Zugkraft parallel zur Faser bis zum Versagen der Verbindung (Be-

lastungsverfahren), siehe Bild 19. Die Vorbelastung R_{inf} wurde mit 40% der maximal zu erwartenden Tragfähigkeit $R_{max,est}$ nach DIN EN 26891:1991-07 (Bild 19) festgelegt.

$$R_{inf} = 0,4 \cdot R_{max,est} \quad (4)$$

Als Prüfmaschine zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Verbindung wurde der für die Brandversuche konzipierte Prüfrahm mit Belastungseinrichtung eingesetzt. Die Messwerte wurden mit Kraft- und Wegsensoren aufgezeichnet und sind in den Diagrammen im Anhang E dargestellt. Die Abbruchkriterien für den Versuch waren entsprechend DIN EN 26891:1991-07 entweder eine Überschreitung der Tragfähigkeit oder eine Verformung der Verbindung von mehr als 15 mm. In Tab. 4 sind die ermittelten Tragfähigkeiten sowie die zugehörigen Verformungen der Verbindungen aufgelistet. Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte in Zeitschritten von 1,2 s.

Das Verformungsverhalten der Verbindung während der Kaltversuche wurde mit Hilfe einer Messschiene der Firma MTS Sensor Technologie GmbH mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,002$ mm aufgezeichnet. Die Messdaten wurden vollautomatisch von einem EDV gestützten System erfasst.

Tab. 4: charakteristische, erwartete und erreichte Tragfähigkeiten und Verformungen der Verbindungen in Versuchen unter Normaltemperatur

Typ des Probekörpers	charakteristische Tragfähigkeit R_k in kN	erwartete Tragfähigkeit $R_{max,est}$ in kN	Tragfähigkeit R_{est} (Materialversuche) in kN	Tragfähigkeit R im Kaltversuch in kN	Verformung in mm
I	95,6	114,9	102,8	159,0	9,9
II	178,4	214,1	192,5	280,4	4,9
III	178,4	214,1	200,5	320,0	8,9
IV	204,3	245,2	210,6	301,7	3,4
V	213,4	256,1	230,4	395,6	6,1
VI	213,4	256,1	230,4	400,4	14,9

Die Ergebnisse zeigen, dass alle Verbindungen die erwarteten Tragfähigkeiten und die anhand der aus Voruntersuchungen ermittelten Materialkennwerte errechneten Tragfähigkeiten erreicht und zum Teil deutlich überschritten haben. Die mittlere Abweichung zwischen der erwarteten Tragfähigkeit $R_{max,est}$ und der im Kaltversuch erreichten Tragfähigkeit R liegt für Verbindungen mit Stabdübeldurchmessern von 12 mm bei 39% und für Stabdübeldurchmesser von 20 mm bei 44%. Die in den Versuchen erreichten höheren Tragfähigkeiten sind auch auf die teilweise an den Proben ermittelten deutlich höheren Rohdichten des Holzes zurückzuführen.

4.4 Brandbeanspruchung nach DIN EN 1363-1 (ISO 834-1)

Dem numerischen Modell zur Ermittlung der Tragfähigkeiten stabförmiger Verbindungsmittel im Brandfall wurde eine Temperaturentwicklung im Brandraum entsprechend der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) nach DIN EN 1363-1 (ISO 834-1) [6] zugrunde gelegt.

$$T - T_0 = 345 \cdot \log(8t + 1) \quad (5)$$

mit:

- T Brandraumtemperatur in K
- T₀ Temperatur des Probekörpers in K
- t Zeit in Minuten

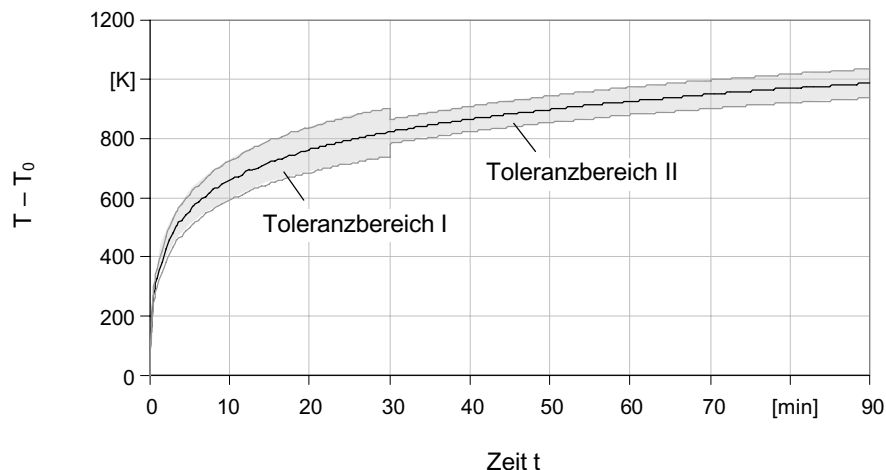


Bild 20: Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN EN 1363-1 (ISO 834-1) [6]

Zur Verifizierung der theoretischen Ergebnisse wurde dieses Brandszenario unter Einhaltung der zulässigen Toleranzbereiche im Prüfofen eingestellt.

Die Beflammung der Prüfofens erfolgte mit zwei Industrieleichtölbrennern mit einer Nennleistung von 464 kW je Brenner. Bei dem Brennstoff handelte es sich um leichtes Heizöl (EL). Die Ofentemperatur wurde mit Hilfe von 6 Plattenthermoelementen (Platte-Elemente) (Bild 18) über ein automatisches EDV-System gesteuert. Zu Kontroll- und Vergleichszwecken wurden die Temperaturen zusätzlich mit 6 herkömmlichen Mantelthermoelementen mit einem Durchmesser von 3 mm aufgezeichnet. Des weiteren erfolgte eine Aufzeichnung der Systemtemperaturen der Prüfkonstruktion an exponierten Messpunkten, wie beispielsweise am Prüfrahen sowie an den Einspannungen des Probekörpers. Zum Einsatz kamen hier NiCr-Ni Drahtthermoelemente vom Typ K der Firma Fisher-Rosemount.

Der Ofendruck wurde mit zwei „T“-förmigen Druckmessköpfen nach DIN EN 1363-1 [6] überwacht. Somit konnte eine durchschnittliche Druckverteilung von 2 Pa im Inneren der Brandkammer sichergestellt werden.

4.5 Brandversuche

Je Verbindungsgeometrie wurden zwei Probekörper getestet, so dass insgesamt 12 Brandversuche durchgeführt wurden. Mit dem im Teil 1 des Forschungsvorhabens [14] entwickelten theoretischen Modell wurden die Tragfähigkeiten der Verbindungen für die geplanten Brandbeanspruchungsdauern bestimmt.

Allgemein ist ein Brandversuch in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase wird unter Normaltemperaturen zunächst die Vorbelastung und anschließend die erwartete Beanspruchbarkeit im Brandfall als Beanspruchung $R_{k,fi}$ auf den Probekörper aufgebracht, vgl. Tab. 5. Die Vorbelastung wurde anhand der erwarteten Tragfähigkeiten unter Normaltemperaturen entsprechend Gleichung (4) festgelegt. In der zweiten Phase erfolgt die Brandbelastung bis zum Erreichen der Tragfähigkeit.

Im Unterschied zu den Kaltversuchen wurde die Belastungsrampe nur bis zum Erreichen der berechneten Tragfähigkeit der Verbindung unter Brandbeanspruchung $R_{k,fi}$ gefahren. Nach dem Erreichen der errechneten Tragfähigkeit wurde die Zugkraft bis zum Versagen der Verbindung, entsprechend Bild 21 konstant gehalten.

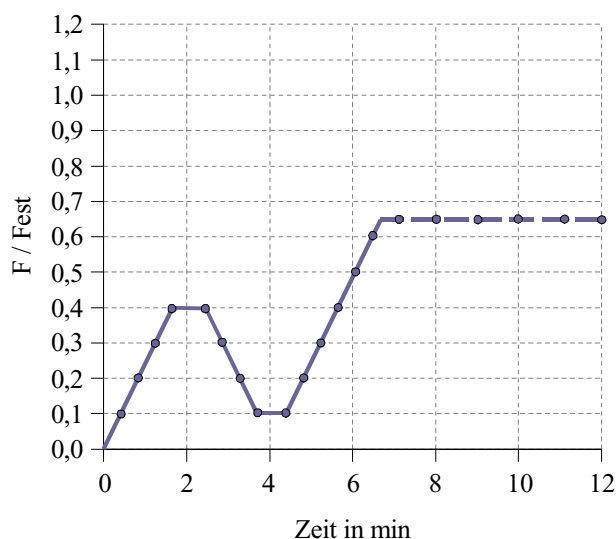


Bild 21: modifizierte Belastungsrampe nach DIN EN 26891:1991 (Belastungsverfahren) zur Durchführung der Brandversuche

Tab. 5: Berechnete Tragfähigkeiten der Probekörper im Brandfall nach [14] unter Angabe der Vorbelastung und der Brandbeanspruchungsdauern

Probekörpertyp	Branddauer t_{fi} in min	Vorbelastung in kN	Tragfähigkeit $R_{k,fi}$ nach [14] in kN
I	30	46,0	59,0
II	30	85,6	110,1
III	30	85,6	140,2
IV	30	98,1	141,6
V	30	102,4	183,3
VI	60	102,4	114,1

Die Generierung der Daten zur Steuerung der Belastungsrampe erfolgte aus den durchgeführten Kaltversuchen. Beim Erreichen der vorberechneten Tragfähigkeit $R_{k,fi}$ der Verbindung musste die Generation der Belastungskurve manuell unterbrochen werden. Bei gleichzeitigem Aufrechterhalten der Zugkraft erfolgte das Umschalten des Belastungsgenerators, so dass nun die Zugkraft konstant auf den Probekörper einwirken konnte. Die Aufzeichnung der Messdaten in der Phase der Vorbelastung erfolgte mittels Kraft- und Wegsensoren. Nach Abschluss dieser vorbereitenden Arbeiten wurde der eigentliche Brandversuch begonnen. Im ersten Schritt erfolgte der Austausch des Gasgemisches innerhalb der Brandkammer durch ein Schutzgas, um einen sicheren Start der Brenner zu ermöglichen. Zeitgleich mit dem Start der beiden Industriebrenner begann die Aufzeichnung der Temperaturen sowie die Videoaufzeichnung des Versuchs. Die Steuerung der Brandraumtemperaturen gemäß ETK sowie das Einpegeln des Ofendrucks auf 2 Pa erfolgte automatisch.



Bild 22: Geöffneter Prüfofen mit Versuchskörper nach Abschluss des Brandversuchs

Die Realisierung einer konstanten Zugkraft während des Brandversuchs erfolgte durch eine zwischen Hydraulikzylinder und Probekörper angeordnete Kraftmessdose der Firma INSTRON Schenk mit einem Toleranzbereich von 0,5%. Der Kraftaufnehmer arbeitet nach dem Ringtorsionsprinzip, mit einem Querkrafteinfluss $\leq 0,2\%$. Verformungen der zu prüfenden Verbindungen in axialer Richtung der Probekörper, die sich im Verlauf der Versuche unter Brandlast einstellten, wurden durch einen in den Zugzylinder integrierten induktiven Wegaufnehmer gemessen. Der Toleranzbereich des Messgeräts beträgt $\pm 1\%$.

Das Abbruchkriterium für die Versuche wurde mit dem Erreichen der Tragfähigkeit der Verbindung oder einem Überschreiten der Verformung der Verbindung von 25 mm festgelegt.

5 Auswertung der Versuche

5.1 Allgemeines

Als Messergebnisse aus den Brandversuchen wurden aufgezeichnet:

- der Temperaturverlauf in der Brandkammer
- die Temperaturen der einzelnen Messpunkte innerhalb der Verbindung
- die Verformungen der Verbindungen und
- die Versagenszeiten der Verbindungen.

Die detaillierten Ergebnisse der einzelnen Versuche können den Anhängen entnommen werden.

5.2 Temperaturverlauf im Brandraum

Die Aufzeichnung und Steuerung der Brandraumtemperaturen erfolgte mit 6 Plate-Elementen. Zu Kontroll- und Vergleichszwecken wurde zusätzlich die Temperaturentwicklung mit Hilfe von 6 Mantelthermoelementen erfasst. In den Diagrammen des Anhanges F sind die Temperaturen der Plate- und der Mantelthermoelemente dargestellt. Die Temperaturen der Plate-Elemente liegen durchgehend unter denen mit den Mantelthermoelementen aufgezeichneten Temperaturen. Die Plate-Elemente zeichnen sich aufgrund ihres Aufbaus durch eine höhere Trägheit bei der Temperaturmessung im Vergleich zu Mantelthermoelementen aus. Bei den Plate-Elementen muss zunächst die Stahlplatte erwärmt werden. Für diesen Vorgang ist ein gewisser Energieeintrag erforderlich. Erst nach dieser Erwärmung und dem damit verbundenen Nachlauf zwischen vorhandener und gemessener Temperatur ist ein weiterer Temperaturanstieg möglich. Mit Hilfe der Fourier Transformation wurden die Verläufe der Brandlastkurven geglättet und vergleichend gegenübergestellt. Die Temperaturdifferenz zwischen den Mantelthermo- und den Plate-Elementen beträgt ab der 5. Minute einen annähernd konstanten Wert von 50 K. Für die Brandbeanspruchung des Probekörpers vom Typ I ist dies in Bild 23 beispielhaft dargestellt. Die mittlere Temperatur der Plate-Elemente bildet den Verlauf der Einheitstemperatur-Zeitkurve ab, da anhand dieser Elemente die Brandraumtemperatur gesteuert wurde. Die Temperaturen der Mantelthermoelemente liegen oberhalb der ETK. Die in DIN EN 1363-1:1999-10 festgelegte obere Toleranzgrenze wird für eine Branddauer von 30 Minuten im Wesentlichen eingehalten. Zur Gewährleistung eines abgesicherten Ergebnisses wurde die Brandraumtemperatur

anhand der Plate-Elemente gesteuert, so dass die tatsächlich auf den Prüfkörper einwirkende Temperatur im oberen Toleranzbereich der ETK liegt.

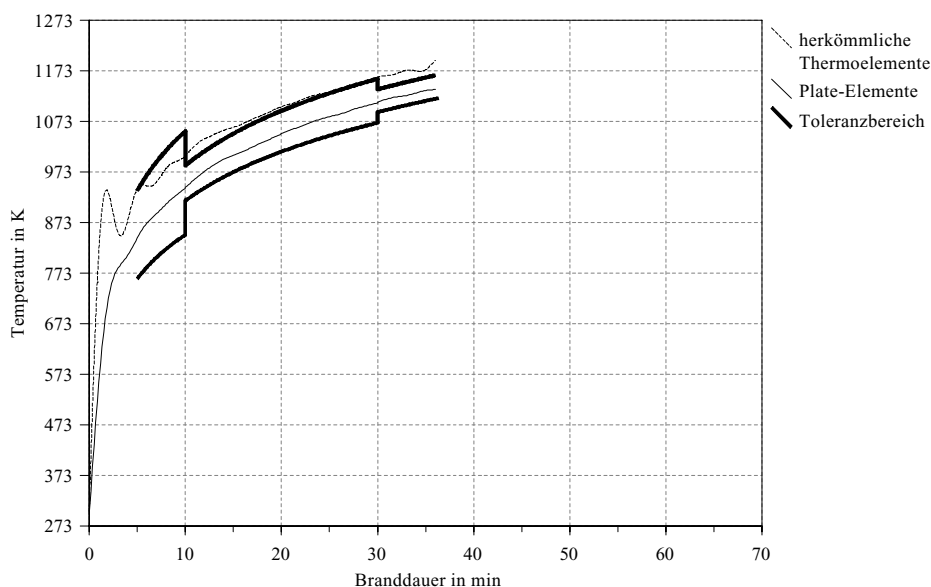


Bild 23: Gegenüberstellung der mit Hilfe der Fourier-Transformation geglätteten Temperaturverläufe von Plate-Elementen und Mantelthermoelementen

5.3 Temperaturen innerhalb der Verbindungen

Eine wesentliche Grundlage der Tragfähigkeitsberechnungen zweischnittiger Stabdübelverbindungen im Brandfall nach [14] ist die Kenntnis der Temperaturentwicklung im Holz und im Stahl.

5.3.1 Temperaturverläufe in den Stabdübeln

Die Aufzeichnung der Messwerte erfolgte vollautomatisch in Zeitschritten von 10,2 s. Im Anhang G sind die Messwerte der Temperaturen für die Verbindungsmittel aller Probekörper detailliert dargestellt. Die gemessenen Temperaturen erreichten in Abhängigkeit von der Versuchsdauer und Verbindungsgeometrie in den oberflächennahen Bereichen des Probekörpers in einer Messtiefe von 10 mm für eine Branddauer von 30 Minuten Maximalwerte von ca. 573 K. Die Streuung der Temperaturmesswerte

unterschiedlicher Messpunkte mit gleicher Tiefe ist in den oberflächennahen Bereichen größer und reduziert sich mit zunehmender Messtiefe. Als Maximum für die Streuung der Stabdübeltemperaturen in gleicher Messtiefe lässt sich für eine Branddauer von 30 Minuten bei einem Abstand zur Brandoberfläche von 25 mm ein Wert von 50 K feststellen.

Zur Verifizierung des theoretischen Modells wurden die Temperaturentwicklungen in den zu prüfenden Verbindungen entsprechend [14] mit dem Programmsystem Ansys® Release 5.7.1 numerisch berechnet. Die in den geprüften Verbindungen eingesetzten Stabdübel wiesen Durchmesser von 12 bzw. 20 mm auf. Die Länge der Stabdübel betrug je nach Geometrietyt der Verbindung zwischen 200 und 400 mm. In Bild 24 ist beispielhaft ein modellierter Verbindungsausschnitt für einen Stabdübel \varnothing 12 mm des Probekörpers Typ III dargestellt. Die Elementierung des Modells wurde entsprechend der Forschungsarbeit [14] dem erwarteten Temperaturgradienten angepasst.

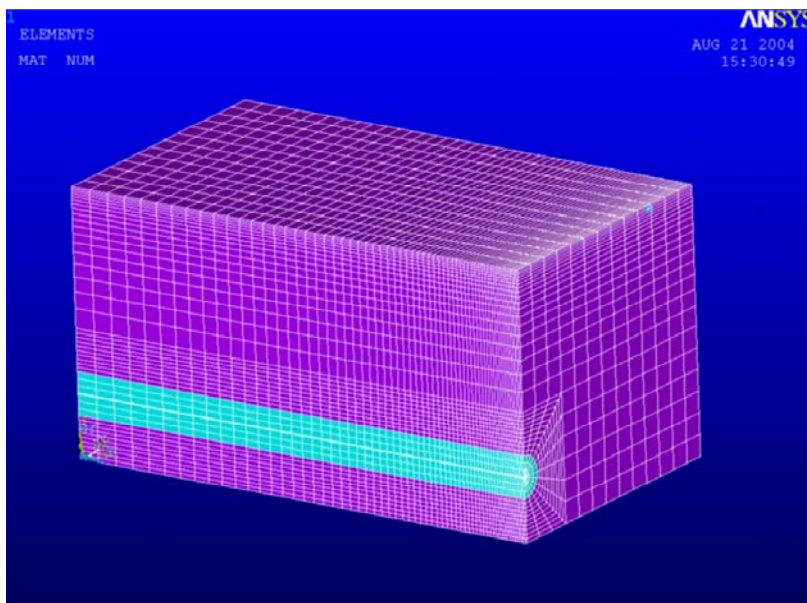


Bild 24: Elementierung eines Verbindungsausschnitts vom Probekörper Typ III

Zur Auswertung der Temperaturverläufe in den Verbindungsmitteln wurden die Temperaturen im Stabdübel entlang eines Messpfades ausgewertet. Infolge der Elementierung des Stabdübels liefert der gewählte Messpfad die mittlere Temperatur des Verbindungsmittelquerschnitts. In [14] wurde nachgewiesen, dass die Temperaturen über den Querschnitt nahezu konstant sind, so dass der Vergleich der gemessenen Temperaturen mit einer numerisch berechneten mittleren Temperatur zur Verifizierung des theoretischen Modells eine hohe Genauigkeit aufweist.

In [14] wurde weiterhin gezeigt, dass ab einem Randabstand quer zur Faser von 60 mm für eine Brandbeanspruchungsdauer von 30 Minuten keine zusätzlichen Temperatureinflüsse aus einer seitlichen Brandbeanspruchung für das Verbindungsmittel entstehen. Bei den Probekörpern mit Stabdübeln \varnothing 12 mm wurde ein Randabstand $a_{2,c}$ quer zur Faser von 57 mm ausgeführt. Da der vorhandene Abstand kleiner als der Mindestabstand nach [14] ist, wurde eine zusätzliche seitliche Brandbeanspruchung der Verbindung simuliert, auch wenn die Einflüsse aufgrund der geringfügigen Überschreitung vernachlässigbar klein sind. Für den Probekörper Typ VI mit einer Brandbeanspruchungsdauer von 60 Minuten wurde mit einem ausgeführten Randabstand $a_{2,c}$ quer zur Faser von 81 mm der geforderte Wert nach [14] von 80 mm eingehalten, so dass für diesen Fall keine zusätzliche seitliche Brandbeanspruchung in der numerischen Simulation zu berücksichtigen war.

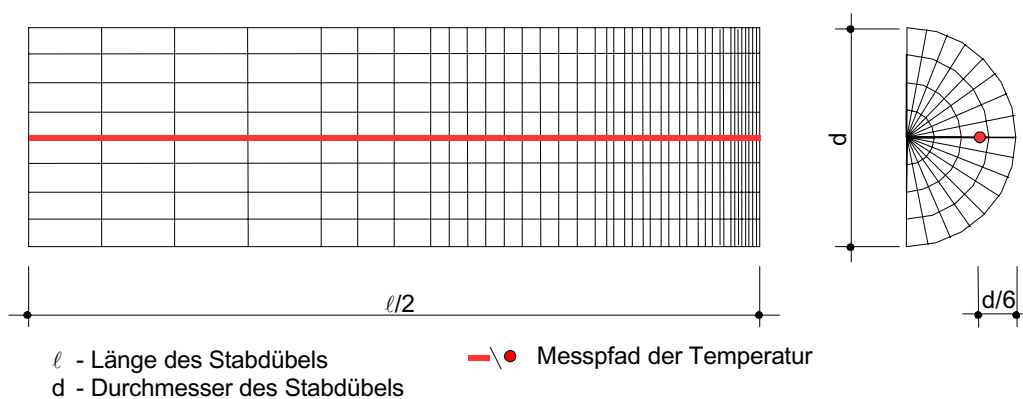


Bild 25: Elementierung eines Stabdübels mit Angabe des Pfades der Temperaturewertung

Aus den je Prüfkörper an unterschiedlichen Messstellen in gleichen Tiefen gemessenen Temperaturen wurden die Mittelwerte bestimmt und den numerisch berechneten Temperaturen in Bild 26 bis Bild 31 vergleichend gegenübergestellt. Der Vergleich über die Mittelwerte erscheint vor dem Hintergrund der Streuung der Einzelmesswerte, siehe auch Anhang G.1, sinnvoll.

Für eine Brandbeanspruchungsdauer von 30 Minuten sind für den in Bild 24 modellierten Prüfkörperausschnitt des Typs III die Isothermenflächen als Ergebnis der numerischen Berechnung in Bild 40 dargestellt.

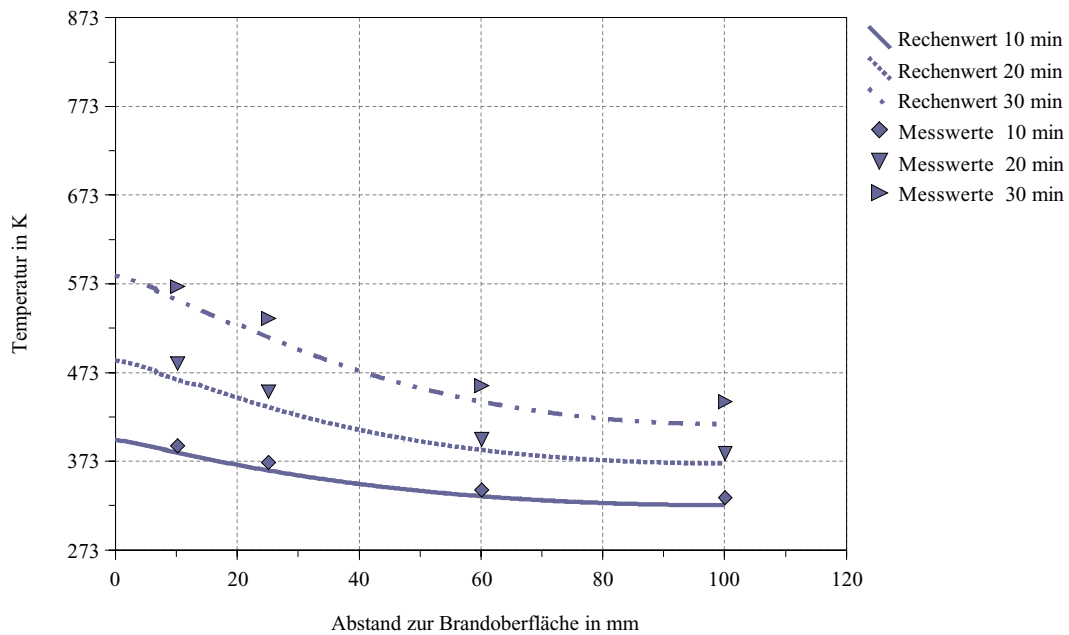


Bild 26: Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen \varnothing 12 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ I für unterschiedliche Branddauern

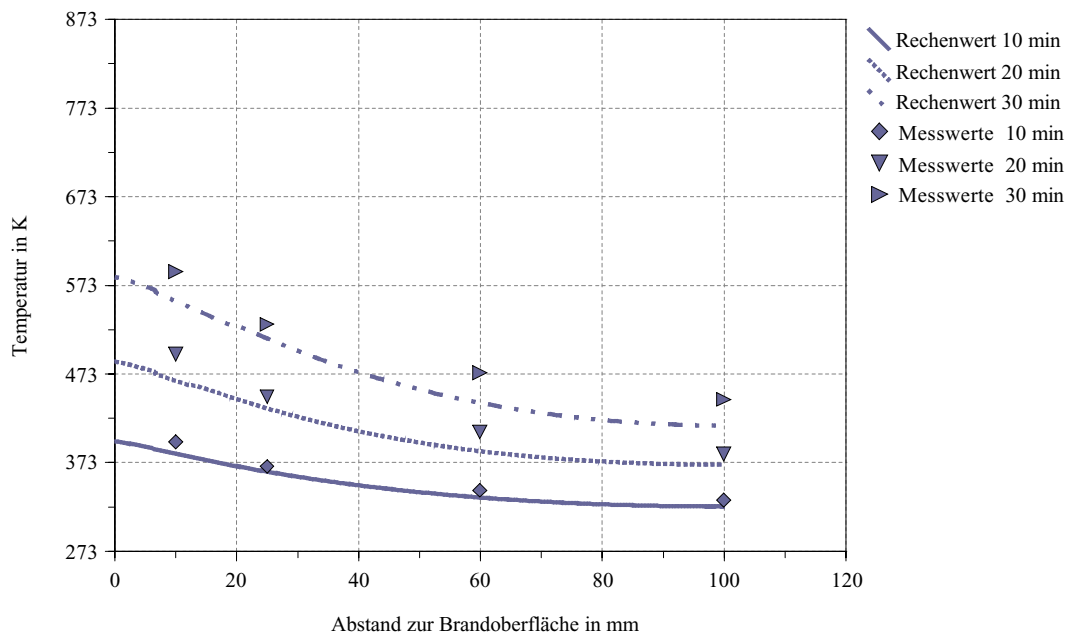


Bild 27: Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen \varnothing 12 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ II für unterschiedliche Branddauern

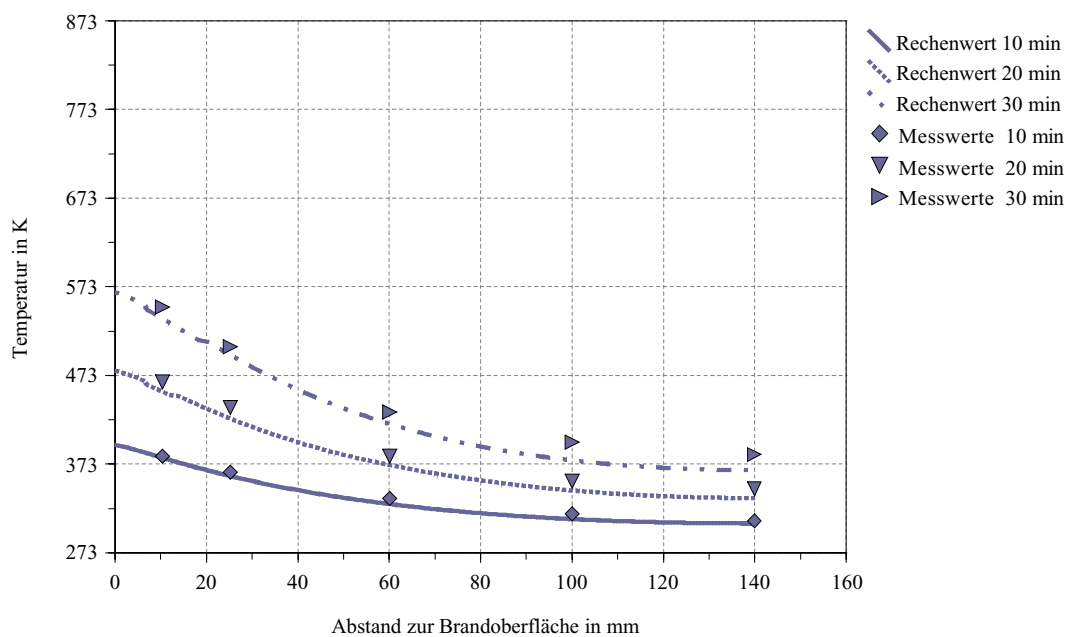


Bild 28: Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen \varnothing 12 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ III für unterschiedliche Branddauern

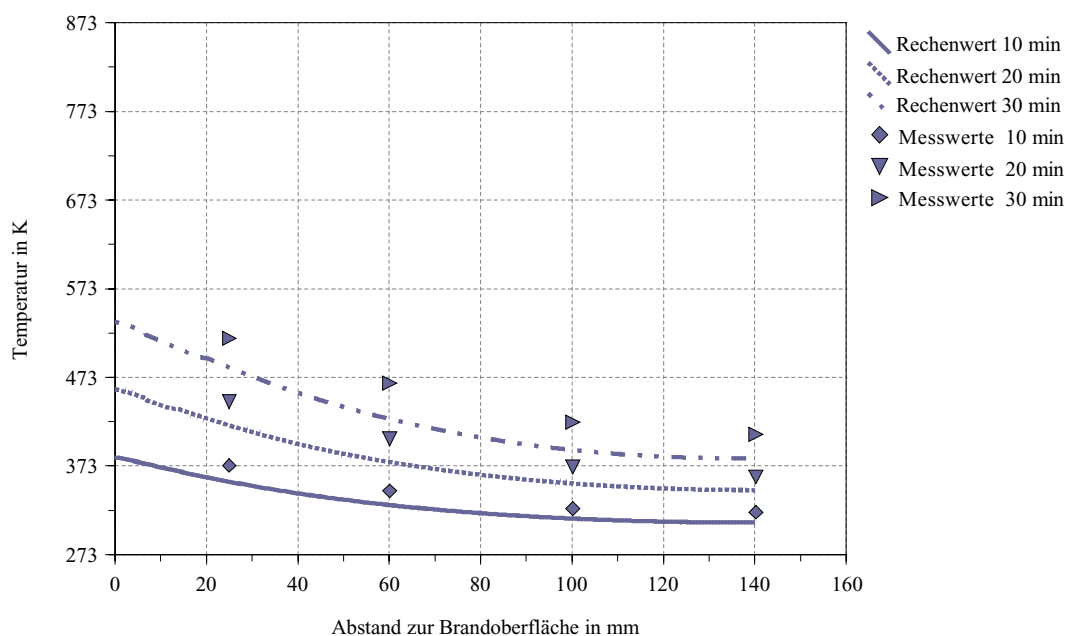


Bild 29: Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen \varnothing 20 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ IV für unterschiedliche Branddauern

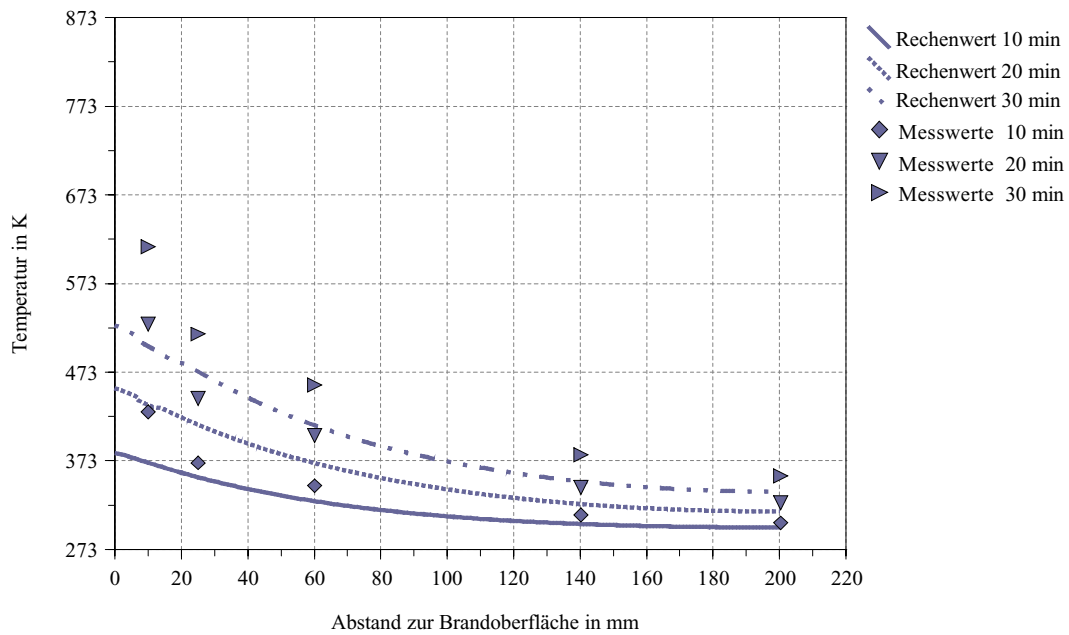


Bild 30: Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen \varnothing 20 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ V für unterschiedliche Branddauern

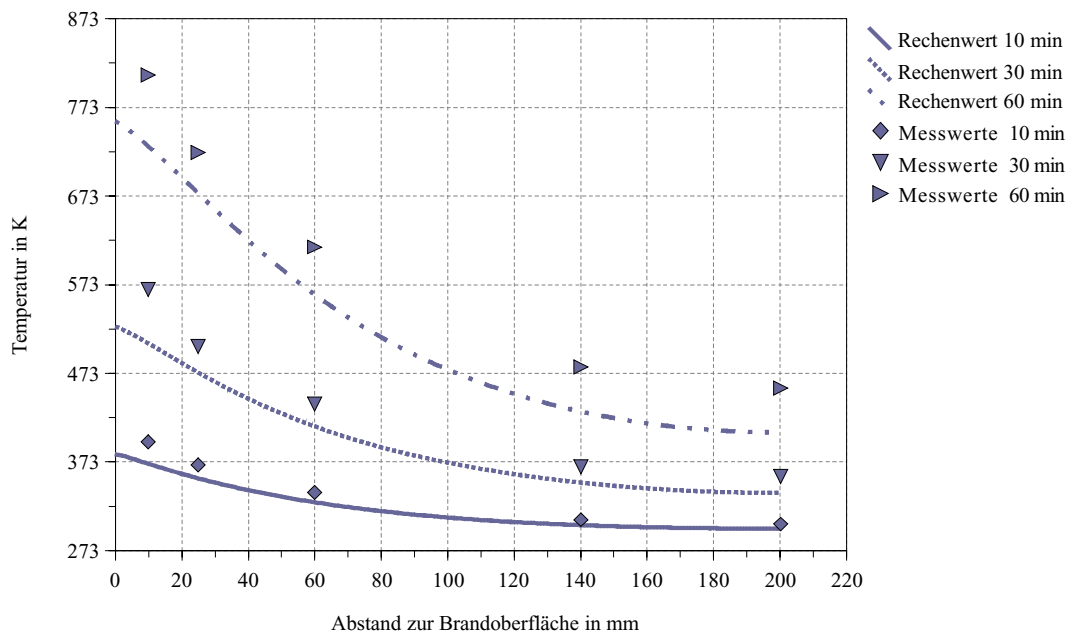


Bild 31: Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen \varnothing 20 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ VI für unterschiedliche Branddauern

Für Stabdübel \varnothing 20 mm zeigen Bild 30 und Bild 31, dass in oberflächennahen Bereichen, in einer Tiefe von 10 mm, die gemessenen Werte deutlich über den numerisch errechneten liegen. In dem in [14] entwickelten theoretischen Modell fließt in die Ermittlung der Tragfähigkeit zweischnittiger Stabdübelverbindungen im Brandfall nur der tragfähige Restquerschnitt ein. Eventuelle Einhängeneffekte der Verbindungsmittel im Bereich des Abbrands bleiben unberücksichtigt. Demnach hat die Temperaturentwicklung im Bereich des Abbrands auf die Gültigkeit des Modells und somit auf den Bemessungsvorschlag keinen Einfluss. Die Verifizierung des theoretischen Modells erfolgt ausschließlich über einen Temperaturvergleich innerhalb des tragfähigen Restquerschnitts.

Die numerisch ermittelten Temperaturen entlang der Verbindungsmittel liegen sowohl für den Stabdübeldurchmesser von 12 mm als auch von 20 mm geringfügig unterhalb der gemessenen Daten. Innerhalb des tragfähigen Restquerschnitts ergibt sich für eine Brandbeanspruchungsdauer bis zu 30 Minuten für Stabdübeldurchmesser von 12 mm eine mittlere Abweichung zwischen den gemessenen und den berechneten Werten von 17 K, für die Verbindungen mit Durchmessern von 20 mm beträgt die mittlere Abweichung 21 K. Tendenziell nimmt die Abweichung zwischen den berechneten und den gemessenen Temperaturen mit steigender Dauer der Brandbeanspruchung zu. Für eine Brandbeanspruchungsdauer von 60 Minuten liegen die numerisch berechneten Temperaturen innerhalb des tragfähigen Restquerschnitts im Mittel ca. 40 K unter den gemessenen Daten. Ursache für diese Abweichungen ist die in Abschnitt 5.2 beschriebene Einstellung der Brandraumtemperatur, die aufgrund der Steuerung über die Platte-Elemente über dem Mittelwert der Einheits-Temperaturzeitkurve liegt (Bild 23). Durch Vergleichsmessungen mit Mantelthermoelementen konnte eine Erhöhung der ETK festgestellt werden, die ab der 5. Versuchsminute einen konstanten Wert von ca. 50 K beträgt. Aufgrund dieser Abweichung der Temperatur von der ETK, wurden weitergehende Vergleichsrechnungen mit der Finiten-Element-Methode durchgeführt. Hierfür wurde eine modifizierte ETK durch Erhöhung der Brandlast von 50 K gegenüber der ETK angesetzt, Bild 32. Die sich aus den Vergleichsrechnungen ergebenden Stabdübeltemperaturen sind beispielhaft für den Probekörper Typ IV über die Verbindungsmittellänge in Bild 33 dargestellt. Vergleicht man die neu berechneten Temperaturen mit den Versuchsergebnissen ergibt sich für alle Probekörper eine hohe Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den berechneten Temperaturen. Die mittlere Abweichung beträgt ± 3 K. Anhand dieser Gegenüberstellungen der Messwerte zu den numerisch berechneten Stabdübeltemperaturen kann das theoretische Modell durch eine gute Übereinstimmung zu tatsächlich gemessenen Temperaturen als Berechnungsmodell zur wirklichkeitsnahen Erfassung der Temperaturentwicklung in Holzverbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln verifiziert werden.

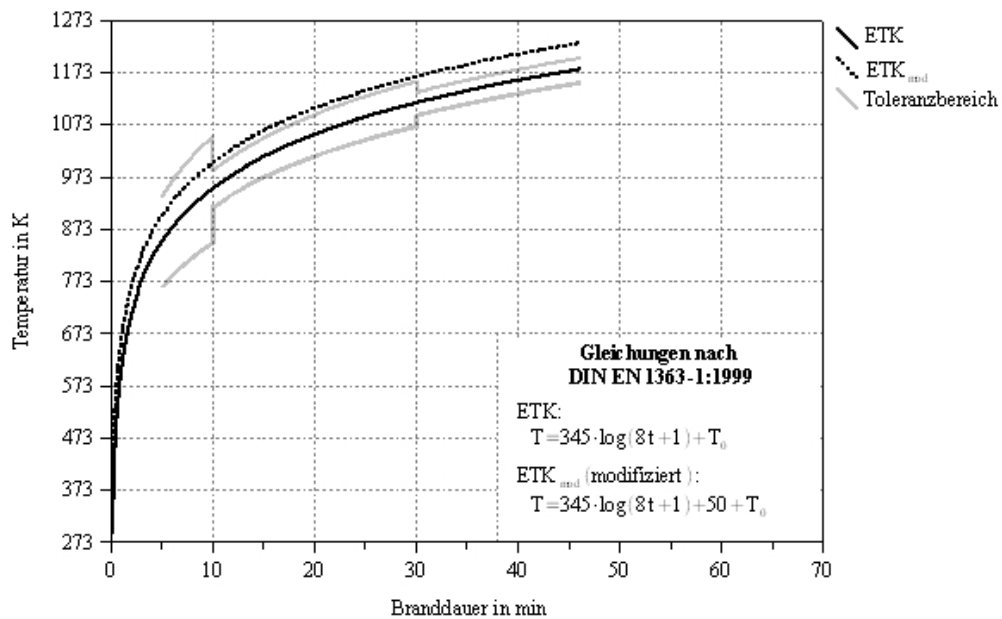


Bild 32: Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) und um 50 K erhöhte modifizierte Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK_{mod})

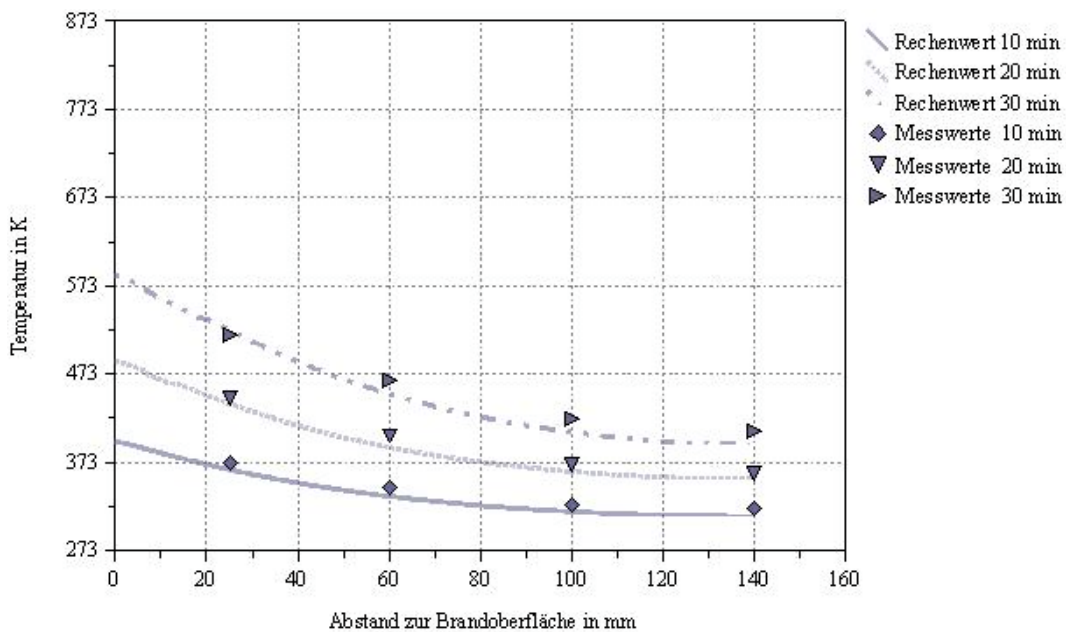


Bild 33: Vergleich der berechneten Stabdübeltemperaturen \varnothing 20 mm entlang des Verbindungsmittels mit den Versuchsergebnissen des Probekörpers Typ IV für unterschiedliche Branddauern bei Erhöhung der ETK um 50 K (ETK_{mod})

5.3.2 Temperaturverläufe im Holz

Analog der Ermittlung der Temperaturen in den Verbindungsmitteln erfolgte die Bestimmung der Temperaturverläufe im Holz mit Hilfe von Mantelthermoelementen. Die Thermoelemente wurden zum Einen in unterschiedlichen Abständen zur brandbeanspruchten Oberfläche und zum Anderen mit unterschiedlichen Abständen zu den Stabdübeln in das Holz eingebaut, vgl. Anhang D. Die Aufzeichnungsintervalle der Messwerte betragen wie bei den Verbindungsmitteln 10,2 s. Zur Erhöhung der Genauigkeit der Messdaten wurden, in Analogie zu den Verbindungsmitteln, mehrere Thermoelemente je Messtiefe, über den Prüfkörper verteilt, angeordnet. Im Anhang G sind die Messwerte der Temperaturen des Holzes für alle Probekörper detailliert dargestellt.

Der Temperaturverlauf aller Messpunkte zeigt zwischen 293 und 373 K einen verzögerten Anstieg. Holz ist ein Werkstoff, der aufgrund seiner Struktur kolloidal gebundenes Wasser enthält. Bis zu einer Temperatur von 100°C vollzieht sich der Vorgang der Trocknung. Zwischen 98 und 103°C verdampft das kolloidal gebundene Wasser. Bei Erreichen der Verdampfungstemperatur von 100°C bleibt die Temperatur des Holzes bis zum vollständigen Übergang des kolloidal gebundenen Wassers in den gasförmigen Aggregatzustand konstant. Die für die Umwandlung des hygroskopisch gebundenen Wassers in Wasserdampf erforderliche Wärmemenge wird als latente Wärme bezeichnet. Erst nach dem vollständigen Abschluss dieses Prozesses ist ein weiterer Anstieg der Temperatur des Holzes möglich. Mit dem Überschreiten der Temperatur von 373 K nehmen die Messwerte kontinuierlich zu. Die Maximalwerte der Temperaturen im Holz erreichten in den oberflächennahen Bereichen für eine Brandbeanspruchungsdauer von 30 Minuten ein Maximum von 773 K. Die maximale Streuung der Temperaturen von Messstellen mit gleichem Abstand zur Brandoberfläche sowie gleichem Abstand zum Stabdübel beträgt für eine Branddauer von 30 Minuten und einer Tiefe von 25 mm ca. 25K.

Für die Berechnung der Temperaturverläufe wurden in das FE-Programm die in [14] verwendeten Materialkennwerte für Holz und Holzkohle sowie die dort modellierten Randbedingungen implementiert. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit konnte gezeigt werden, dass die Rohdichte des Holzes auf die Ermittlung der Temperaturen nur einen geringfügigen Einfluss hat. Aus diesem Grunde wurden die FE-Berechnungen für alle Probekörpertypen mit der an den Versuchskörpern ermittelten minimalen Rohdichte von 410 kg/m³ durchgeführt.

Aus den je Prüfkörper an unterschiedlichen Messstellen in gleichen Tiefen gemessenen Temperaturen wurden, in Analogie zur Vorgehensweise für die Stabdübel, die Mittelwerte bestimmt und den numerisch berechneten Temperaturen in Bild 34 bis Bild 39 vergleichend gegenübergestellt. Die Gegenüberstellung der gemessenen mit den numerisch berechneten Temperaturen erfolgt für die Prüfkörper vom Typ I bis III mit

Stabdübeldurchmessern von 12 mm in einem Abstand von 12 mm zur Längsachse des Verbindungsmittels, der Abstand des Messpunktes zur Stabdübeloberfläche beträgt 6 mm. Für die Prüfkörper vom Typ IV bis VI mit Stabdübeldurchmessern von 20 mm wird die Auswertung in einem Abstand von 20 mm zur Längsachse des Verbindungsmittels vorgenommen, der Abstand des Messpunktes zur Stabdübeloberfläche beträgt somit 10 mm.

Für den Bereich des tragfähigen Restquerschnitts nach Abschluss einer definierten Branddauer zeigt der Vergleich, ebenso wie für die Verbindungsmittel, auch für die Holztemperaturen eine hohe Genauigkeit zwischen den numerisch berechneten Temperaturen und den gemessenen Daten. Die Abweichung der numerisch berechneten Temperaturen zu den gemessenen Werten innerhalb des tragfähigen Restquerschnitts beträgt für die Verbindungen mit Stabdübeldurchmessern von 12 mm ± 7 K und für die Verbindungen mit Stabdübeldurchmessern von 20 mm ± 5 K. Für alle übrigen Mess-tiefen konnten durch Vergleiche mit numerisch berechneten Temperaturen Übereinstimmungen in gleicher Genauigkeit festgestellt werden.

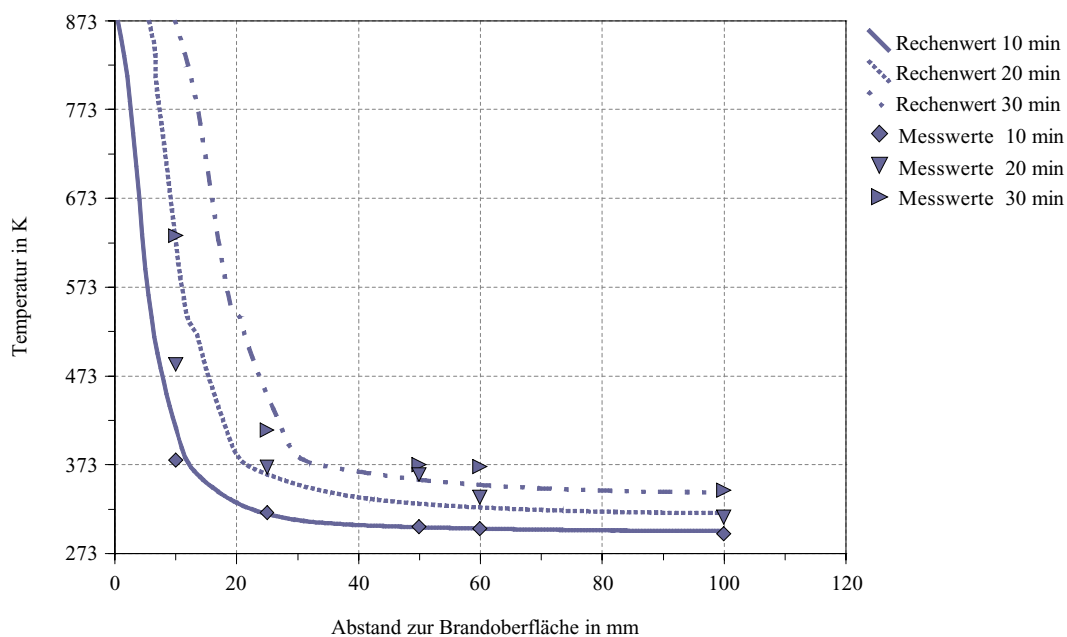


Bild 34: Vergleich der berechneten und gemessenen Holztemperaturen des Probekörpers Typ I mit einem Abstand zum Verbindungsmittel von 12 mm für unterschiedliche Branddauern

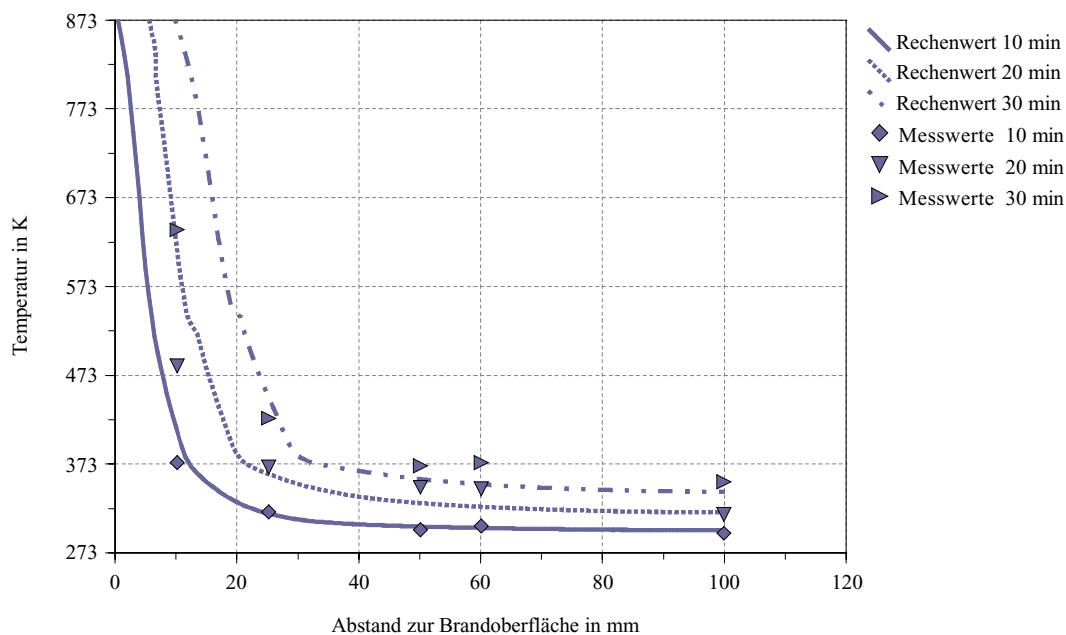


Bild 35: Vergleich der berechneten und gemessenen Holztemperaturen des Probekörpers Typ II mit einem Abstand zum Verbindungsmittel von 12 mm für unterschiedliche Branddauern

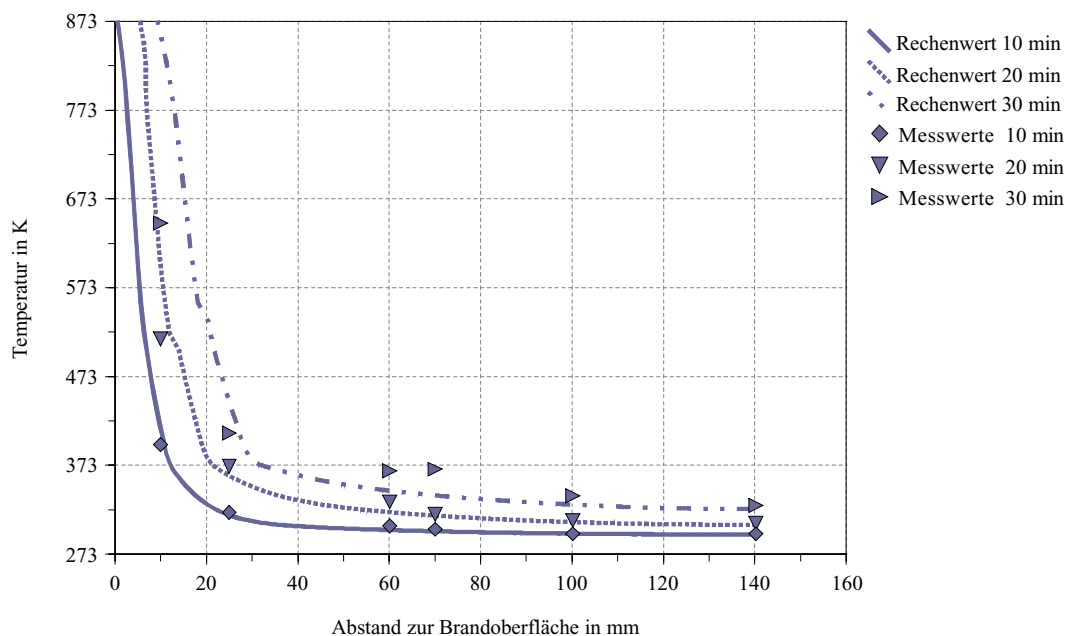


Bild 36: Vergleich der berechneten und gemessenen Holztemperaturen des Probekörpers Typ III mit einem Abstand zum Verbindungsmittel von 12 mm für unterschiedliche Branddauern

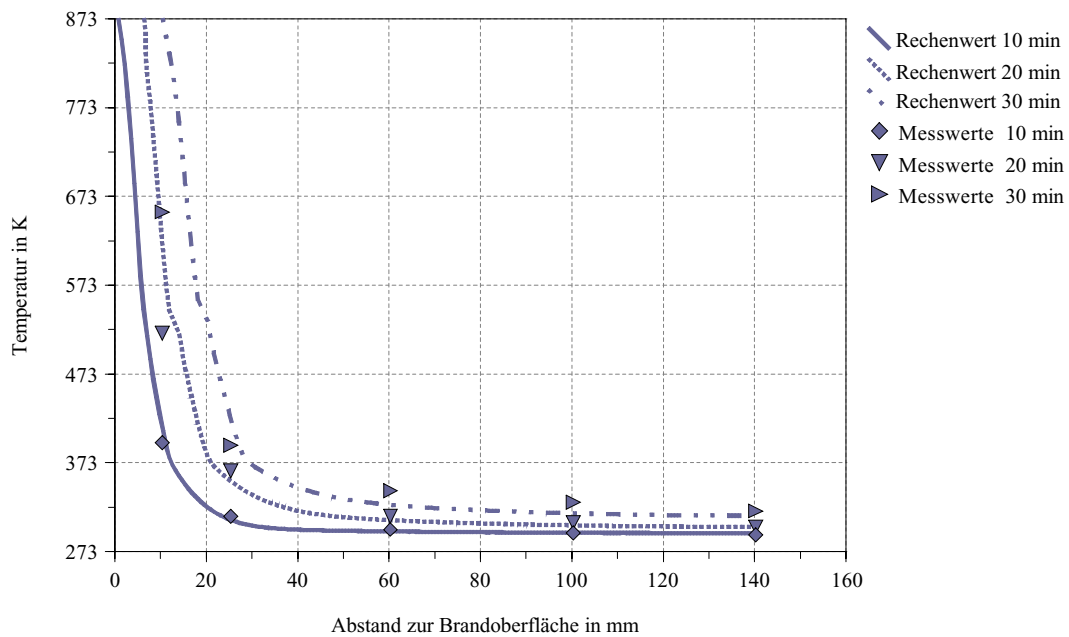


Bild 37: Vergleich der berechneten und gemessenen Holztemperaturen des Probekörpers Typ IV mit einem Abstand zum Verbindungsmittel von 20 mm für unterschiedliche Branddauern

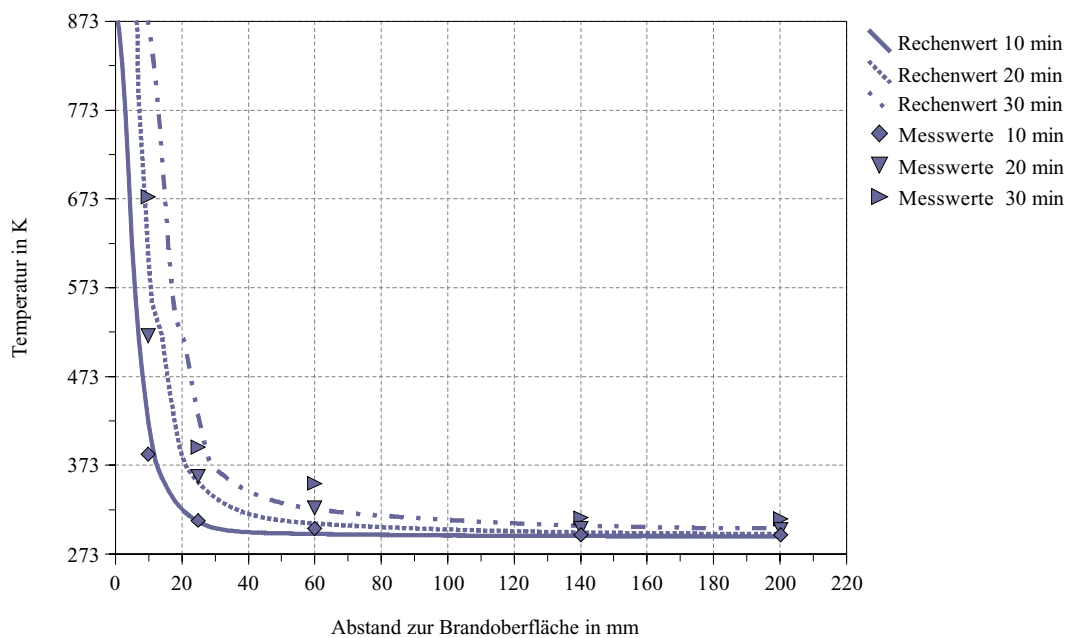


Bild 38: Vergleich der berechneten und gemessenen Holztemperaturen des Probekörpers Typ V mit einem Abstand zum Verbindungsmittel von 20 mm für unterschiedliche Branddauern

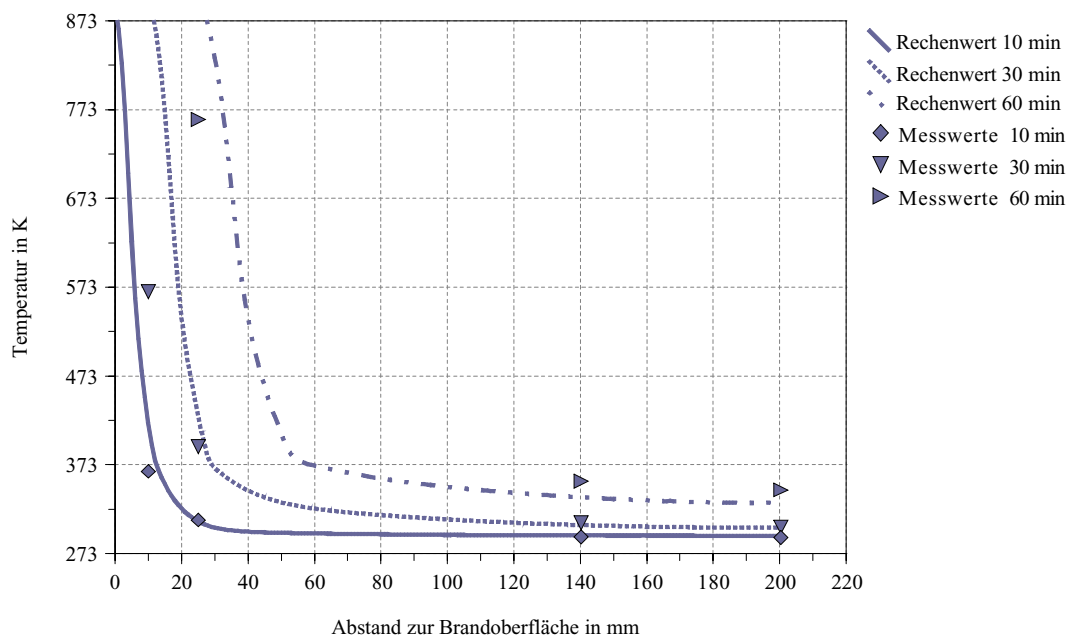


Bild 39: Vergleich der berechneten und gemessenen Holztemperaturen des Probekörpers Typ VI mit einem Abstand zum Verbindungsmittel von 20 mm für unterschiedliche Branddauern

Im Bereich des Abbrands liegen die numerisch berechneten Temperaturen deutlich über den gemessenen Werten. Im thermischen Modell wurde zur Simulation der örtlichen Rissbildung in der Holzkohle während der Brandbeanspruchung die Wärmeleitfähigkeit der Holzkohle erhöht, so dass für diese Bereiche die berechneten Temperaturen über den tatsächlich vorhandenen liegen. Eine weitere Ursache liegt in der Anordnung der Mantelthermoelemente in den Prüfkörpern. Aus versuchstechnischen Gründen mussten diese senkrecht zu den Isothermenflächen eingebaut werden, Bild 40. Diese Anordnung hat den Nachteil, dass durch den hohen Temperaturgradienten in den oberflächennahen Bereichen ein Wärmeaustausch mit den tieferliegenden kühleren Bauteilebenen durch den Mantel der Thermolemente erfolgt. Dieser Wärmefluss hat zur Folge, dass in den Versuchen für diese Messpunkte im Bereich des Abbrands zu geringe Temperaturen aufgezeichnet werden. Da das theoretische Modell nach [14] zur Ermittlung der Tragfähigkeit zweischrittiger auf Abscheren beanspruchter Stabdübelverbindungen nur den tragfähigen Restquerschnitt der Verbindung berücksichtigt, kann anhand der Gegenüberstellung das entwickelte thermische Modell zur Ermittlung der Temperaturverteilung innerhalb des tragfähigen Restquerschnitts mit hoher Genauigkeit verifiziert werden.

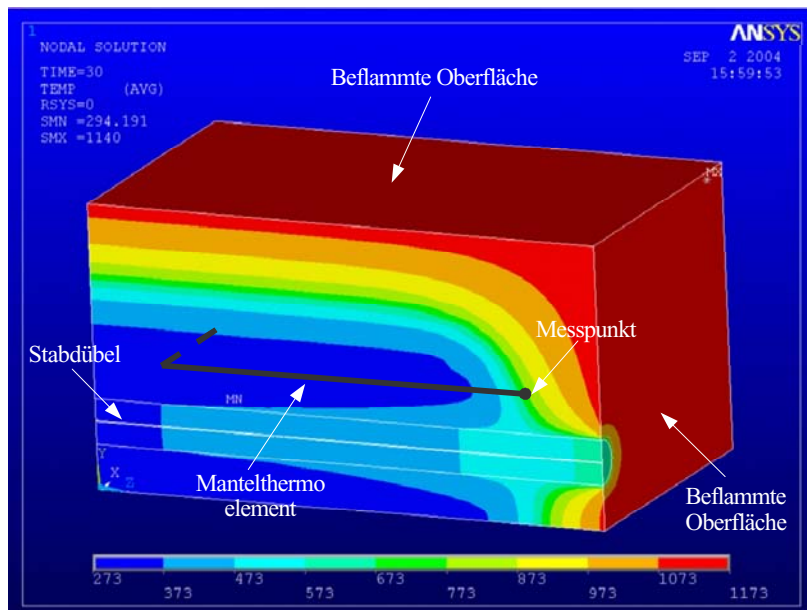


Bild 40: Isothermenflächen mit Mantelthermoelement für einen Prüfkörperausschnitt Typ III für eine Brandbeanspruchungsdauer von 30 Minuten

5.4 Abbrandraten des Holzes

Eine direkte Messung der Abbrandraten während der Versuche konnte nicht vorgenommen werden, so dass eine Ermittlung der Abbrandgeschwindigkeit nur über die Bestimmung der Abbrandtiefe nach dem Ablöschen der Prüfkörper möglich ist. Ein Ablöschen der Prüfkörper in der Brandkammer konnte jedoch aus technischen Gründen nicht durchgeführt werden. Nach Entfernung des mittleren Deckensegments wurden die Probekörper aus der Brandkammer gehoben und mit Wasser abgelöscht. Dieser Vorgang erstreckte sich für die einzelnen Verbindungen auf einen Zeitraum zwischen 10 und 20 Minuten nach Beendigung des Brandversuchs. Während dieser Zeit brannten die Prüfkörper weiter, jedoch nicht unter der Brandbeanspruchung der sie im Prüfofen ausgesetzt waren. Eine exakte Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit konnte infolge dessen nicht vorgenommen werden. Zur Kontrolle des allgemeinen Abbrandbildes wurden die Probekörper mit Hilfe eines Computer-Tomographen untersucht. In Bild 41 und Bild 42 sind die Mittelhölzer verschiedener Probekörper gezeigt. Eine weiß gestrichelte Linie markiert die ursprüngliche Fläche des Mittelholzes. Die Bilder zeigen, dass der Abbrand gleichmäßig und vierseitig erfolgte. In den äußeren Bereichen ist noch teilweise die Holzkohle zu erkennen. Ein Teil der Holzkohle ist während des Ausbaus aus der Brandkammer vom Probekörper gelöst worden. Während des Brandversuchs hatte die Holzkohle das Mittelholz vollständig umschlossen.

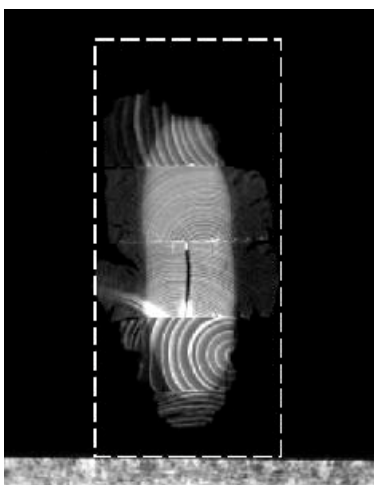


Bild 41: Mittelholz Probekörper Typ II

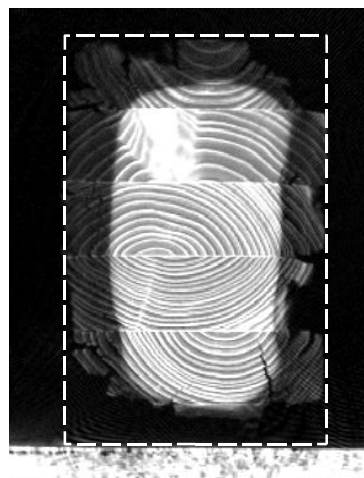


Bild 42: Mittelholz Probekörper Typ IV

5.5 Tragfähigkeiten der Verbindungen

Je Verbindungsgeometrie wurden zwei Prüfkörper getestet, diese sind mit „a“ und „b“ gekennzeichnet. Auf die Verbindungen wurde die Beanspruchung $R_{k,fi}$ für die angestrebte Feuerwiderstandsdauer entsprechend Abschnitt 4.5 aufgebracht. Je Probekörper wurden die Versagenszeit und die zum Zeitpunkt des Überschreitens der Tragfähigkeit eingetretene Verformung aufgezeichnet. Die Verformungen wurden am Zugsylinder des Prüfstands gemessen. Die Ergebnisse sind in Tab. 6 zusammengestellt.

Tab. 6: erreichte Versagenszeiten und aufgetretene Verformungen der Verbindungen im Brandversuch mit Angabe der angestrebten Feuerwiderstandsdauer

Probekörpertyp	geplante Branddauer t_{fi} in min	Versuchsdauer t in min	Verformung in mm
I a	30	39,1	16,1
I b	30	36,3	16,1
II a	30	33,8	10,8
II b	30	32,7	5,3
III a	30	40,7	19,9
III b	30	42,6	18,5
IV a	30	37,8	13,9
IV b	30	39,7	9,6
V a	30	45,2	23,5
V b	30	48,1	22,8
VI a	60	64,6	18,0
VI b	60	63,7	17,6

Grundlage für die Bemessung von Verbindungen mit stabförmigen Verbindungsmitteln unter Normaltemperatur sowie des theoretischen Modells für die Ermittlung der Tragfähigkeiten im Brandfall nach [14] ist die starr plastische Theorie nach K.W. Johansen [10]. Für zweischnittige Verbindungen bei Normaltemperatur werden vier Versagensfälle unterschieden. Zur Bestimmung der Versagensfälle der Verbindungen der Probekörper wurden die Stabdübel nach den Versuchen ausgebaut und vermessen. In Tab. 7 sind die aufgetretenen Versagensfälle für die Versuche unter Normaltemperatur und die Brandversuche vergleichend gegenübergestellt. Eine detaillierte Dokumentation der Verformungen der einzelnen Verbindungsmittel kann dem Anhang I entnommen werden.

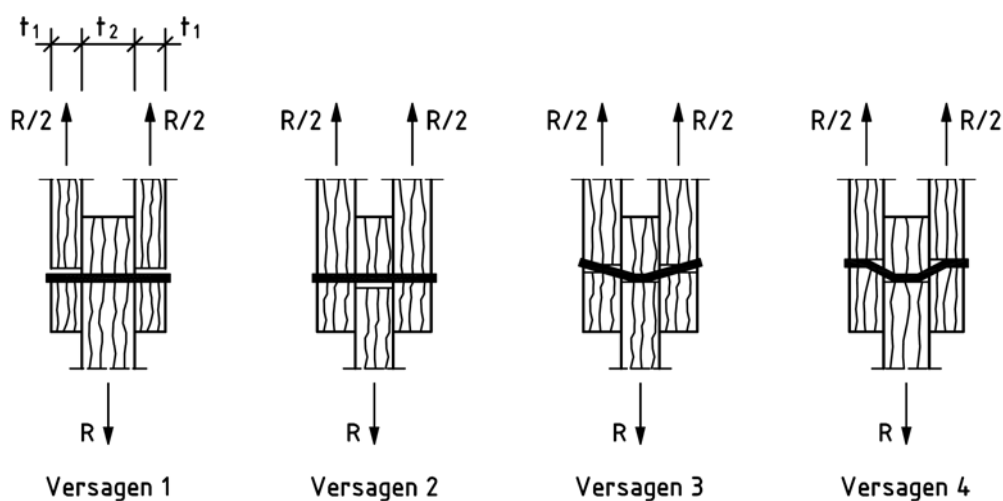


Bild 43: Versagensfälle zweischnittiger auf Abscheren beanspruchter Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln

Tab. 7: Maßgebende Versagensfälle der Verbindungen nach K.W. Johansen

Probekörpertyp	Versagensfall im Kaltversuch	Versagensfall im Brandversuch
I a	1	3
I b	1	3
II a	1	Zugversagen der Seitenhölzer
II b	1	Zugversagen der Seitenhölzer
III a	4	3
III b	4	3
IV a	1	1
IV b	1	1
V a	1	3
V b	1	3
VI a	4	1
VI b	4	1

Die Auswertung zeigt, dass für eine Verbindungsgeometrie für beide Prüfkörper sowohl in den Kalt- als auch in den Brandversuchen erwartungsgemäß jeweils der gleiche Versagensfall eingetreten ist. Die Geometrie der Probekörper I und II ist für die Holzbauteile baugleich ausgeführt worden. Sie unterscheiden sich lediglich in der Anzahl der Verbindungsmittel. Der Prüfkörper Typ II weist mit 16 Stabdübeln die doppelte Anzahl von denen des Prüfkörpers Typ I auf. Für den Brandfall beträgt das Verhältnis der anhand des entwickelten Bemessungsmodells nach [14] ermittelten Beanspruchbarkeiten nur 1,87, vgl. Tab. 5. Die Belastung je Stabdübel im Brandversuch ist somit für den Probekörper vom Typ I höher, so dass hier ein Übergang von Versagensfall 1, dem reinen Lochleibungsversagen der Seitenhölzer, zum Versagensfall 3, der Kombination aus Lochleibungsversagen und Fließgelenkausbildung, auftritt. Für den Probekörper vom Typ II tritt eine Fließgelenkausbildung der Stabdübel im Bereich des Mittelholzes im Brandfall nicht auf.

Für den Versuchskörper Typ III ist unter Normaltemperaturen der Versagensfall 4 maßgebend. Hierbei handelt es sich um duktile Verbindungen, die durch eine Kombination aus Lochleibungsversagen und der Ausbildung von Fließgelenken sowohl im Mittelholz als auch in den Seitenhölzern gekennzeichnet sind. Im Brandfall wird durch den Abbrand des Seitenholzes die Einspannung des Stabdübels in diesem Bauteil geringer. Eine Verdrehung des Verbindungsmittels wird möglich, die dazu führt, dass sich im Bereich der Seitenhölzer keine Fließgelenke ausbilden. Demzufolge geht für diesen Prüfkörper der unter Normaltemperaturen maßgebende Versagensfall 4 im Brandfall in den Versagensfall 3 über.



Bild 44: Mittelholz Probekörper Typ III mit Stabdübeln \varnothing 12 mm

Der Prüfkörper Typ IV unterscheidet sich vom Typ III durch eine Halbierung der Verbindungsmittellanzahl auf 8 Stabdübel sowie durch eine Erhöhung des Stabdübel-durchmessers von 12 auf 20 mm. Aufgrund des großen Stabdübel-durchmessers im Vergleich zur geringen Seitenholzdicke wird für diesen Verbindungstyp sowohl unter Normaltemperaturen als auch im Brandfall das Lochleibungsversagen der Seitenhölzer und somit der Versagensfall 1 maßgebend.

Bei den Probekörpern Typ V und Typ VI handelt es sich um baugleiche Verbindungen, die für unterschiedliche Feuerwiderstandsdauern von 30 Minuten für Typ V und 60 Minuten für den Typ VI geprüft wurden. Infolge der geringeren Branddauer ergibt sich anhand des in [14] entwickelten Bemessungsmodells für den Probekörper Typ V eine höhere Beanspruchbarkeit, die der Verbindung im Brandversuch als Belastung aufgebracht wurde, vgl. Tab. 5. Die höhere Beanspruchung der Verbindungsmittel, der Temperatureintrag in die Stabdübel und der im Vergleich zum Prüfkörper Typ VI geringere Abbrand der Seitenhölzer führt zu einem Versagen der Stabdübel infolge Fließgelenk-ausbildung. Die auf den Probekörper Typ VI einwirkende lange Brandbeanspruchungsdauer führt zu einem deutlichen Abbrand der Seitenhölzer, die ein Lochleibungsversagen dieser Bauteile bewirken, so dass ein Übergang des unter Normaltemperaturen maßgebenden Versagensfalls 4 im Brandfall in den Versagensfall 3 erfolgt.

Prinzipiell konnte anhand der Brandversuche festgestellt werden, dass der unter Normaltemperaturen angestrebte Versagensfall 4 für duktile Verbindungen, die durch eine Kombination aus Lochleibungsversagen und der Ausbildung von Fließgelenken sowohl im Mittelholz als auch in den Seitenhölzern gekennzeichnet sind, für übliche Verbindungsgeometrien nicht maßgebend wird. Dieses Phänomen ist durch den Abbrand im Bereich der Seitenhölzer begründet. Die Verringerung der Seitenholzdicke und die gleichzeitige Erwärmung führen zu einer Verringerung der Verbindungsmittelspannung in diesem Bereich. Eine Verdrehung des Verbindungsmittels wird möglich, die dazu führt, dass sich im Bereich der Seitenhölzer keine Fließgelenke ausbilden. Demzufolge geht für diese Verbindungen der unter Normaltemperaturen maßgebende Versagensfall 4 im Brandfall in den Versagensfall 3 über.

Für die Tragfähigkeiten der Verbindungen kann festgestellt werden, dass für die nach Teil 1 des Forschungsvorhabens aufgetragenen Beanspruchungen die angestrebten Feuerwiderstandsdauern für alle Probekörper eingehalten wurden. Die Abweichungen für die Prüfkörper Typ a und Typ b je Verbindungsgeometrie sind nahezu gleich, so dass die Tragfähigkeiten als kennzeichnend für die ausgeführten Geometrien gelten. Die Mittelwerte der Versagenszeiten von Prüfkörper Typ a und Typ b je Verbindungsgeometrie sind für die angestrebte Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten in Bild 45 vergleichend gegenübergestellt.

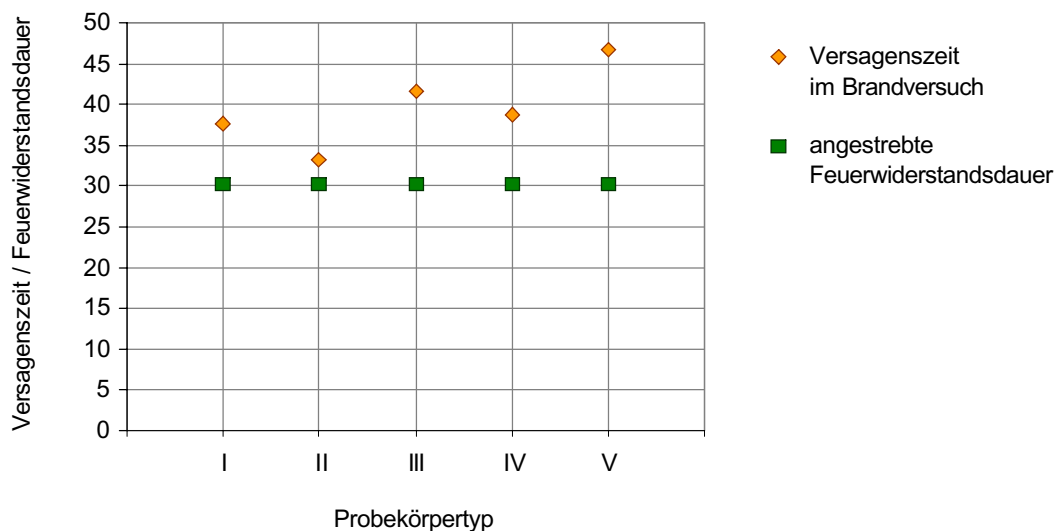


Bild 45: Vergleich der Mittelwerte der Versagenszeiten von Prüfkörper a und b je Verbindungsgeometrie für die Probekörper Typ I bis V mit den angestrebten Feuerwiderstandsdauern

Während für die Probekörper I, III und IV die mittlere Überschreitung der angestrebten Feuerwiderstandsdauern ca. 7 bis 11 Minuten beträgt, wurde für die Probekörper II die angestrebte Feuerwiderstandsdauer mit nur 3 Minuten überschritten. Es handelt sich um einen Probekörper, der von den Abmessungen der Holzbauteile dem Probekörper I entspricht. Für den Prüfkörper II wurde im Unterschied zum Typ I eine Verdopplung der Stabdübelanzahl vorgenommen. Diese ist mit einer Verdopplung der Querschnittschwächung für die Seiten- und Mittelhölzer verbunden. Nähere Untersuchungen nach Abschluss des Brandversuchs zeigten, dass für die Probekörper IIa und b kein Versagen der Verbindung auftrat. Ursächlich für das Versagen war eine Überschreitung der Zugtragfähigkeit des verbleibenden Restquerschnitts aus Seiten- und Mittelhölzern. Anhand der Verformungsverläufe kann das Materialversagen des Holzes auf Zug zusätzlich bestätigt werden. Die Verformungskurven der Verbindungen des Probekörpers Typ II zeigen, wie die des Probekörpers Typ I, einen parabelförmigen Verlauf, siehe Anhang H. Im Unterschied zum Probekörper Typ I trat bei Typ II bereits bei einer geringen Steigung der Verformungskurve ein schlagartiges Versagen ein.

Zur Bestätigung dieses Versagensfalls wurden Vergleichsrechnungen mit dem in [12] von Peter entwickelten thermisch-strukturmechanischen Modell durchgeführt. Für den verbleibenden Restquerschnitt wurde nach einer Brandbeanspruchungsdauer von 30 Minuten eine Tragfähigkeit von 78 kN numerisch berechnet. Für die Verbindung wurde nach [14] eine Beanspruchbarkeit für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten von 110,1 kN ermittelt. Diese ist höher als die Zugtragfähigkeit des verbleibenden Restquerschnitts, so dass sich vor dem Erreichen der Tragfähigkeit der Ver-

bindung ein Materialversagen aufgrund der Querschnittsschwächung durch die Stabdübel einstellt.

Anhand der Weg-Zeit-Diagramme, vgl. Anhang H, konnte weiterhin festgestellt werden, dass für alle Verbindungen ein schlagartiges Versagen eintrat. Der Verlauf der Verformungen, die am Zugzylinder aufgezeichnet wurden, zeigt bis zum Bruch einen parabelförmigen Verlauf.

Anhand der Brandversuche konnte das in Teil 1 dieses Forschungsvorhabens entwickelte Modell zur Ermittlung der Tragfähigkeit von ungeschützten, zweischnittigen auf Abscheren beanspruchten Stabdübelverbindungen im Brandfall sowohl für die Temperaturentwicklung innerhalb der Verbindung als auch für die Bestimmung der Tragfähigkeit mit guter Übereinstimmung zu tatsächlich in Versuchen erhaltenen Werten verifiziert werden.

6 Beurteilung des Bemessungsvorschlags

Im Teil 1 dieses Forschungsvorhabens wurde ein allgemeingültiges, praxisgerechtes Bemessungskonzept zum Nachweis ungeschützter, zweiseitiger, auf Abscheren beanspruchter Stabdübelverbindungen im Brandfall entwickelt, das mit den Erkenntnissen aus [13] zwischenzeitlich geringfügig überarbeitet wurde. Es sieht vor, die Tragfähigkeit der Verbindung für eine vorgegebene Feuerwiderstandsdauer direkt aus der charakteristischen Tragfähigkeit unter Normaltemperaturen entsprechend Gleichung (1) zu ermitteln. Der Faktor η_{conn} ist abhängig von der Geometrie der ausgeführten Verbindung. Durch Einführung einer normierten Seitenholzdicke wird die Beziehung für η_{conn} für alle Stabdübeldurchmesser und alle Festigkeitsklassen des Holzes auf einen vereinheitlichten Verlauf reduziert, der sich in Form vereinfachter Bemessungsgeraden angeben lässt.

Tab. 8: Normierte Seitenholzdicke nach [13]

Branddauer	Mittelholzdicke	
	$t_2 = t_1$	$t_2 = 2 \cdot t_1$
30 Minuten	für alle d: $t_1 = \frac{t_1 - 33}{2,1 \sqrt{d}}$	$t_1 = \frac{t_1 - 35}{1,35 \sqrt{d}}$
60 Minuten	für $d < 8$ mm $t_1 = \frac{t_1 - 70}{1,6 \sqrt{d}}$	$t_1 = \frac{t_1 - 64}{1,4 \sqrt{d}}$
	für $d \geq 8$ mm $t_1 = \frac{t_1 - 64}{1,5 \sqrt{d}}$	$t_1 = \frac{t_1 - 60}{1,4 \sqrt{d}}$
Seitenholzdicke t_1 und Stabdübeldurchmesser d in mm		

Tab. 9: Bemessungsgeraden für die Tragfähigkeitsreduzierung im Brandfall für zweiseitige Stabdübelverbindungen nach [13]

Branddauer	Mittelholzdicke ¹	
	$t_2 = t_1$	$t_2 \geq 2 \cdot t_1$
30 Minuten	für $0 < t_1 \leq 6,4$: $\eta_{\text{conn}} = 0,075 \cdot t_1 - 0,05$	für $0 < t_1 \leq 2,0$: $\eta_{\text{conn}} = 0,225 \cdot t_1$
	für $t_1 > 6,4$: $\eta_{\text{conn}} = 0,024 \cdot t_1 + 0,28$ $\eta_{\text{conn}} \leq 0,80$	für $t_1 > 2,0$: $\eta_{\text{conn}} = 0,055 \cdot t_1 + 0,34$ $\eta_{\text{conn}} \leq 0,80$
60 Minuten	für $0 < t_1 \leq 6,0$: $\eta_{\text{conn}} = 0,105 \cdot t_1 - 0,23$	für $0 < t_1 \leq 5,0$: $\eta_{\text{conn}} = 0,110 \cdot t_1 - 0,1$
	für $t_1 > 6,0$: $\eta_{\text{conn}} = 0,044 \cdot t_1 + 0,14$ $\eta_{\text{conn}} \leq 0,80$	für $t_1 > 5,0$: $\eta_{\text{conn}} = 0,041 \cdot t_1 + 0,245$ $\eta_{\text{conn}} \leq 0,80$
¹ Zwischenwerte der Tragfähigkeitsreduzierung η_{conn} für andere Mittelholzdicken $t_1 \leq t_2 \leq 2 \cdot t_1$ dürfen linear interpoliert werden		

Die Rand- und Zwischenabstände sind gemäß den Regelungen einer Bemessung unter Normaltemperaturen nach DIN 1052:2004-08 festzulegen. Zur Berücksichtigung

des thermischen Einflusses seitlicher Brandbeanspruchungen sind nach [13] zusätzlich die in Tab. 10 angegebenen Mindestrandabstände einzuhalten.

Tab. 10: Mindestabstände von Stabdübeln im Brandfall nach [13]

Abstände	Branddauer	
	30 Minuten	60 Minuten
untereinander, parallel zur Faser	$\alpha_{1,fi} \geq 7 \cdot d$	
untereinander, senkrecht zur Faser	$\alpha_{2,fi} \geq 3 \cdot d$	
Randabstand, parallel zur Faser	$\alpha_{3,fi} \geq \max \left\{ \begin{array}{l} \min \alpha_{3,fi} \\ \alpha_3 + (t \cdot \beta) \end{array} \right\}$	
	$\min \alpha_{3,fi} = 80 \text{ mm}^1$	$\min \alpha_{3,fi} = 110 \text{ mm}^1$
Randabstand, senkrecht zur Faser	$\alpha_{4,fi} \geq \max \left\{ \begin{array}{l} \min \alpha_{4,fi} \\ \alpha_4 + (t \cdot \beta) \end{array} \right\}$	
	$\min \alpha_{4,fi} = 60 \text{ mm}^1$	$\min \alpha_{4,fi} = 80 \text{ mm}^1$

¹ Zwischenwerte für andere Branddauern dürfen linear interpoliert werden.

Zur Beurteilung des entwickelten Bemessungskonzepts wurden für die in den Brandversuchen geprüften Probekörper die Tragfähigkeiten nach [13] ermittelt und mit den in den Brandversuchen auf die Verbindungen aufgetragenen Beanspruchungen und den daraus resultierenden Versagenszeiten verglichen.

Tab. 11: Vergleich der Tragfähigkeiten des Bemessungskonzepts nach [13] mit den in den Brandversuchen aufgetragenen Belastungen und den erreichten Versagenszeiten

Probekörpertyp p	Tragfähigkeit $R_{k,fi}$ nach [13] in kN	Beanspruchung R_{fi} im Brandversuch in kN	Verhältnis $R_{k,fi}/R_{fi}$	mittlere Versagenszeit in min
I	48,0	59,0	1,23	37,7
II	89,6	110,1	1,23	33,3
III	125,9	140,2	1,11	41,7
IV	116,6	141,6	1,21	38,8
V	169,9	183,3	1,08	46,7
VI	97,4	114,1	1,17	64,2

Der Vergleich zeigt, dass für alle Verbindungsgeometrien in den Brandversuchen bei höheren als nach dem Bemessungskonzept ermittelten Tragfähigkeiten zusätzlich die Versagenszeiten über den angestrebten Feuerwiderstandsdauern lagen. Somit kann festgestellt werden, dass mit dem in [14] entwickelten und in [13] angepassten Bemessungskonzept die Tragfähigkeit ungeschützter, zweischnittiger auf Abscheren bean-

sprucher Stabdübelverbindungen mit ausreichender Sicherheit bestimmt werden kann. Es zeichnet sich zudem durch seine Allgemeingültigkeit und die praxisgerechte Handhabbarkeit aus, so dass es sinnvoll und empfehlenswert ist, das Verfahren in die zukünftige Brandschutznormung zu integrieren.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die derzeitigen Regelungen zur Bemessung der Tragfähigkeit von ungeschützten Holzverbindungen mit stabförmigen Verbindungsmitteln im Brandfall basieren überwiegend auf empirisch gewonnenen Daten. In einem vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) über die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. (DGfH) geförderten Forschungsvorhaben, „Stabförmige Verbindungsmittel im Brandfall, Grundlagenuntersuchungen“ [14], wurde ein theoretisches Modell zur Ermittlung der Tragfähigkeit zweischnittiger, auf Abscheren beanspruchter Stabdübelverbindungen im Brandfall entwickelt. Mit Hilfe des entwickelten Modells konnten mit FE-Berechnungen die Temperaturentwicklung innerhalb einer Verbindung im Brandfall abgebildet werden. Auf der Grundlage der Temperaturverläufe wurden Algorithmen zur Tragfähigkeitsbestimmung für den Brandfall erarbeitet. Aus den Ergebnissen umfangreicher Berechnungen wurde ein allgemeingültiges, praxisgerechtes Bemessungskonzept zweischnittiger, auf Abscheren beanspruchter Stabdübelverbindungen im Brandfall abgeleitet. Es sieht vor, die Tragfähigkeit der Verbindung für eine vorgegebene Feuerwiderstandsdauer direkt aus der charakteristischen Tragfähigkeit unter Normaltemperaturen zu ermitteln.

Zur Bestätigung der theoretischen Erkenntnisse als Voraussetzung für eine Umsetzung in die zukünftige Brandschutznormung wurden an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin Versuchsreihen an zweischnittigen Holzverbindungen mit Stabdübeln durchgeführt. Insgesamt wurden 12 Probekörper mit unterschiedlichen Verbindungsgeometrien und Stabdübeldurchmessern unter Brandlast geprüft. Während der Versuche wurden auf die Probekörper konstante Zugkräfte aufgebracht. Zur Absicherung der Messergebnisse wurden jeweils zwei baugleiche Probekörper getestet. Schwerpunkt der Untersuchungen bildeten Versuche an Verbindungsgeometrien mit einer Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten. Zusätzlich wurden zwei Probekörper für eine Feuerwiderstandsdauer von 60 Minuten bemessen und geprüft. Während der Versuche erfolgte eine kontinuierliche Aufzeichnung der Temperaturen und der Verformung der Verbindung.

Das entwickelte Bemessungskonzept konnte anhand der Brandversuche verifiziert werden. Auch Vergleiche mit in Frankreich durchgeführten Versuchen unter Normaltemperaturen, die in [13] geführt wurden, zeigten gute Übereinstimmungen, so dass es möglich und empfehlenswert ist, das Verfahren in die zukünftige Brandschutznormung zu integrieren. Die Untersuchungen zeigen zudem, dass es sinnvoll ist, das Verfahren auch auf andere Verbindungsarten zu erweitern. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen belegen, dass für Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln bei Kenntnis der Temperaturverteilung innerhalb der Verbindung die üblichen Bemess-

sungsverfahren verwendet werden können und damit häufig ausreichende Tragfähigkeiten auch ungeschützter Verbindungen im Brandfall für Feuerwiderstandszeiten von 30 bis 60 Minuten nachgewiesen werden können. Damit würde sich der konstruktive Aufwand im Vergleich zu bisher geschützt auszuführenden Verbindungen wesentlich verringern.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN 1052:2004-08: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.
- [2] DIN 4074-1:1989-09: Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit; Nadel-schnittholz.
- [3] DIN 4102-4:1994-03: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Zusammen-stellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile.
- [4] DIN 4102-22:2004-11: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 22: Anwendungsnorm zu DIN 4102-4 auf der Bemessungsbasis von Teilsicherheits-beiwerten.
- [5] DIN 52182:1976-09: Prüfung von Holz; Bestimmung der Rohdichte.
- [6] DIN EN 1363-1:1999-10: Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anfor-derungen.
- [7] DIN EN 10002-1:2001-12: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüf-verfahren bei Raumtemperatur.
- [8] DIN EN 10025:1994-03: Warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen; Technische Lieferbedingungen.
- [9] DIN EN 26891:1991-07: Holzbauwerke; Verbindungen mit mechanischen Ver-bindungsmitteln; Allgemeine Grundsätze für die Ermittlung der Tragfähigkeit und des Verformungsverhaltens.
- [10] E DIN EN 1995-1-2:2003-08: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holz-bauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Bemessung für den Brandfall.
- [11] Johansen, K. W.: Theory of Timber Connections. Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau. Veröffentlichung Nr. 9, S. 249-262, Bern, Switzerland, 1949.
- [12] Peter, M.: Numerische Tragfähigkeitsermittlung von Holzbauteilen im Brandfall unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens. Dissertation, Tech-nische Universität Berlin, 2003.
- [13] Povel, D.: Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit stabförmigen Verbindungs-mitteln im Brandfall. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2002.
- [14] Scheer, C.; Povel, D.: Tragfähigkeit von Holzverbindungen mit stabförmigen Ver-bindungsmitteln im Brandfall; Teil 1: Grundlagenuntersuchungen. Forschungsbe-richt, Technische Universität Berlin, 2002.

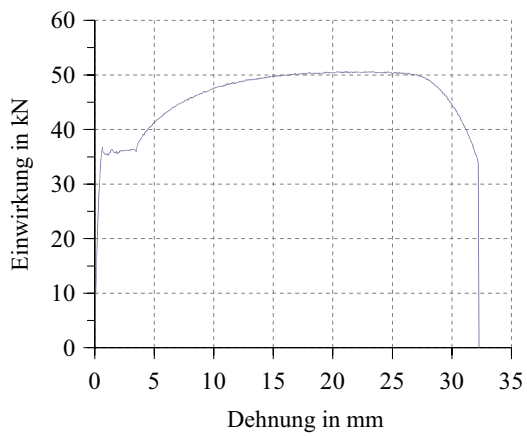
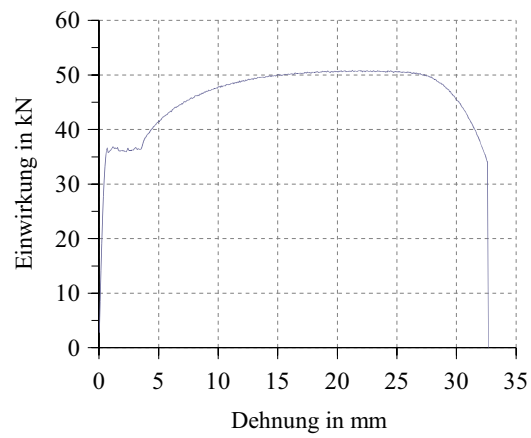
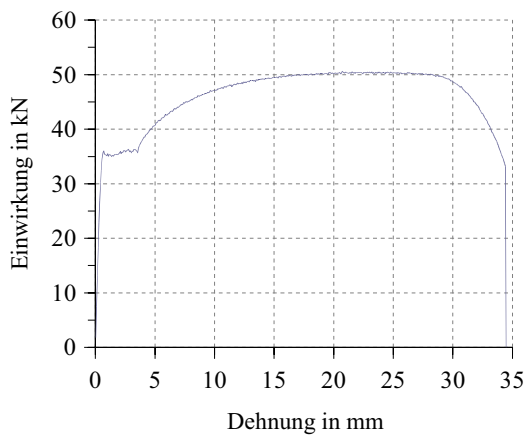
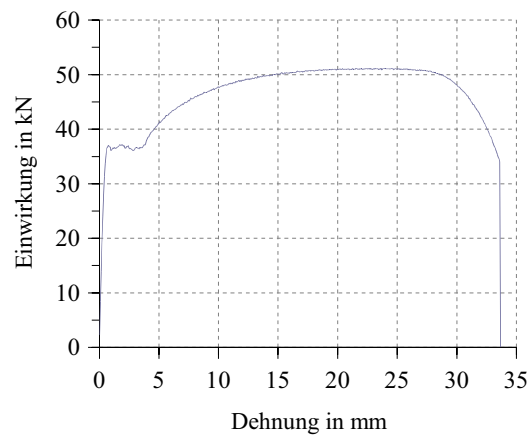
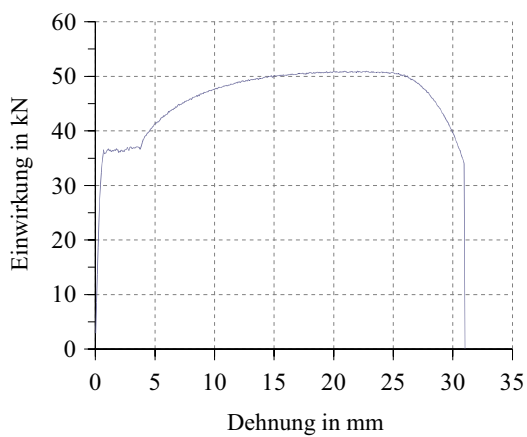
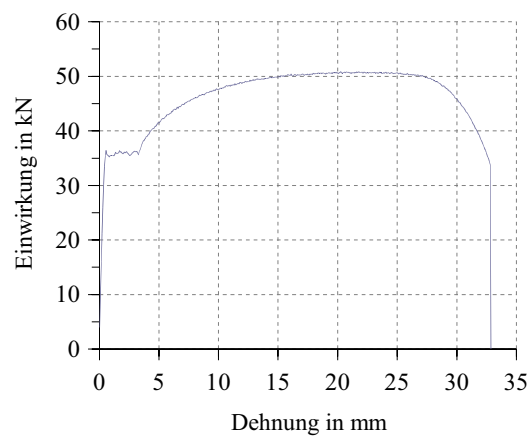
Anhang A

Zugversuche Stabdübel

Anhang A umfasst die Versuchsdaten der Materialuntersuchungen des Stahls aus denen die Verbindungsmittel hergestellt wurden. Die Stabdübel wurden aus unterschiedlichen Stahlsträngen vom Typ S235JRG2 (RST 37-2) gefertigt. In den Tabellen sind die Messwerte der einzelnen Versuche aufgelistet.

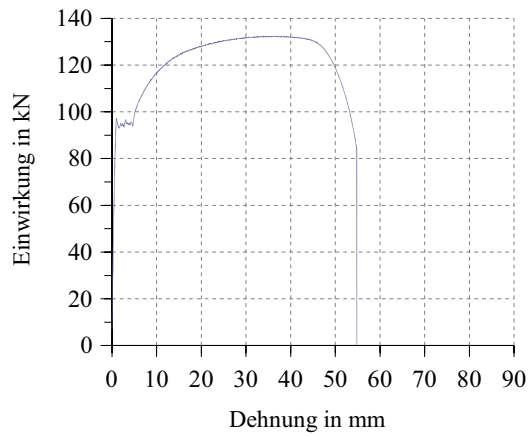
Tab.13: Mechanische Eigenschaften der Stahlproben

Materialnummer	Strangstärke in mm	Prüfgeschwindigkeit in mm/min	Obere Streckgrenze R_{eH} in kN.	Untere Streckgrenze R_{eL} in kN	Zugfestigkeit R_m in kN
01	12	2,0	36,7	36,0	50,7
08	12	2,0	36,6	36,3	50,9
09	12	2,0	36,0	35,7	50,6
10	12	2,0	37,0	36,1	51,2
11	12	2,0	36,5	36,6	50,9
12	12	2,0	36,4	35,6	50,8
03	20	1,8	97,2	94,0	132,4
04	20	1,8	96,4	92,9	131,3
05	20	1,8	96,6	93,4	131,4
06	20	1,8	97,4	92,6	131,7
07	20	1,8	95,8	93,5	131,9

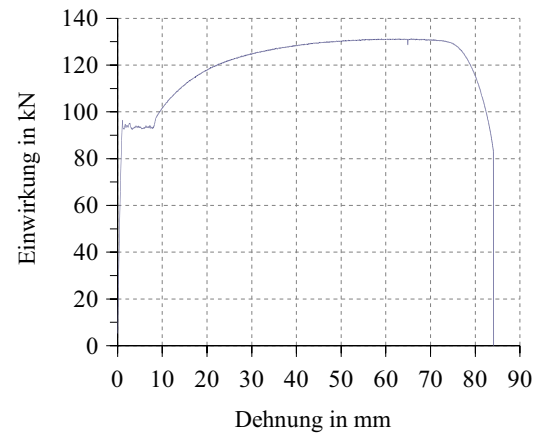
Stahlproben der Strangstärke \varnothing 12 mm**Materialnummer 01****Materialnummer 08****Materialnummer 09****Materialnummer 10****Materialnummer 11****Materialnummer 12**

Stahlproben der Strangstärke $\varnothing 20$ mm

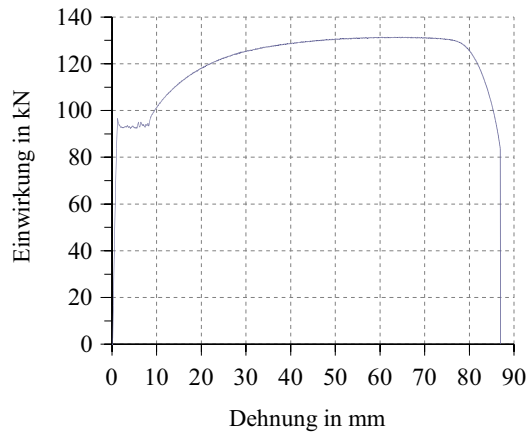
Materialnummer 03



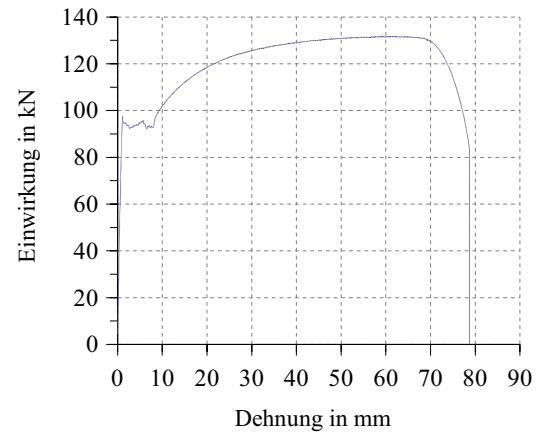
Materialnummer 04



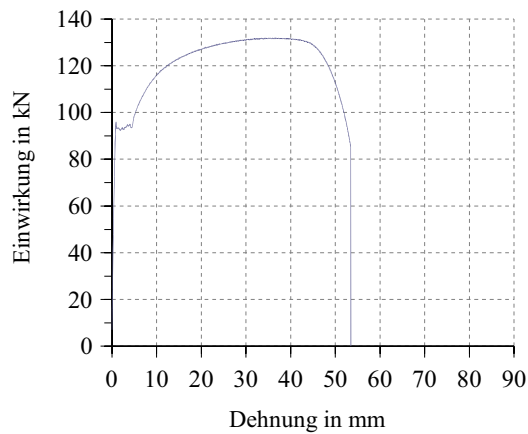
Materialnummer 05



Materialnummer 06



Materialnummer 07



Anhang B

Ermittlung der Rohdichte des Holzes

Der Anhang B umfasst die zur Ermittlung der Rohdichte des Holzes der Probekörper erforderlichen Messdaten in tabellarischer Form.

Tab.14: Probengewichte während der Darrtrocknung

Probe	Einlagerung		1. Messung		2. Messung		3. Messung		4. Messung		5. Messung	
	Datum	Gewicht	Datum	Gewicht	Datum	Gewicht	Datum	Gewicht	Datum	Gewicht	Datum	Gewicht
1	23.4.03	935,0	28.4.03	870,0	5.5.03	869,1	9.5.03	869,5	13.5.03	869,4	23.5.03	869,0
2	23.4.03	963,5	28.4.03	889,4	5.5.03	888,8	9.5.03	888,4	13.5.03	888,7	23.5.03	888,5
3	23.4.03	1031,9	28.4.03	950,5	5.5.03	950,0	9.5.03	949,1	13.5.03	950,1	23.5.03	949,5
4	23.4.03	867,5	28.4.03	803,4	5.5.03	802,6	9.5.03	802,6	13.5.03	802,6	23.5.03	802,4
5	23.4.03	829,9	28.4.03	772,8	5.5.03	772,5	9.5.03	772,2	13.5.03	772,5	23.5.03	771,8
6	23.4.03	1038,5	28.4.03	958,5	5.5.03	958,3	9.5.03	957,2	13.5.03	957,9	23.5.03	957,0
7	23.4.03	676,9	28.4.03	628,8	5.5.03	628,3	9.5.03	628,5	13.5.03	628,5	23.5.03	628,6
8	23.4.03	597,0	28.4.03	553,2	5.5.03	552,6	9.5.03	552,6	13.5.03	552,5	23.5.03	552,4
9	23.4.03	737,4	28.4.03	679,7	5.5.03	679,2	9.5.03	678,9	13.5.03	678,8	23.5.03	678,8
10	23.4.03	584,6	28.4.03	544,9	5.5.03	544,5	9.5.03	544,5	13.5.03	544,2	23.5.03	543,9
11	23.4.03	588,1	28.4.03	550,6	5.5.03	550,4	9.5.03	550,8	13.5.03	550,6	23.5.03	550,5
12	23.4.03	612,7	28.4.03	569,7	5.5.03	569,6	9.5.03	569,4	13.5.03	569,4	23.5.03	569,0
13	23.4.03	487,8	28.4.03	451,3	5.5.03	450,8	9.5.03	450,8	13.5.03	450,7	23.5.03	450,3
14	23.4.03	452,8	28.4.03	420,8	5.5.03	420,7	9.5.03	420,5	13.5.03	420,6	23.5.03	420,3
15	23.4.03	355,5	28.4.03	329,2	5.5.03	329,0	9.5.03	328,8	13.5.03	329,1	23.5.03	328,9
16	23.4.03	330,0	28.4.03	303,1	5.5.03	303,0	9.5.03	302,9	13.5.03	303,1	23.5.03	302,9
17	23.4.03	260,2	28.4.03	240,4	5.5.03	240,2	9.5.03	240,2	13.5.03	240,1	23.5.03	240,0
18	23.4.03	246,3	28.4.03	230,0	5.5.03	229,4	9.5.03	229,4	13.5.03	229,6	23.5.03	229,5

Alle Gewichtsangaben erfolgen in Gramm [g]

Tab.15: Abbruchbedingung für die Darrtrocknung

Probe	Bedingung: $ d_m < (0,1\% \text{ vom Gewicht der Probe})$									
	28.4.03		5.5.03		9.5.03		13.5.03		23.5.03	
	d_m	m	d_m	m	d_m	m	d_m	m	d_m	m
1	65,000	0,870	0,900	0,869	-0,400	0,870	0,100	0,869	0,4	0,9
2	74,100	0,889	0,600	0,889	0,400	0,888	-0,300	0,889	0,2	0,9
3	81,400	0,951	0,500	0,950	0,900	0,949	-1,000	0,950	0,6	0,9
4	64,100	0,803	0,800	0,803	0,000	0,803	0,000	0,803	0,2	0,8
5	57,100	0,773	0,300	0,773	0,300	0,772	-0,300	0,773	0,7	0,8
6	80,000	0,959	0,200	0,958	1,100	0,957	-0,700	0,958	0,9	1,0
7	48,100	0,629	0,500	0,628	-0,200	0,629	0,000	0,629	-0,1	0,6
8	43,800	0,553	0,600	0,553	0,000	0,553	0,100	0,553	0,1	0,6
9	57,700	0,680	0,500	0,679	0,300	0,679	0,100	0,679	0,0	0,7
10	39,700	0,545	0,400	0,545	0,000	0,545	0,300	0,544	0,3	0,5
11	37,500	0,551	0,200	0,550	-0,400	0,551	0,200	0,551	0,1	0,6
12	43,000	0,570	0,100	0,570	0,200	0,569	0,000	0,569	0,4	0,6
13	36,500	0,451	0,500	0,451	0,000	0,451	0,100	0,451	0,4	0,5
14	32,000	0,421	0,100	0,421	0,200	0,421	-0,100	0,421	0,3	0,4
15	26,300	0,329	0,200	0,329	0,200	0,329	-0,300	0,329	0,2	0,3
16	26,900	0,303	0,100	0,303	0,100	0,303	-0,200	0,303	0,2	0,3
17	19,800	0,240	0,200	0,240	0,000	0,240	0,100	0,240	0,1	0,2
18	16,300	0,230	0,600	0,229	0,000	0,229	-0,200	0,230	0,1	0,2

m – 0,1% des Gewichtes der Probe in [g] mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,1\%$
 d_m – Differenz (Gewichtsabnahme) zur Vorwägung in [g]

Tab.16: Trockenrohddichte der Holzproben

Probe	Feuchtvolumen V_u [mm ³]	Feuchtgewicht m_u [g]	Trockengewicht m_d [g]	Feuchtegehalt u [%]	Trockenrohddichte r_d [kg/m ³]
1	2194500	935,0	869,0	7,6	396
2	2239529	963,5	888,5	8,4	397
3	2613450	1031,9	949,5	8,7	363
4	2075853	867,5	802,4	8,1	387
5	2045138	829,9	771,8	7,5	377
6	2618438	1038,5	957,0	8,5	365
7	1537988	676,9	628,6	7,7	409
8	1408875	579,0	552,4	4,8	392
9	1556890	737,4	678,8	8,6	436
10	1403350	584,6	543,9	7,5	388
11	1306800	588,1	550,5	6,8	421
12	1313400	612,7	569,0	7,7	433
13	953663	487,8	450,3	8,3	472
14	951500	452,8	420,3	7,7	442
15	781235	355,5	328,9	8,1	421
16	780788	330,0	302,9	8,9	388
17	555000	260,2	240,0	8,4	432
18	553750	246,3	229,5	7,3	414

mit $u = \frac{100 \cdot (m_u - m_d)}{m_d}$ und $r_d = \frac{100 \cdot (m_u / V_u)}{(100 + u - 0,85 \cdot m_u / V_u)}$

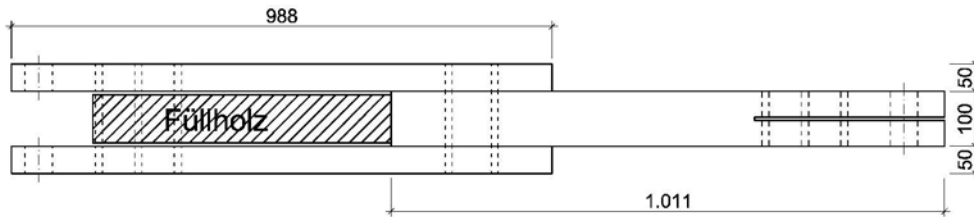
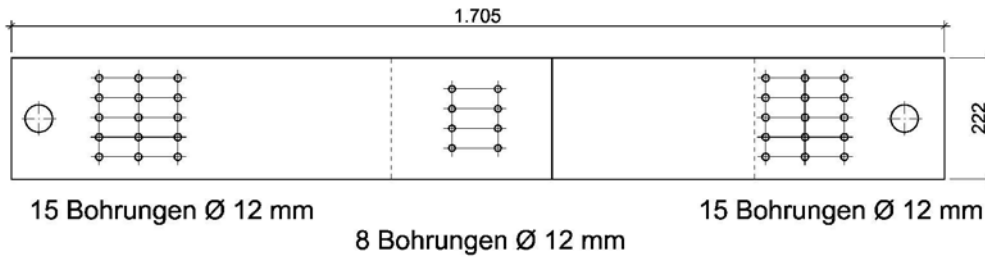
Anhang C

Geometrie der Probekörper

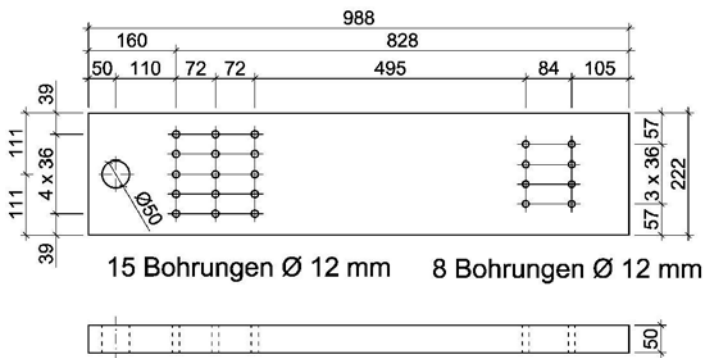
Im Anhang C sind die geometrischen Abmessungen der Holzbauteile aus denen die einzelnen Probekörper bestehen angegebenen.

Anmerkung: Die Zeichnungen sind nicht maßstäblich.

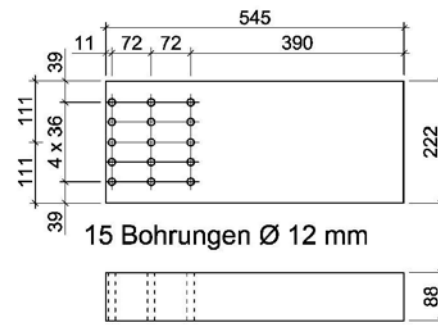
Probekörper Typ I



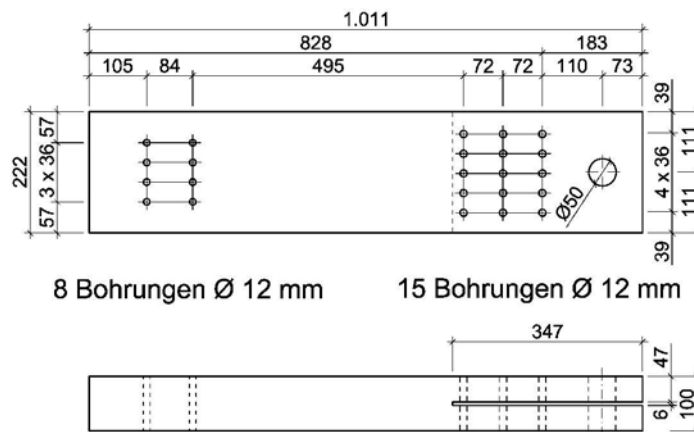
Seitenholz:



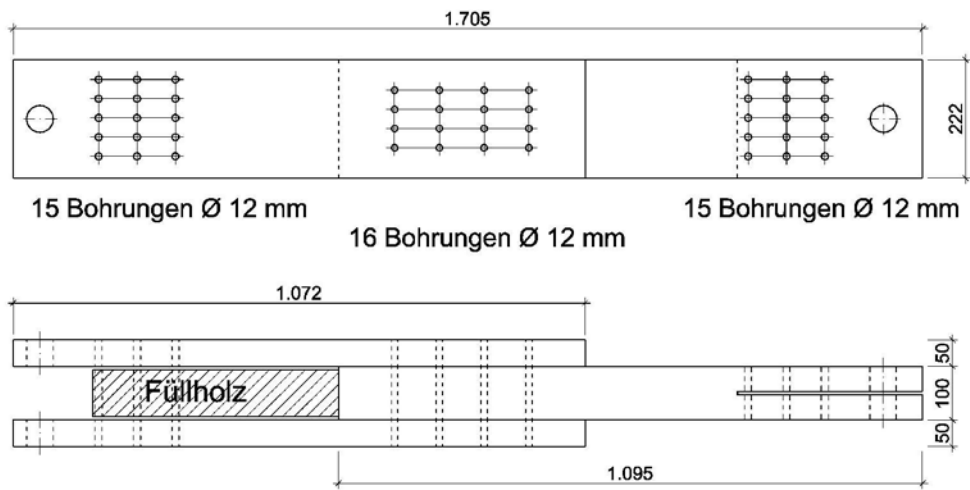
Füllholz:



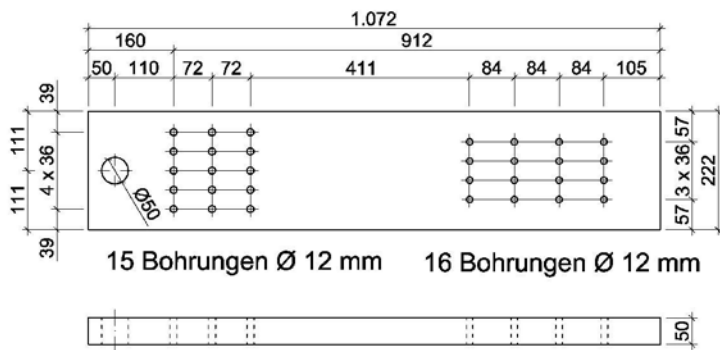
Mittelholz:



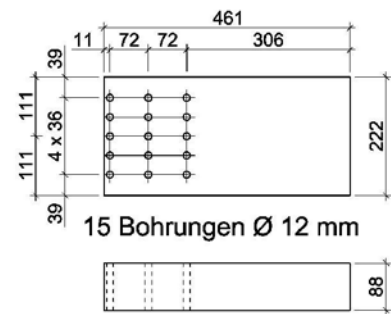
Probekörper Typ II



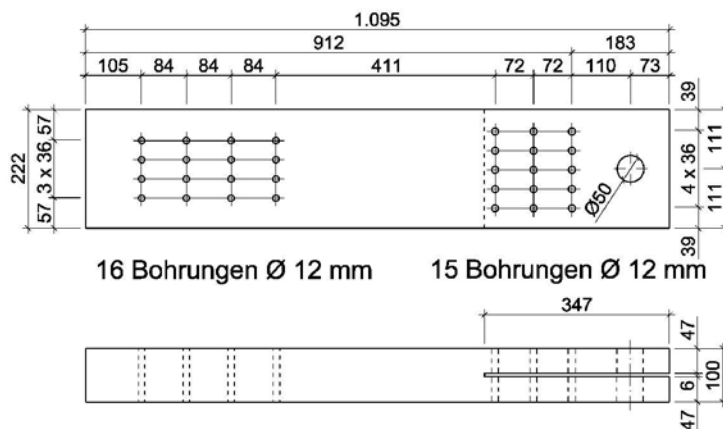
Seitenholz:



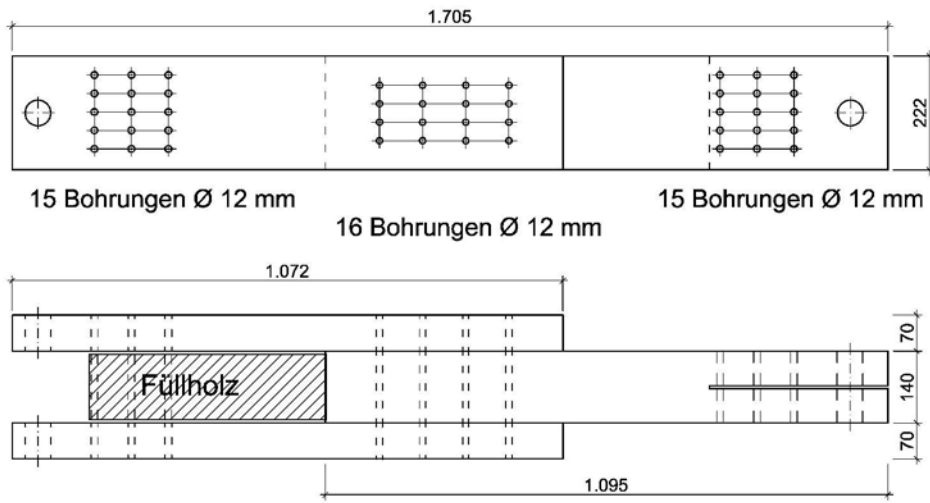
Füllholz:



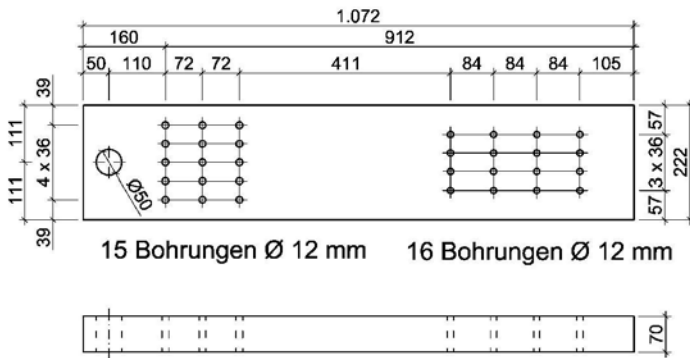
Mittelholz:



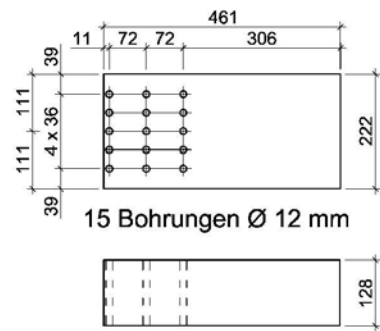
Probekörper Typ III



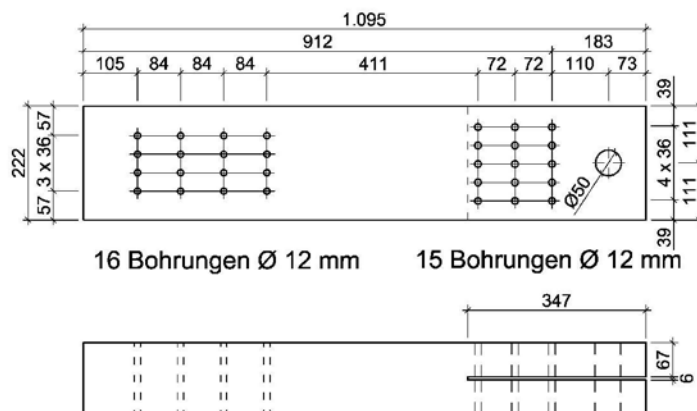
Seitenholz:



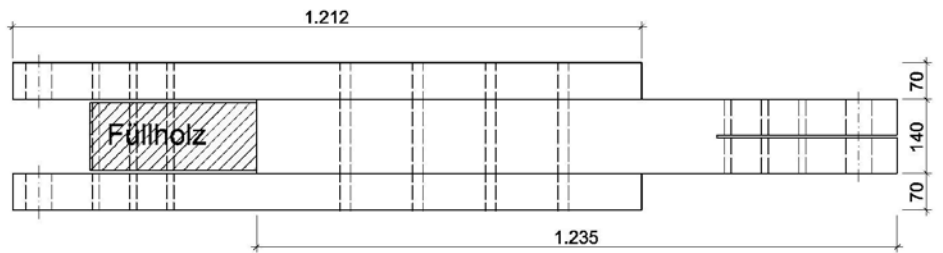
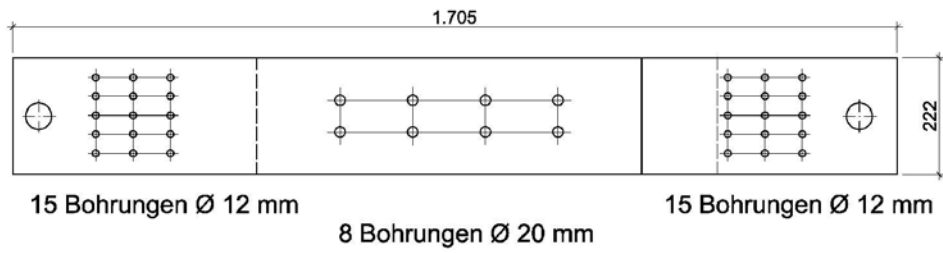
Füllholz:



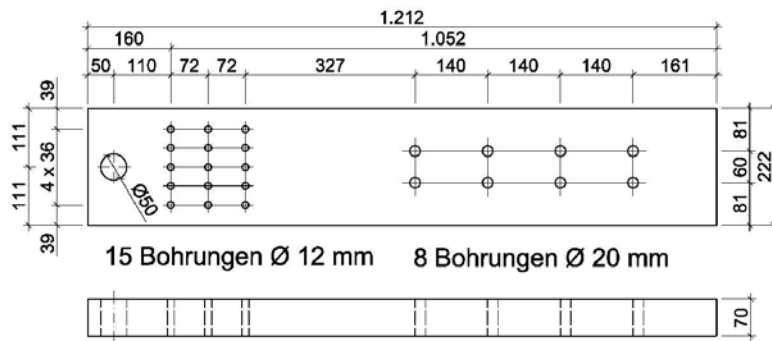
Mittelholz:



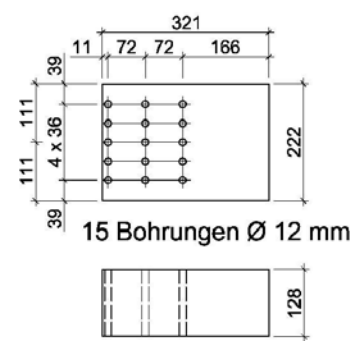
Probekörper Typ IV



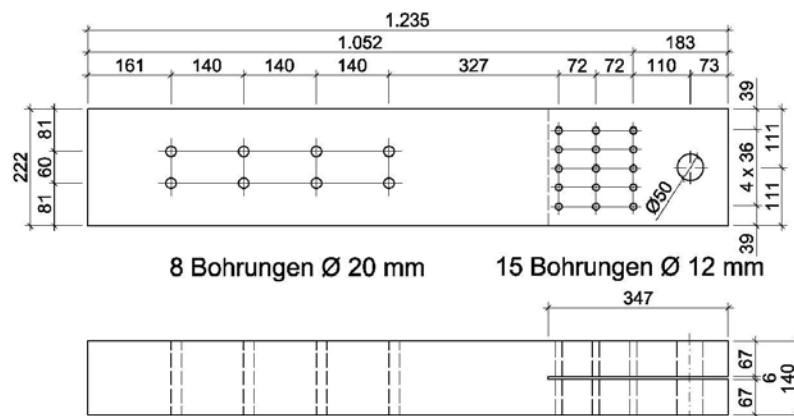
Seitenholz:



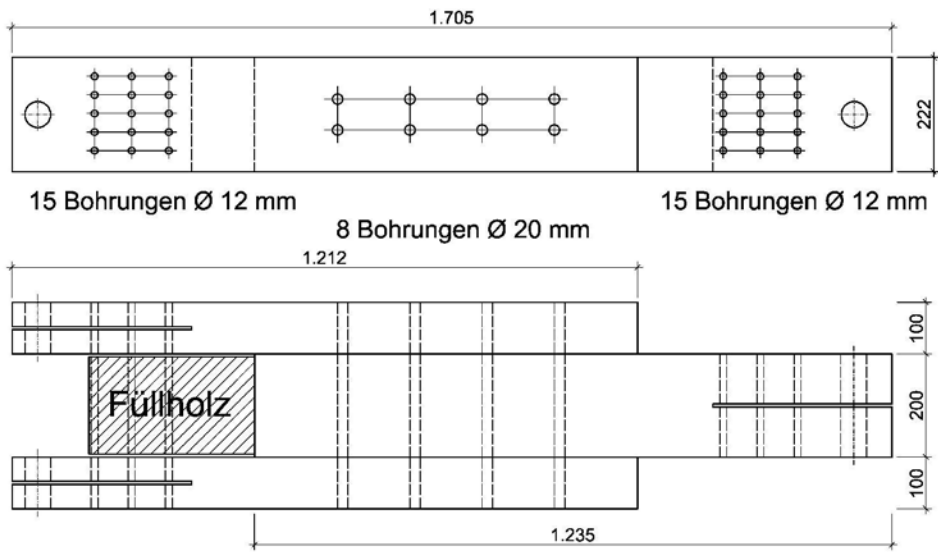
Füllholz:



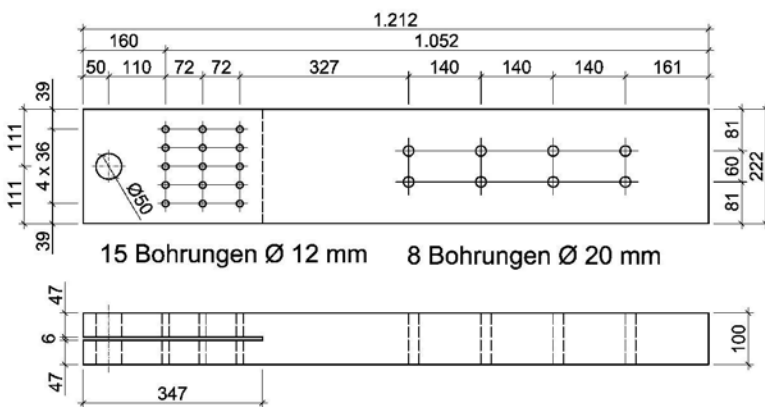
Mittelholz:



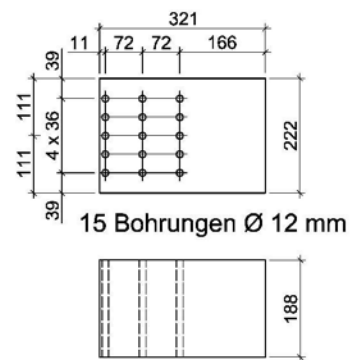
Probekörper Typ V



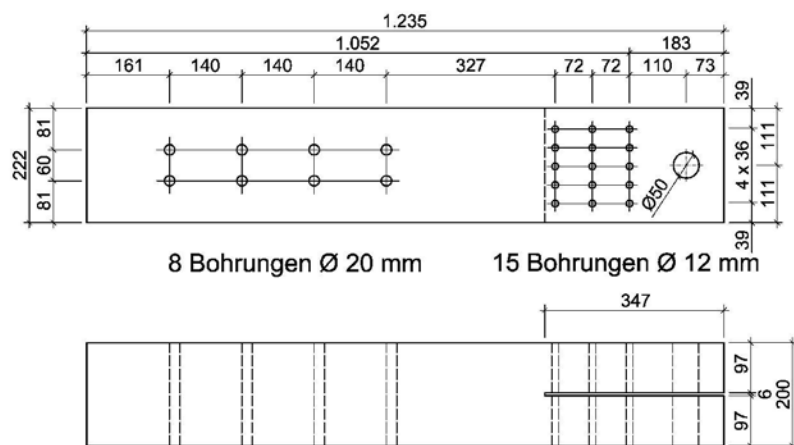
Seitenholz:



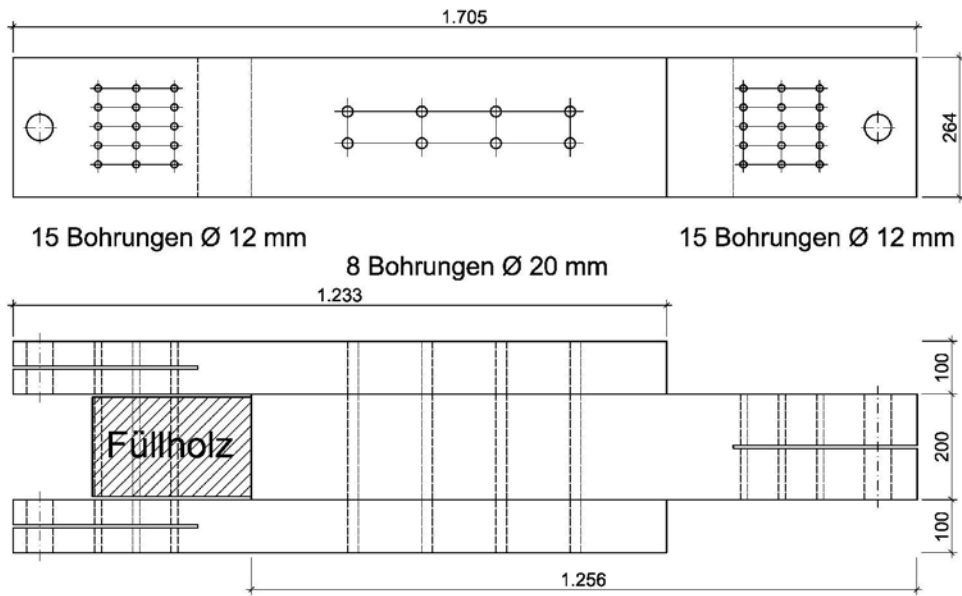
Füllholz:



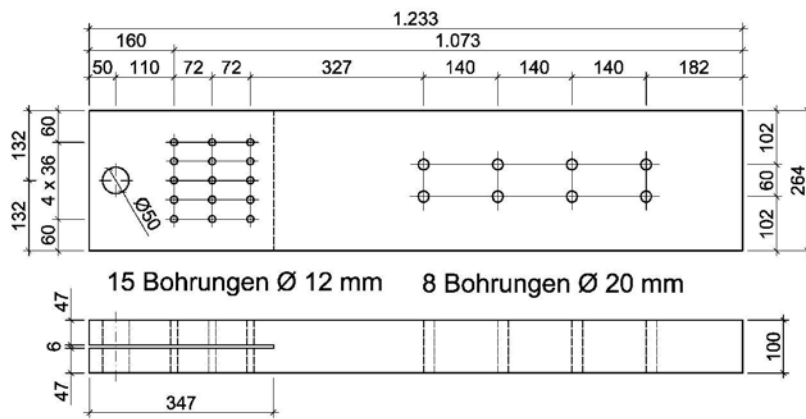
Mittelholz:



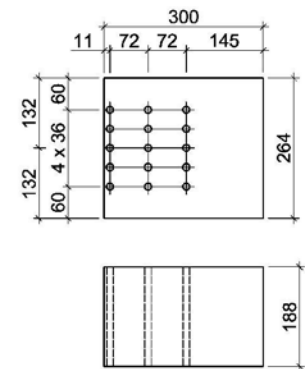
Probekörper Typ VI



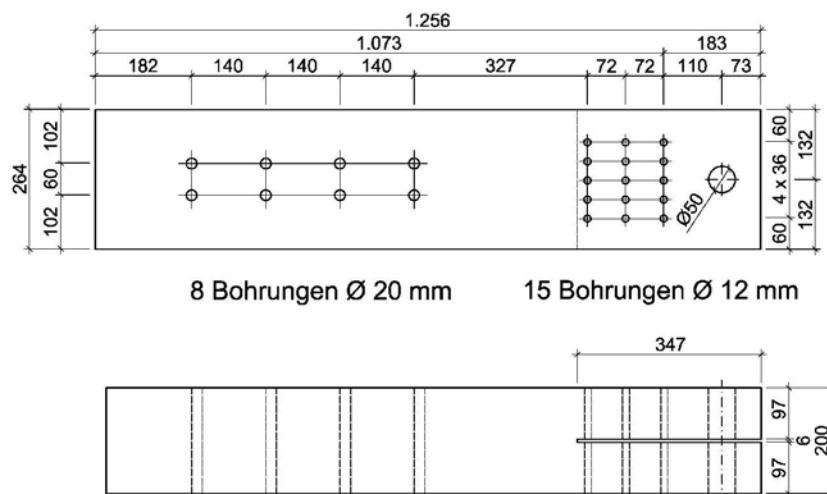
Seitenholz:



Füllholz:



Mittelholz:



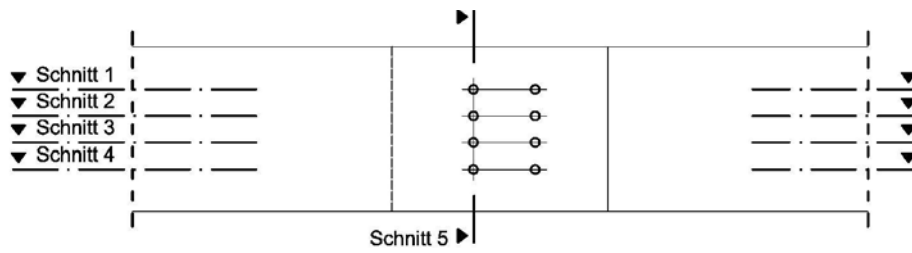
Anhang D

Lage und Bezeichnung der Thermo- elemente

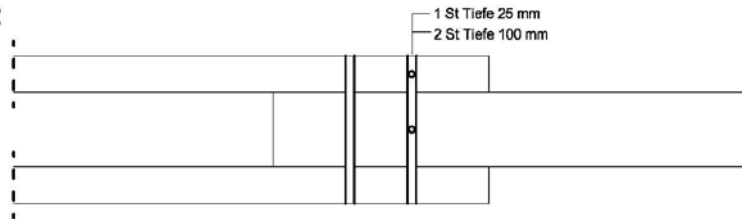
Im Anhang D sind die Lagen und Bezeichnungen der einzelnen Thermoelemente aufgeführt. Dargestellt ist jeweils nur der Probekörper vom Typ Xa. Die Thermoelemente des Typ Xb sind in verringerter Anzahl identisch, wodurch auf eine Darstellung an dieser Stelle verzichtet werden konnte.

Anmerkung: Die Zeichnungen sind nicht maßstäblich.

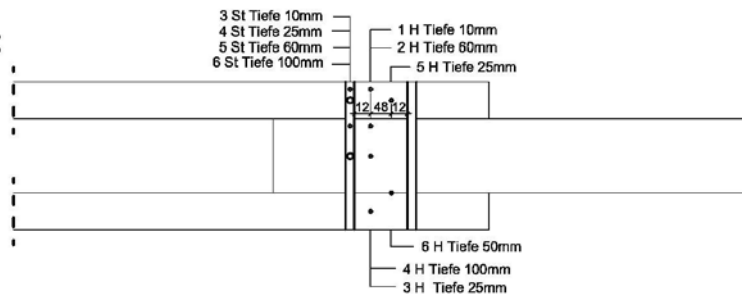
Probekörper Typ Ia



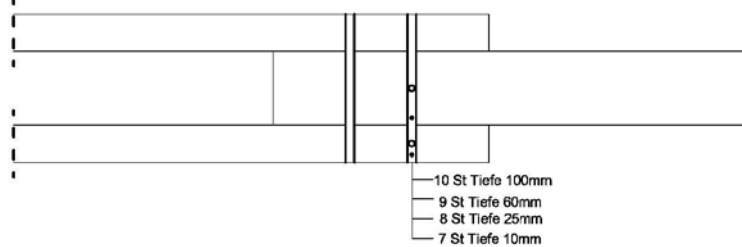
Schnitt 1:



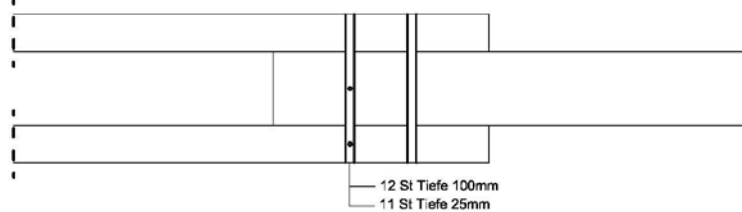
Schnitt 2:



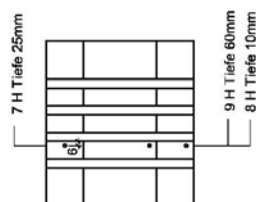
Schnitt 3:



Schnitt 4:



Schnitt 5:

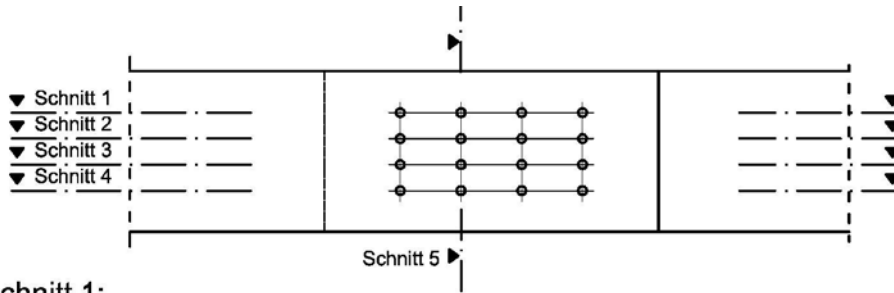


Benötigten Thermoelemente

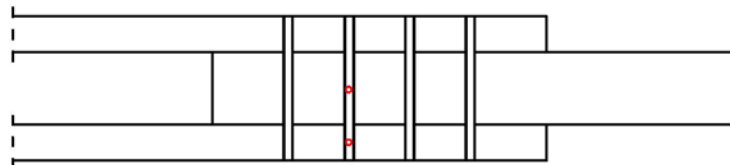
- 12 Thermoelemente $d=0,5\text{mm}$ Typ K
- 9 Thermoelemente $d=1,5\text{mm}$ Typ K

- Thermoelement unterhalb des Stabdübels
- Thermoelement oberhalb des Stabdübels bzw. innerhalb des Holzes

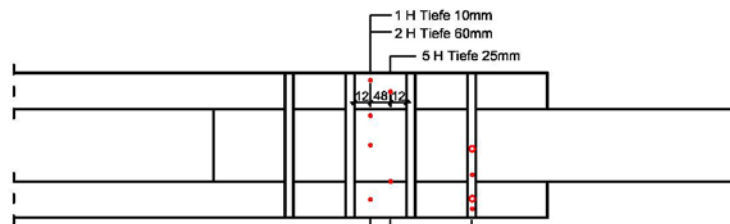
Probekörper Typ IIa



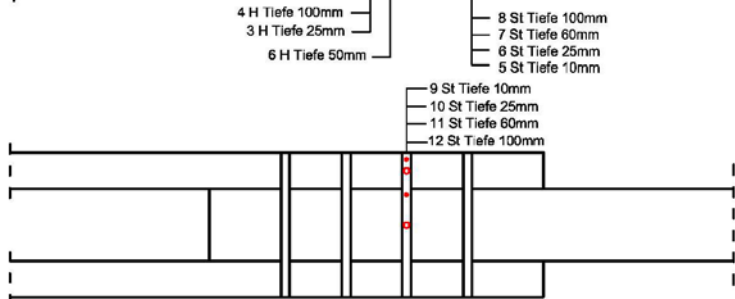
Schnitt 1:



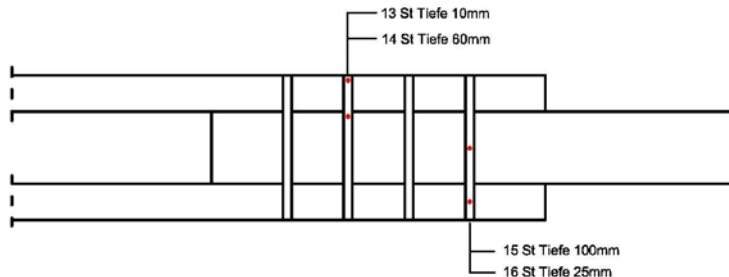
Schnitt 2:



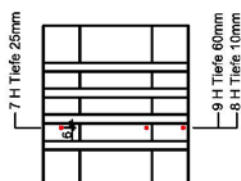
Schnitt 3:



Schnitt 4:



Schnitt 5:

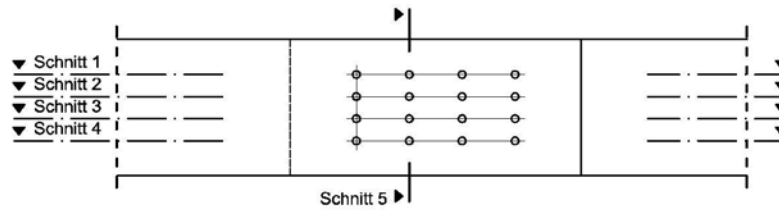


Benötigten Thermoelemente

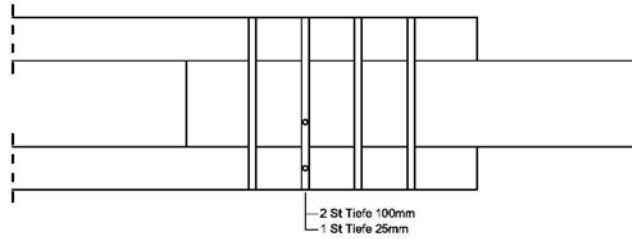
- 14 Thermoelemente $d=0,5\text{mm}$ Typ K
- 9 Thermoelemente $d=1,5\text{mm}$ Typ K

- Thermoelement unterhalb des Stabdübels
- Thermoelement oberhalb des Stabdübels bzw. innerhalb des Holzes

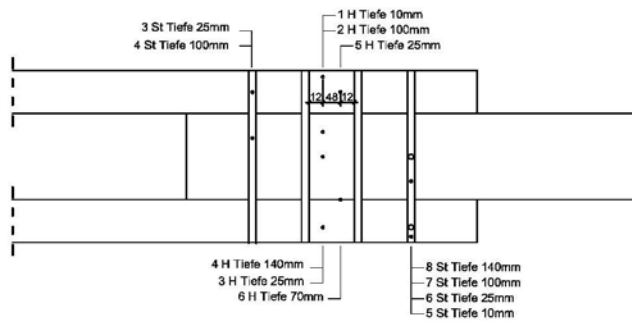
Probekörper Typ IIIa



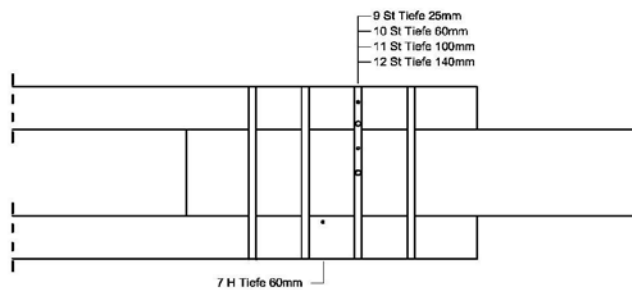
Schnitt 1:



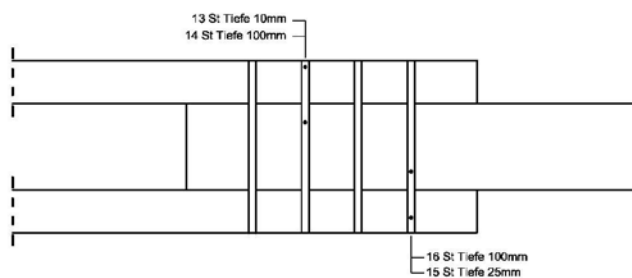
Schnitt 2:



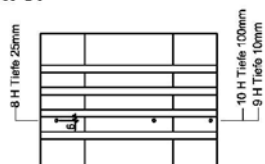
Schnitt 3:



Schnitt 4:



Schnitt 5:

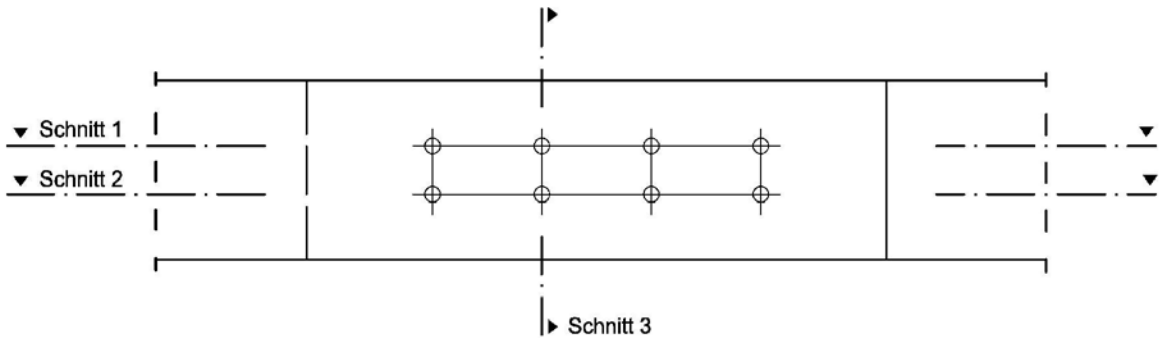


Benötigten Thermolemente

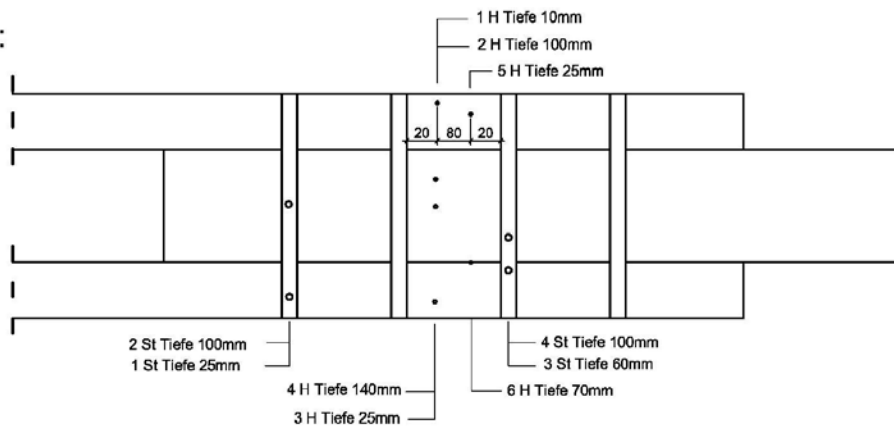
- 16 Thermolemente $d=0,5mm$ Typ K
- 10 Thermolemente $d=1,5mm$ Typ K

- Thermolement unterhalb des Stabdübels
- Thermolement oberhalb des Stabdübels bzw. innerhalb des Holzes

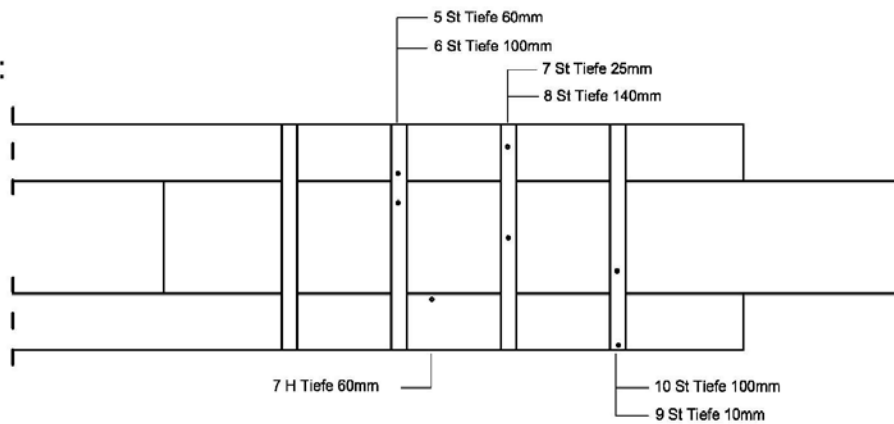
Probekörper Typ IVa



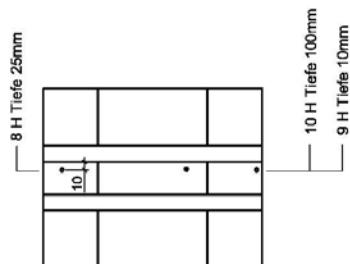
Schnitt 1:



Schnitt 2:



Schnitt 3:

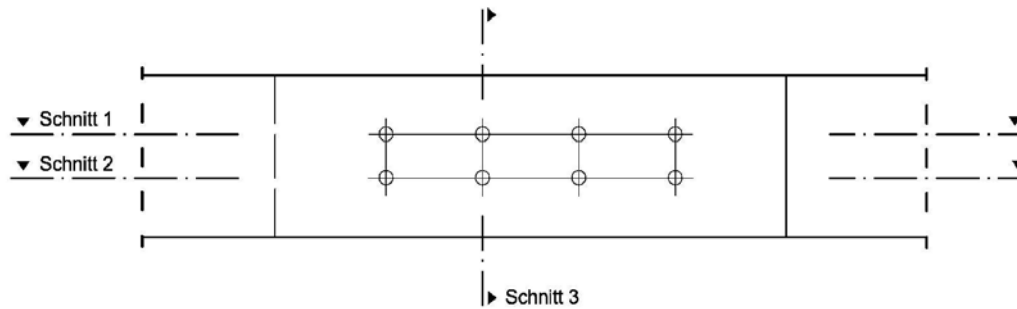


Benötigten Thermoelemente

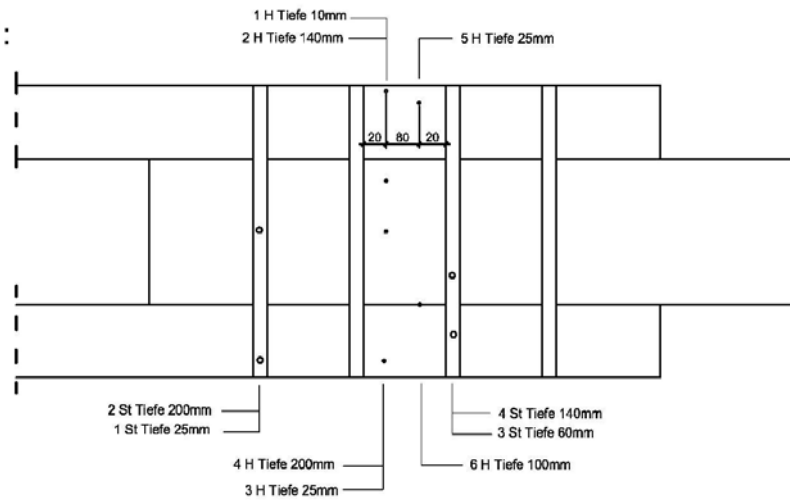
- 10 Thermoelemente d=0,5mm Typ K
- 10 Thermoelemente d=1,5mm Typ K

- Thermoelement unterhalb des Stabdübels
- Thermoelement oberhalb des Stabdübels bzw. innerhalb des Holzes

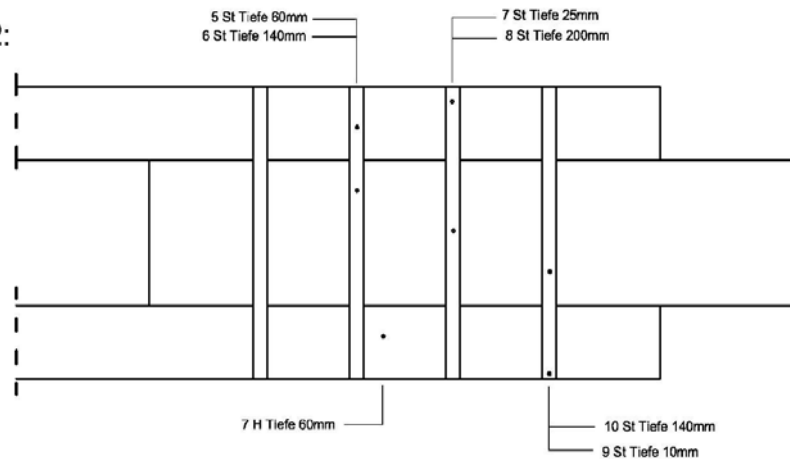
Probekörper Typ Va



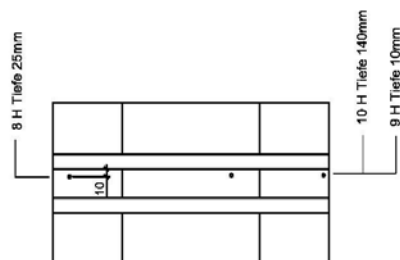
Schnitt 1:



Schnitt 2:



Schnitt 3:

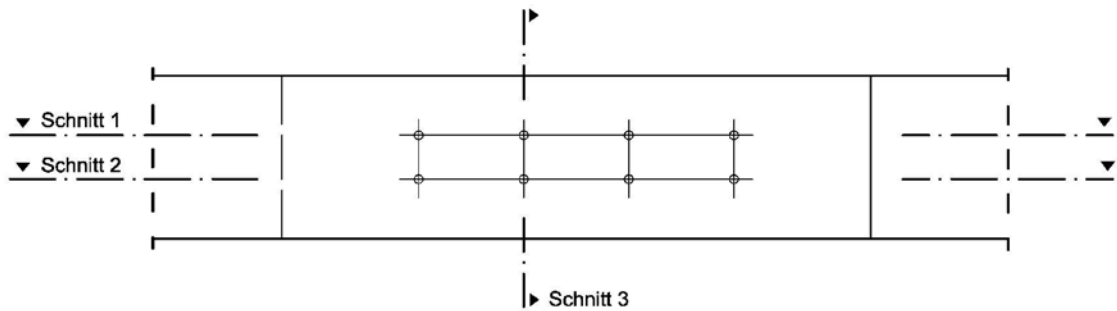


Benötigten Thermolemente

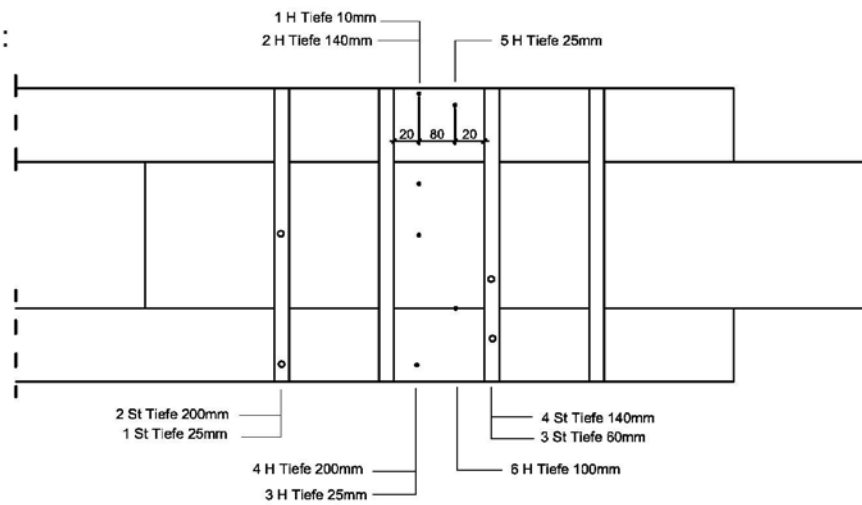
- 10 Thermolemente $d=0,5\text{mm}$ Typ K
- 10 Thermolemente $d=1,5\text{mm}$ Typ K

- Thermolement unterhalb des Stabdübels
- Thermolement oberhalb des Stabdübels bzw. innerhalb des Holzes

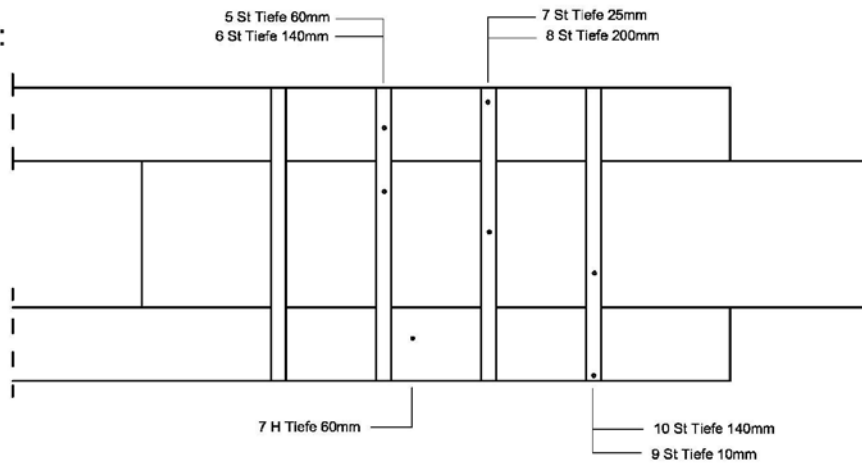
Probekörper Typ VIa



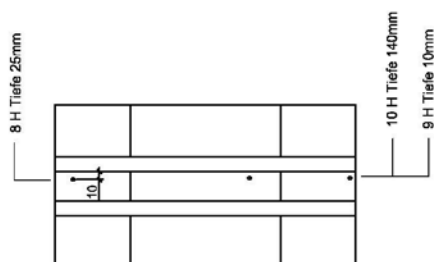
Schnitt 1:



Schnitt 2:



Schnitt 3:



Benötigten Thermolemente

- 10 Thermolemente $d=0,5\text{mm}$ Typ K
- 10 Thermolemente $d=1,5\text{mm}$ Typ K

- Thermolement unterhalb des Stabdübels
- Thermolement oberhalb des Stabdübels bzw. innerhalb des Holzes

Anhang E

- Kaltversuche - Tragfähigkeiten und Verformungen der Verbindungen

Dargestellt sind in den nachfolgenden Diagrammen die Belastungsrampen der Tragfähigkeitsuntersuchungen der Probekörper bei Normaltemperatur. Die Kaltversuche sind entsprechend der DIN EN 26 891 [3] durchgeführt worden. Als Abbruchkriterium sind nach DIN EN 26 891 [3] zwei Bedingungen vorgegeben. Erstens das Erreichen der Tragfähigkeit des Probekörpers. Zweitens das Überschreiten der Verformung der Verbindung von mehr als 15,0 mm.

Für jeden Probekörper wurden zwei Diagramme angefertigt. Das erste Diagramm umfasst den Verlauf der Belastungsrampe während des Versuches. In dem zweiten Diagramm wurde die auftretende Verformung an der Verbindung dargestellt.

Probekörper Typ I

Versuchsdatum: 19.11.2003

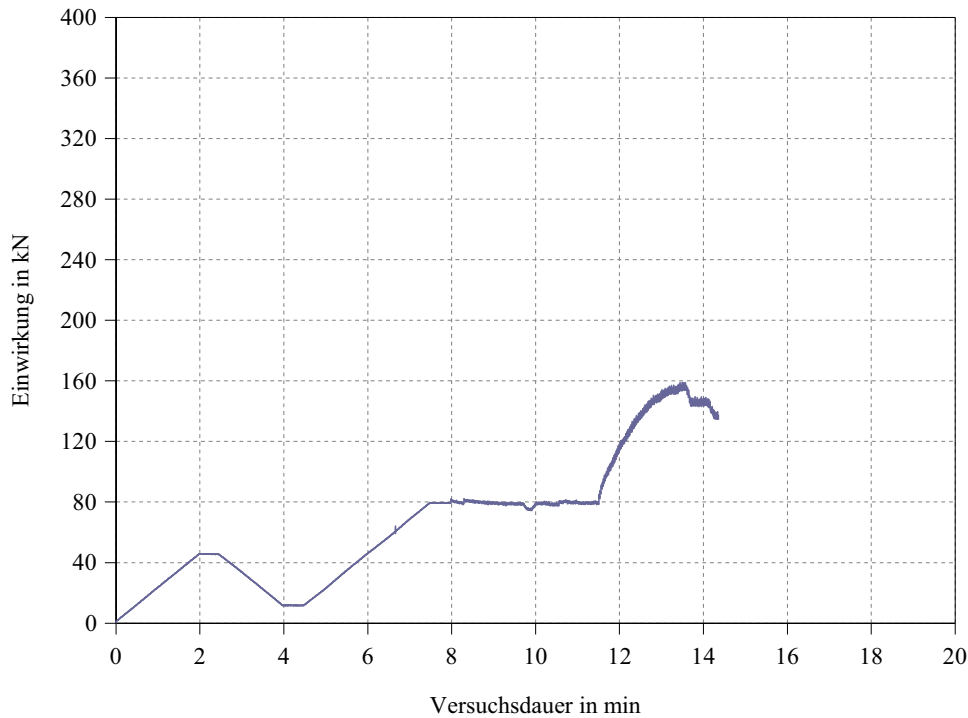
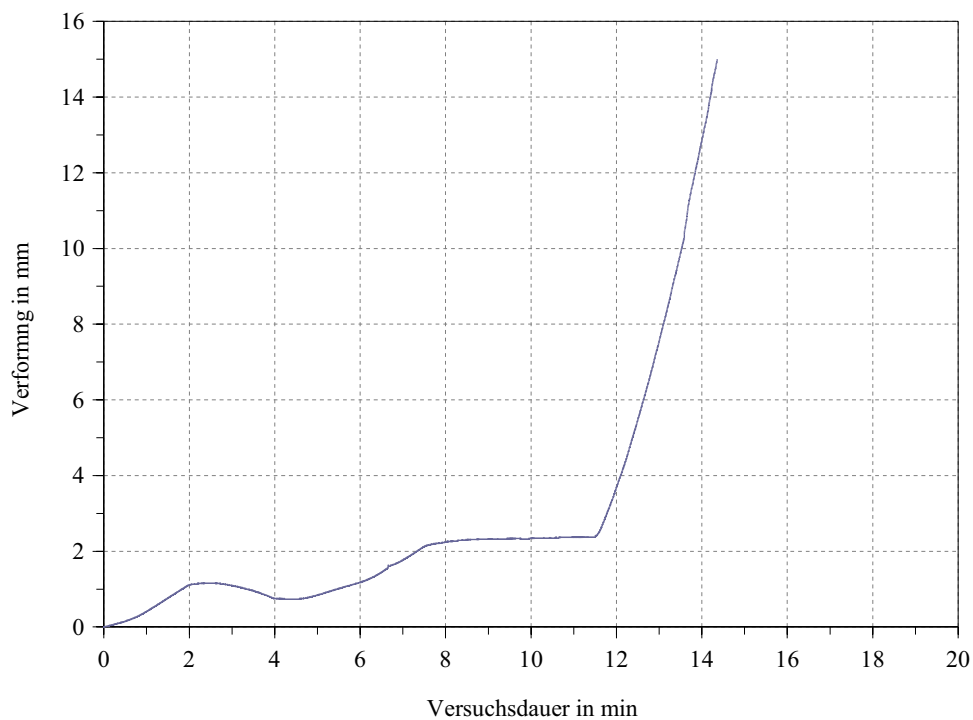
Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 200 mm

Höchstlast (F_{\max}): 159,0 kN

Stabdübelanzahl: 8 Stk

Belastungsrampe bis zum Erreichen der maximalen Tragfähigkeit F_{\max} **Verformung der Verbindung während des Kaltversuches**

Probekörper Typ II

Versuchsdatum: 14.11.2003

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

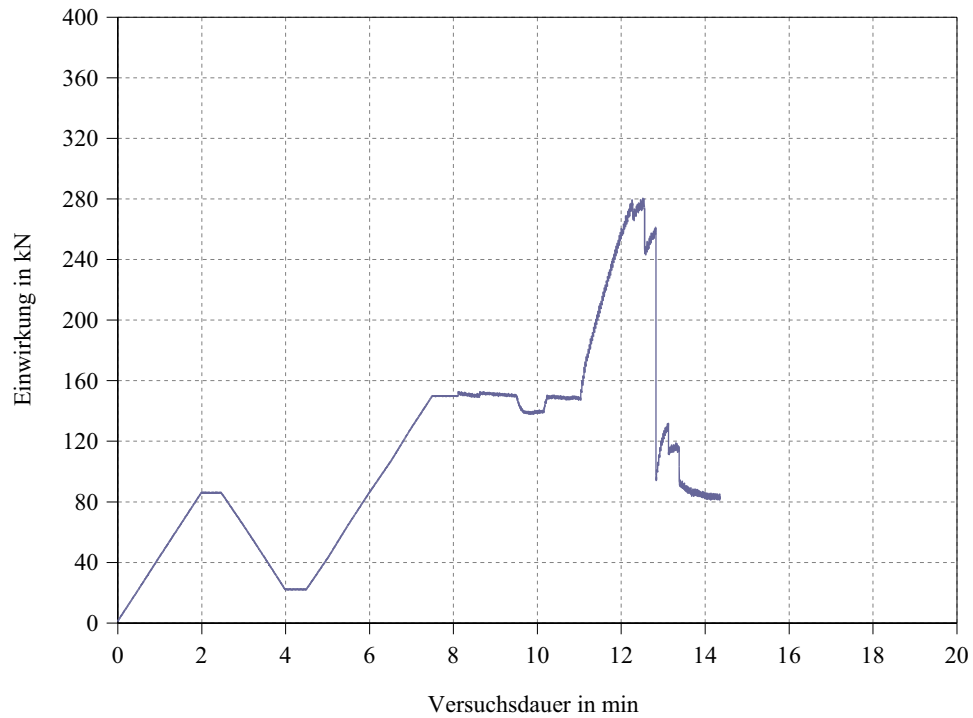
Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 200 mm

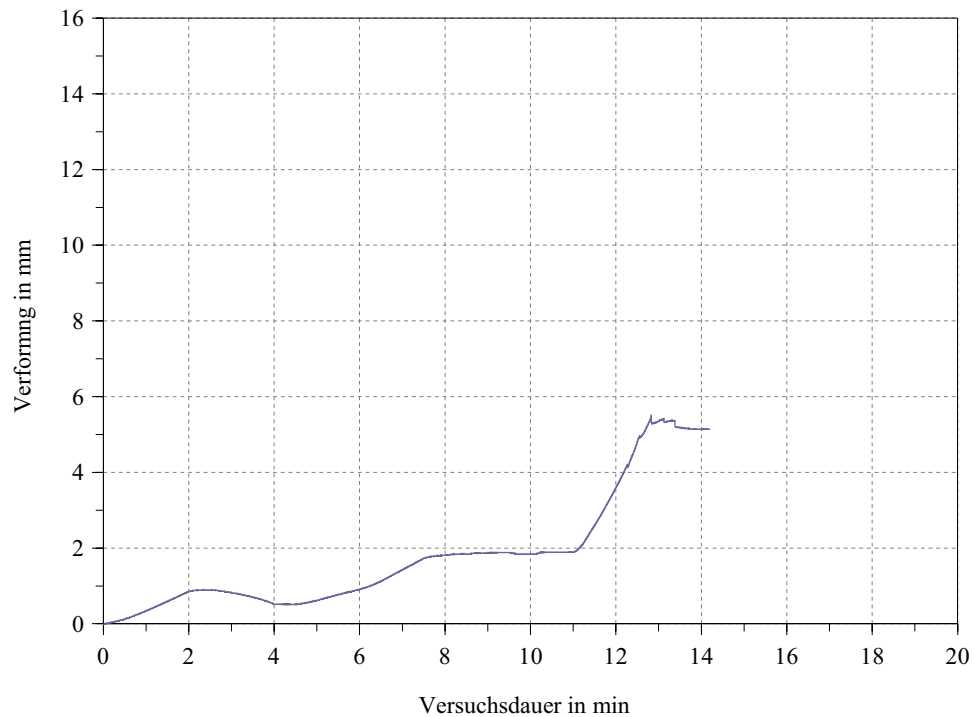
Höchstlast (F_{max}): 280,4 kN

Stabdübelanzahl: 16 Stk

Belastungsrampe bis zum Erreichen der maximalen Tragfähigkeit F_{max}



Verformung der Verbindung während des Kaltversuches



Probekörper Typ III

Versuchsdatum: 13.11.2003

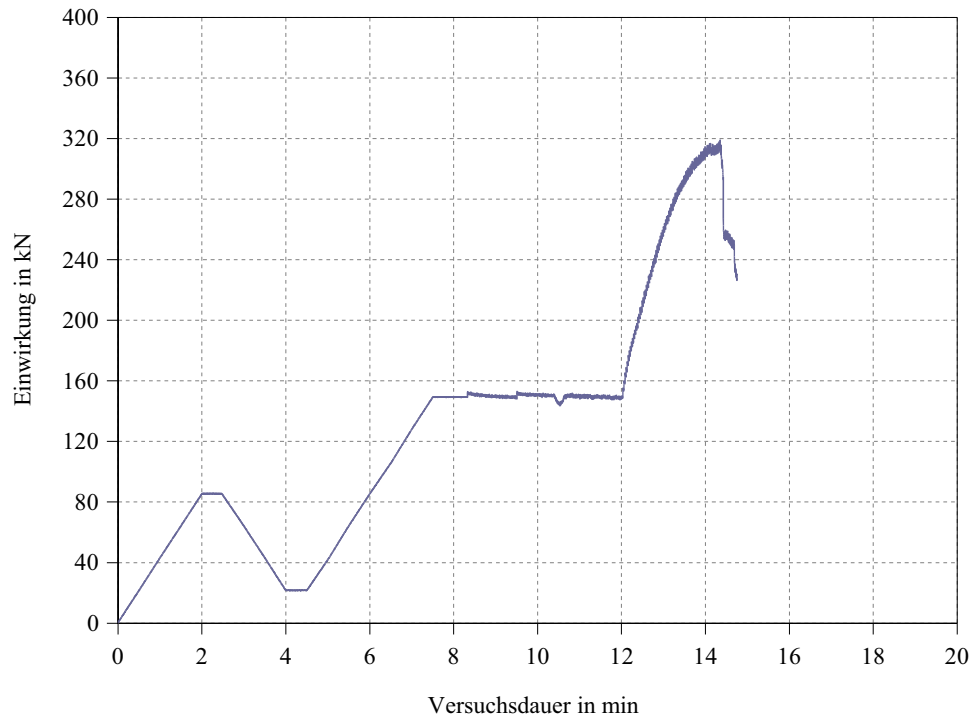
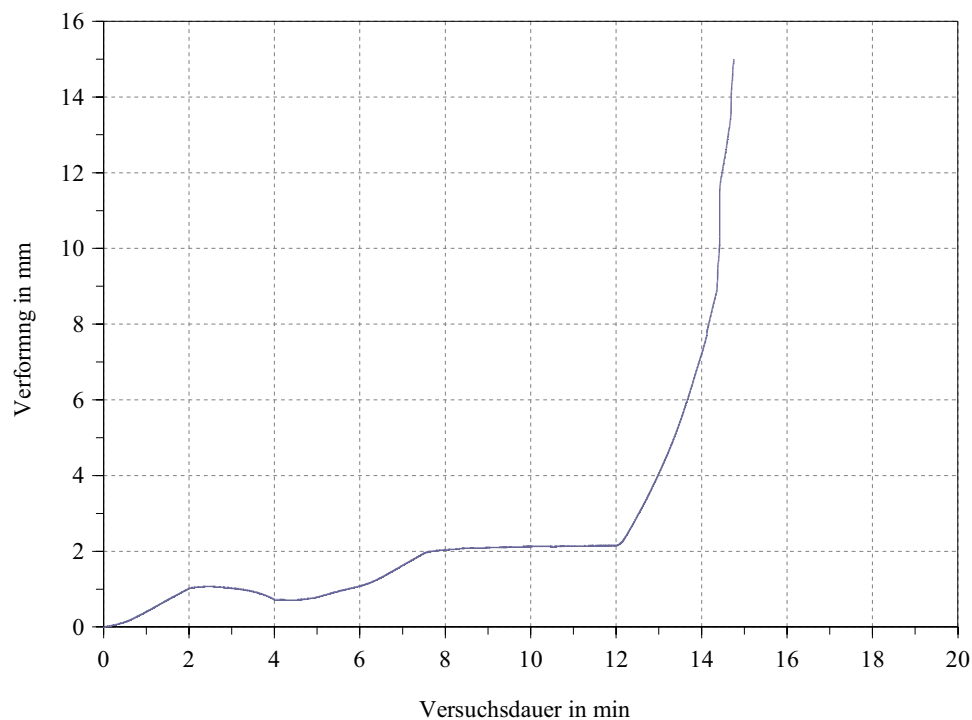
Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 280 mm

Höchstlast (F_{\max}): 319,0 kN

Stabdübelanzahl: 16 Stk

Belastungsrampe bis zum Erreichen der maximalen Tragfähigkeit F_{\max} **Verformung der Verbindung während des Kaltversuches**

Probekörper Typ III Dummy

Versuchsdatum: 10.11.2003

Prüfung: Belastungsverfahren

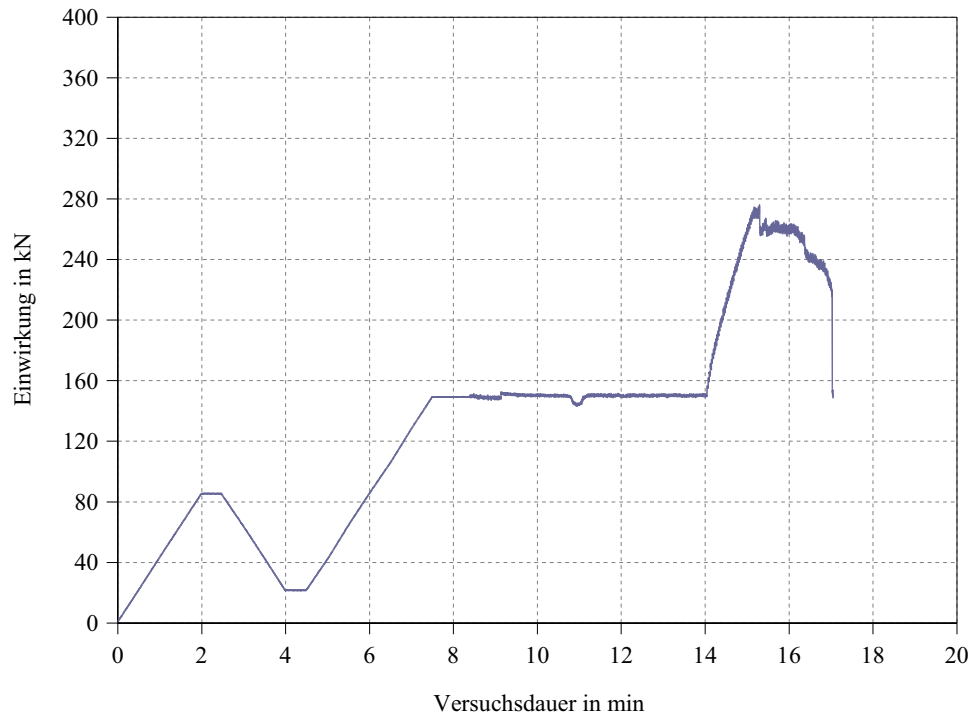
Höchstlast (F_{max}): 276,1 kN

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

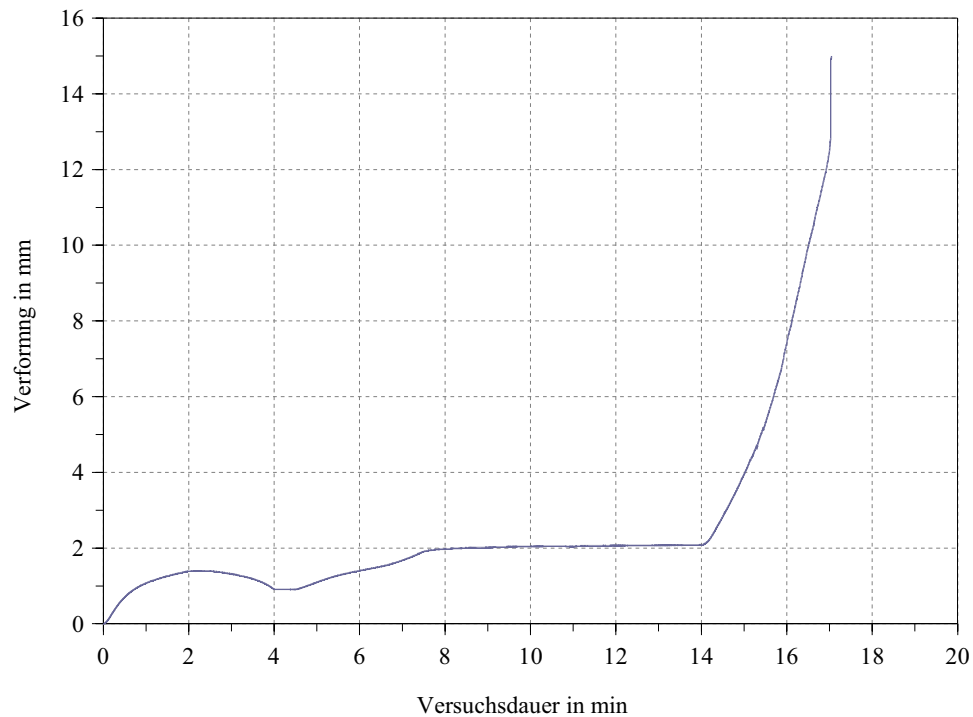
Stabdübellänge: 280 mm

Stabdübelanzahl: 16 Stk

Belastungsrampe bis zum Erreichen der maximalen Tragfähigkeit F_{max}



Verformung der Verbindung während des Kaltversuches



Probekörper Typ IV

Versuchsdatum: 13.11.2003

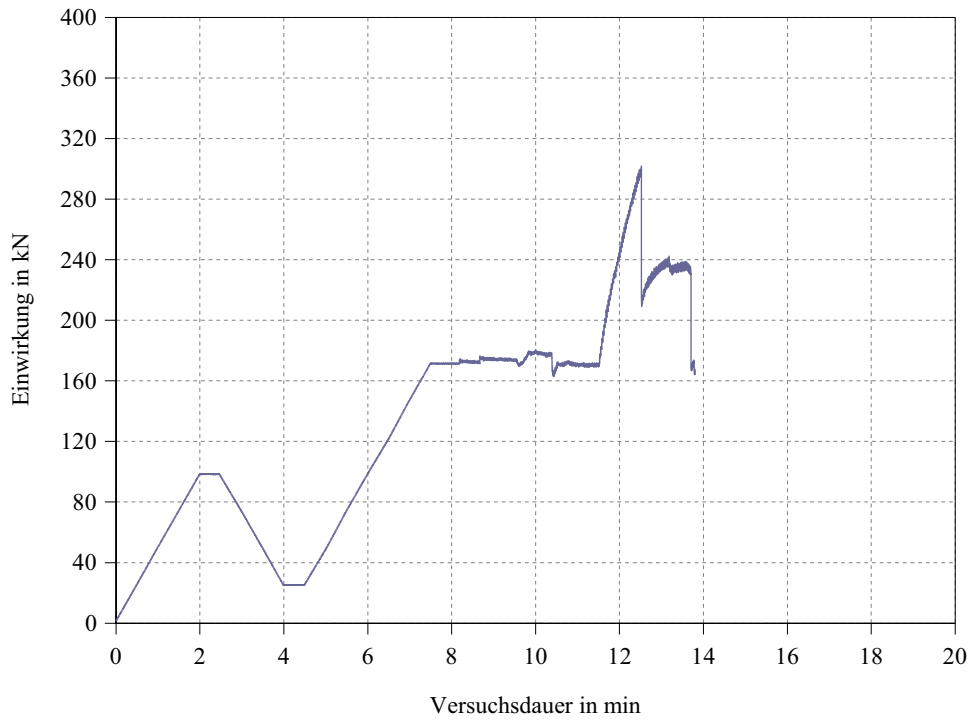
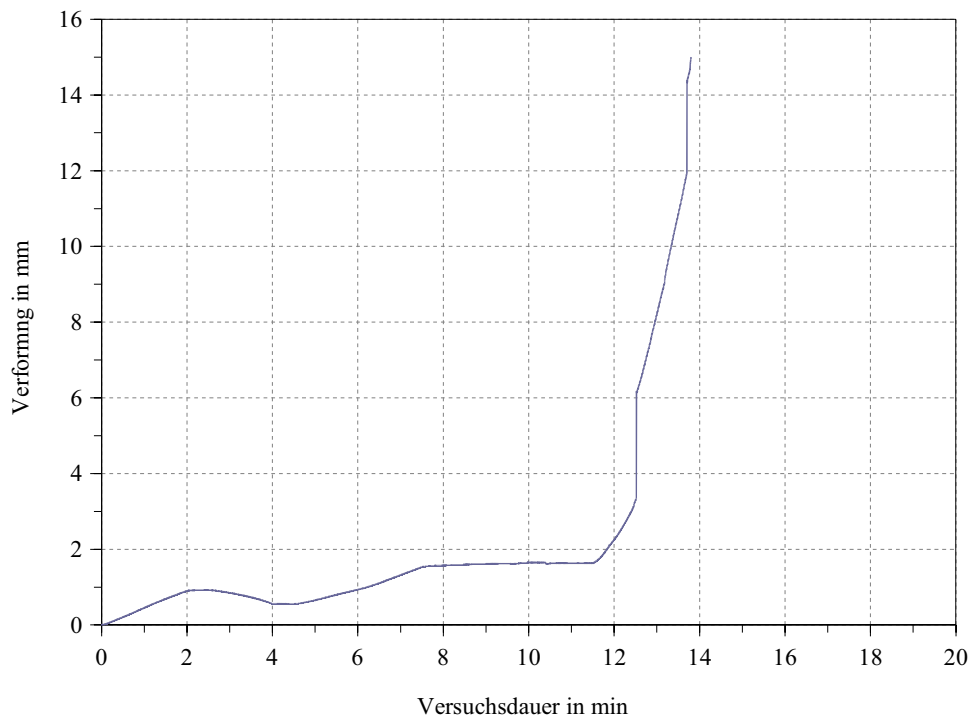
Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 400 mm

Höchstlast (F_{\max}): 301,7 kN

Stabdübelanzahl: 8 Stk

Belastungsrampe bis zum Erreichen der maximalen Tragfähigkeit F_{\max} **Verformung der Verbindung während des Kaltversuches**

Probekörper Typ V

Versuchsdatum: 19.11.2003

Stabdübeldurchmesser: 20 mm

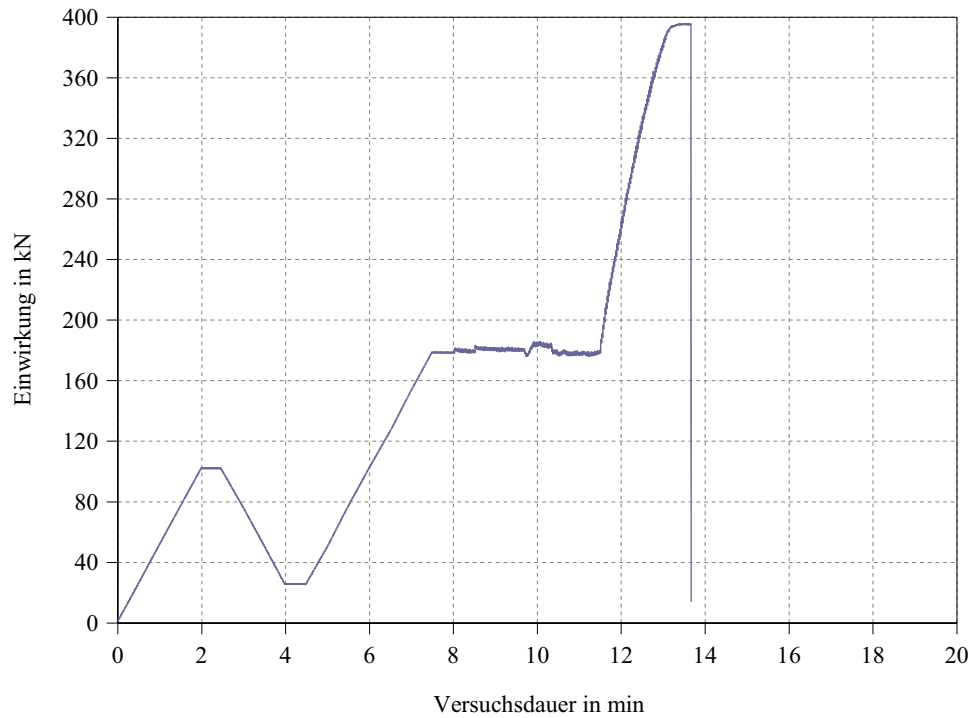
Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 400 mm

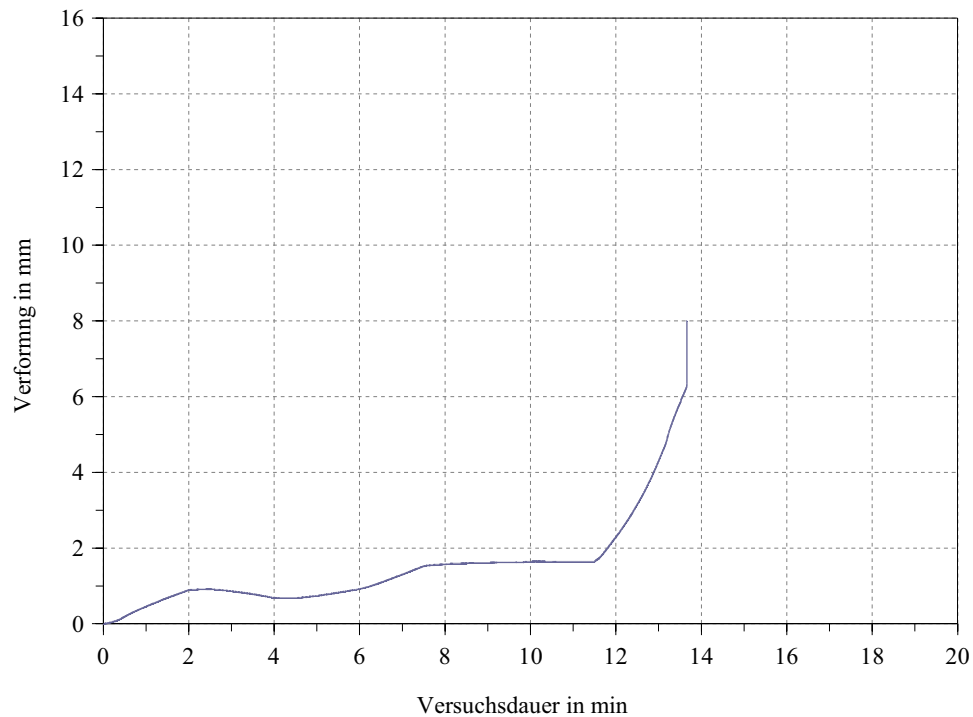
Höchstlast (F_{max}): 395,6 kN

Stabdübelanzahl: 8 Stk

Belastungsrampe bis zum Erreichen der maximalen Tragfähigkeit F_{max}



Verformung der Verbindung während des Kaltversuches



Probekörper Typ VI

Versuchsdatum: 20.11.2003

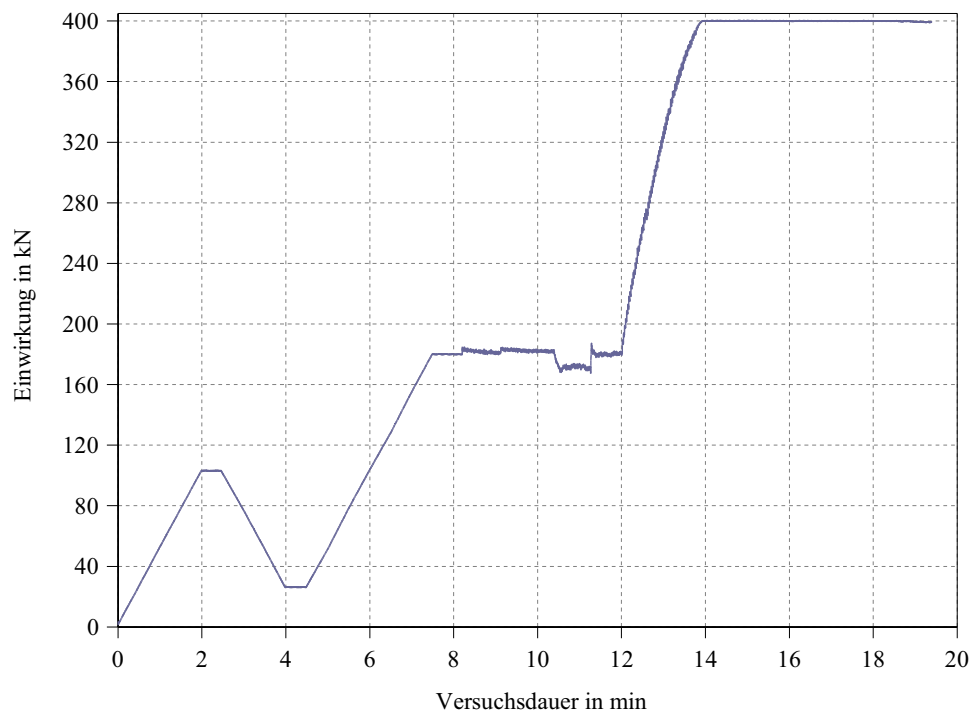
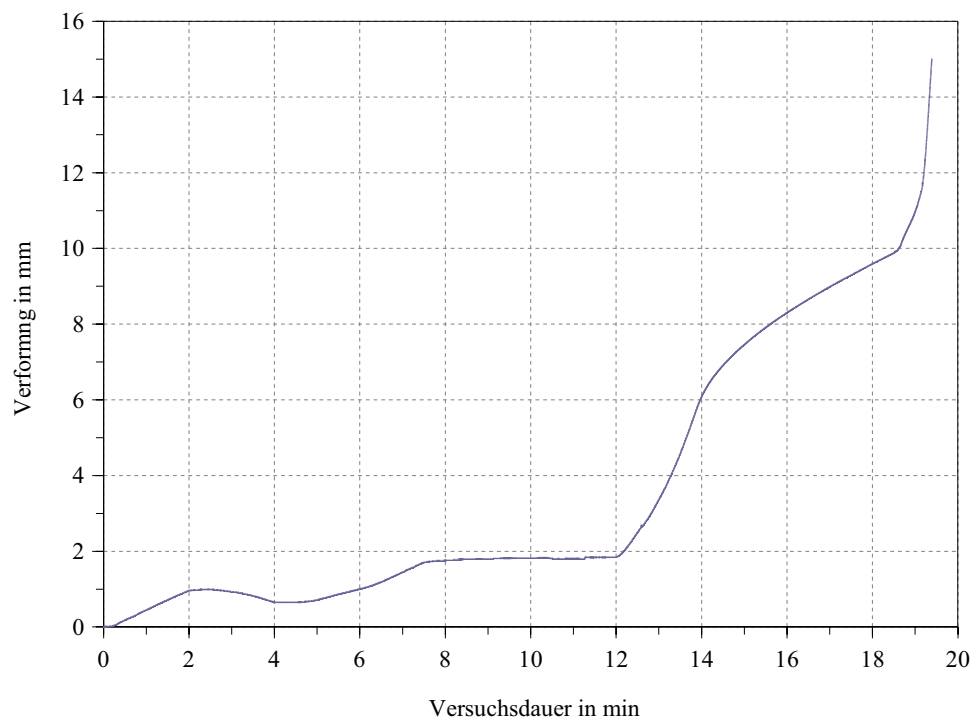
Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 400 mm

Höchstlast (F_{\max}): 400,3 kN

Stabdübelanzahl: 8 Stk

Belastungsrampe bis zum Erreichen der maximalen Tragfähigkeit F_{\max} **Verformung der Verbindung während des Kaltversuches**

Anhang F

Temperaturverläufe in der Brandkammer

Inhalt des Anhanges F ist die grafische Auswertung der Temperaturen im Brandraum während der Versuchsdurchführung. Die Aufzeichnungen erfolgten mit sechs Plate- sowie mit sechs herkömmlichen Mantelthermoelementen. Gesteuert wurde die Brandraumtemperatur über die Plate-Elemente.

Für jeden Probekörper sind zwei Diagramme angefertigt worden. Das erste Diagramm umfasst die Maximal- und Minimalwerte des Brandraumes als auch die mittlere Brandraumtemperatur. Im nachfolgenden Diagramm sind die Mittelwerte der Aufzeichnungen mit Plate- und Mantelthermoelementen gegenüber gestellt worden.

Probekörper Typ Ia

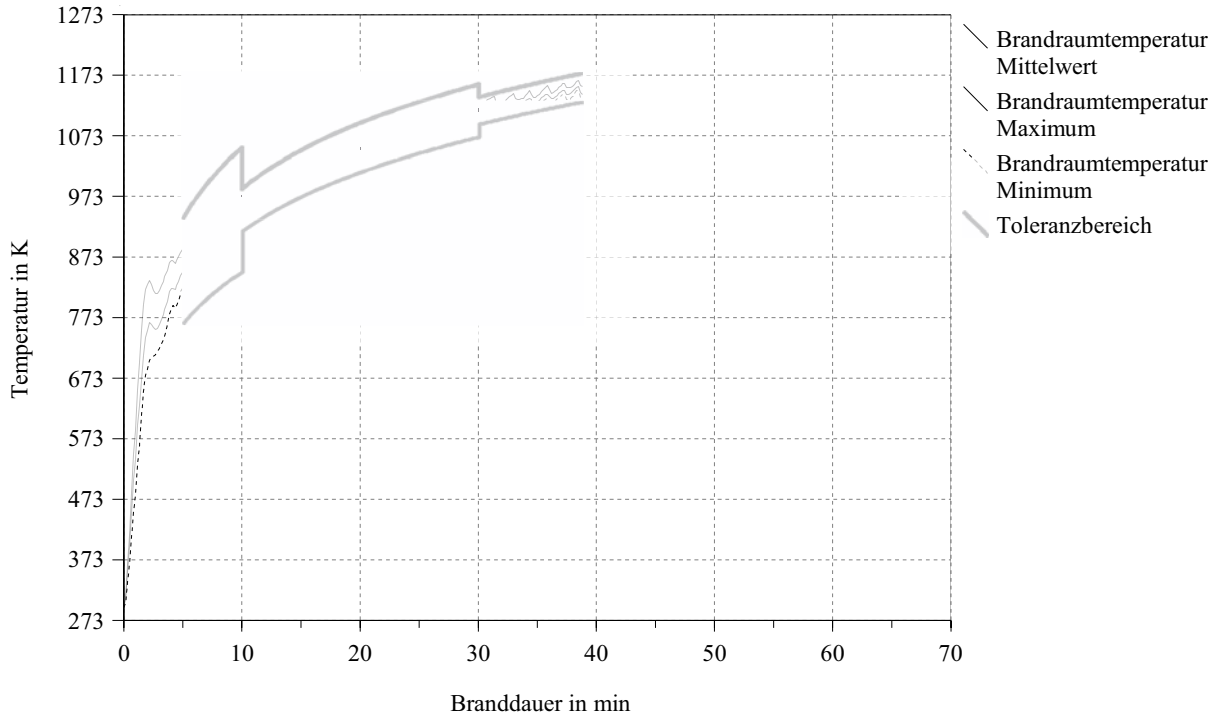
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Plate-Elemente: 6 Stk

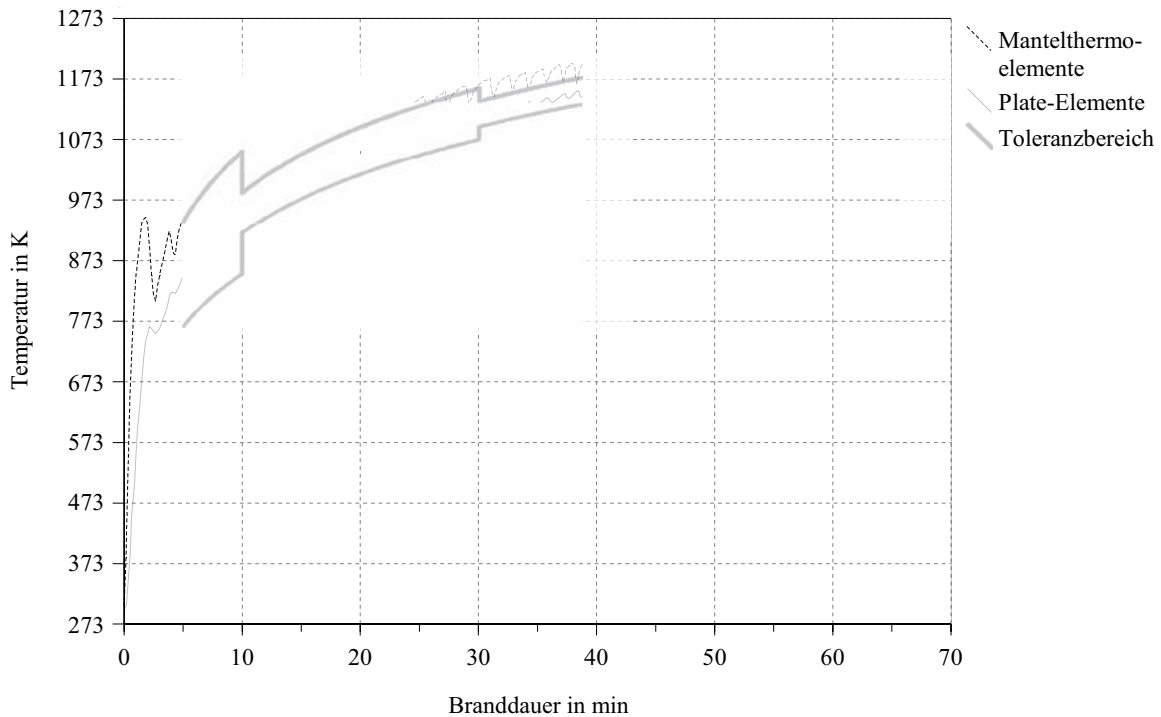
Brandraumdruck: 2 Pa

Mantelthermoelemente: 6 Stk

Temperaturverlauf in der Brandkammer aufgezeichnet mit Plate-Elementen



Vergleich der Mittelwerte der Brandraumtemperaturen



Probekörper Typ Ib

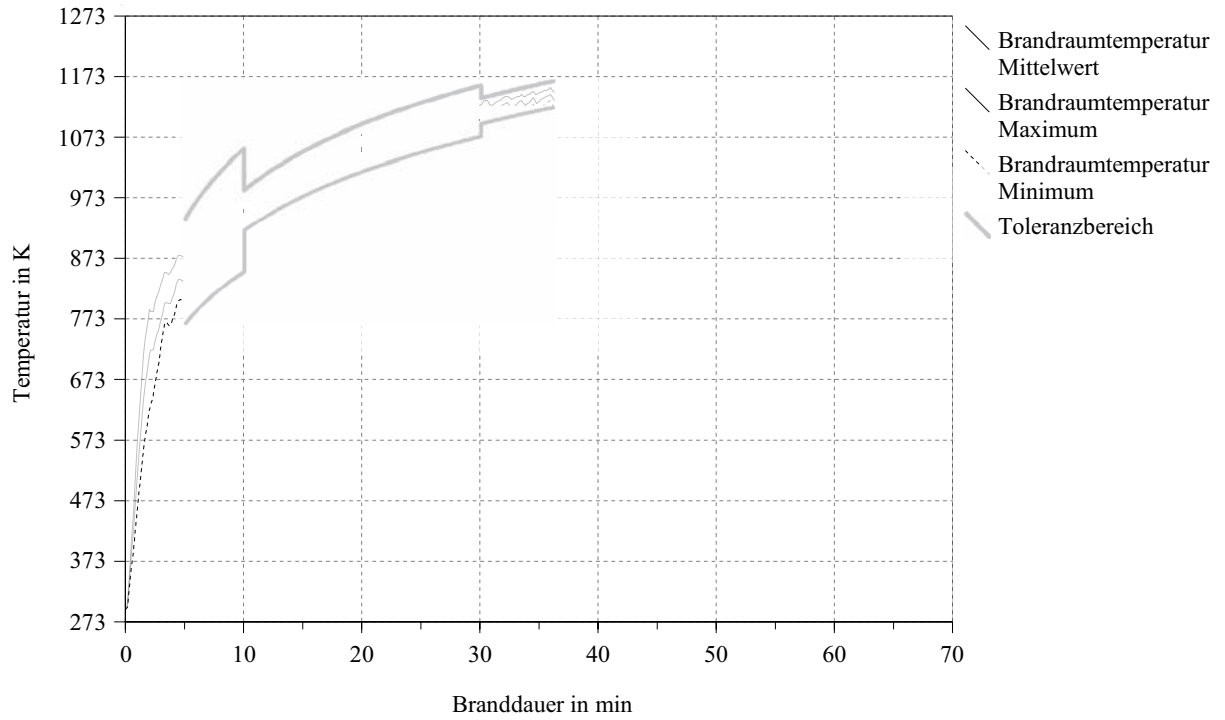
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Plate-Elemente: 6 Stk

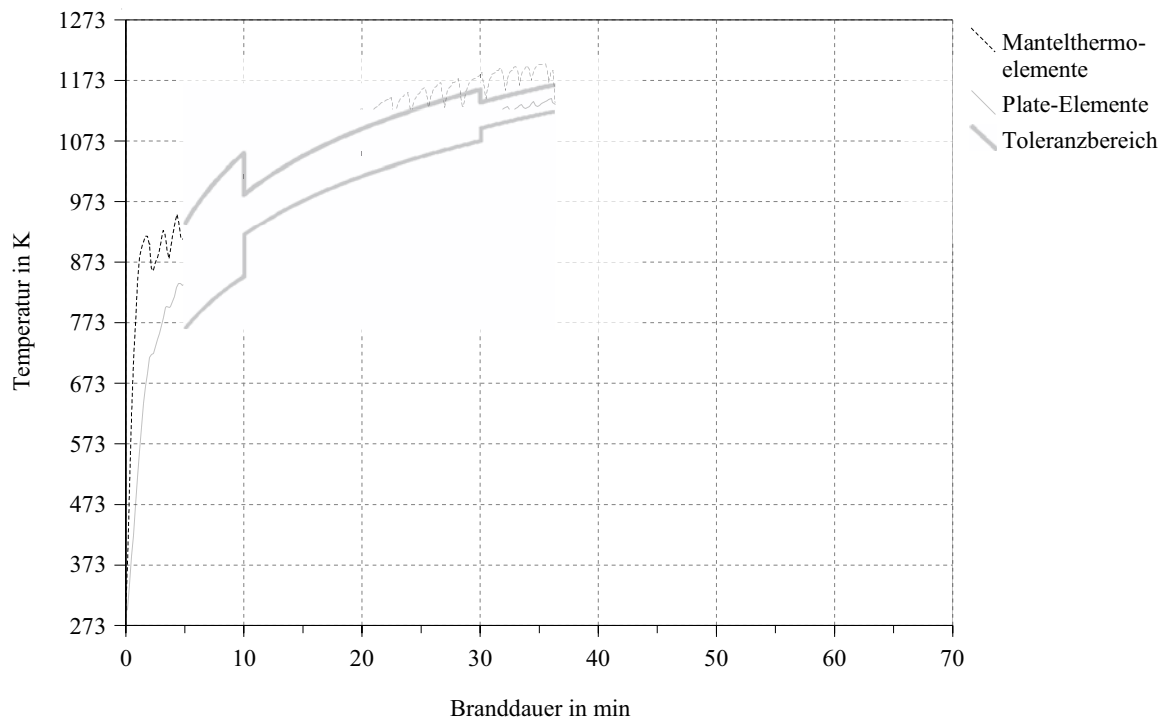
Brandraumdruck: 2 Pa

Mantelthermoelemente: 6 Stk

Temperaturverlauf in der Brandkammer aufgezeichnet mit Plate-Elementen



Vergleich der Mittelwerte der Brandraumtemperaturen



Probekörper Typ IIa

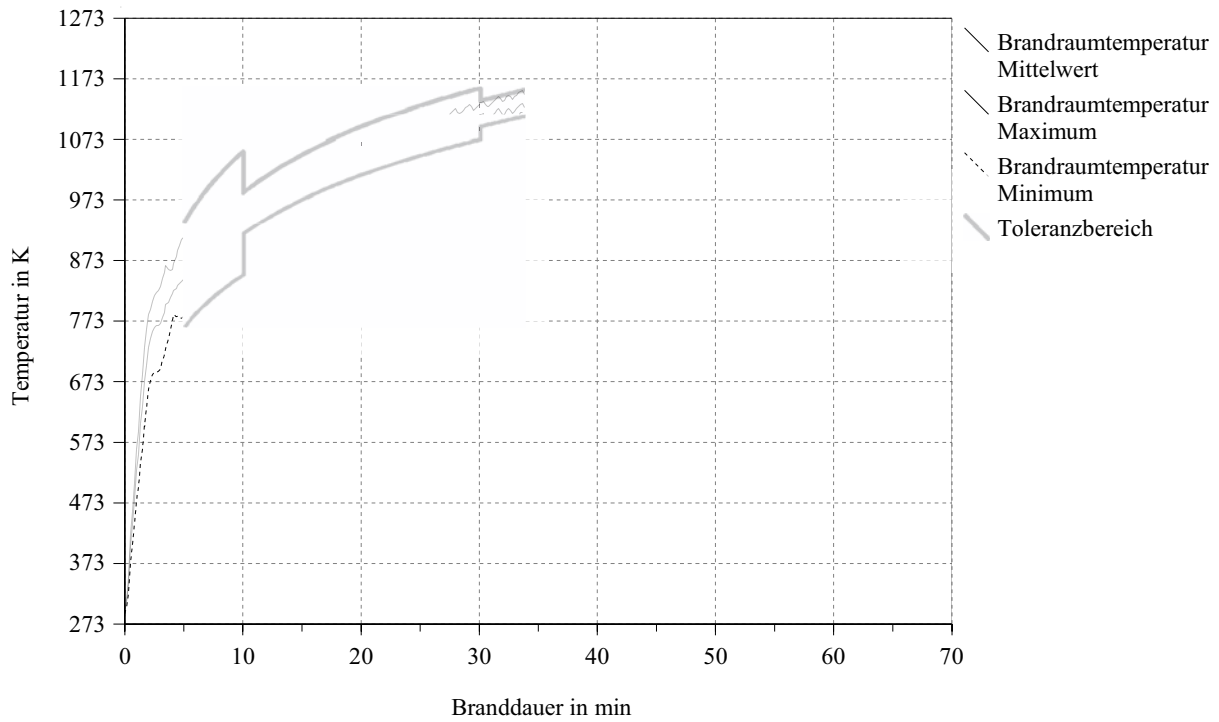
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Brandraumdruck: 2 Pa

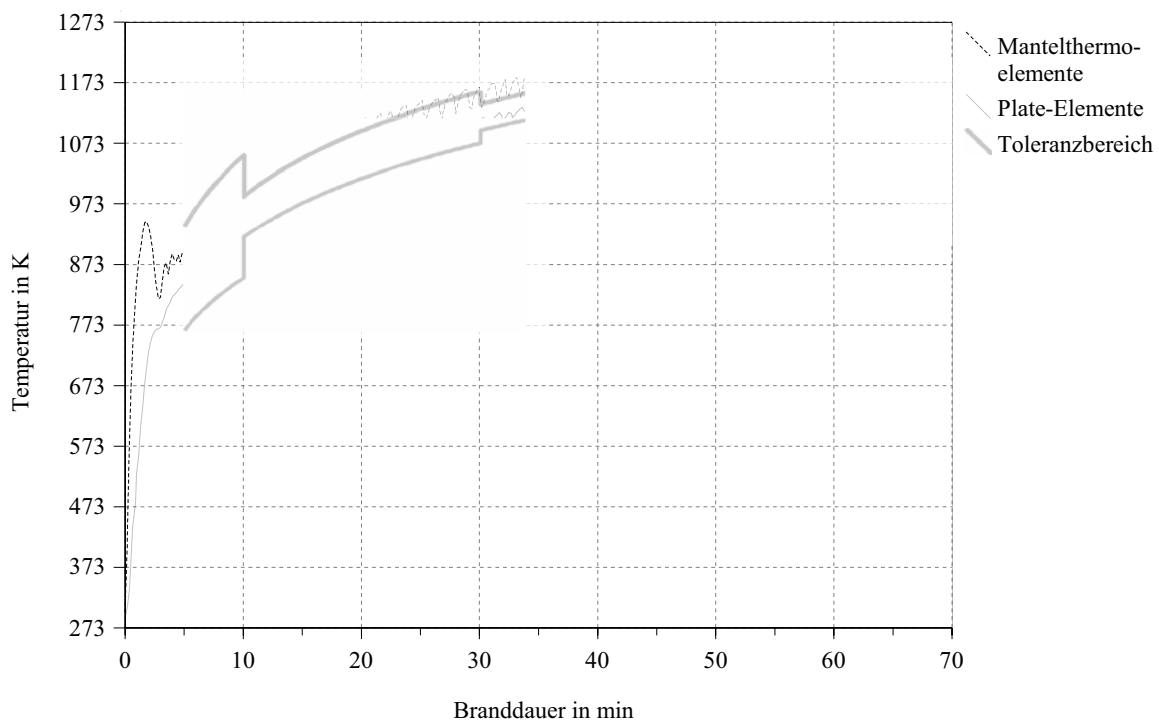
Plate-Elemente: 6 Stk

Mantelthermoelemente: 6 Stk

Temperaturverlauf in der Brandkammer aufgezeichnet mit Plate-Elementen



Vergleich der Mittelwerte der Brandraumtemperaturen



Probekörper Typ IIb

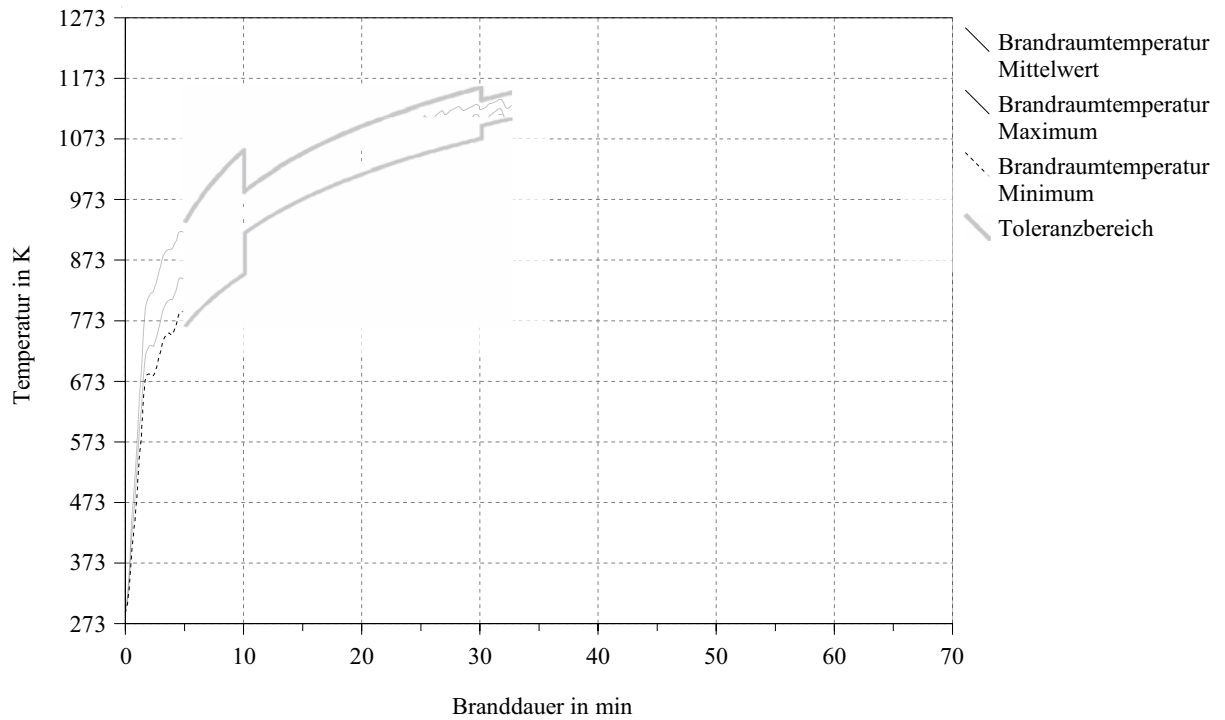
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Plate-Elemente: 6 Stk

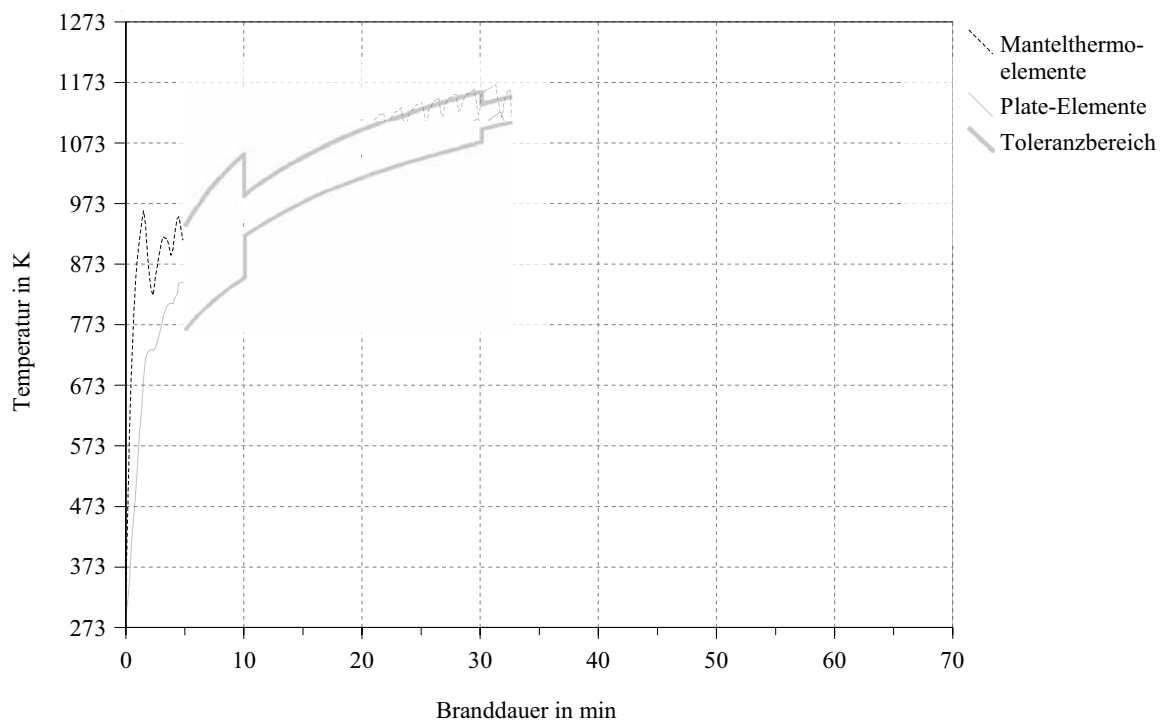
Brandraumdruck: 2 Pa

Mantelthermoelemente: 6 Stk

Temperaturverlauf in der Brandkammer aufgezeichnet mit Plate-Elementen



Vergleich der Mittelwerte der Brandraumtemperaturen



Probekörper Typ IIIa

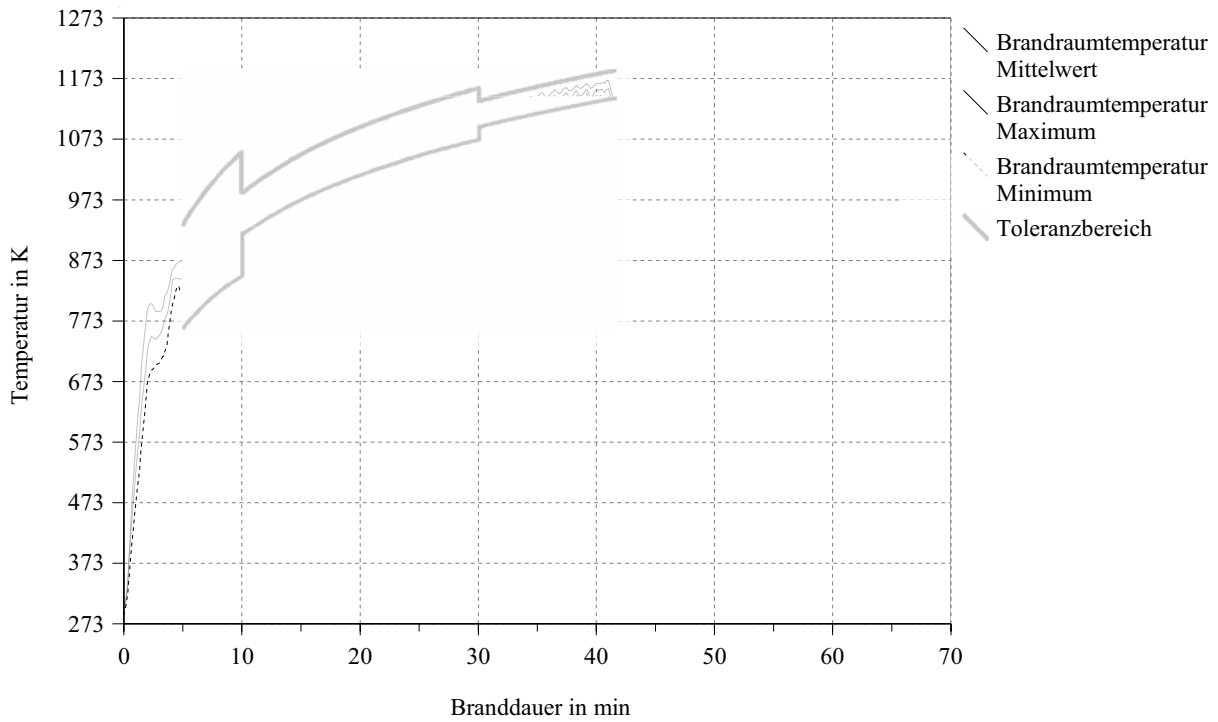
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Brandraumdruck: 2 Pa

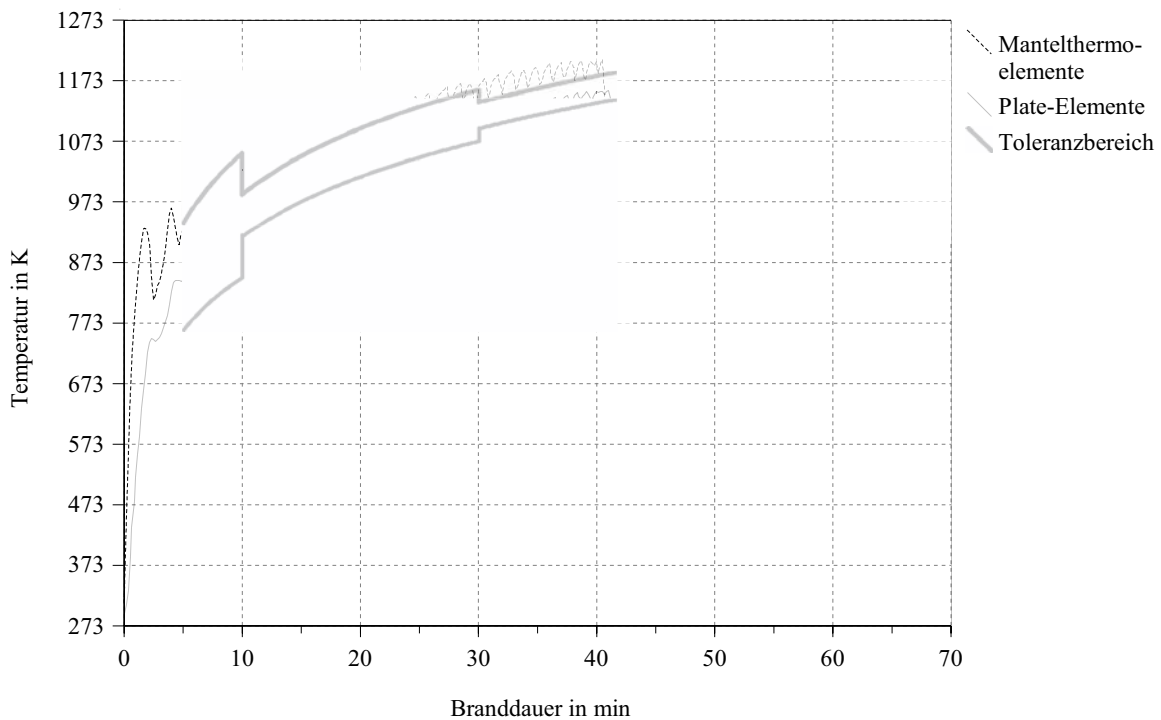
Plate-Elemente: 6 Stk

Mantelthermoelemente: 6 Stk

Temperaturverlauf in der Brandkammer aufgezeichnet mit Plate-Elementen



Vergleich der Mittelwerte der Brandraumtemperaturen



Probekörper Typ IIIb

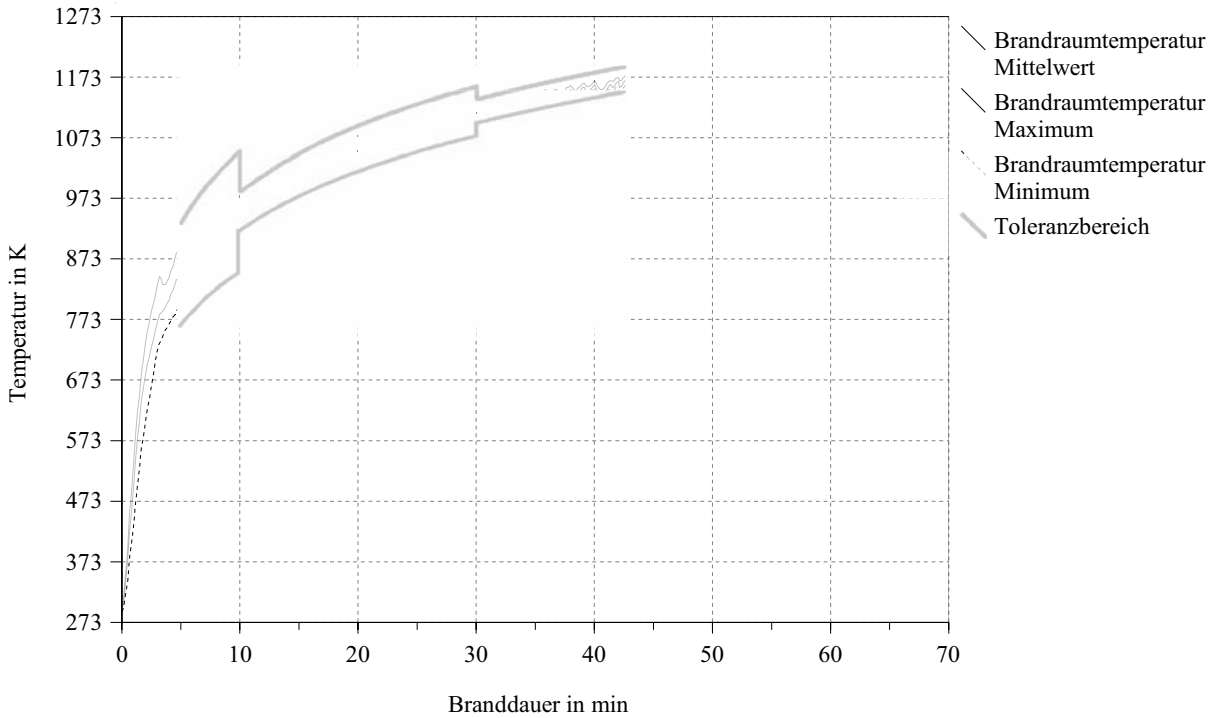
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Plate-Elemente: 6 Stk

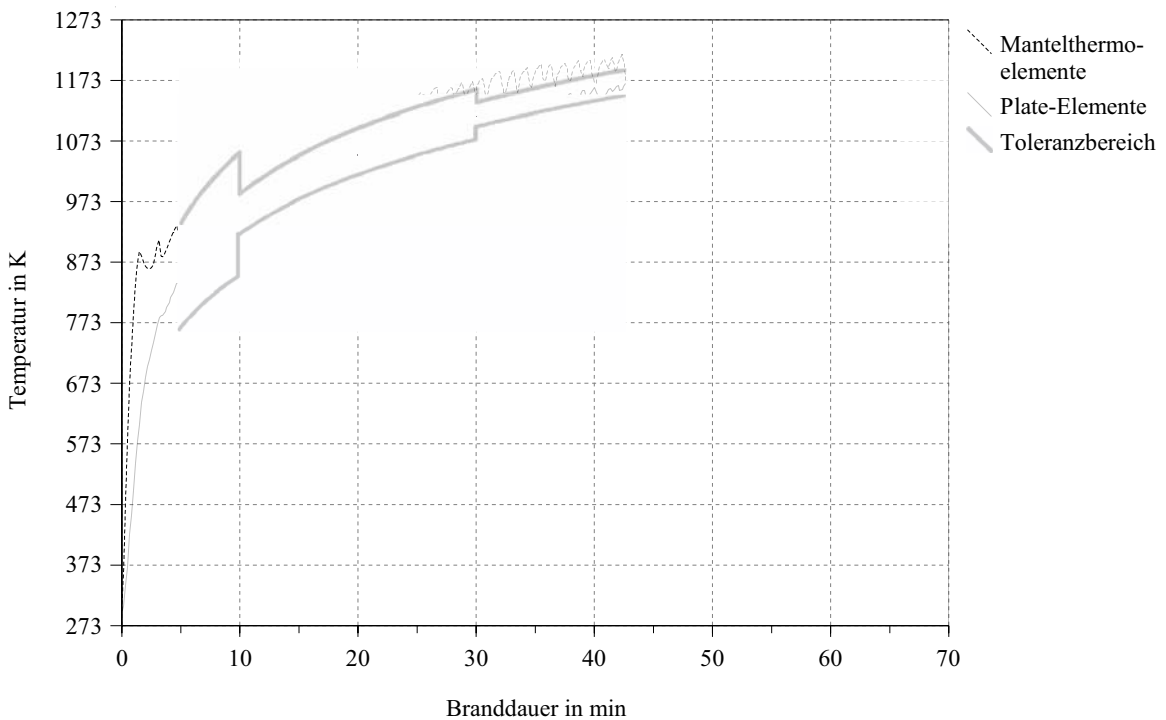
Brandraumdruck: 2 Pa

Mantelthermoelemente: 6 Stk

Temperaturverlauf in der Brandkammer aufgezeichnet mit Plate-Elementen



Vergleich der Mittelwerte der Brandraumtemperaturen



Probekörper Typ III Dummy

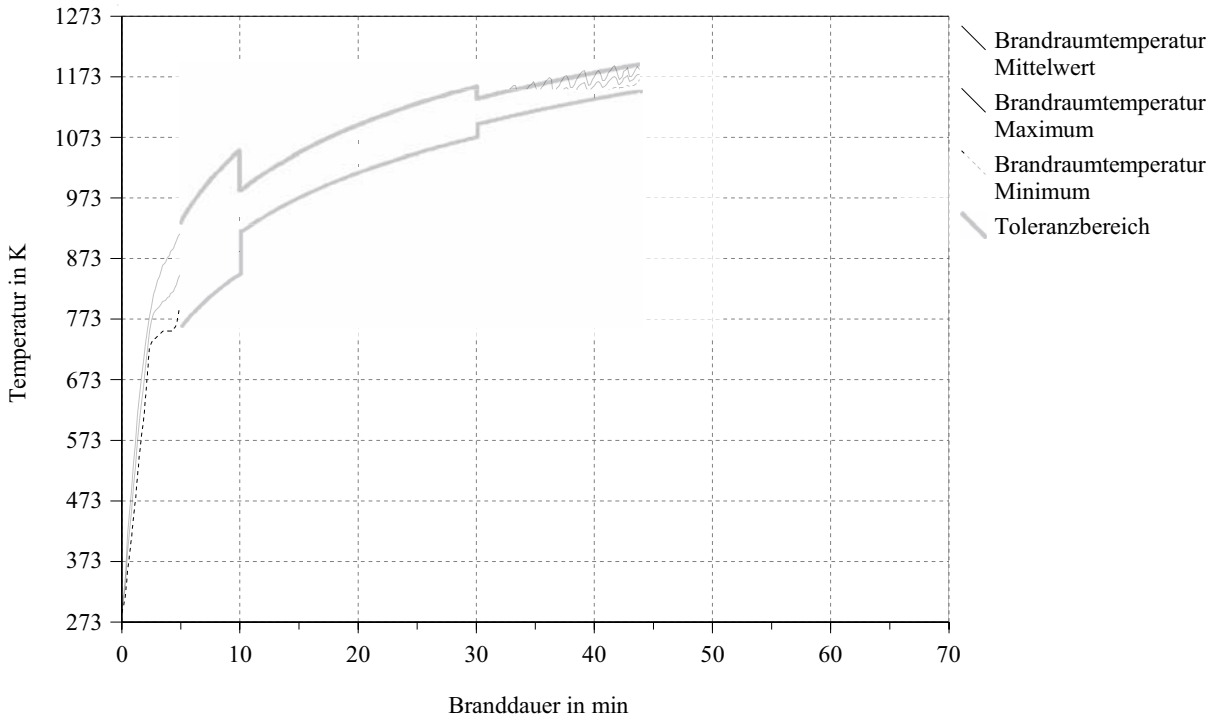
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Brandraumdruck: 2 Pa

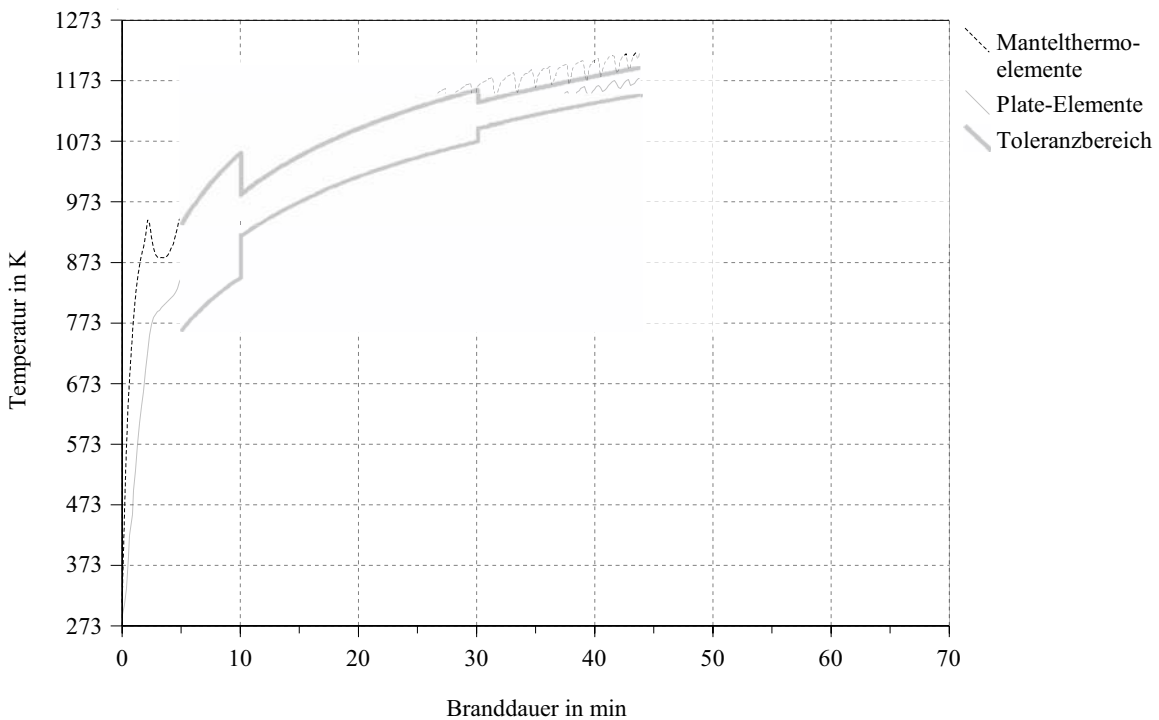
Plate-Elemente: 6 Stk

Mantelthermoelemente: 6 Stk

Temperaturverlauf in der Brandkammer aufgezeichnet mit Plate-Elementen



Vergleich der Mittelwerte der Brandraumtemperaturen



Probekörper Typ IVa

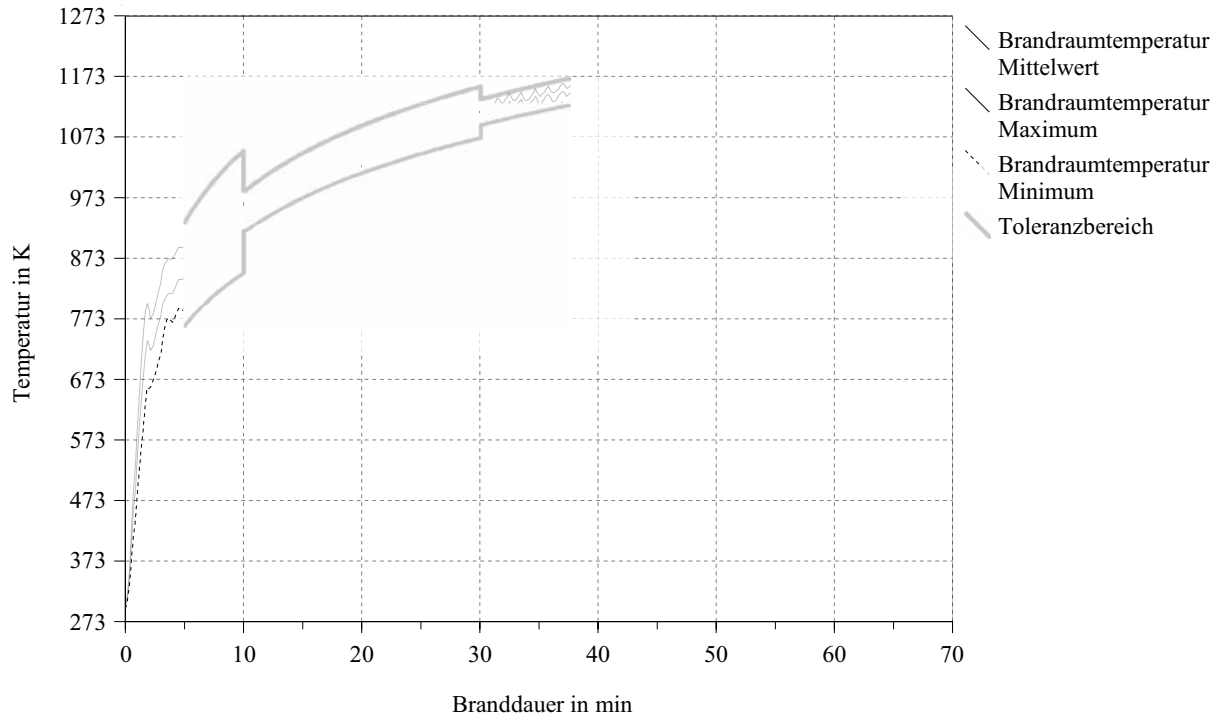
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Plate-Elemente: 6 Stk

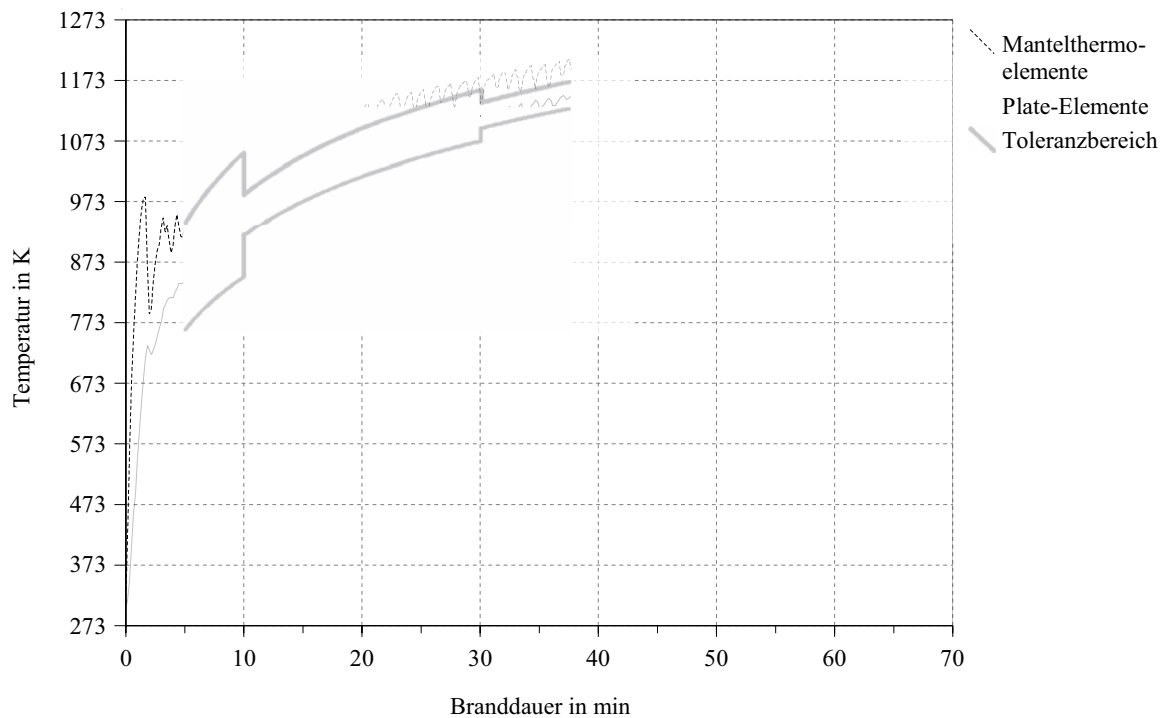
Brandraumdruck: 2 Pa

Mantelthermoelemente: 6 Stk

Temperaturverlauf in der Brandkammer aufgezeichnet mit Plate-Elementen



Vergleich der Mittelwerte der Brandraumtemperaturen



Probekörper Typ IVb

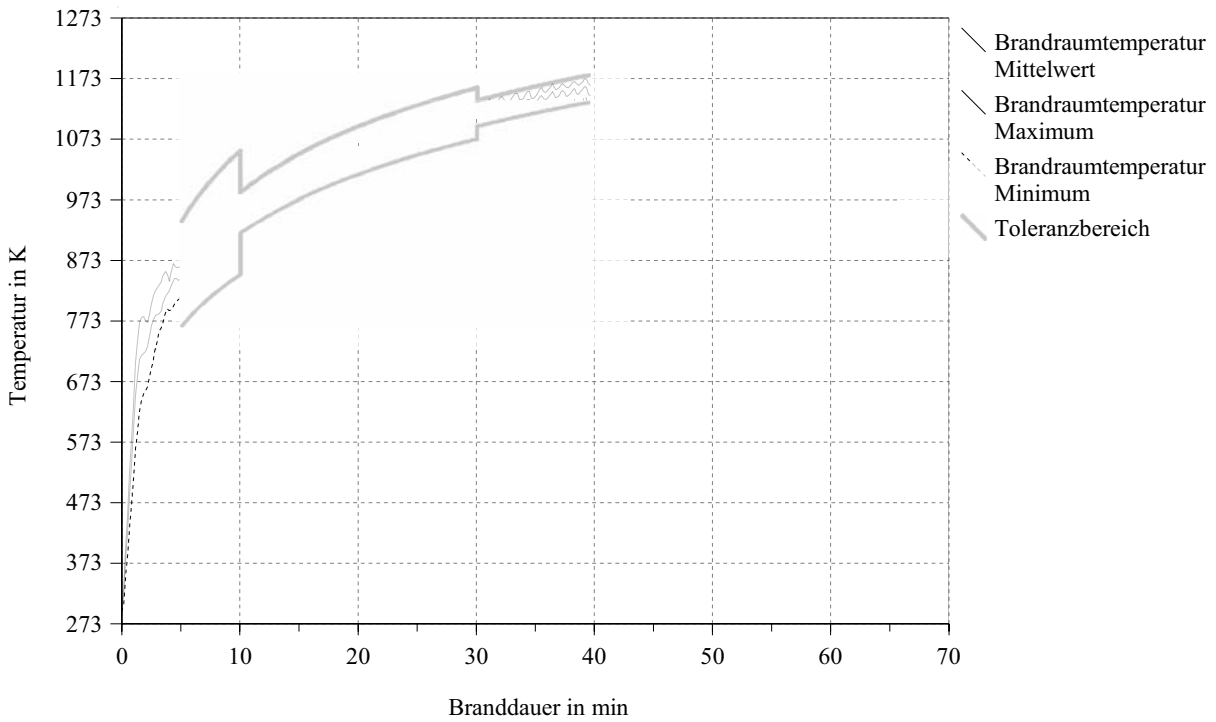
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Brandraumdruck: 2 Pa

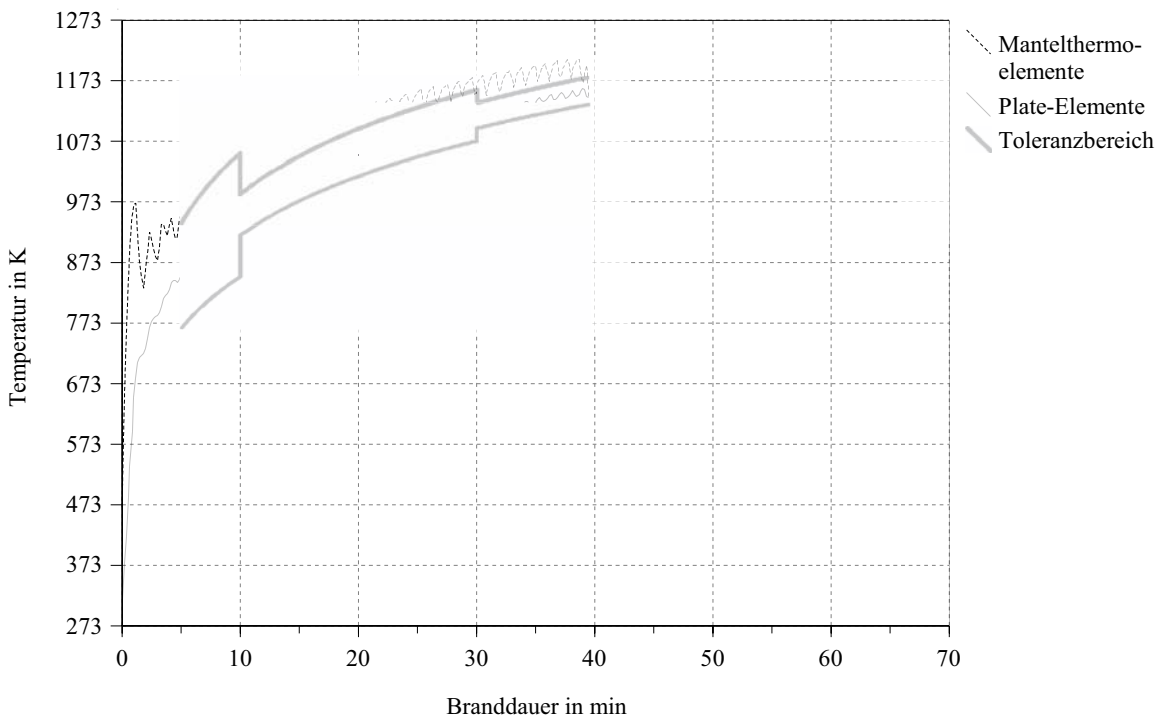
Plate-Elemente: 6 Stk

Mantelthermoelemente: 6 Stk

Temperaturverlauf in der Brandkammer aufgezeichnet mit Plate-Elementen



Vergleich der Mittelwerte der Brandraumtemperaturen



Probekörper Typ Va

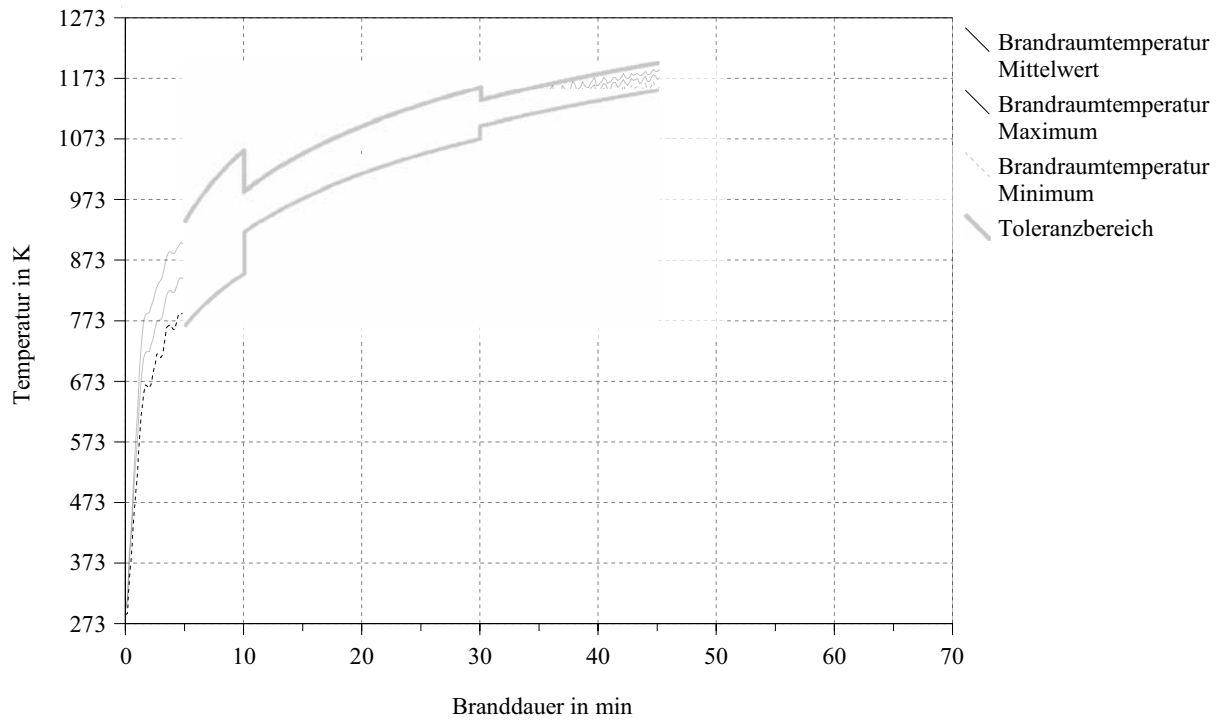
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Plate-Elemente: 6 Stk

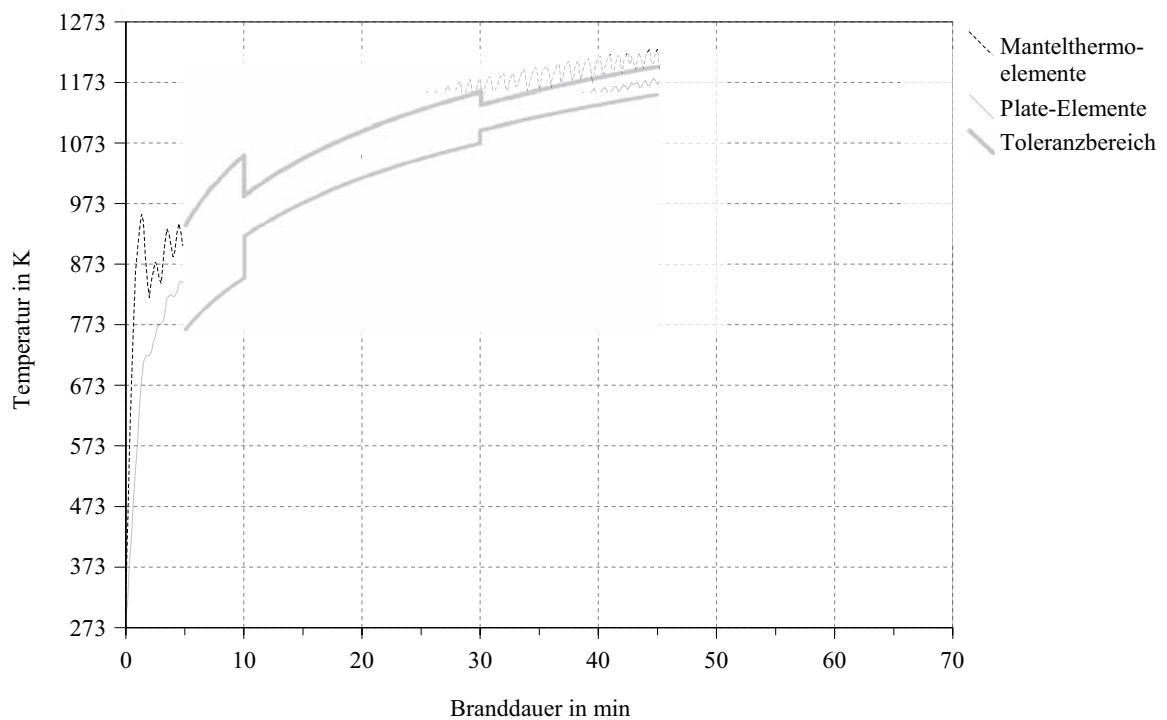
Brandraumdruck: 2 Pa

Mantelthermoelemente: 6 Stk

Temperaturverlauf in der Brandkammer aufgezeichnet mit Plate-Elementen



Vergleich der Mittelwerte der Brandraumtemperaturen



Probekörper Typ Vb

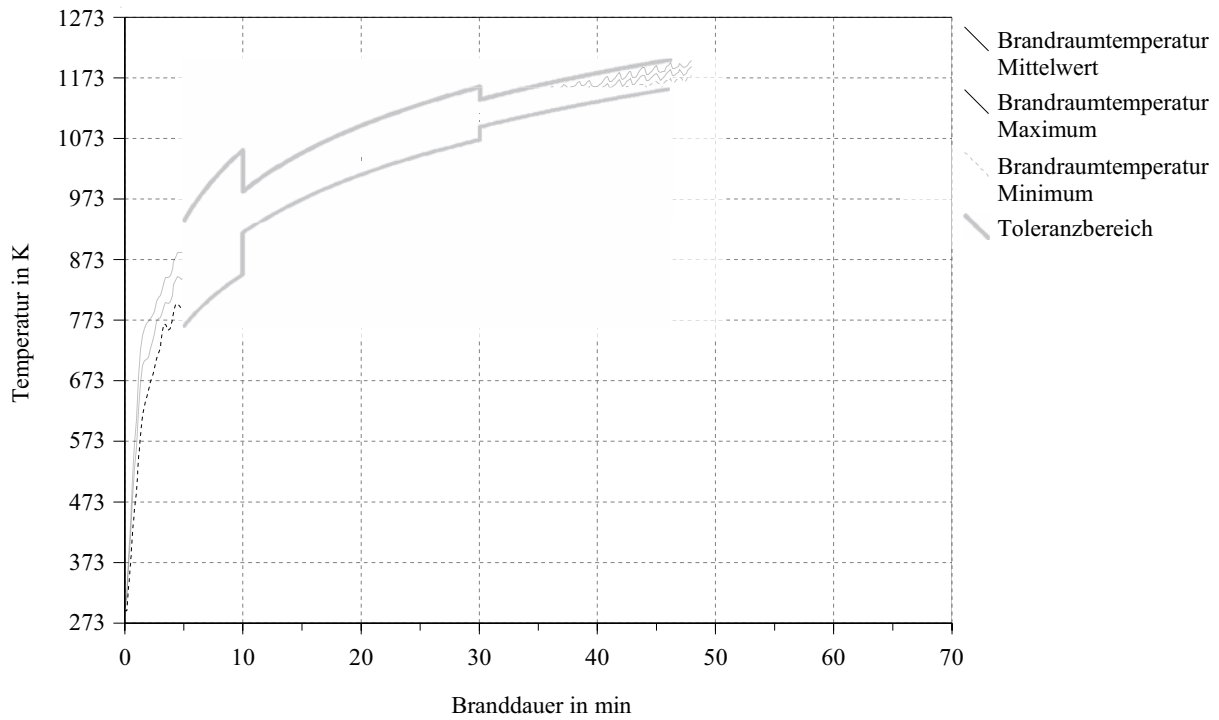
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Brandraumdruck: 2 Pa

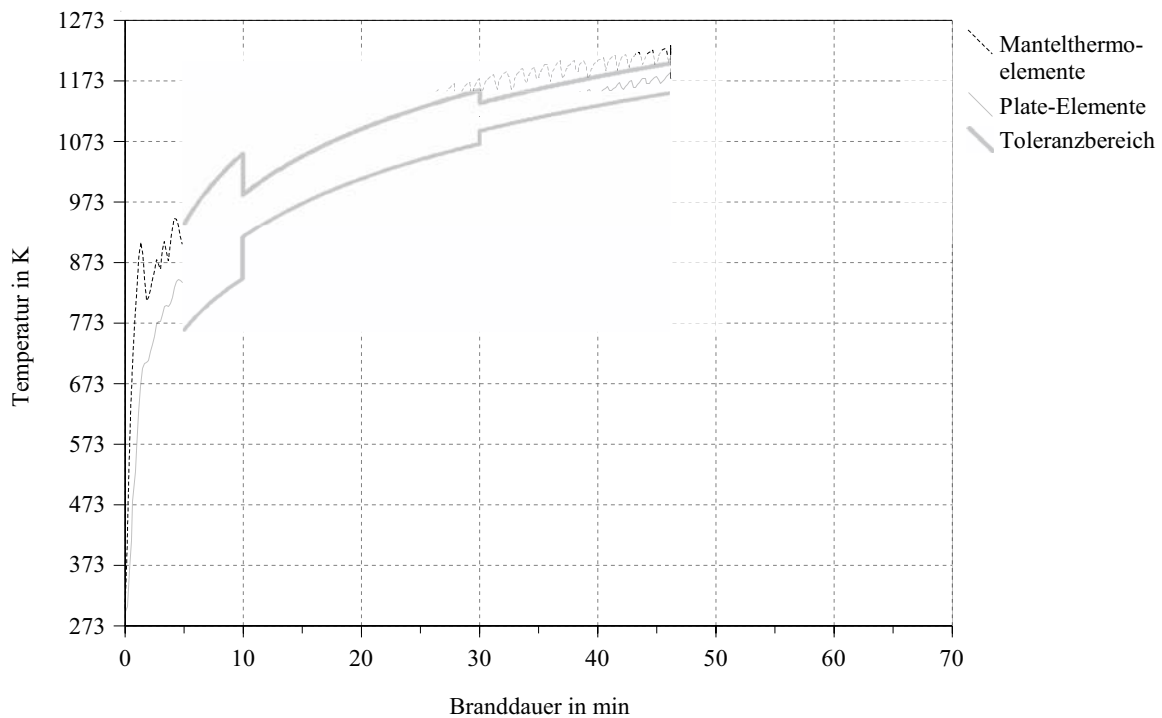
Plate-Elemente: 6 Stk

Mantelthermoelemente: 6 Stk

Temperaturverlauf in der Brandkammer aufgezeichnet mit Plate-Elementen



Vergleich der Mittelwerte der Brandraumtemperaturen



Probekörper Typ VIa

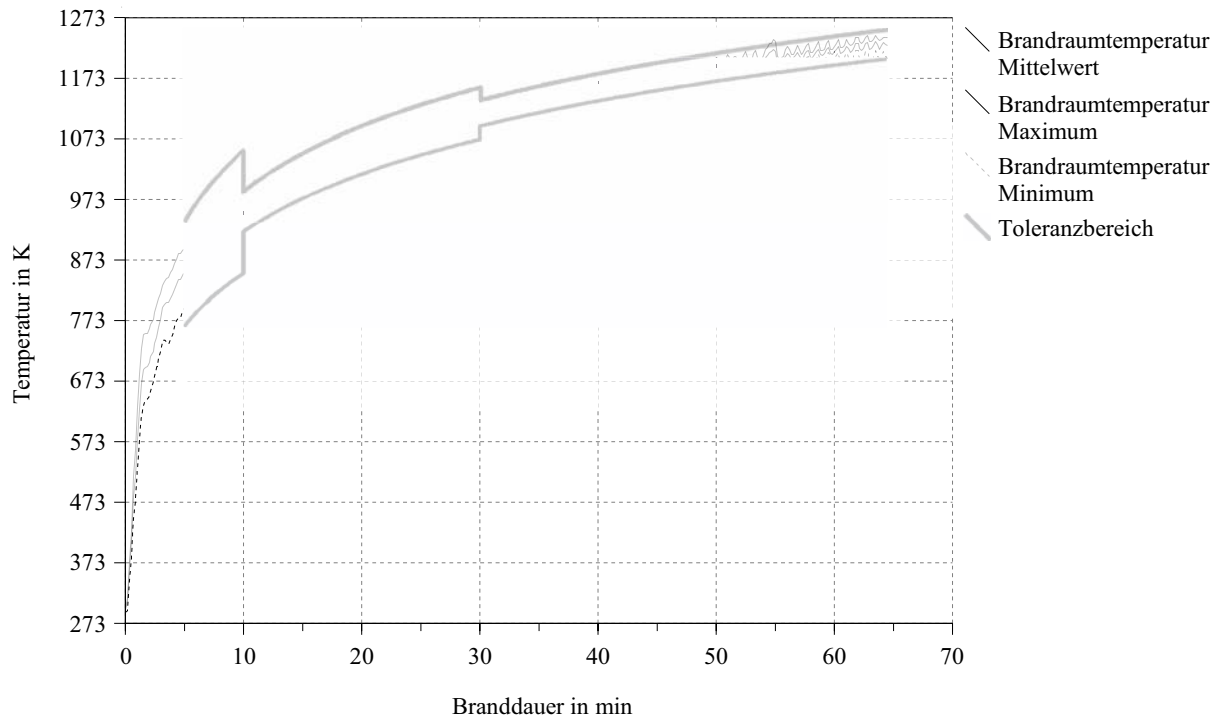
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Plate-Elemente: 6 Stk

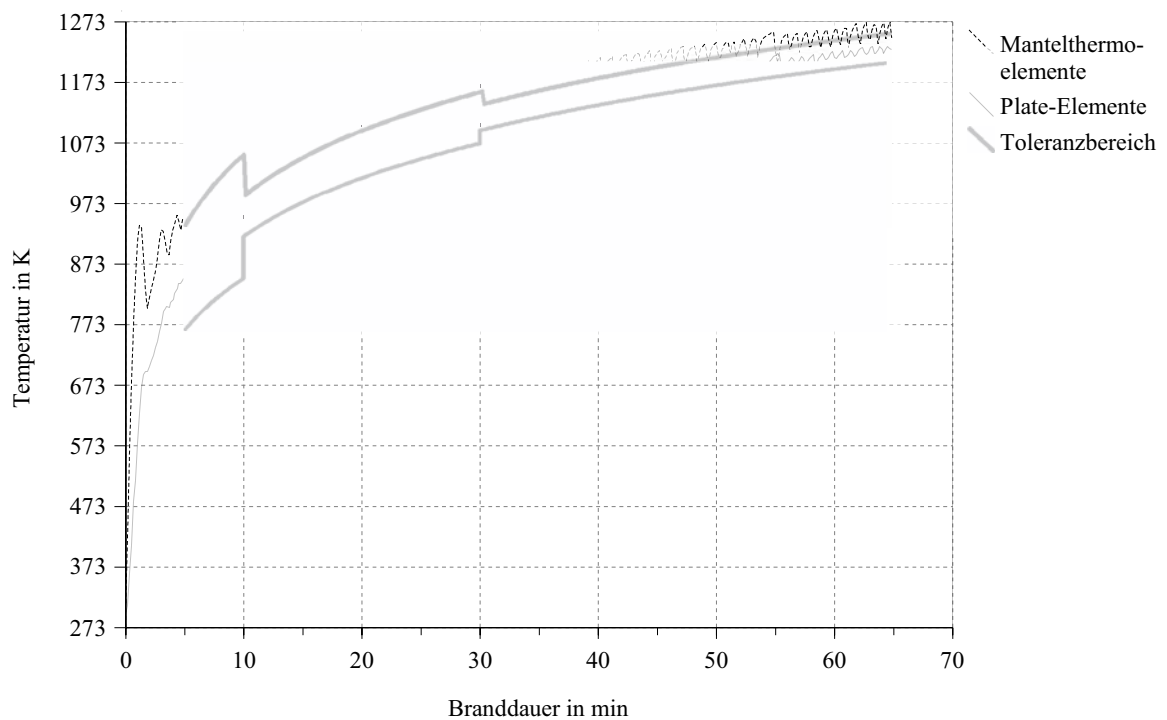
Brandraumdruck: 2 Pa

Mantelthermoelemente: 6 Stk

Temperaturverlauf in der Brandkammer aufgezeichnet mit Plate-Elementen



Vergleich der Mittelwerte der Brandraumtemperaturen



Probekörper Typ VIb

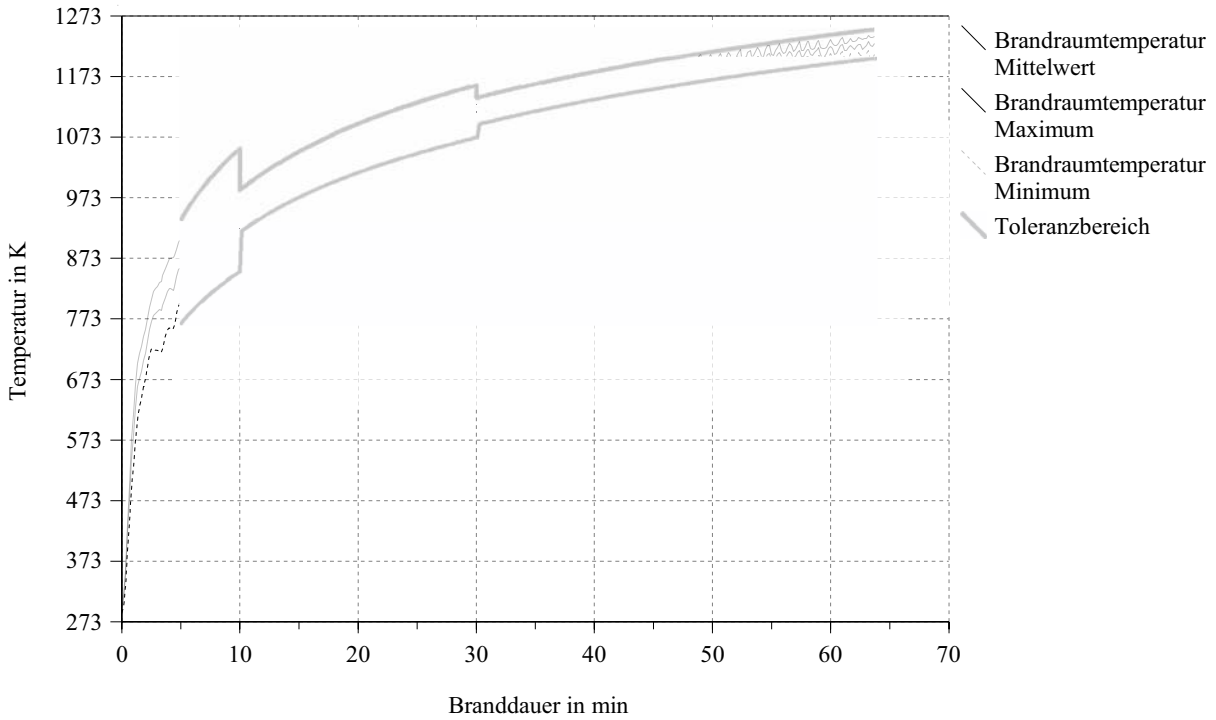
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Brandraumdruck: 2 Pa

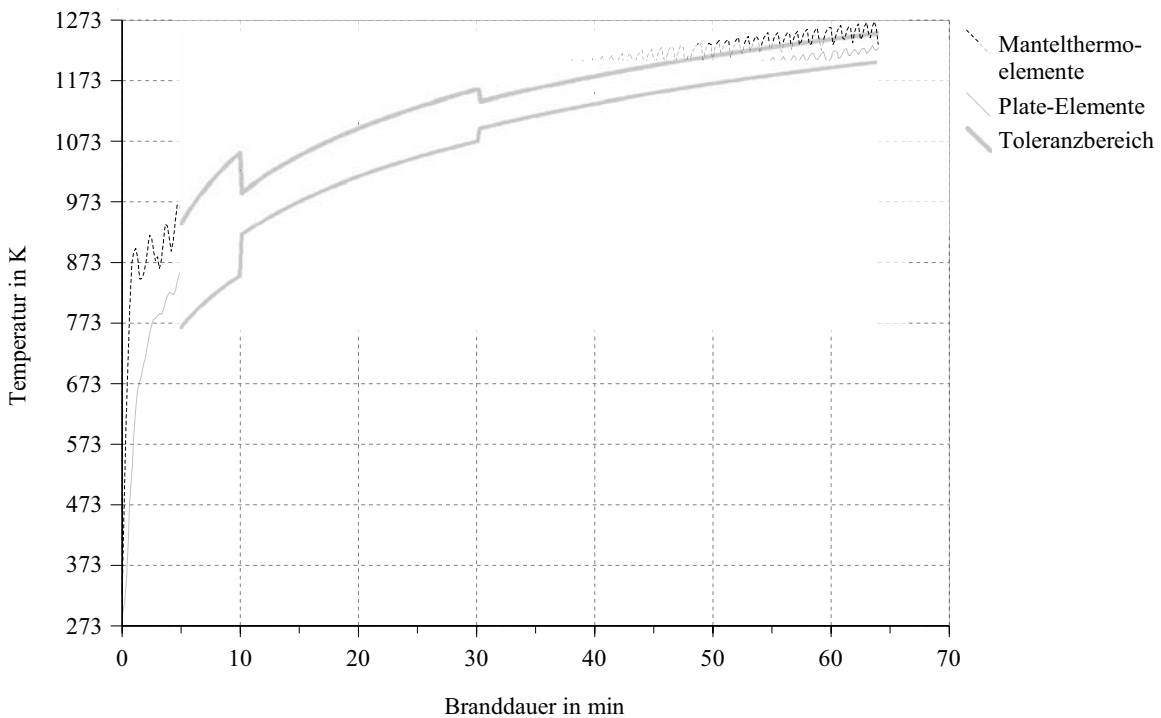
Plate-Elemente: 6 Stk

Mantelthermoelemente: 6 Stk

Temperaturverlauf in der Brandkammer aufgezeichnet mit Plate-Elementen



Vergleich der Mittelwerte der Brandraumtemperaturen



Anhang G

Temperaturmesswerte der Probekörper

In den nachfolgenden Unterpunkten des Abschnittes G sind die während der Brandversuche aufgezeichneten Messwerte der Temperaturen in Diagrammen dargestellt worden.

Es handelt sich hierbei um Temperaturen die an den Stabdübeln sowie im Holz ermittelt wurden. Die Messpunkte befanden sich in unterschiedlichen Abständen zur Brandoberfläche. Bei den Messpunkten im Holz erfolgte zusätzlich eine Variation des Abstandes zum Stabdübel. Die Dauer eines Versuches ergab sich aus der Zeit bis zum Erreichen der Tragfähigkeit der Verbindung.





Messdaten die aus einer fehlerhaften Aufzeichnung resultierten sind in den Diagrammen nicht berücksichtigt worden. Als fehlerhaft wurden Datensätze angesehen, die innerhalb einer Messreihe eine sprunghafte Veränderungen aufwiesen.

G.1 Temperaturverläufe einzelner Messpunkte über die Branddauer

In diesem Abschnitt wurden die Temperaturverläufe der Messpunkte einzelner Brandversuche in Diagrammen abgebildet. Die Diagramme beinhalten die Messdaten der verschiedenen Aufzeichnungspunkte in Abhängigkeit vom Abstand zur beflamnten Oberfläche über die Versuchsdauer.

Die Kennzeichnung verschiedener Temperaturverläufe erfolgte durch die Anwendung farbiger Linien. Linien gleicher Farbe symbolisieren hierbei eine gleiche Einbundtiefe der Messpunkte in den Probekörper. Nachfolgend ist tabellarisch die definierte Zuordnung einer Farbe zu einer entsprechenden Tiefe aufgeführt. Auf den zusätzlichen Einsatz von Symbolen wurde zugunsten der Übersichtlichkeit verzichtet.

Tab 17: Zuordnung der Linienfarben zu den Einbundtiefen der Messpunkte in den Probekörpern

Farbe	Bezeichnung	Tiefe	Farbe	Bezeichnung	Tiefe
	Sun	10 mm		Türkis	70 mm
	Orange	25 mm		Grün	100 mm
	Bordeaux	50 mm		Blau	140 mm
	Rot	60 mm		Hellgrün	200 mm

Probekörper Typ Ia

Versuchsdatum: 29.01.2004

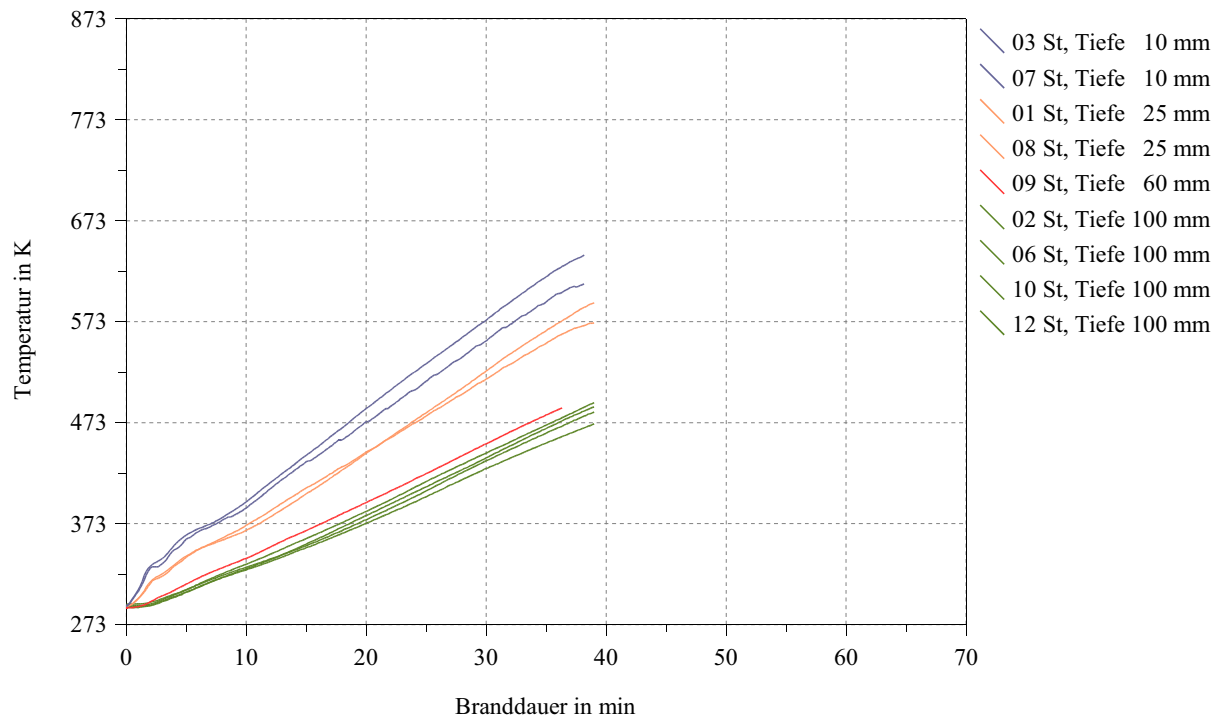
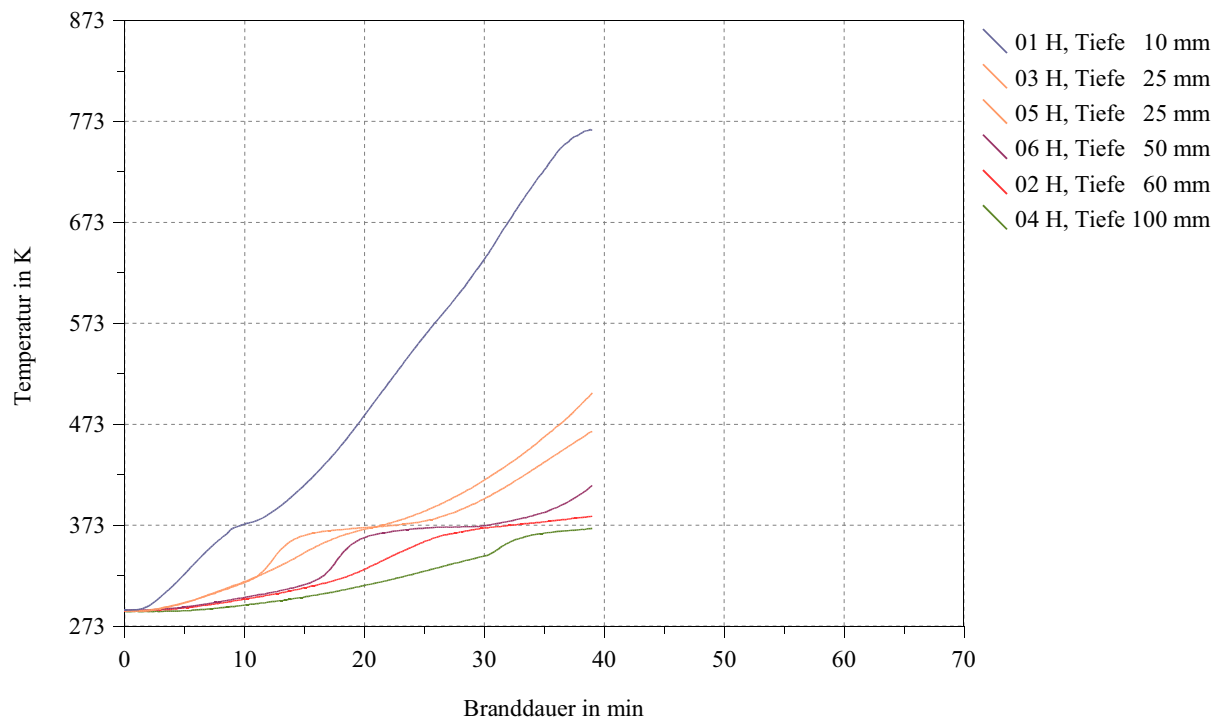
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

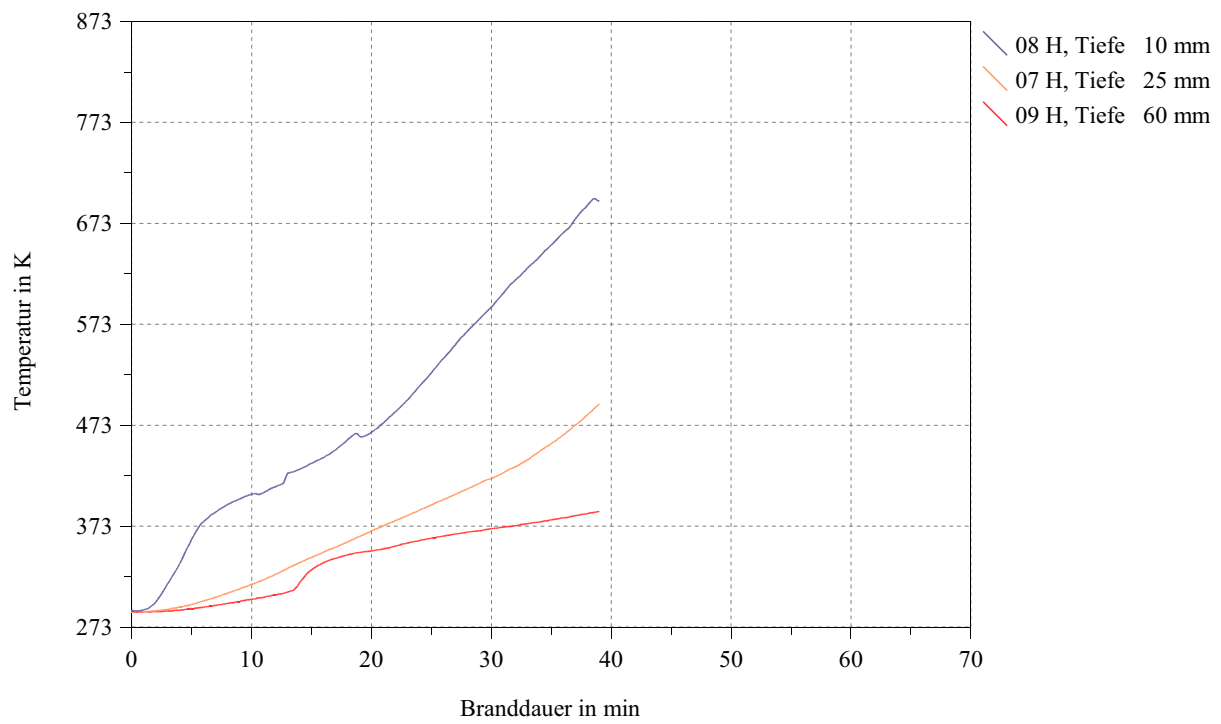
Versuchsdauer: 39,10 min

Stabdübeldurchmess 12 mm

Stabdübellänge: 200 mm

Vorbelastung: 59,10 kN

Stabdübeltemperaturen**Holztemperaturen im Abstand von $a = 12$ mm zum Verbindungsmittel**

Holztemperaturen im Abstand von $a = 6 \text{ mm}$ zum Verbindungsmittel

Probekörper Typ Ib

Versuchsdatum: 03.02.2004

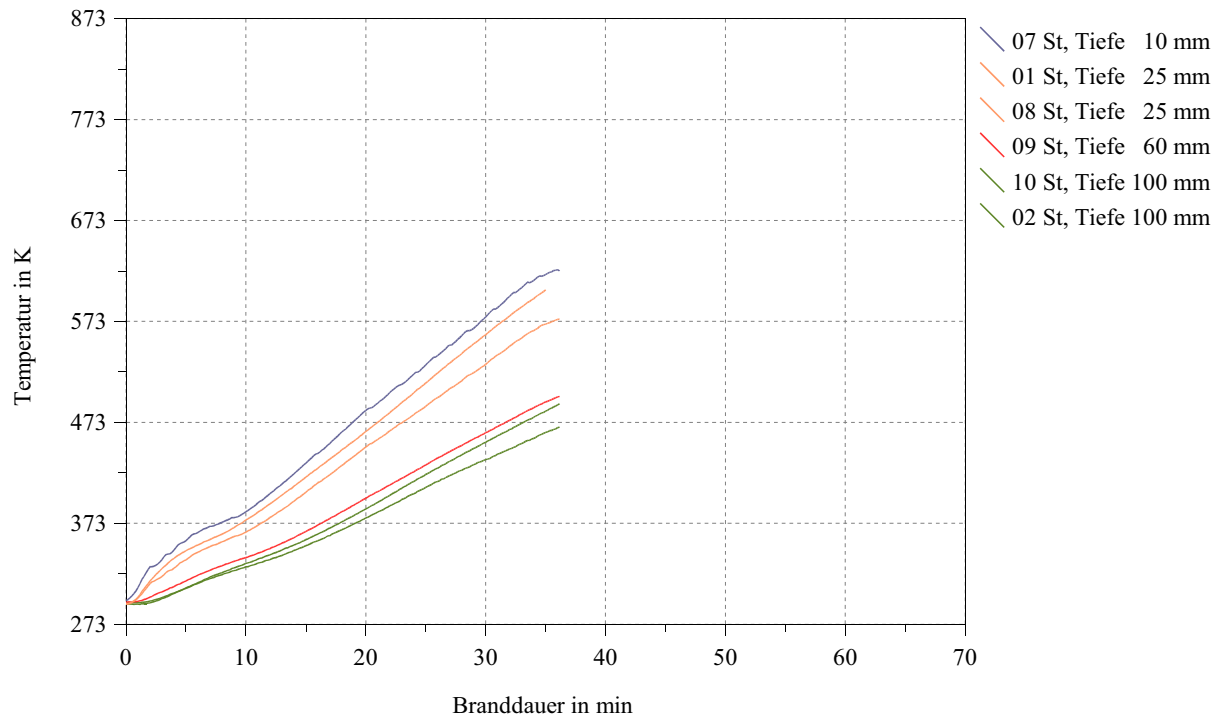
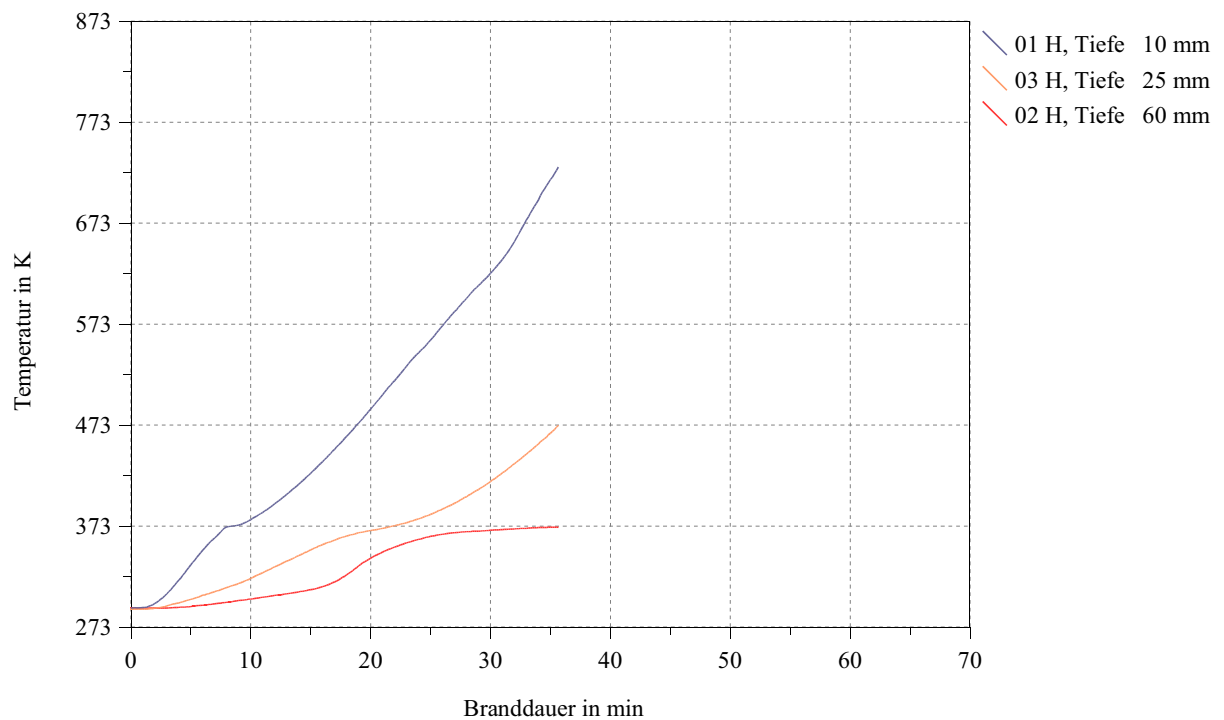
Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 200 mm

Versuchsdauer: 36,28 min

Vorbelastung: 59,10 kN

Stabdübeltemperaturen**Holztemperaturen im Abstand von $a = 12$ mm zum Verbindungsmittel**

Probekörper Typ IIa

Versuchsdatum: 21.01.2004

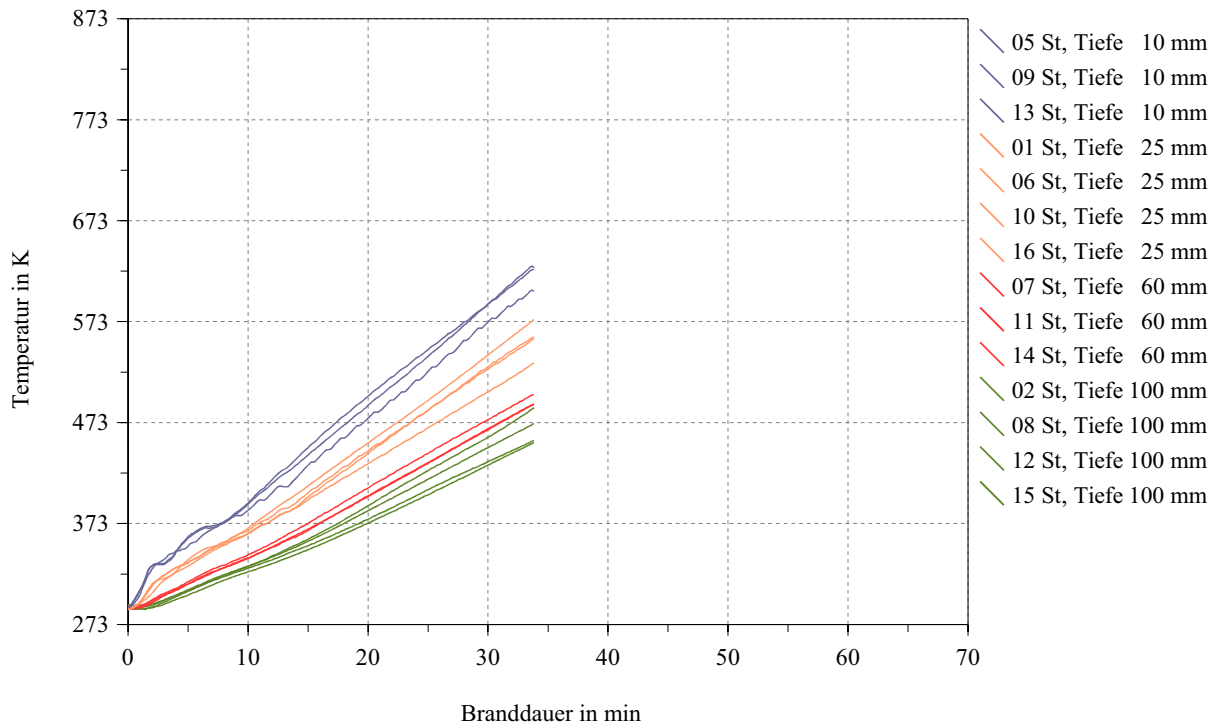
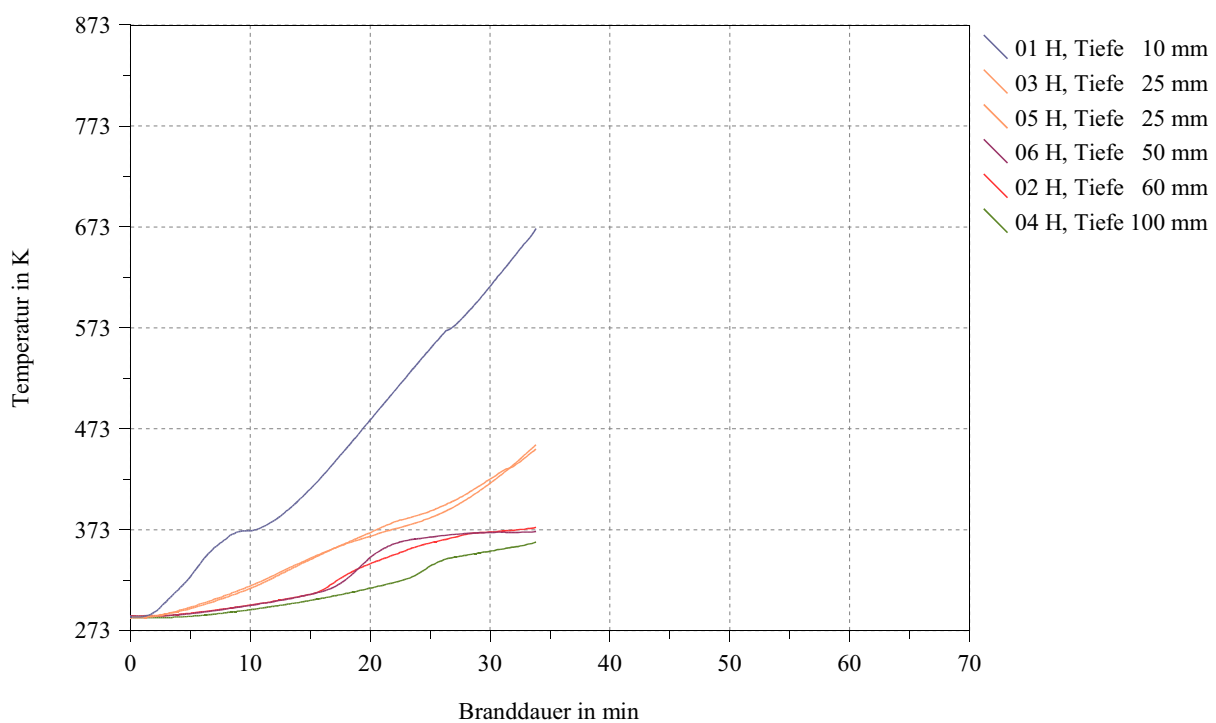
Stabdübeldurchmesser: 12 mm

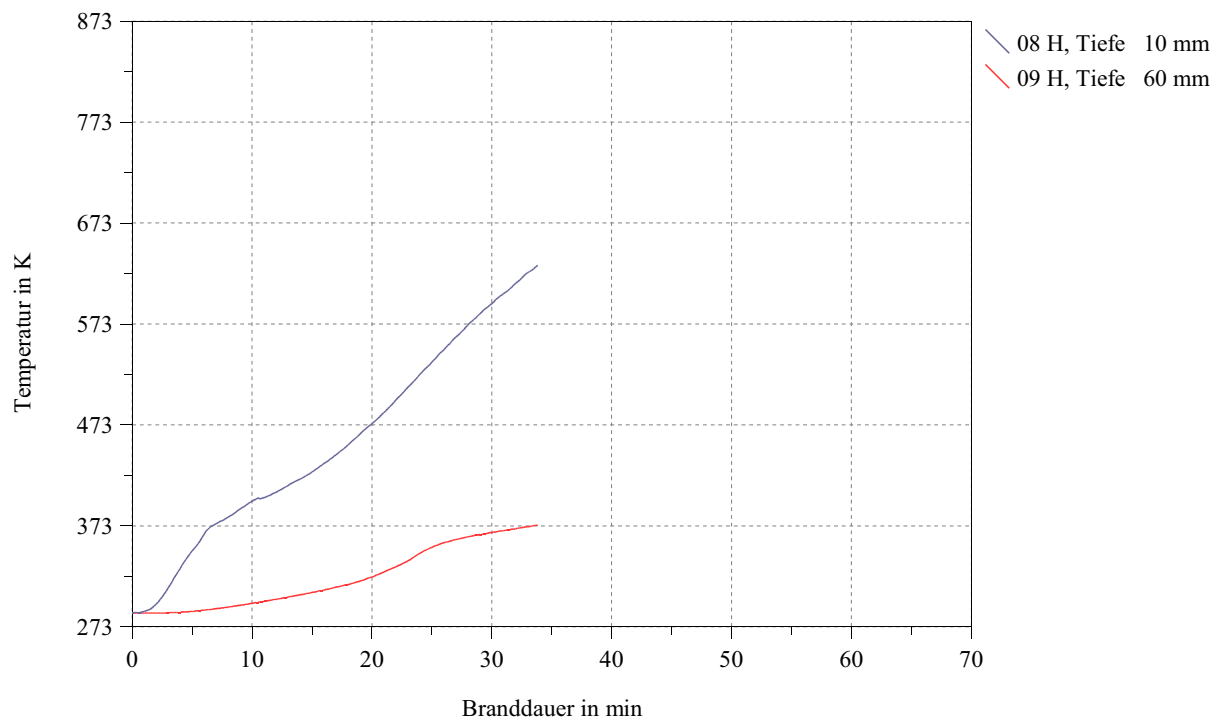
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 200 mm

Versuchsdauer: 33,82 min

Vorbelastung: 110,30 kN

Stabdübeltemperaturen**Holztemperaturen im Abstand von $a = 12$ mm zum Verbindungsmittel**

Holztemperaturen im Abstand von $a = 6 \text{ mm}$ zum Verbindungsmittel

Probekörper Typ IIb

Versuchsdatum: 27.01.2004

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

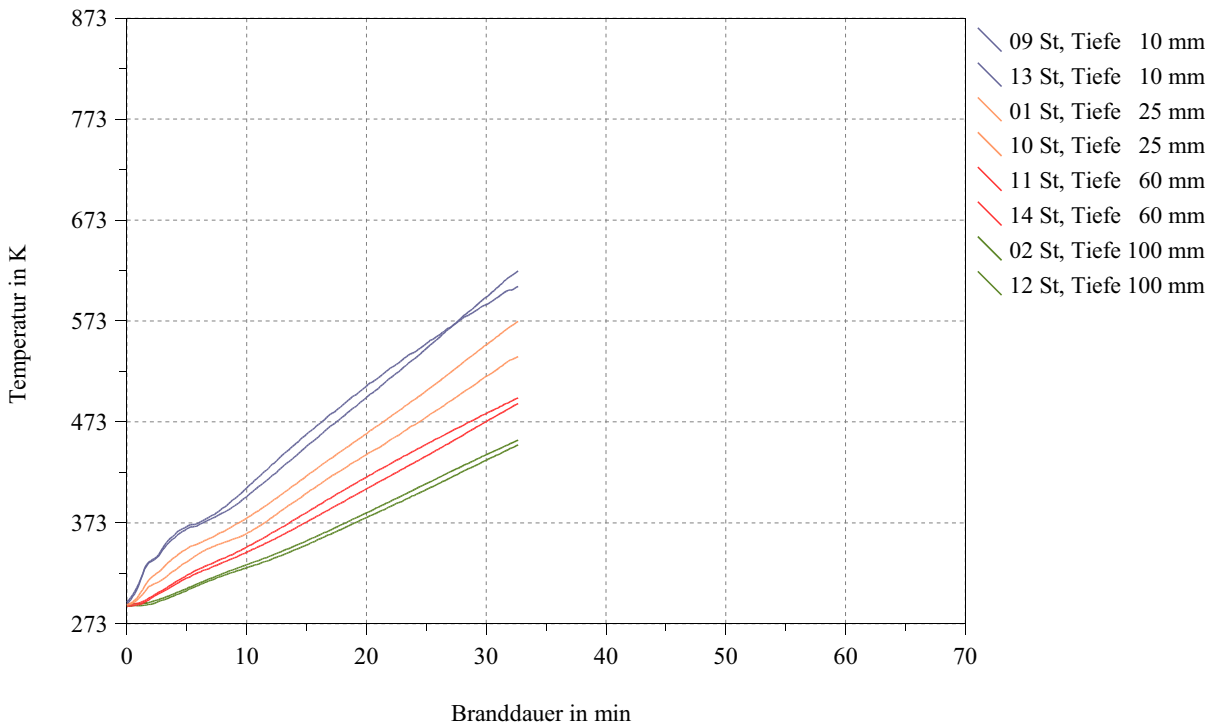
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 200 mm

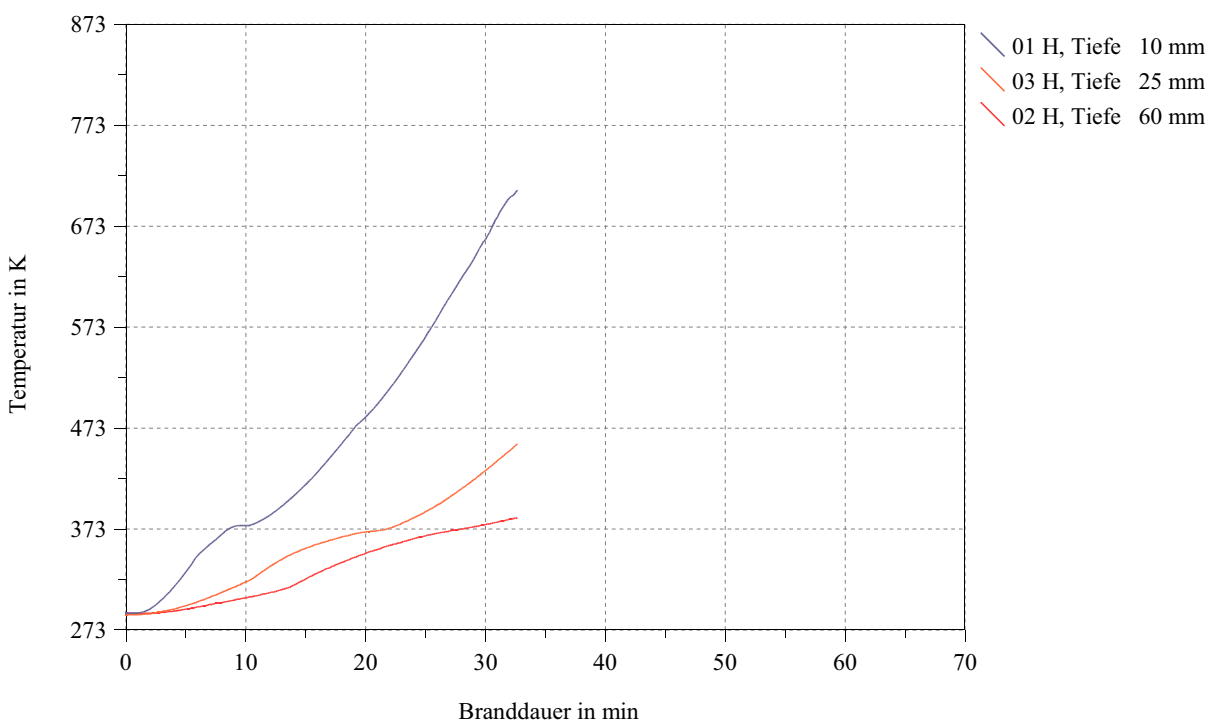
Versuchsdauer: 32,72 min

Vorbelastung: 110,30 kN

Stabdübeltemperaturen



Holztemperaturen im Abstand von $a = 12\text{ mm}$ zum Verbindungsmittel



Probekörper Typ IIIa

Versuchsdatum: 15.01.2004

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

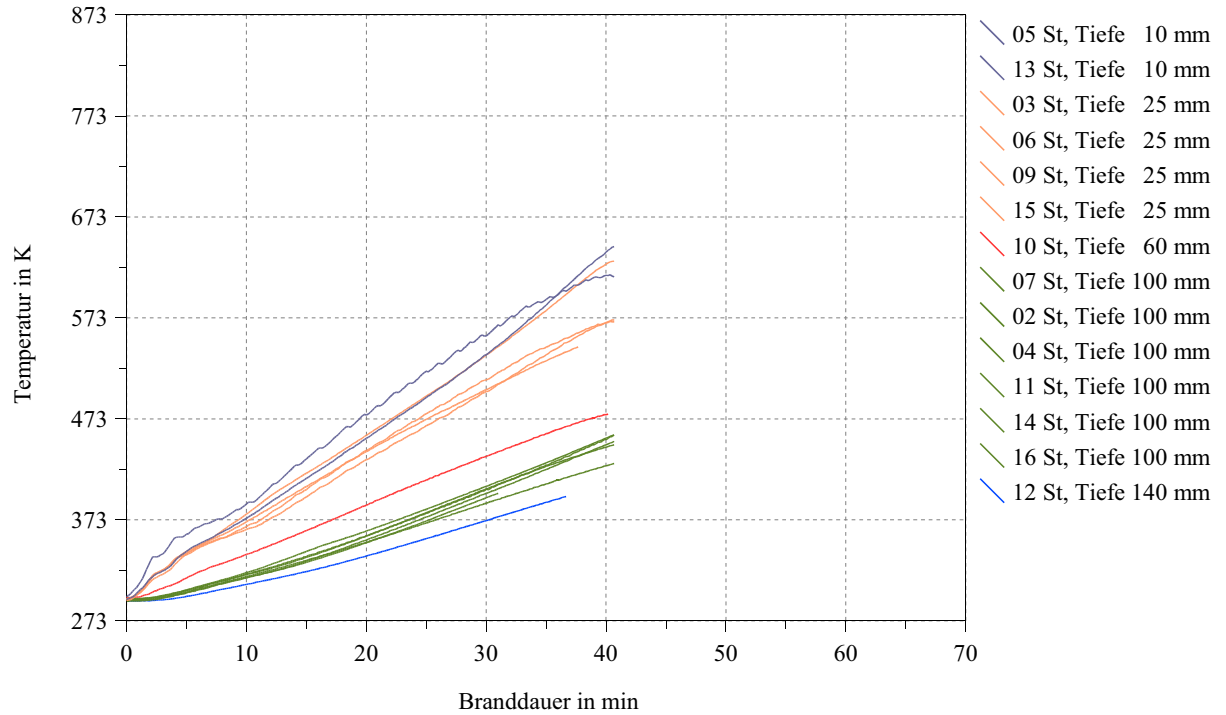
Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 280 mm

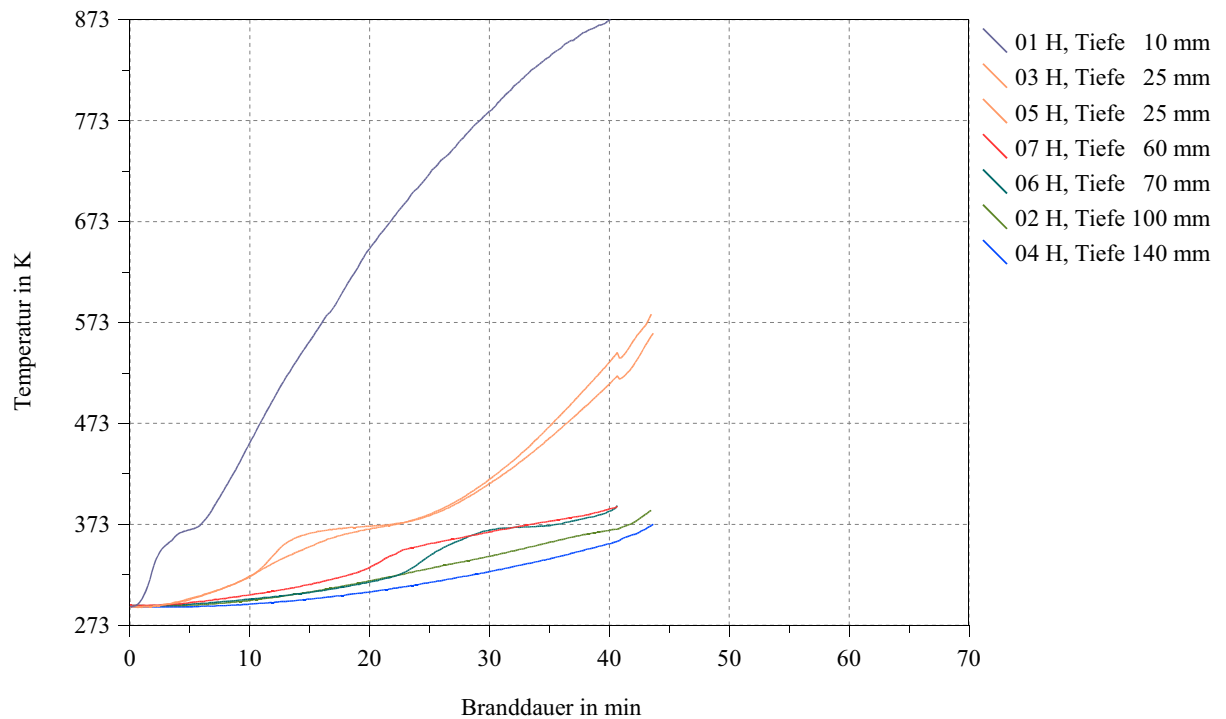
Versuchsdauer: 40,65 min

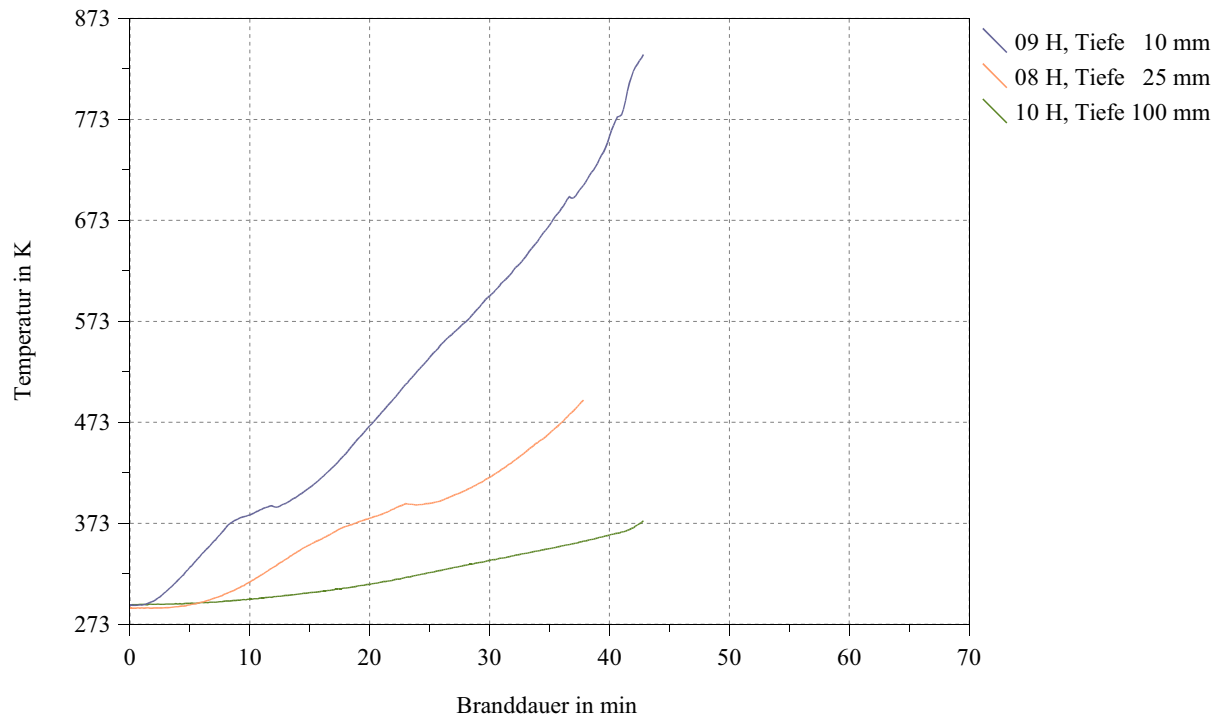
Vorbelastung: 140,20 kN

Stabdübeltemperaturen



Holztemperaturen im Abstand von $a = 12\text{ mm}$ zum Verbindungsmittel



Holztemperaturen im Abstand von $a = 6 \text{ mm}$ zum Verbindungsmittel

Probekörper Typ IIIb

Versuchsdatum: 13.01.2004

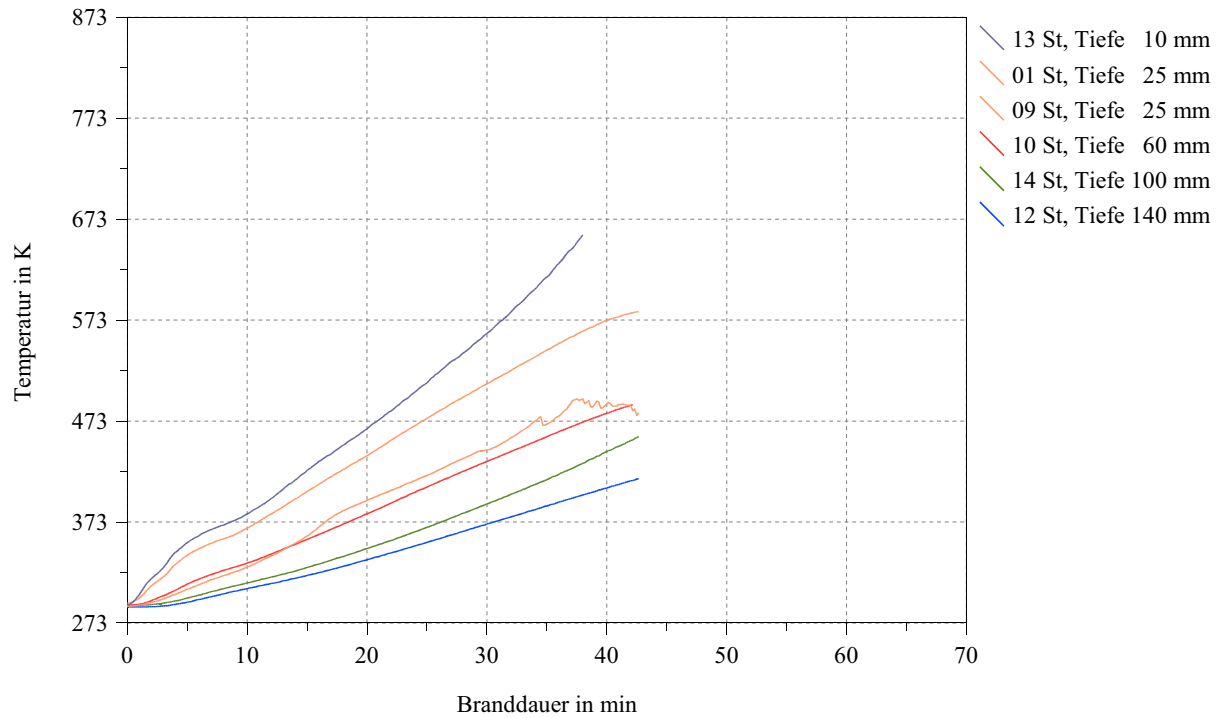
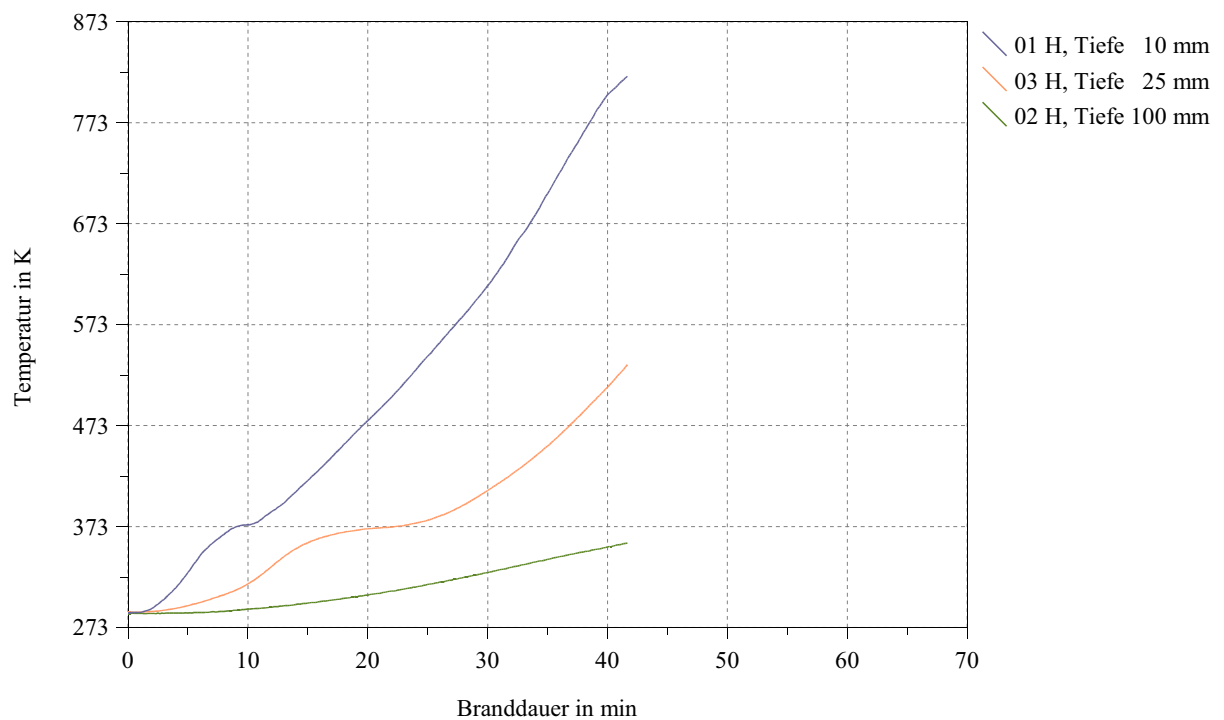
Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 280 mm

Versuchsdauer: 42,62 min

Vorbelastung: 140,20 kN

Stabdübeltemperaturen**Holztemperaturen im Abstand von $a = 12$ mm zum Verbindungsmittel**

Probekörper Typ III Dummy

Versuchsdatum: 08.01.2004

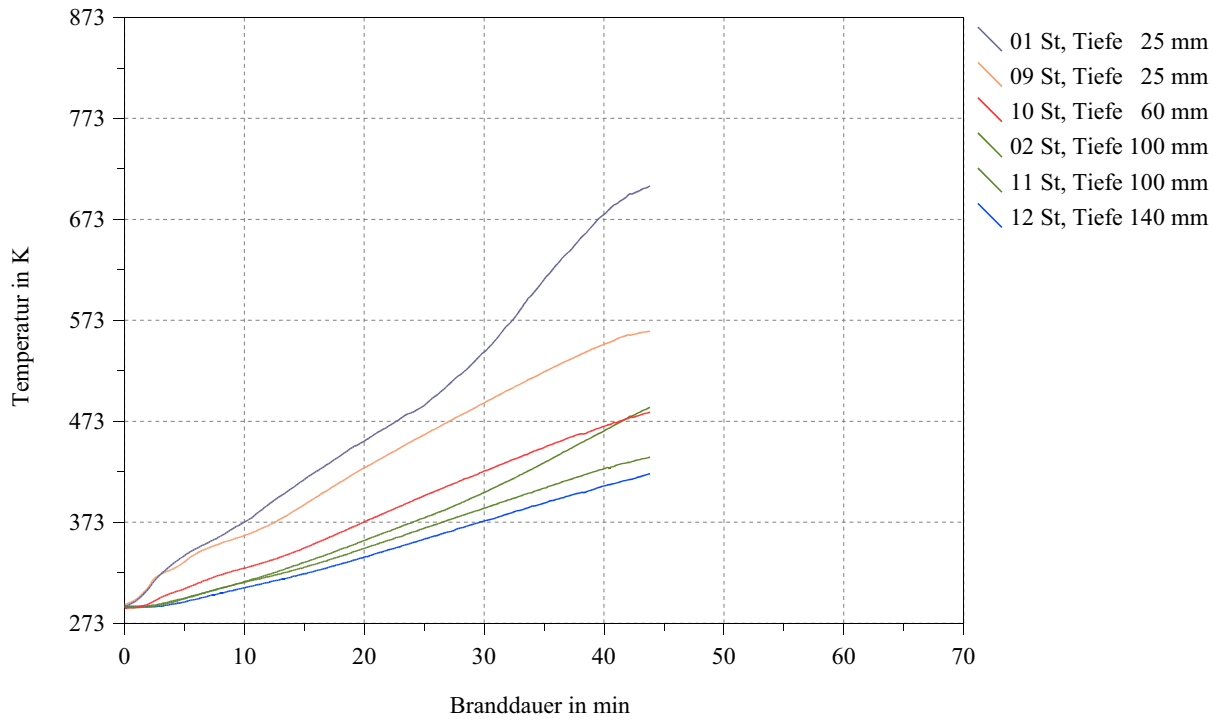
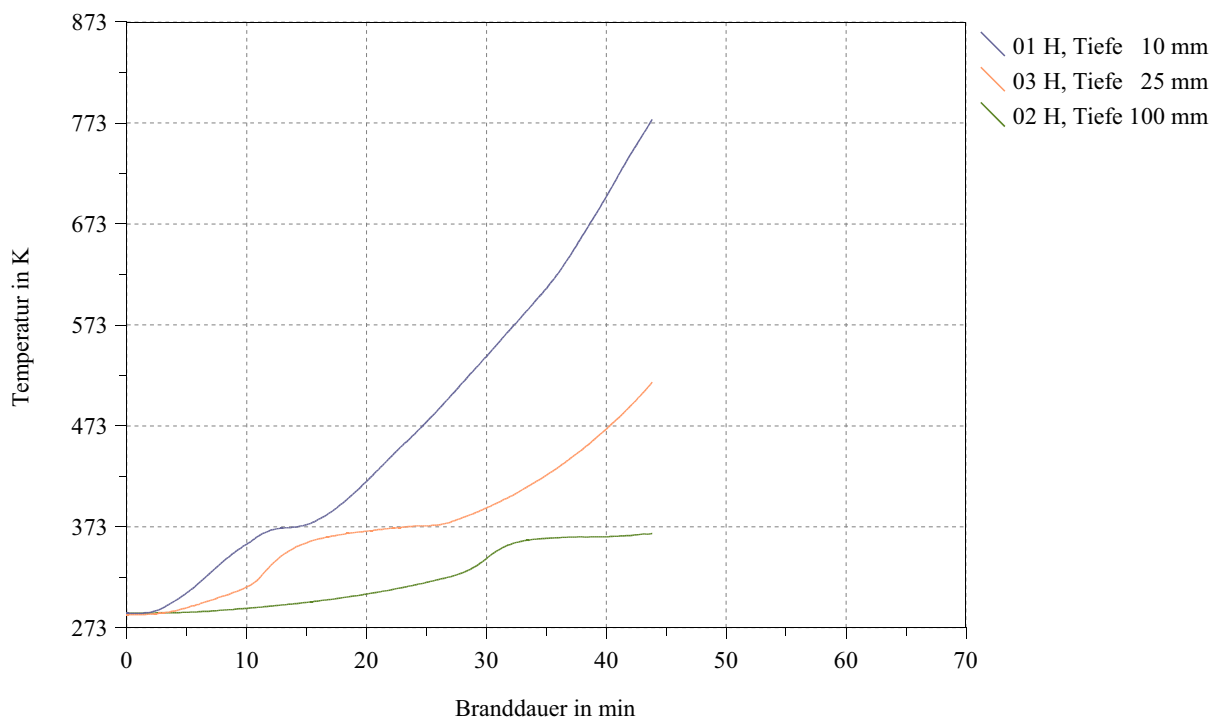
Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 280 mm

Versuchsdauer: 43,92 min

Vorbelastung: 140,20 kN

Stabdübeltemperaturen**Holztemperaturen im Abstand von $a = 12\text{ mm}$ zum Verbindungsmittel**

Probekörper Typ IVa

Versuchsdatum: 05.02.2004

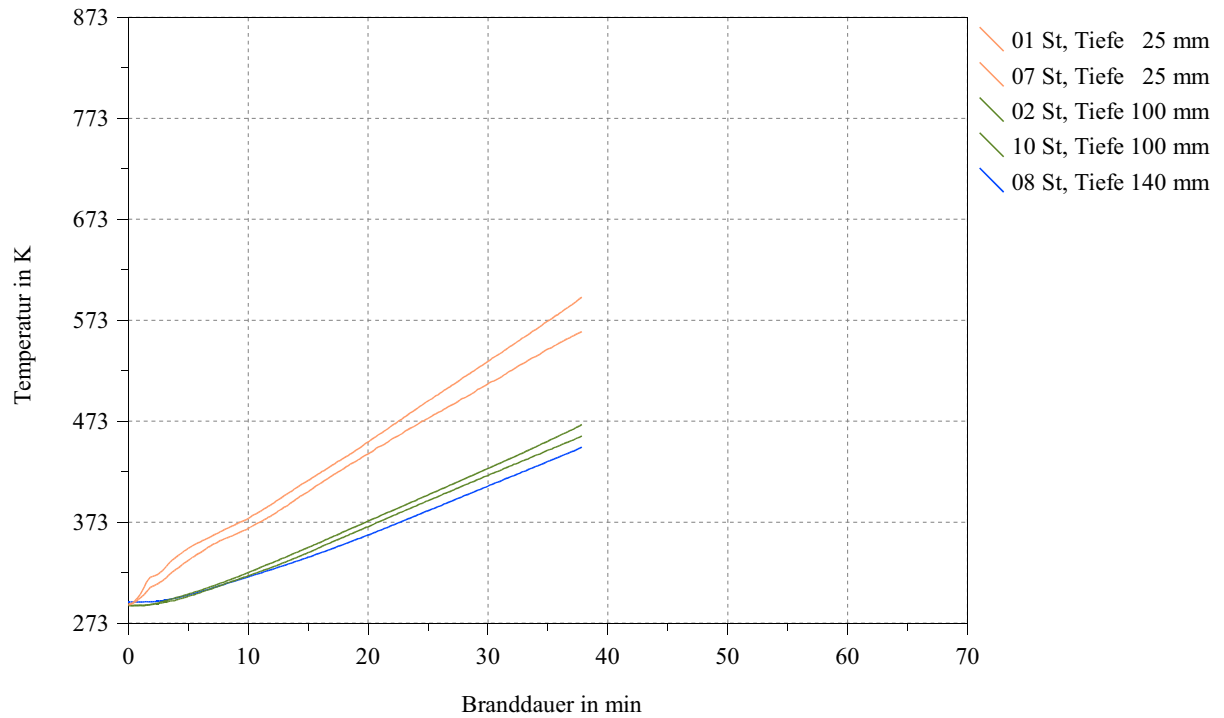
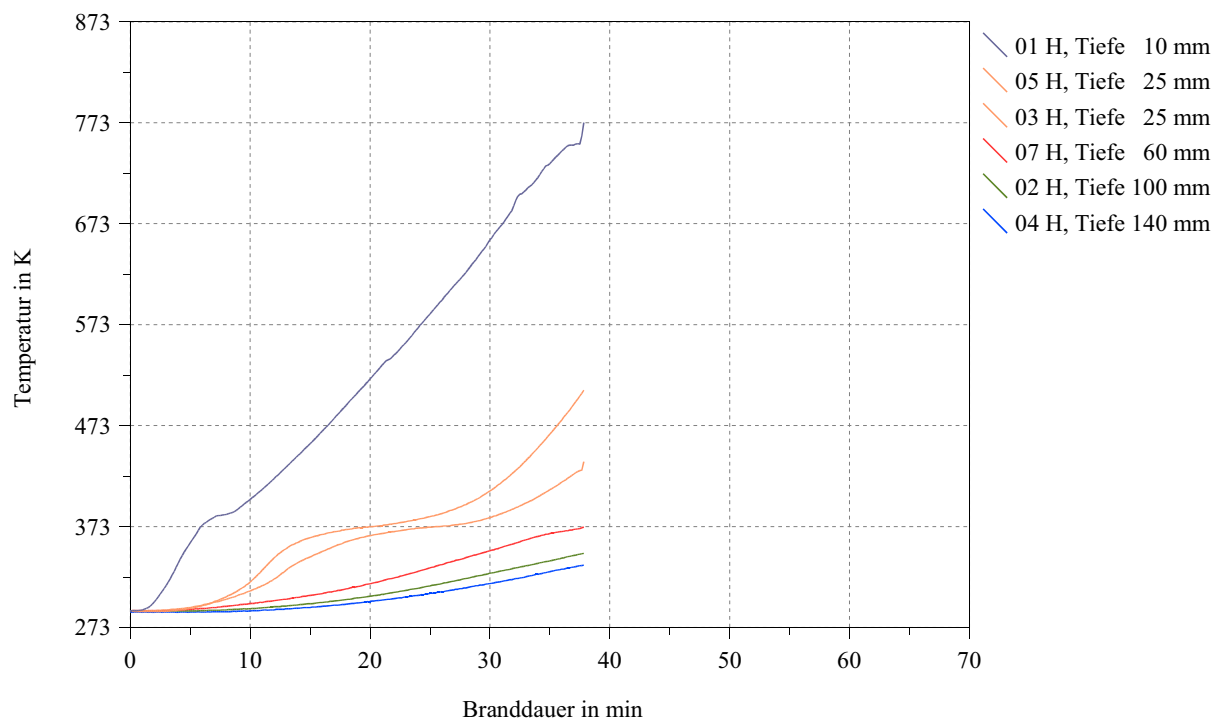
Stabdübeldurchmesser: 20 mm

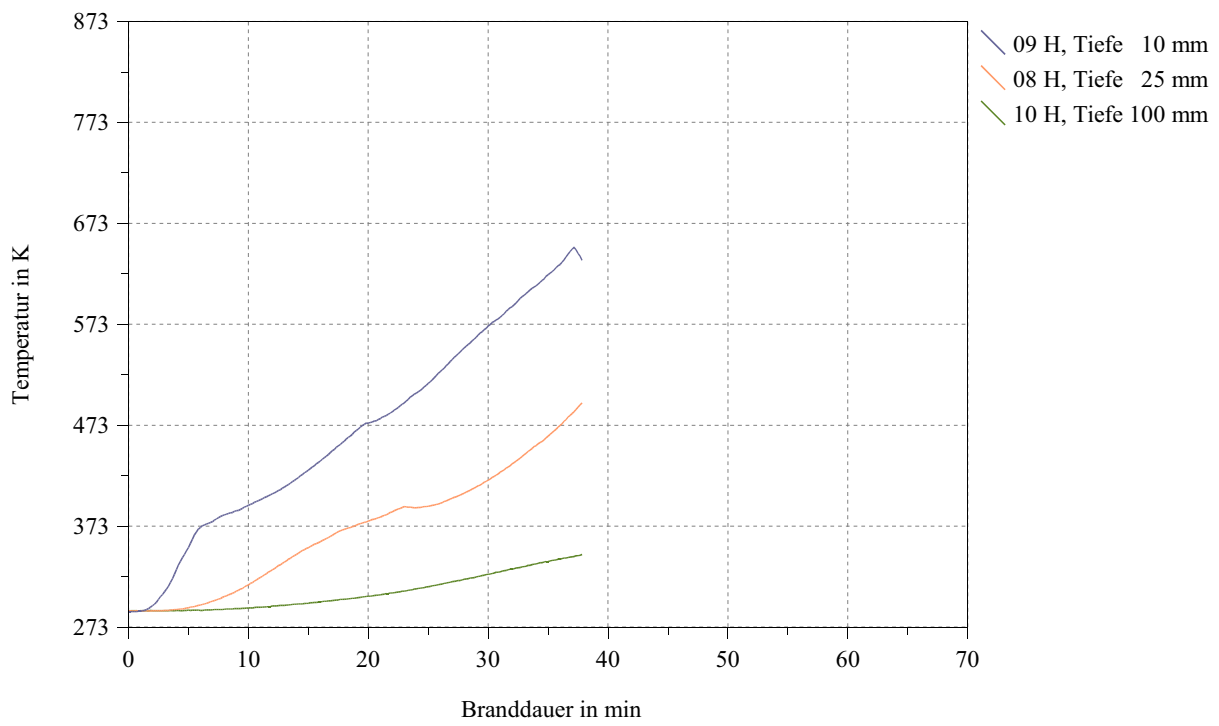
Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 280 mm

Versuchsdauer: 37,78 min

Vorbelastung: 141,60 kN

Stabdübeltemperaturen**Holztemperaturen im Abstand von $a = 20$ mm zum Verbindungsmittel**

Holztemperaturen im Abstand von $a = 10\text{ mm}$ zum Verbindungsmittel

Probekörper Typ IVb

Versuchsdatum: 12.02.2004

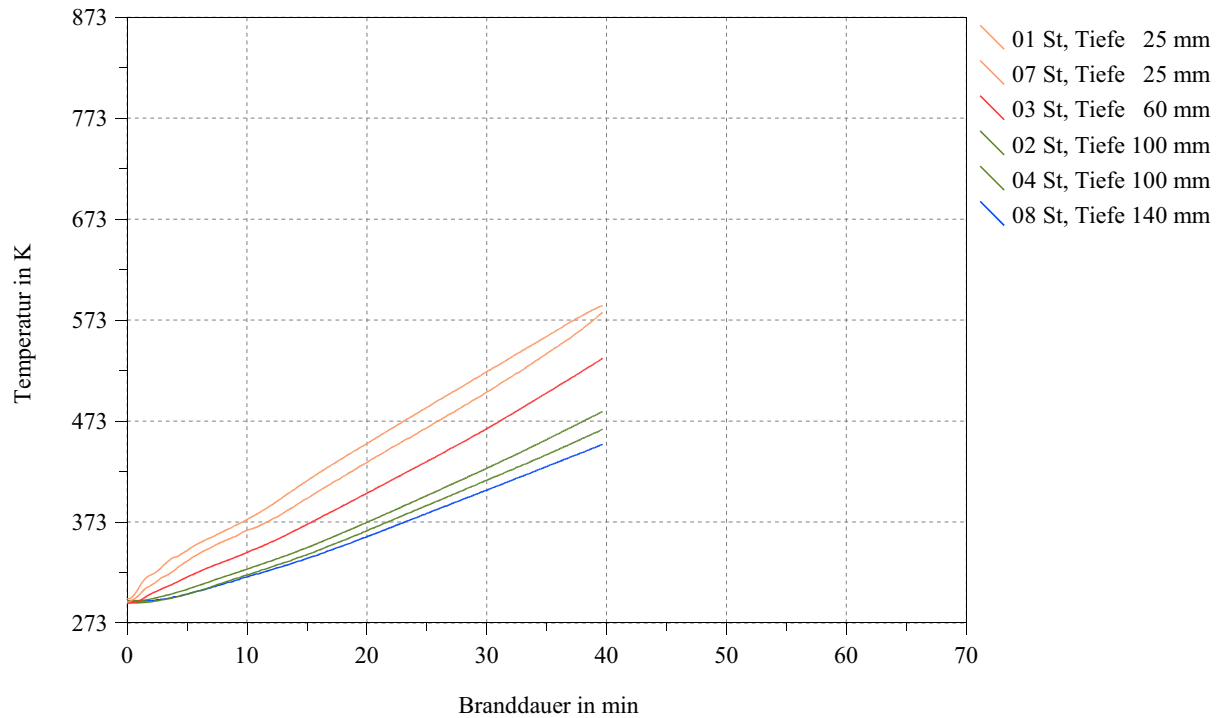
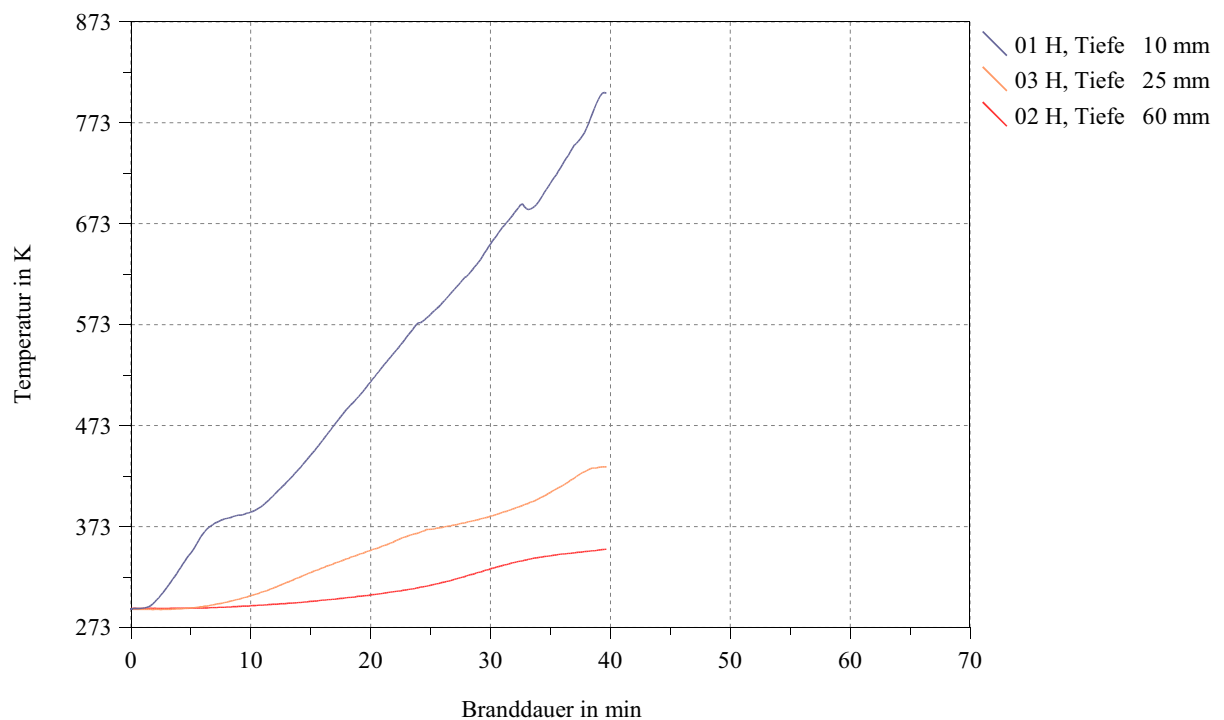
Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 280 mm

Versuchsdauer: 39,65 min

Vorbelastung: 141,60 kN

Stabdübeltemperaturen**Holztemperaturen im Abstand von $a = 20$ mm zum Verbindungsmittel**

Probekörper Typ Va

Versuchsdatum: 20.02.2004

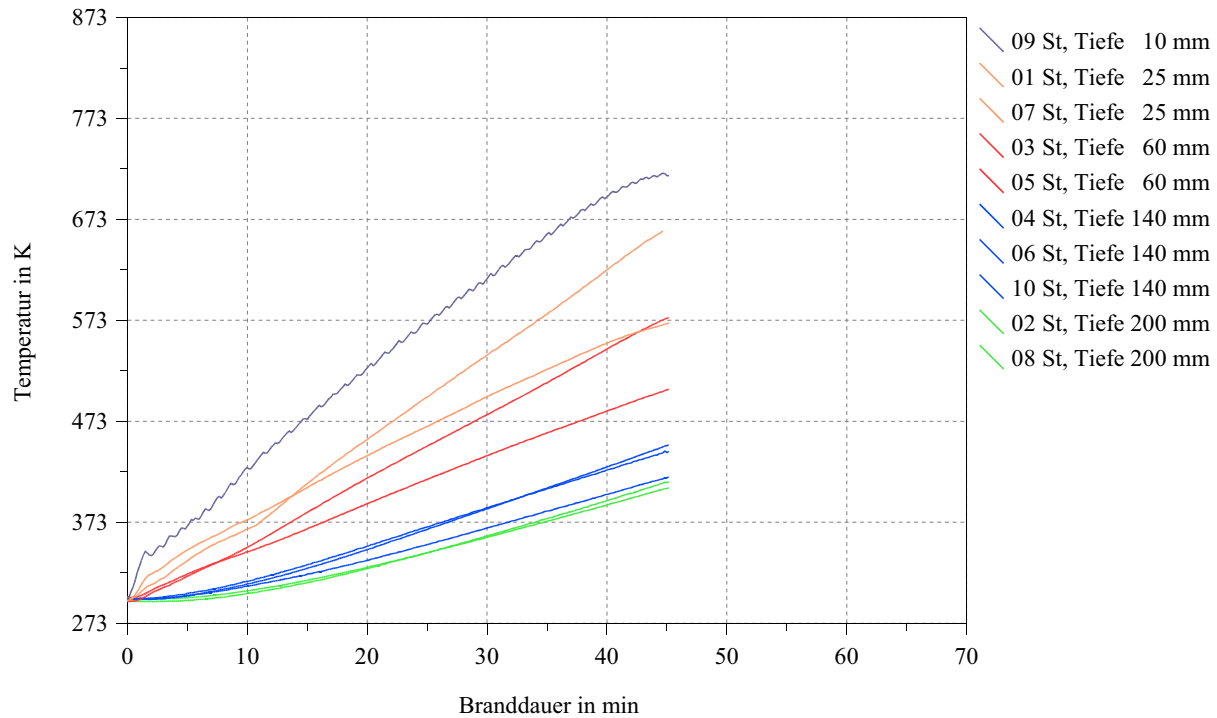
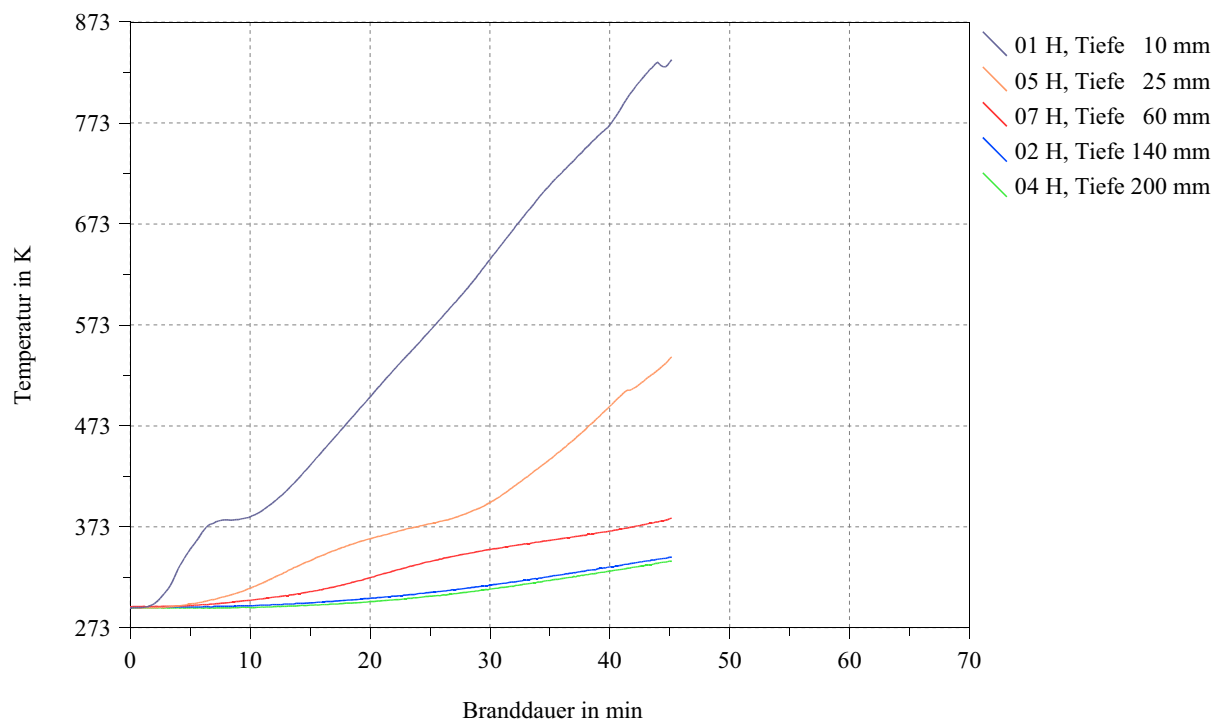
Stabdübeldurchmesser: 20 mm

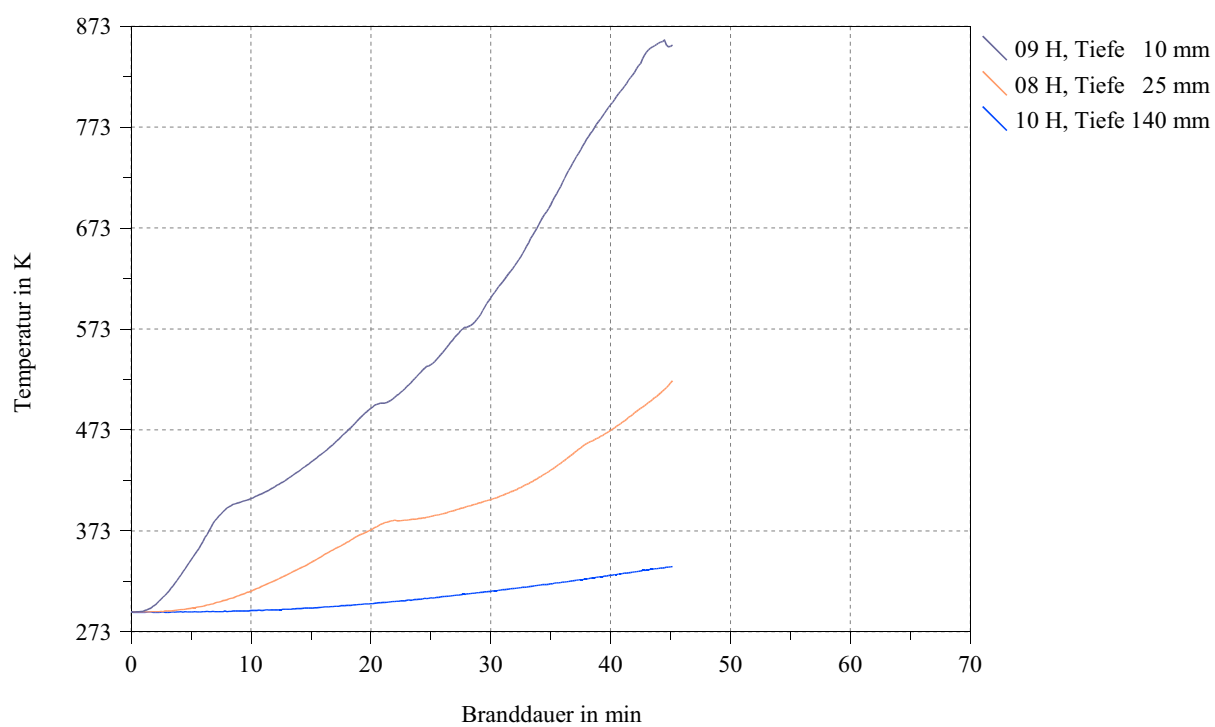
Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 400 mm

Versuchsdauer: 45,18 min

Vorbelastung: 183,30 kN

Stabdübeltemperaturen**Holztemperaturen im Abstand von $a = 20\text{ mm}$ zum Verbindungsmittel**

Holztemperaturen im Abstand von $a = 10 \text{ mm}$ zum Verbindungsmittel

Probekörper Typ Vb

Versuchsdatum: 12.02.2004

Stabdübeldurchmesser: 20 mm

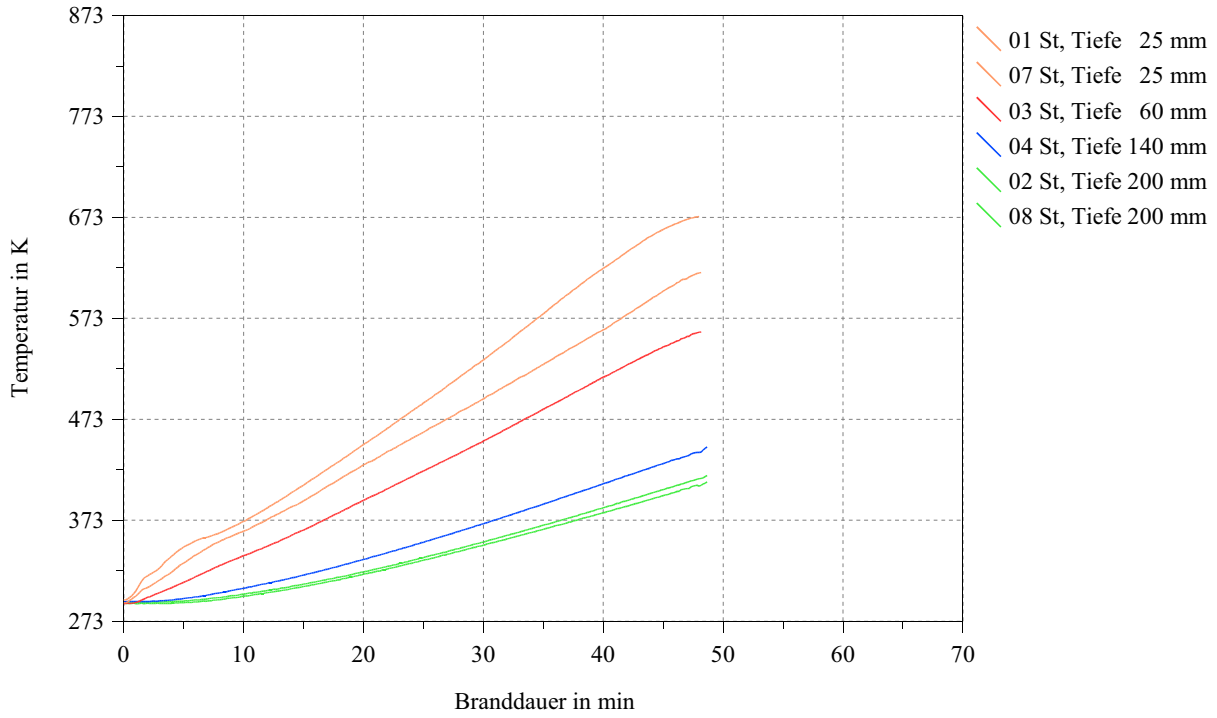
Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 400 mm

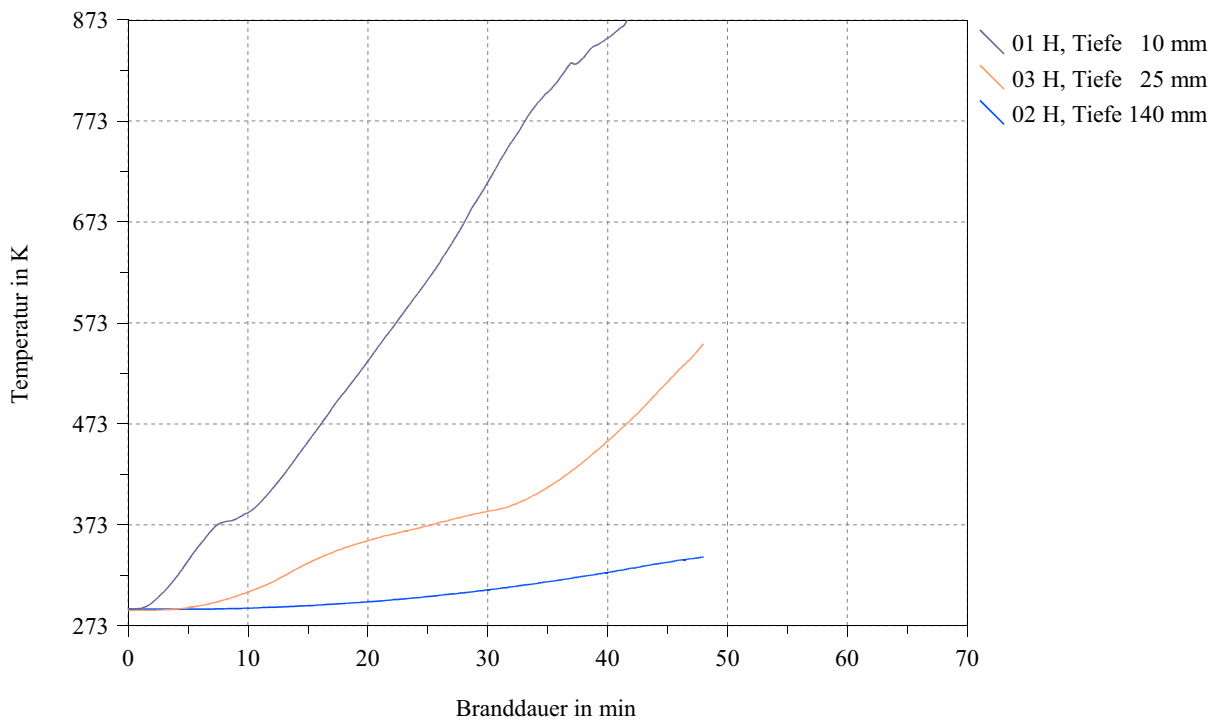
Versuchsdauer: 48,07 min

Vorbelastung: 183,30 kN

Stabdübeltemperaturen



Holztemperaturen im Abstand von a = 20 mm zum Verbindungsmittel



Probekörper Typ VIa

Versuchsdatum: 25.02.2004

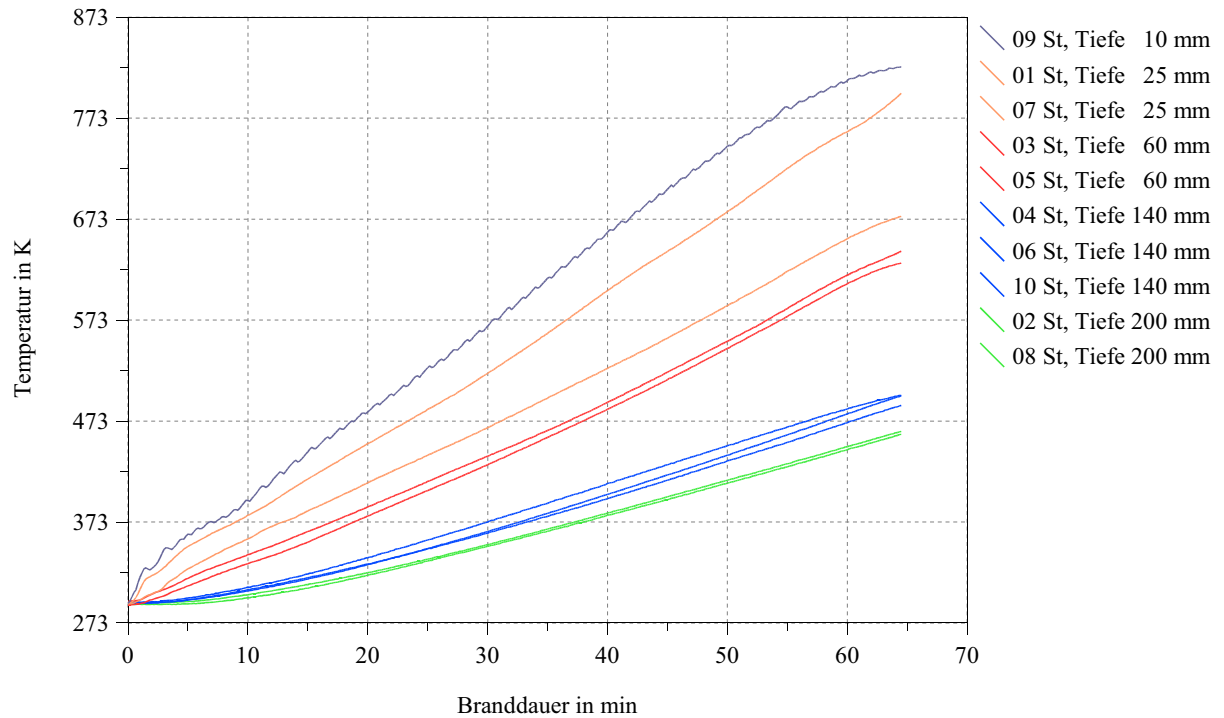
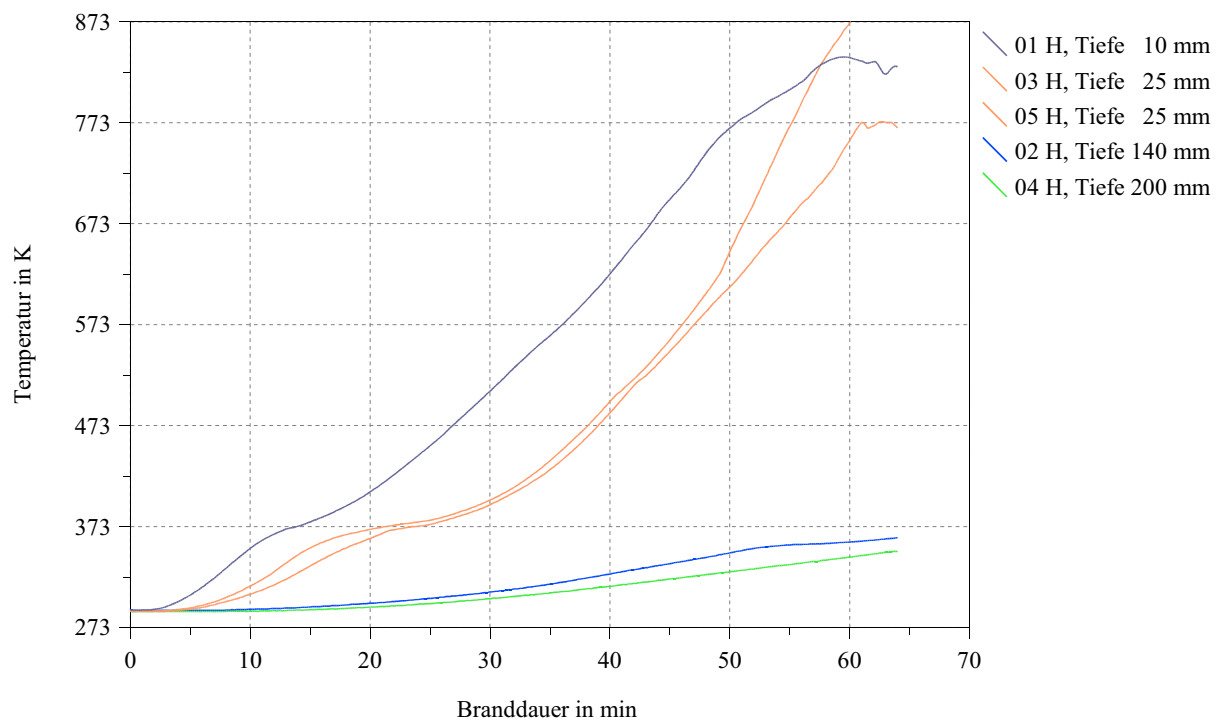
Stabdübeldurchmesser: 20 mm

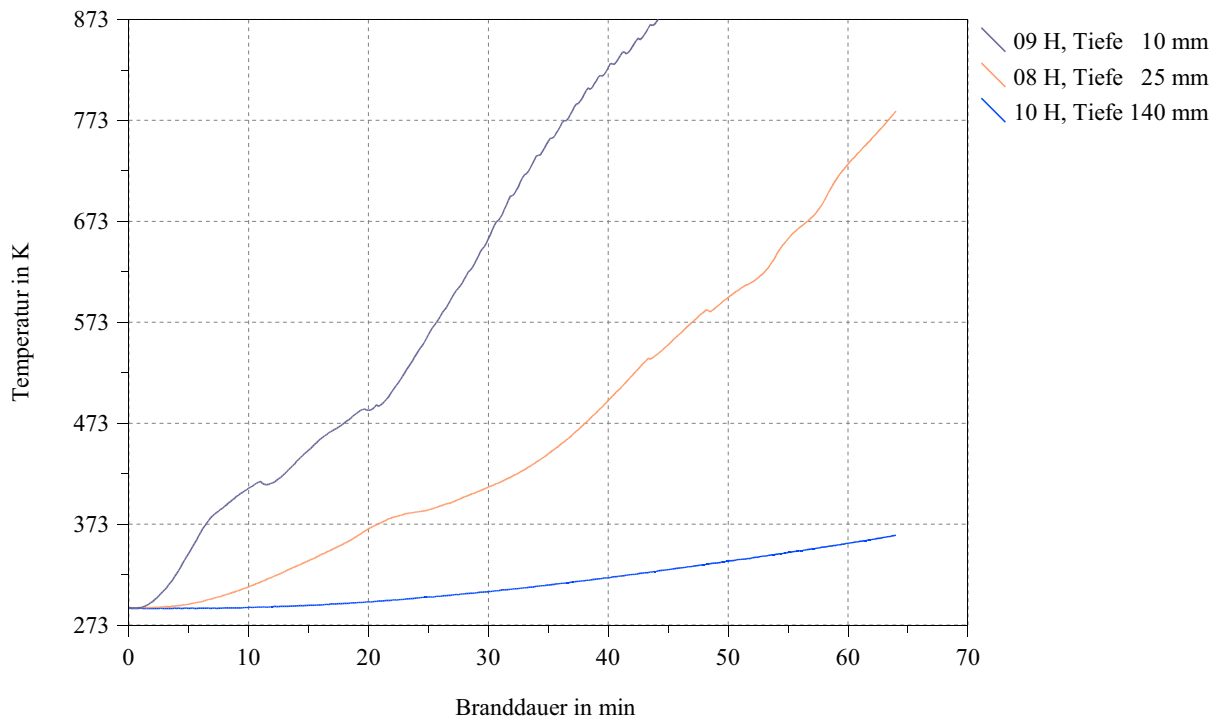
Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 400 mm

Versuchsdauer: 64,58 min

Vorbelastung: 114,20 kN

Stabdübeltemperaturen**Holztemperaturen im Abstand von $a = 20\text{ mm}$ zum Verbindungsmittel**

Holztemperaturen im Abstand von $a = 10 \text{ mm}$ zum Verbindungsmittel

Probekörper Typ VIb

Versuchsdatum: 17.02.2004

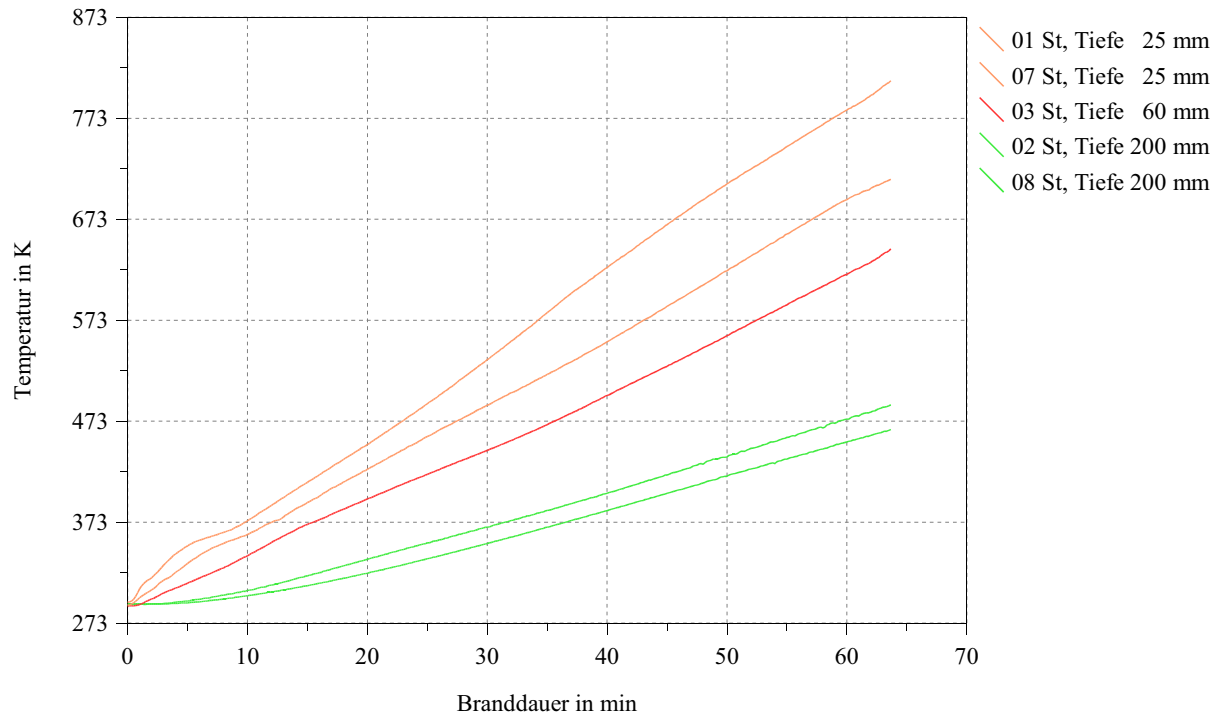
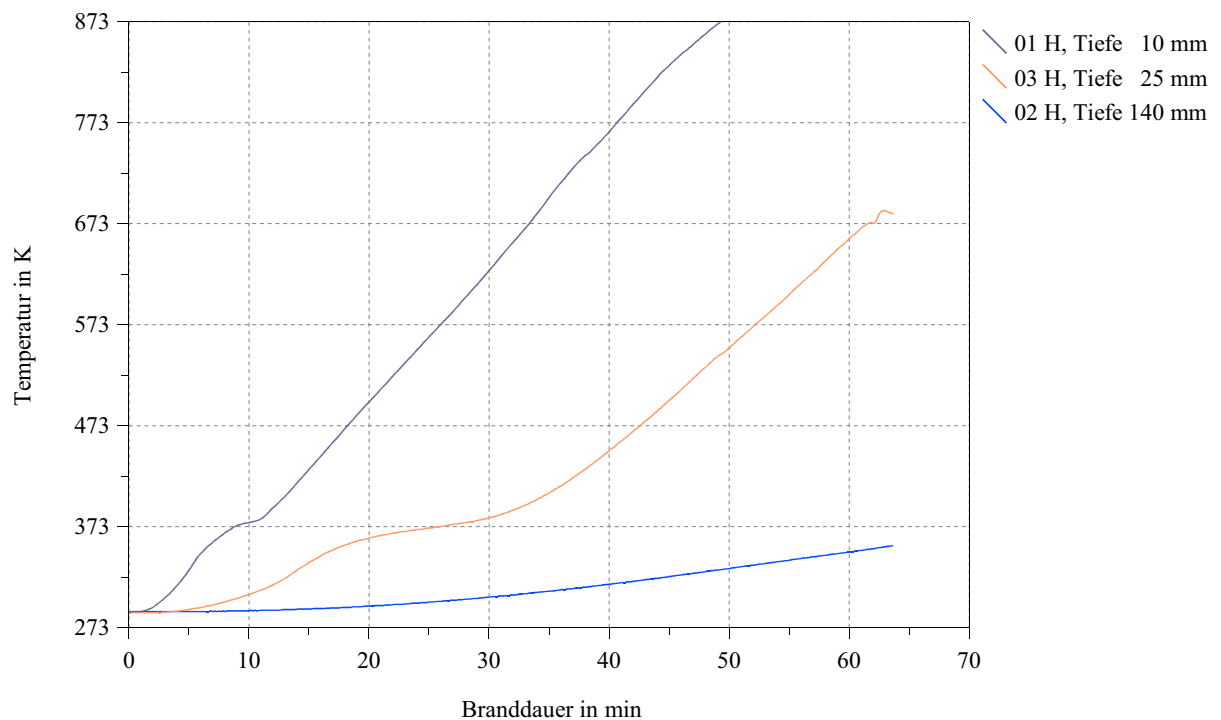
Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 400 mm

Versuchsdauer: 63,68 min

Vorbelastung: 114,20 kN




Stabdübeltemperaturen**Holztemperaturen im Abstand von $a = 10$ mm zum Verbindungsmittel**

G.2 Mittelwerte der Temperaturverläufe über die Branddauer

Inhalt dieses Abschnittes ist die grafische Darstellung der arithmetisch bestimmten Mittelwerte (MW) der Temperaturverläufe der Versuchsreihen über die Dauer der Brandbelastung. Die Mittelwerte ergaben sich aus der Zusammenfassung aller artgleichen Messwerte eines Probekörpertypes.

Die Kennzeichnung der Temperaturverläufe erfolgte durch die Verwendung farbiger Linien in Kombination mit Symbolen. Nachfolgend wurde diese Zuordnung in Abhängigkeit vom Abstand der Messpunkte zur beflamnten Oberfläche tabellarisch dargestellt.

Tab.18: Zuordnung der Linienfarben und Symbole zu den Einbundtiefen der Messpunkte in den Probekörpern

Farbe	Bezeichnung	Symbol	Tiefe	Farbe	Bezeichnung	Symbol	Tiefe
	Sun		10 mm		Türkis		70 mm
	Orange		25 mm		Grün		100 mm
	Bordeaux		50 mm		Blau		140 mm
	Rot		60 mm		Hellgrün		200 mm

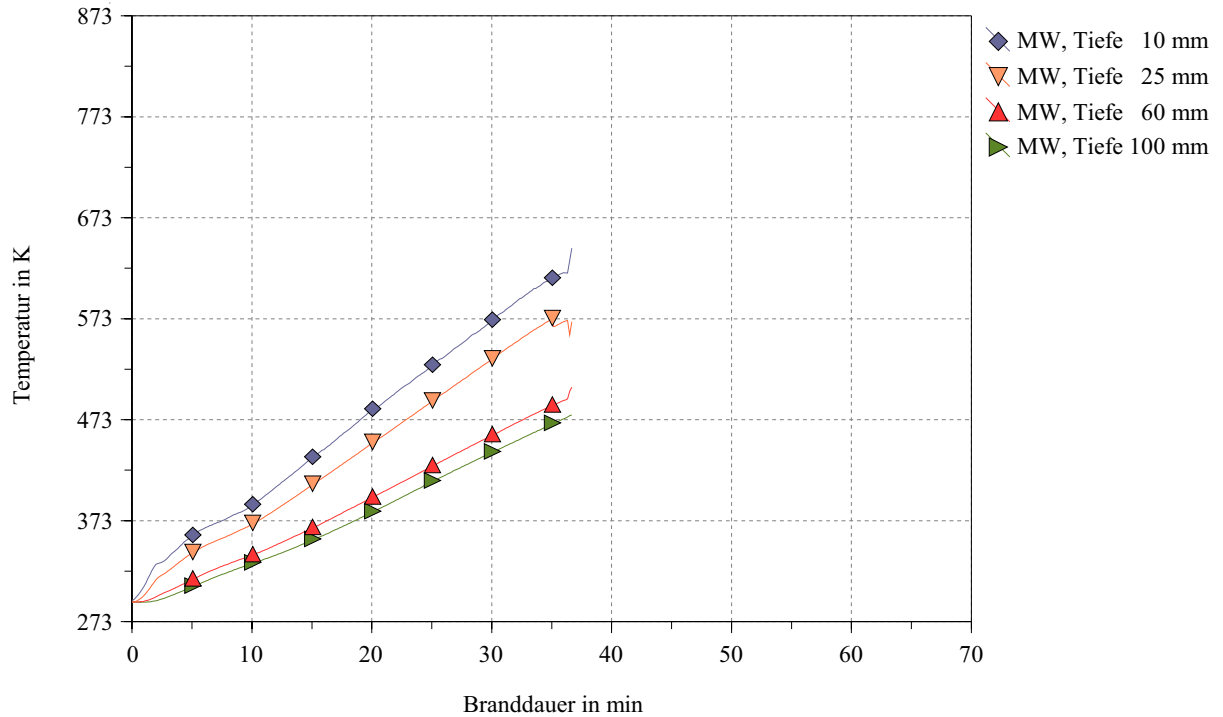
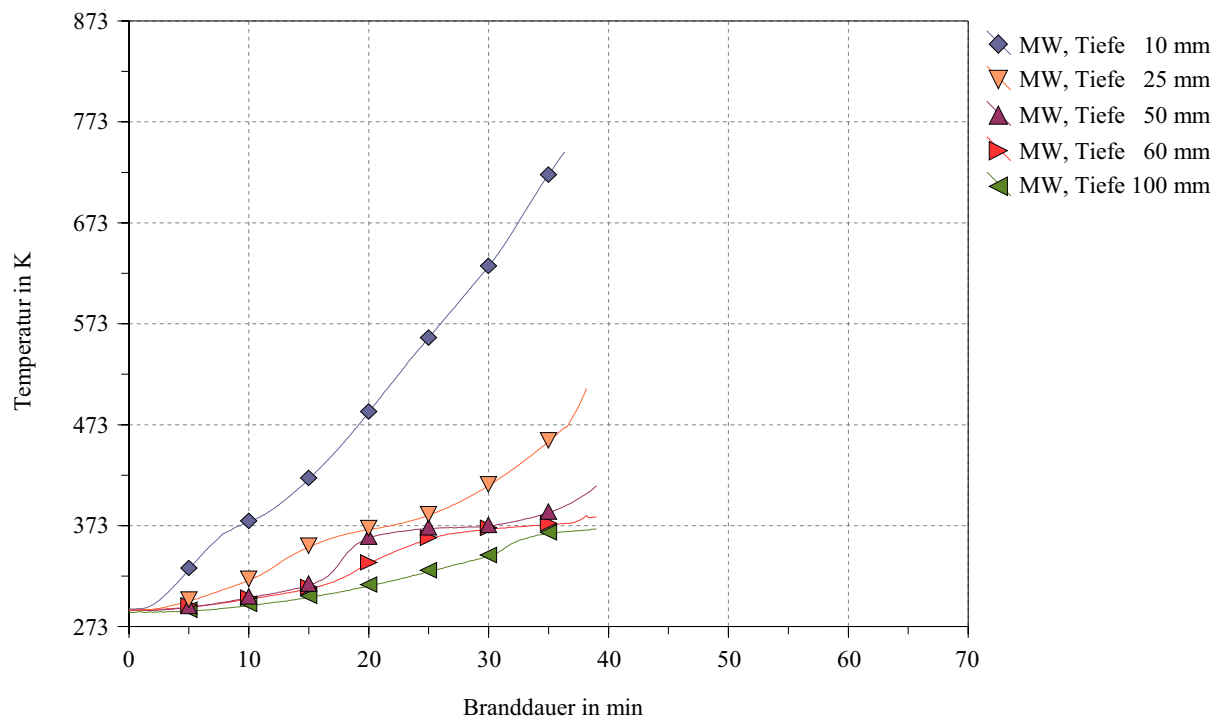
Probekörper Typ I

Vorbelastung: 59,10 kN

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 200 mm

Stabdübeltemperaturen**Holztemperaturen im Abstand von $a = 12$ mm zum Verbindungsmittel**

Probekörper Typ II

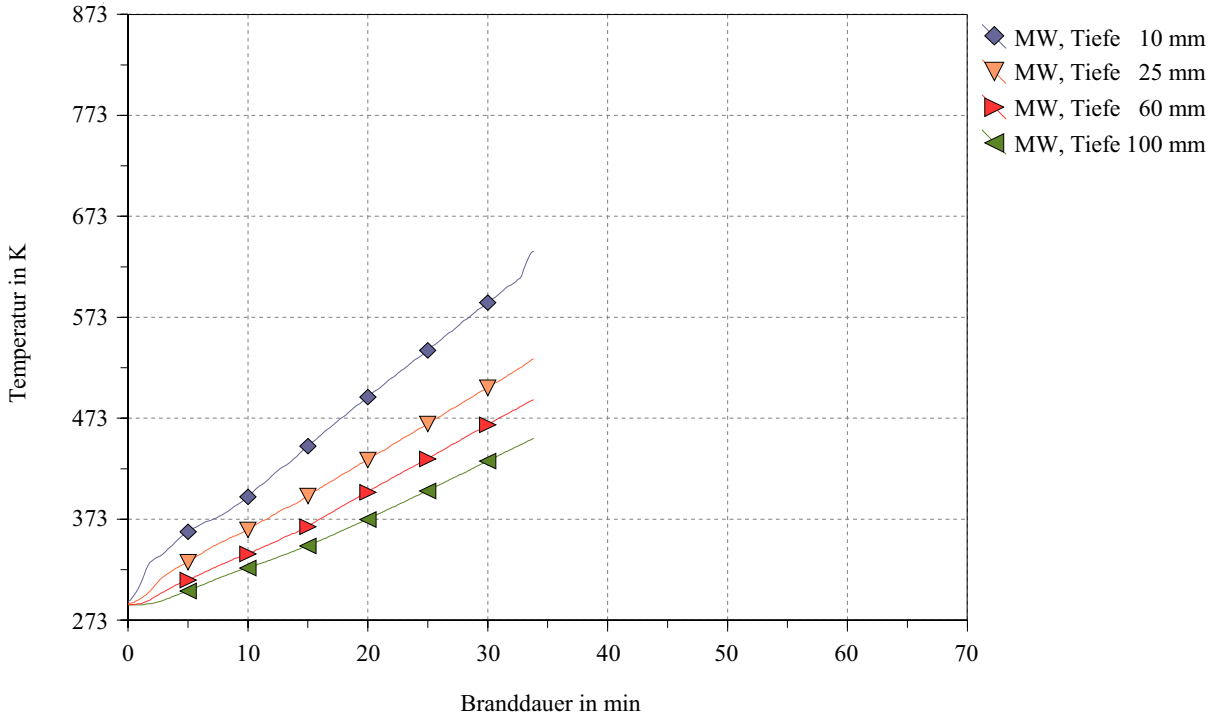
Vorbelastung: 110,30 kN

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

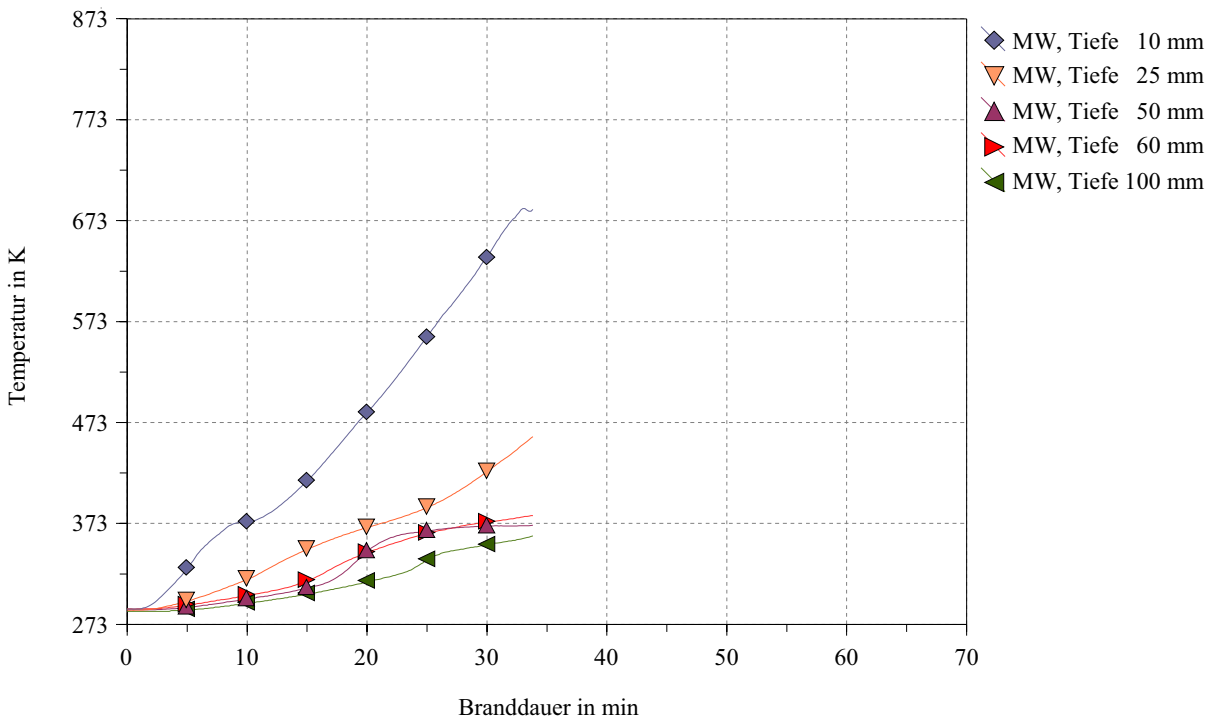
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 200 mm

Stabdübeltemperaturen



Holztemperaturen im Abstand von $a = 12\text{ mm}$ zum Verbindungsmittel



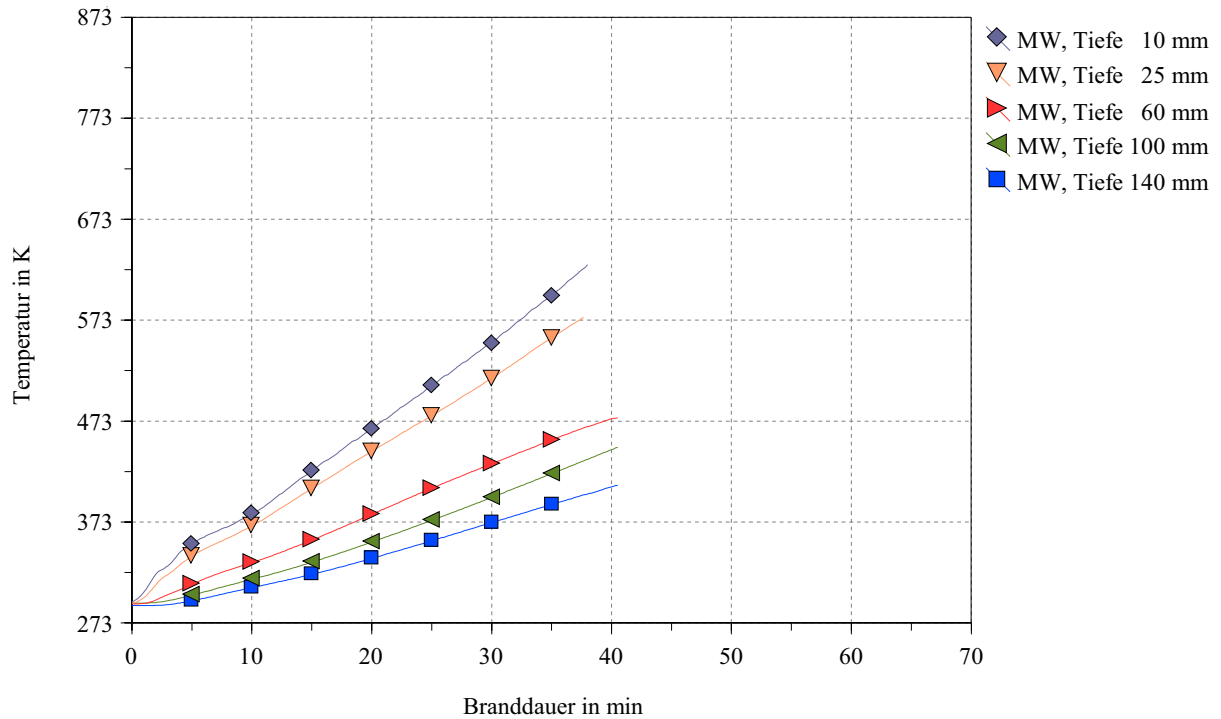
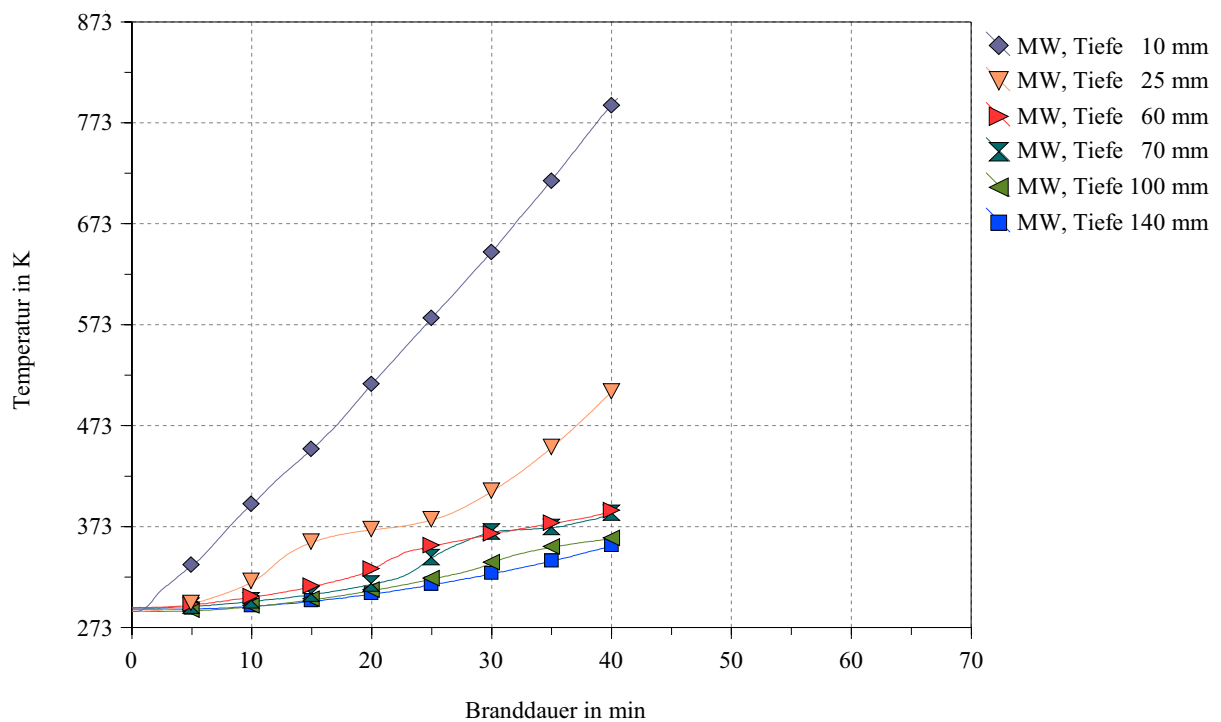
Probekörper Typ III

Vorbelastung: 140,20 kN

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 280 mm

Stabdübeltemperaturen**Holztemperaturen im Abstand von $a = 12$ mm zum Verbindungsmittel**

Probekörper Typ IV

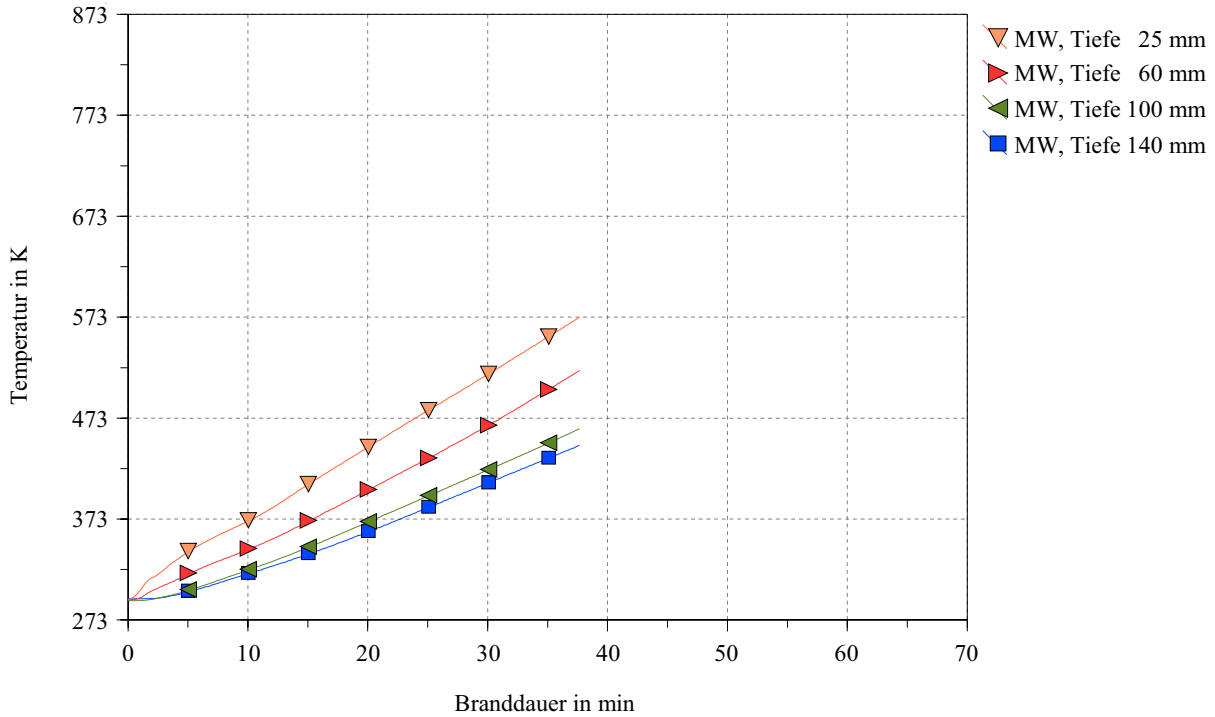
Vorbelastung: 141,60 kN

Stabdübeldurchmesser: 20 mm

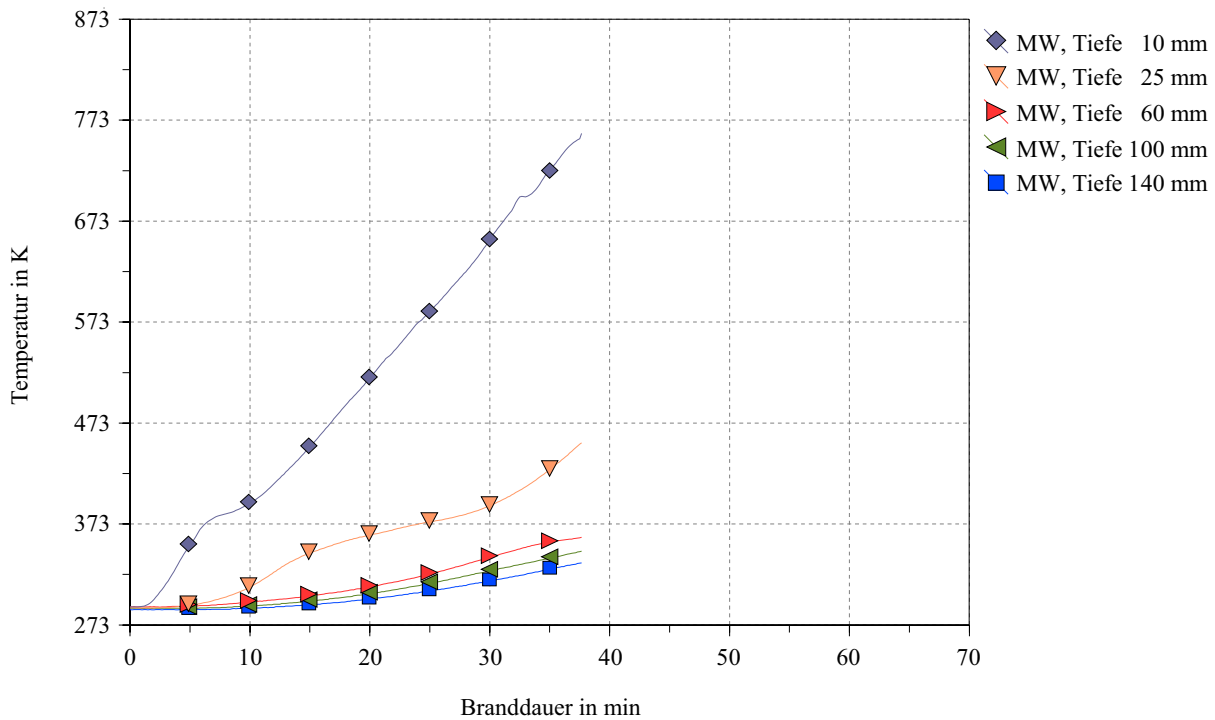
Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 280 mm

Stabdübeltemperaturen



Holztemperaturen im Abstand von $a = 20\text{ mm}$ zum Verbindungsmittel



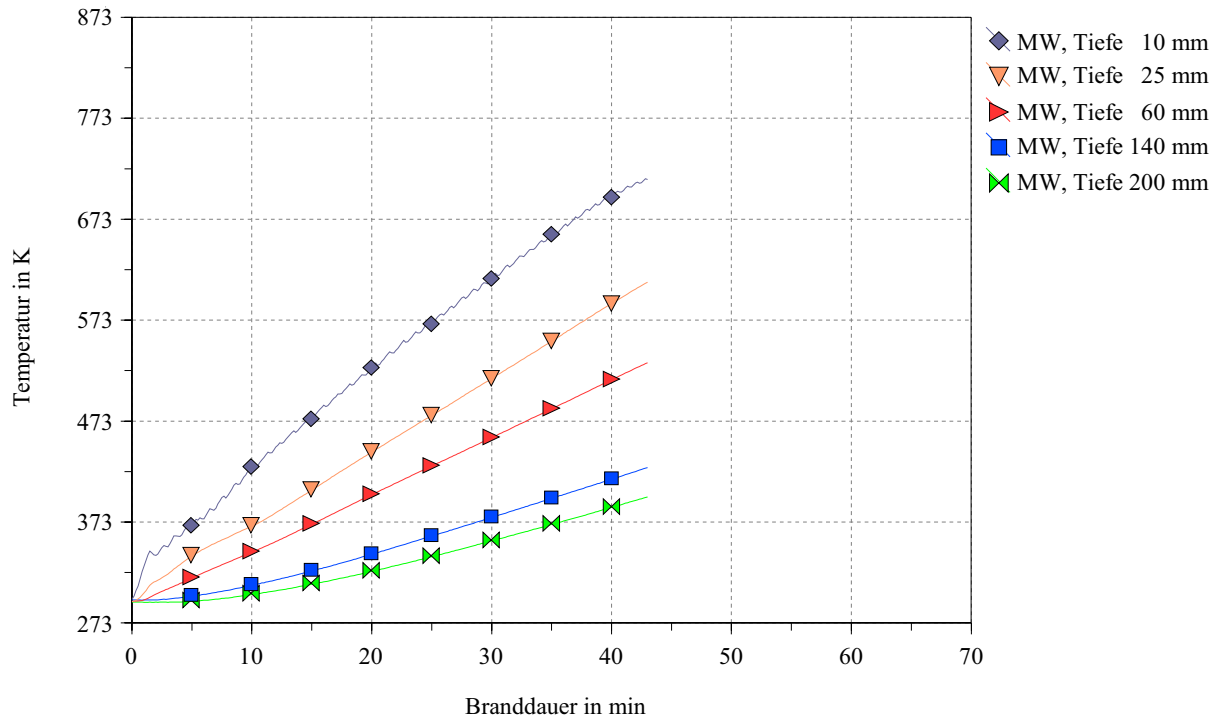
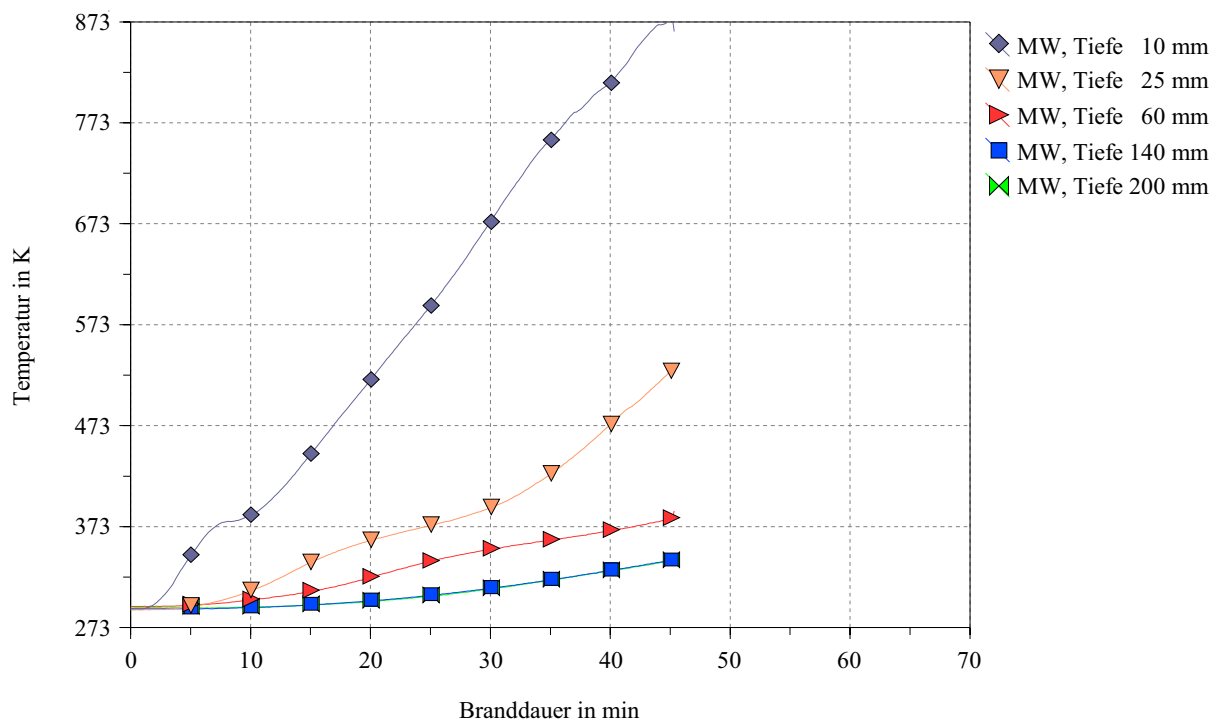
Probekörper Typ V

Vorbelastung: 183,30 kN

Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 400 mm

Stabdübeltemperaturen**Holztemperaturen im Abstand von $a = 20$ mm zum Verbindungsmittel**

Probekörper Typ VI

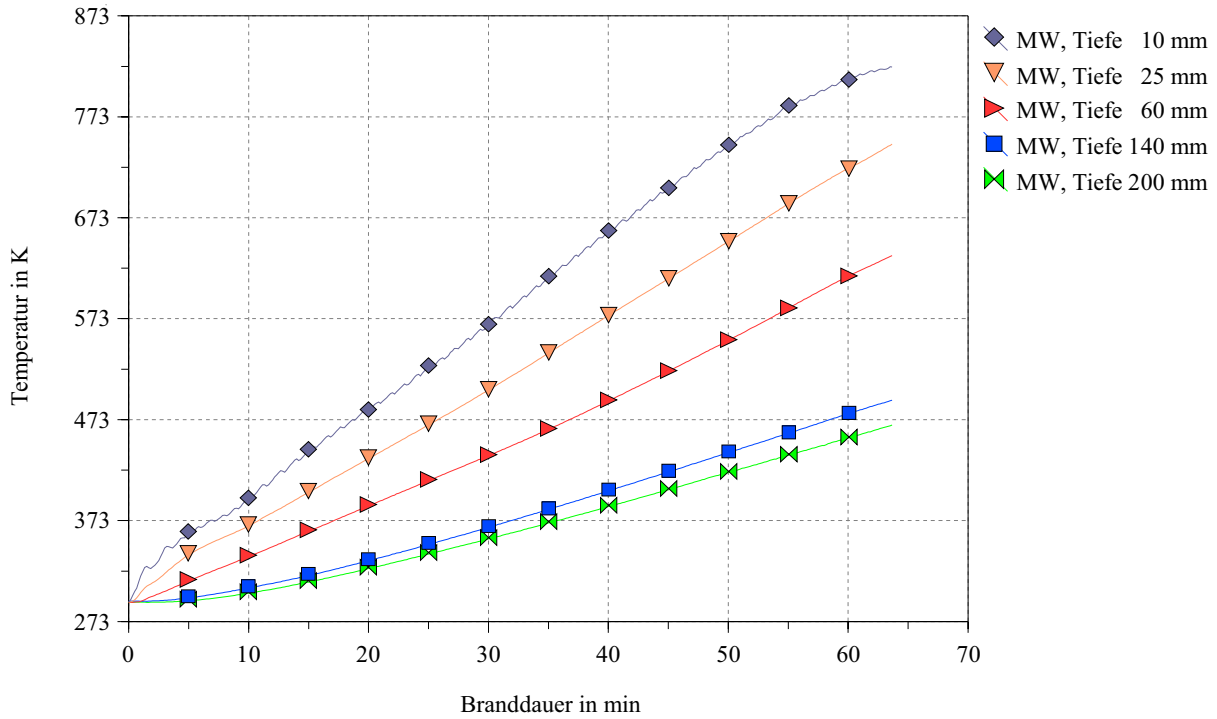
Vorbelastung: 114,20 kN

Stabdübeldurchmesser: 20 mm

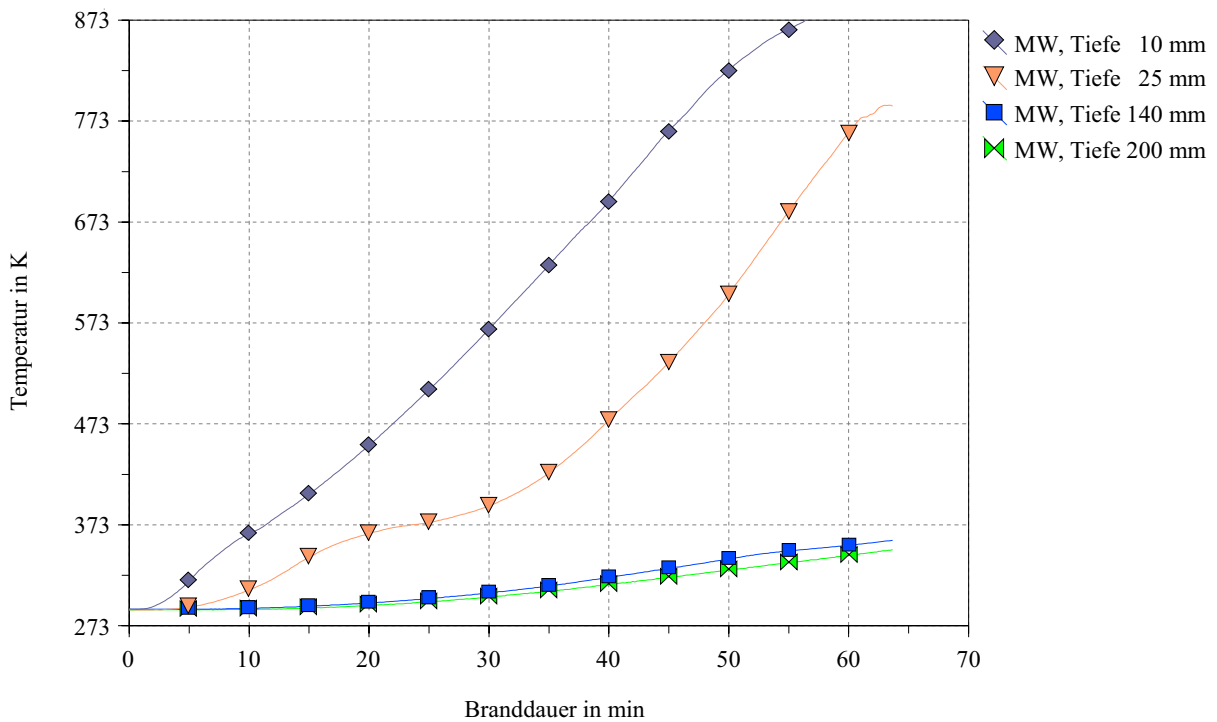
Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 400 mm

Stabdübeltemperaturen



Holztemperaturen im Abstand von a = 20 mm zum Verbindungsmittel



Anhang H

- Brandversuche - Verformungen der Verbindungen

Der Anhang H beinhaltet die grafische Darstellung der Verformungen der Verbindungen die während des Brandversuche aufgezeichnet wurden.

Für jeden Probekörper sind zwei Abbildungen angefertigt worden. In der ersten Abbildung erfolgte die Darstellung der Verformung die sich unter Aufbringung der Vorlast einstellte. Die zweite Abbildung gibt das Verhalten der Prüfstelle unter Brandbelastung bezüglich des Verformungsverhaltens über die Zeit wieder.

Die Aufzeichnungen der Verformungen der Vorbelastungs- und der Brandphase erfolgten getrennt. Aus diesem Grund wurde der Startwert für die Weg- und Zeitmessung innerhalb der Brandphase wieder auf Null gesetzt.

Probekörper Typ Ia

Versuchsdatum: 29.01.2004

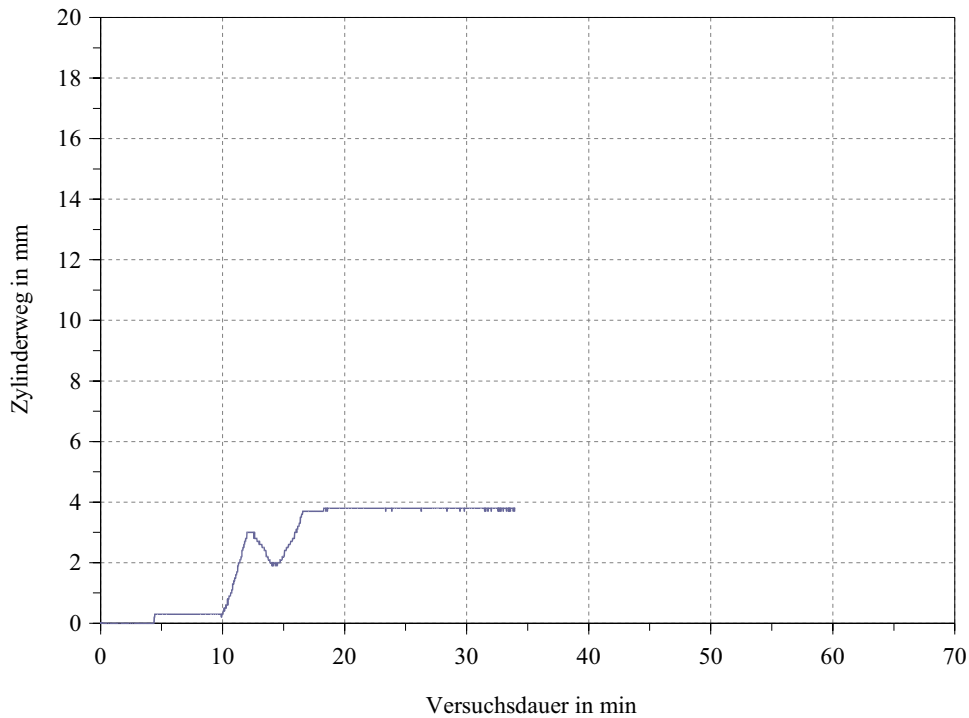
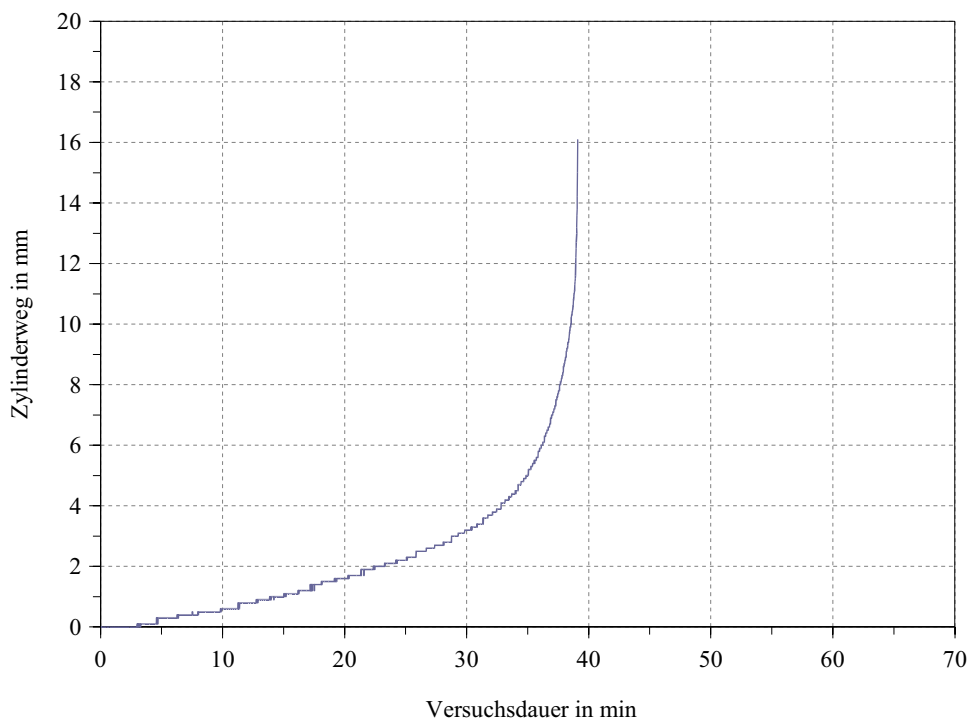
Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 200 mm

Belastung ($R_{k,fi}$): 59,0 kN

Stabdübelanzahl: 8 Stk

Zylinderweg in der kalten Phase des Versuches (Aufbringung der Vorlast $R_{k,fi}$)**Zylinderweg während des Brandversuches (Vorlast $R_{k,fi}$ konstant)**

Probekörper Typ Ib

Versuchsdatum: 03.02.2004

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

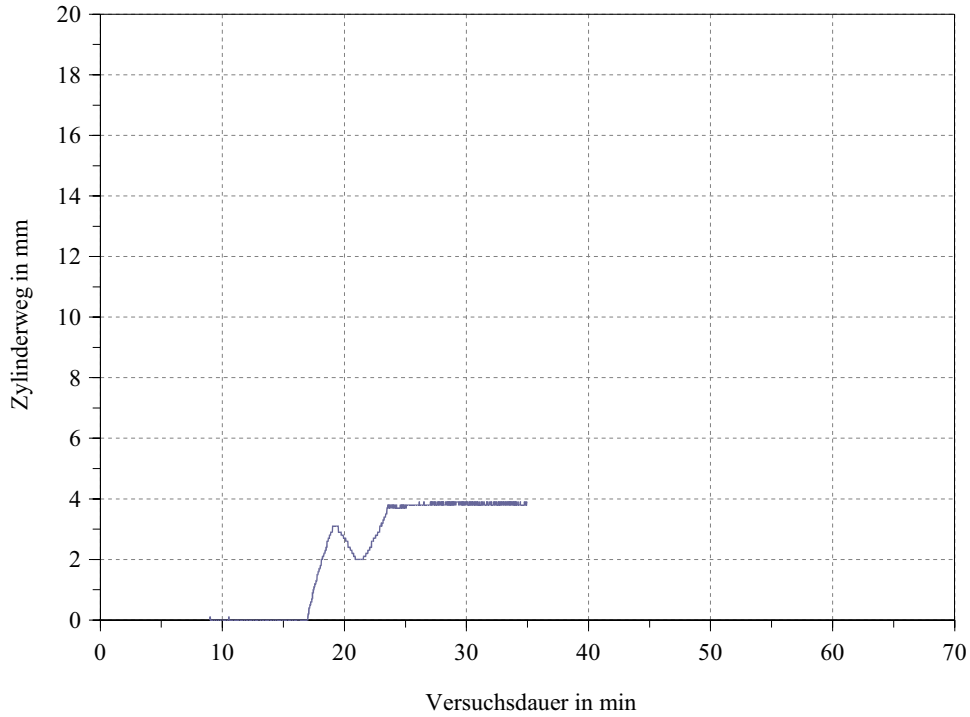
Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 200 mm

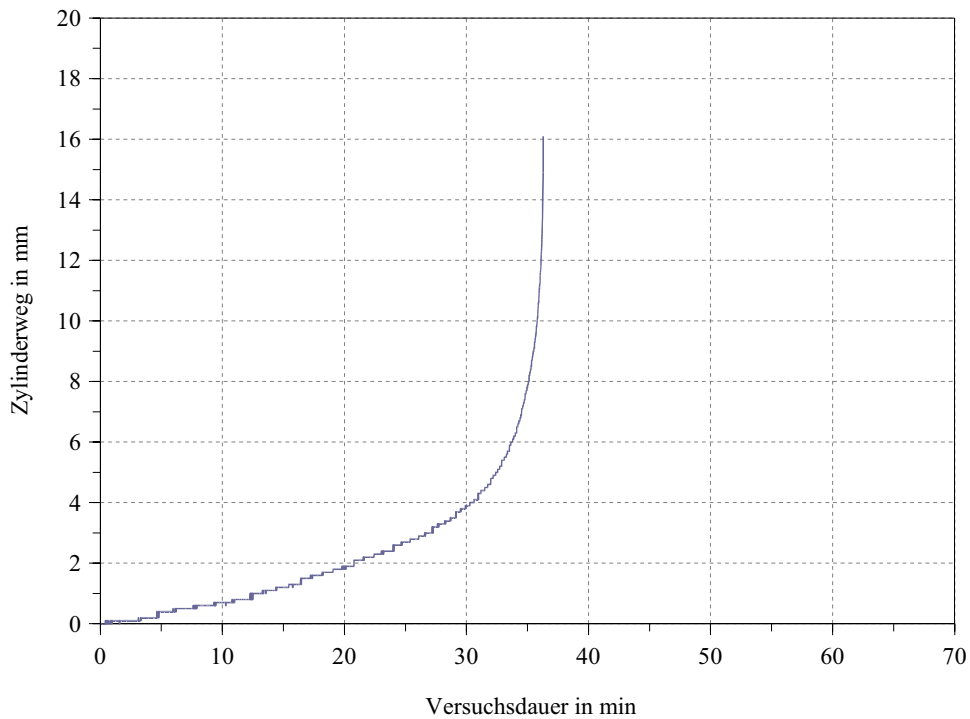
Belastung ($R_{k,fi}$): 59,0 kN

Stabdübelanzahl: 8 Stk

Zylinderweg in der kalten Phase des Versuches (Aufbringung der Vorlast $R_{k,fi}$)



Zylinderweg während des Brandversuches (Vorlast $R_{k,fi}$ konstant)



Probekörper Typ IIa

Versuchsdatum: 21.01.2004

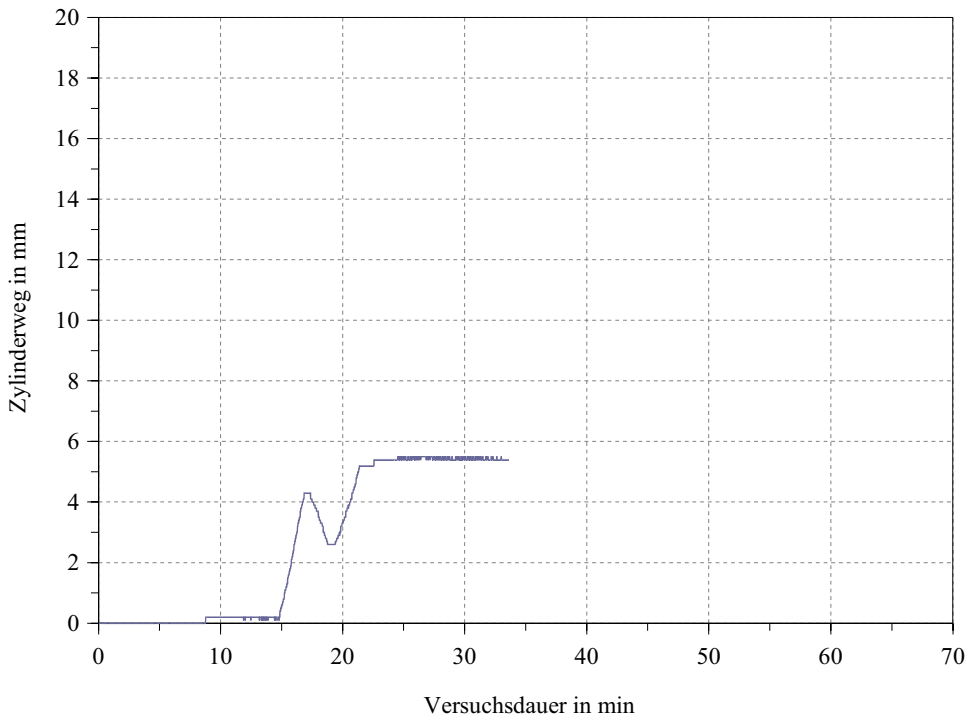
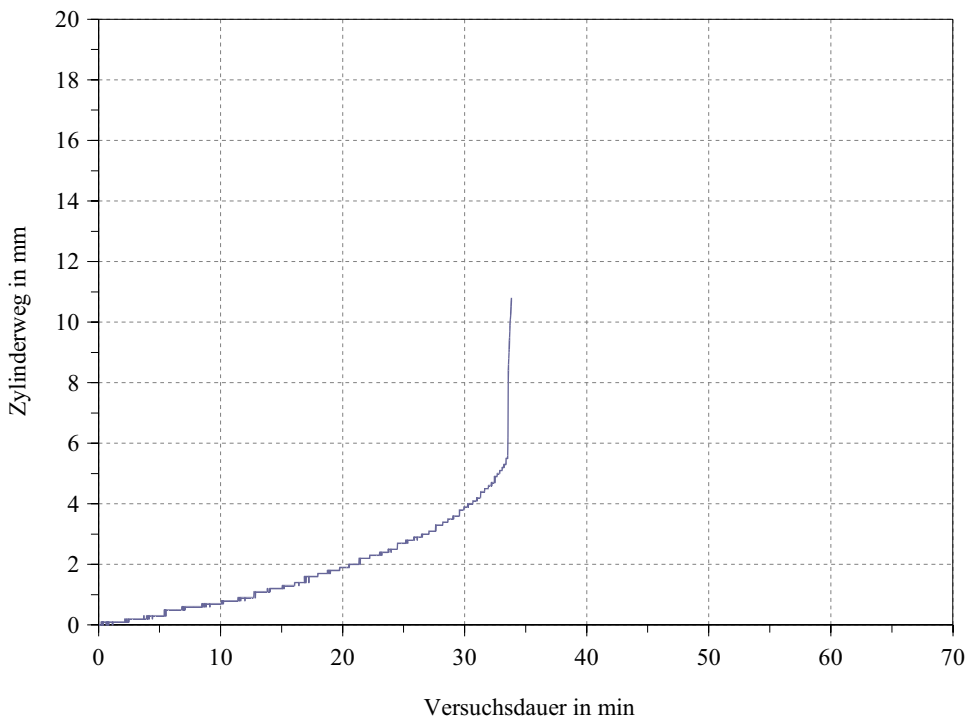
Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 200 mm

Belastung ($R_{k,fi}$): 110,1 kN

Stabdübelanzahl: 16 Stk

Zylinderweg in der kalten Phase des Versuches (Aufbringung der Vorlast $R_{k,fi}$)**Zylinderweg während des Brandversuches (Vorlast $R_{k,fi}$ konstant)**

Probekörper Typ IIb

Versuchsdatum: 27.01.2004

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

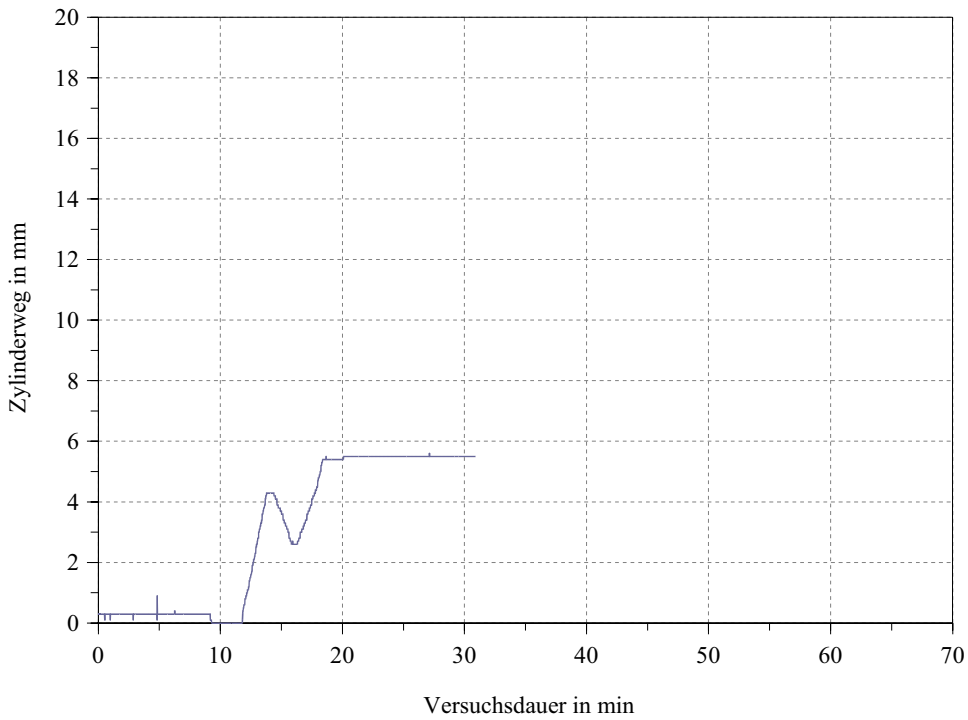
Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 200 mm

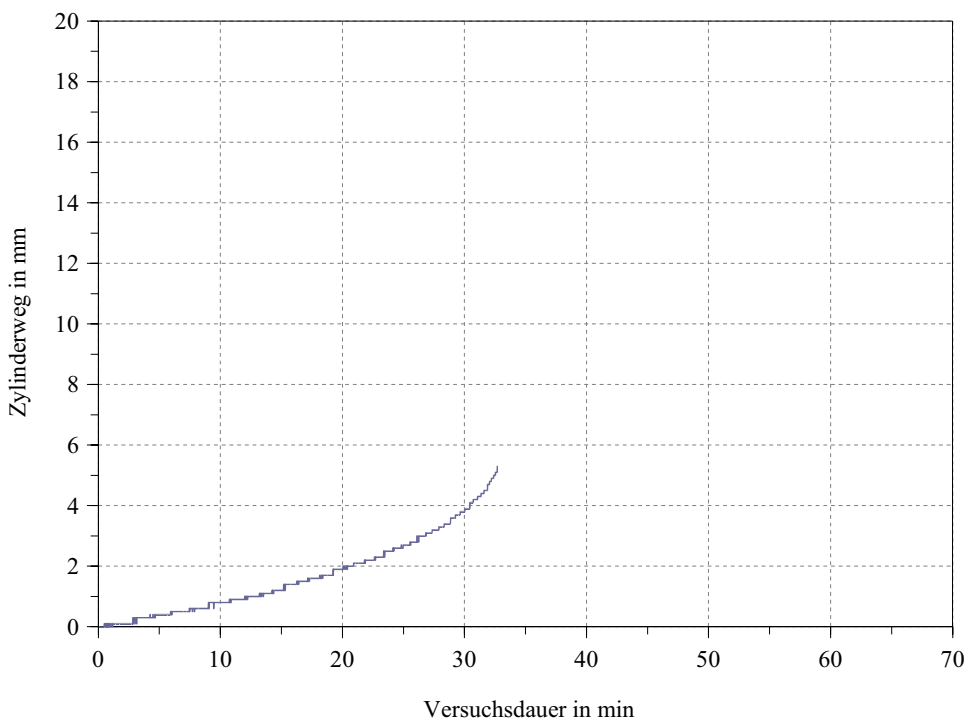
Belastung ($R_{k,fi}$): 110,1 kN

Stabdübelanzahl: 16 Stk

Zylinderweg in der kalten Phase des Versuches (Aufbringung der Vorlast $R_{k,fi}$)



Zylinderweg während des Brandversuches (Vorlast $R_{k,fi}$ konstant)



Probekörper Typ IIIa

Versuchsdatum: 15.01.2004

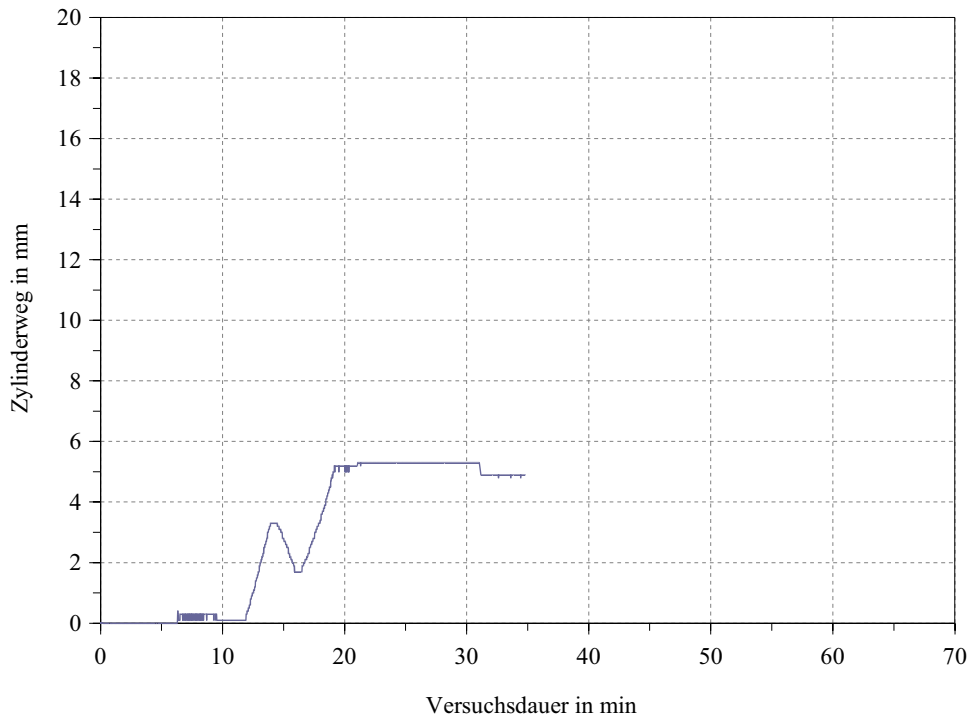
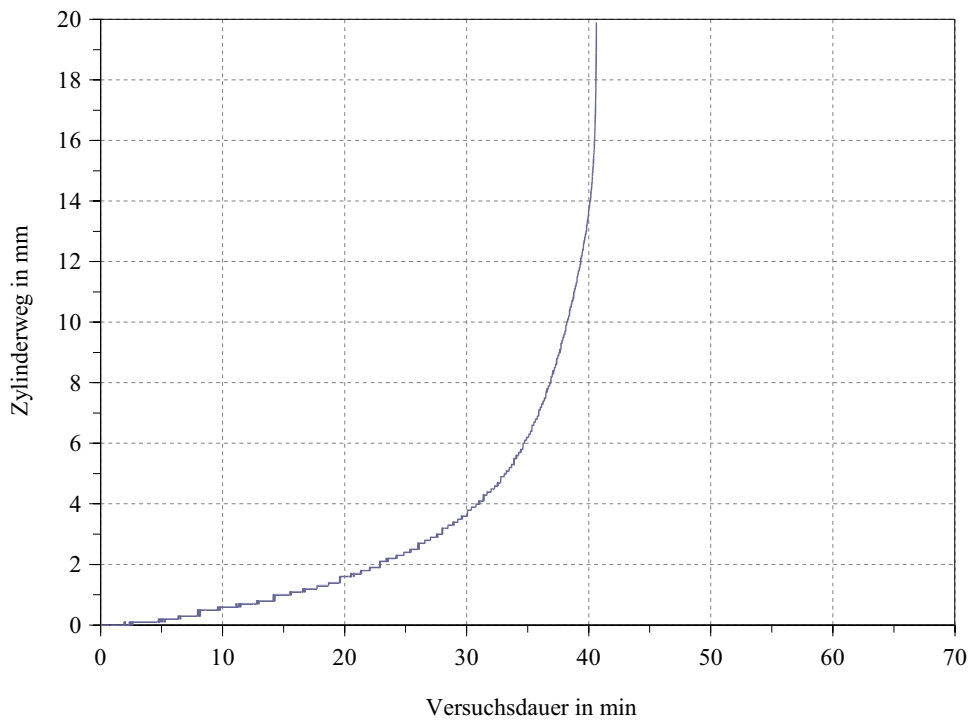
Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 280 mm

Belastung ($R_{k,fi}$): 140,2 kN

Stabdübelanzahl: 16 Stk

Zylinderweg in der kalten Phase des Versuches (Aufbringung der Vorlast $R_{k,fi}$)**Zylinderweg während des Brandversuches (Vorlast $R_{k,fi}$ konstant)**

Probekörper Typ IIIb

Versuchsdatum: 13.01.2004

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

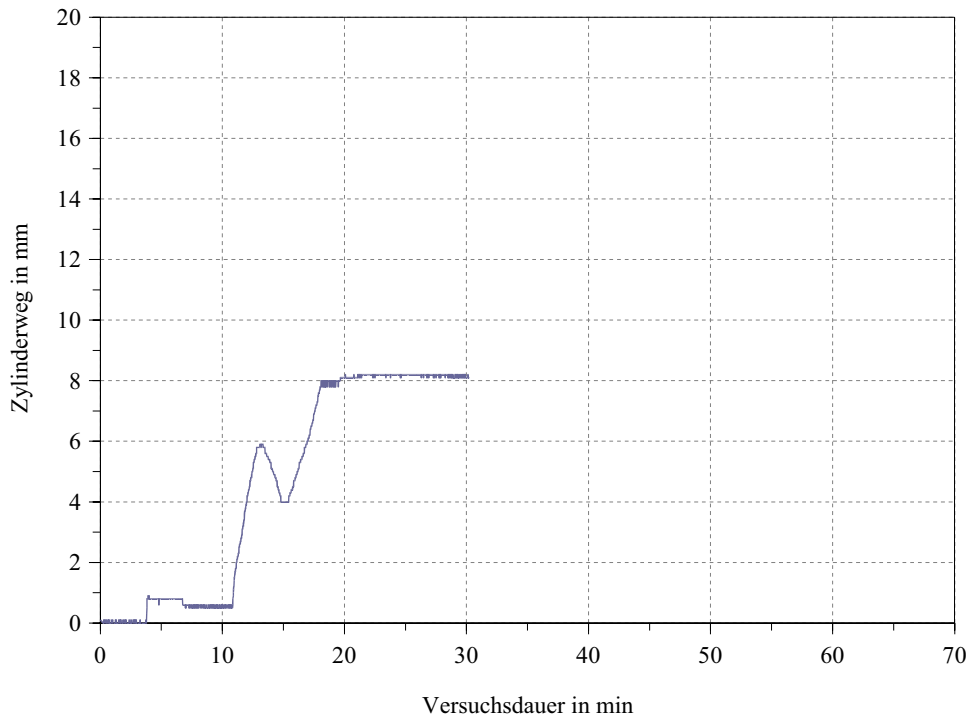
Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 280 mm

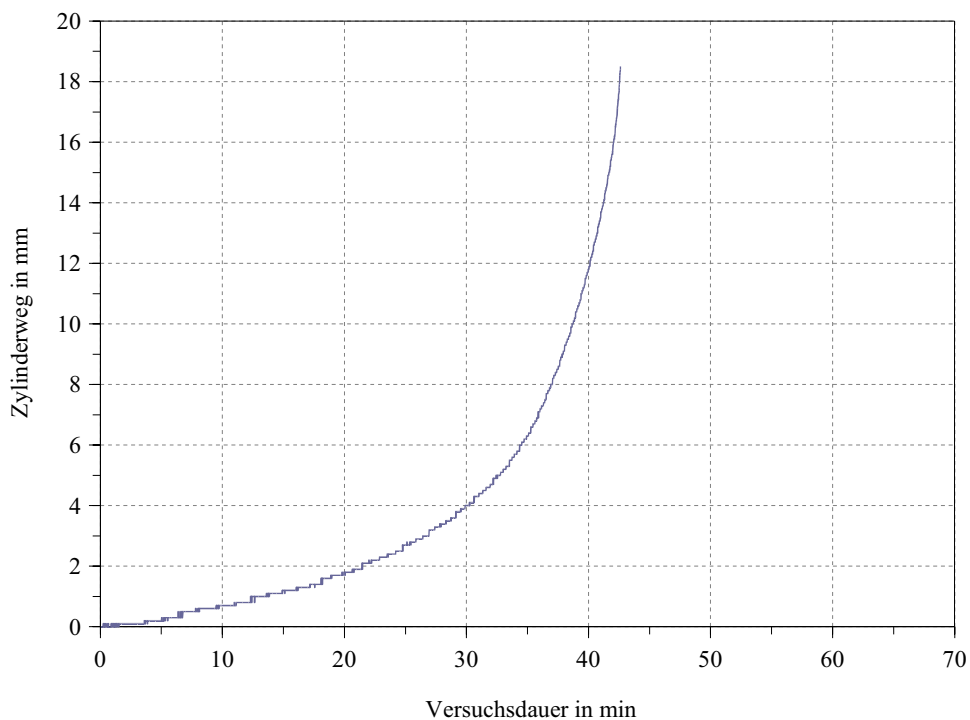
Belastung ($R_{k,fi}$): 140,2 kN

Stabdübelanzahl: 16 Stk

Zylinderweg in der kalten Phase des Versuches (Aufbringung der Vorlast $R_{k,fi}$)



Zylinderweg während des Brandversuches (Vorlast $R_{k,fi}$ konstant)



Probekörper Typ III Dummy

Versuchsdatum: 08.01.2004

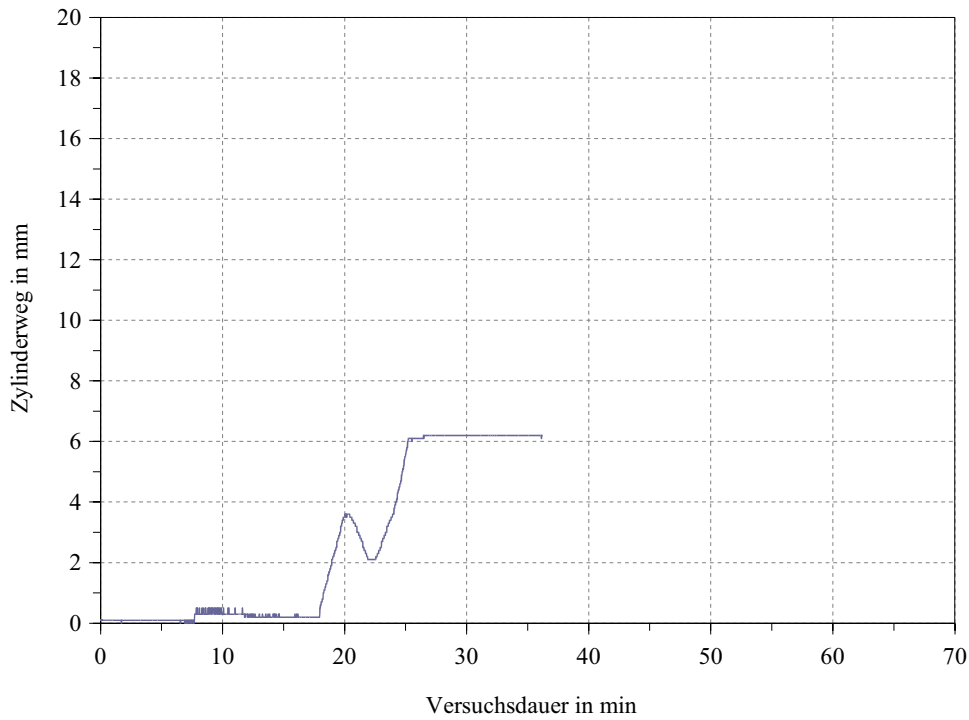
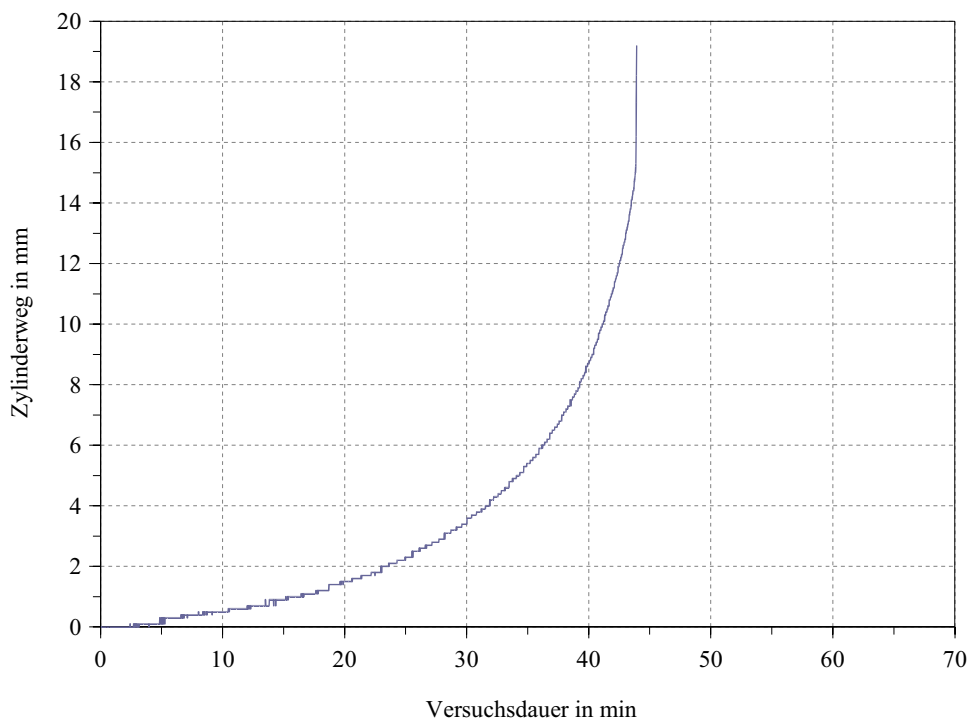
Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 280 mm

Belastung ($R_{k,fi}$): 140,2 kN

Stabdübelanzahl: 16 Stk

Zylinderweg in der kalten Phase des Versuches (Aufbringung der Vorlast $R_{k,fi}$)**Zylinderweg während des Brandversuches (Vorlast $R_{k,fi}$ konstant)**

Probekörper Typ IVa

Versuchsdatum: 10.02.2004

Stabdübeldurchmesser: 20 mm

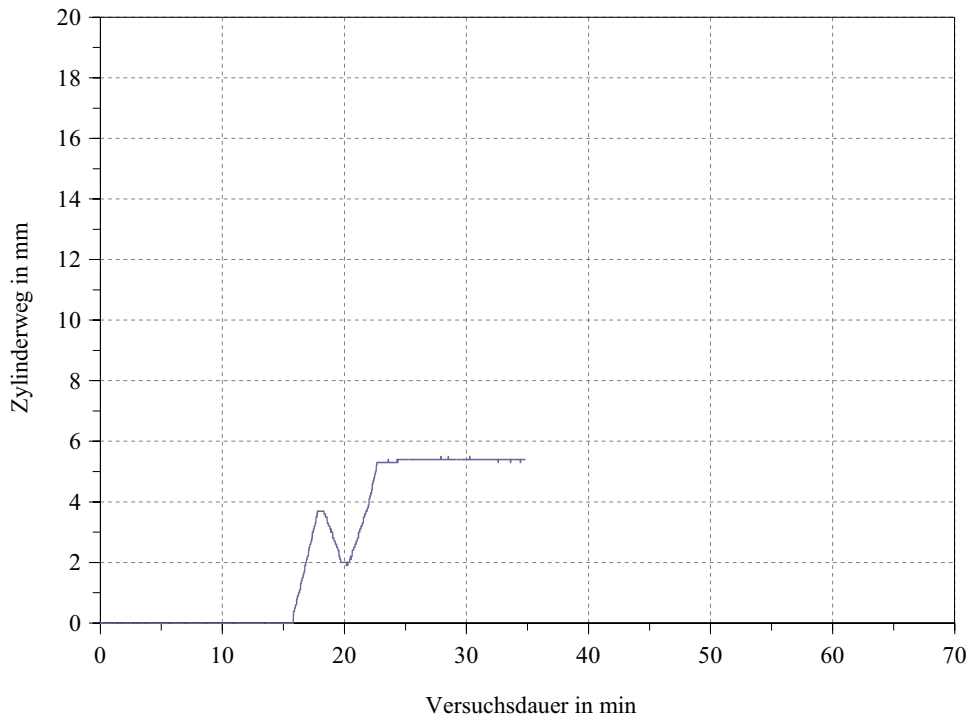
Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 280 mm

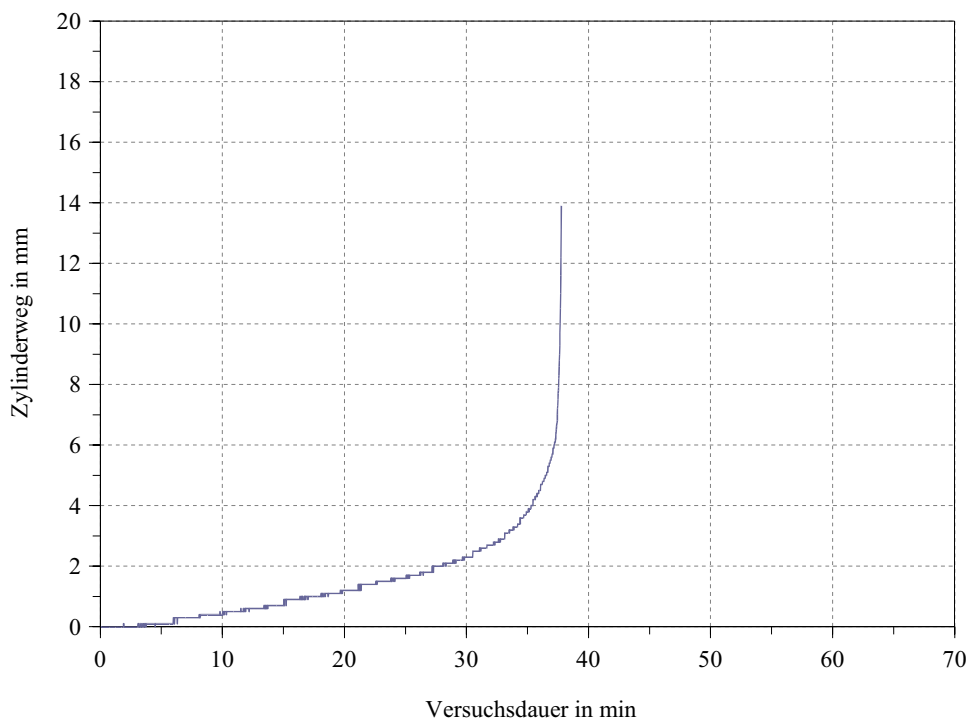
Belastung ($R_{k,fi}$): 141,6 kN

Stabdübelanzahl: 8 Stk

Zylinderweg in der kalten Phase des Versuches (Aufbringung der Vorlast $R_{k,fi}$)



Zylinderweg während des Brandversuches (Vorlast $R_{k,fi}$ konstant)



Probekörper Typ IVb

Versuchsdatum: 12.02.2004

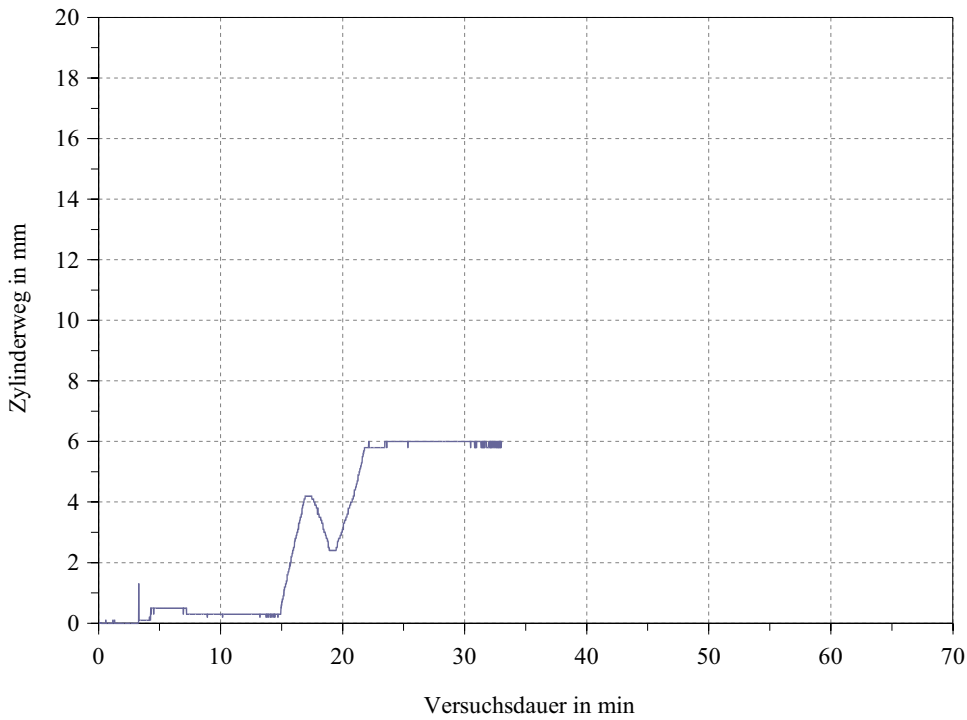
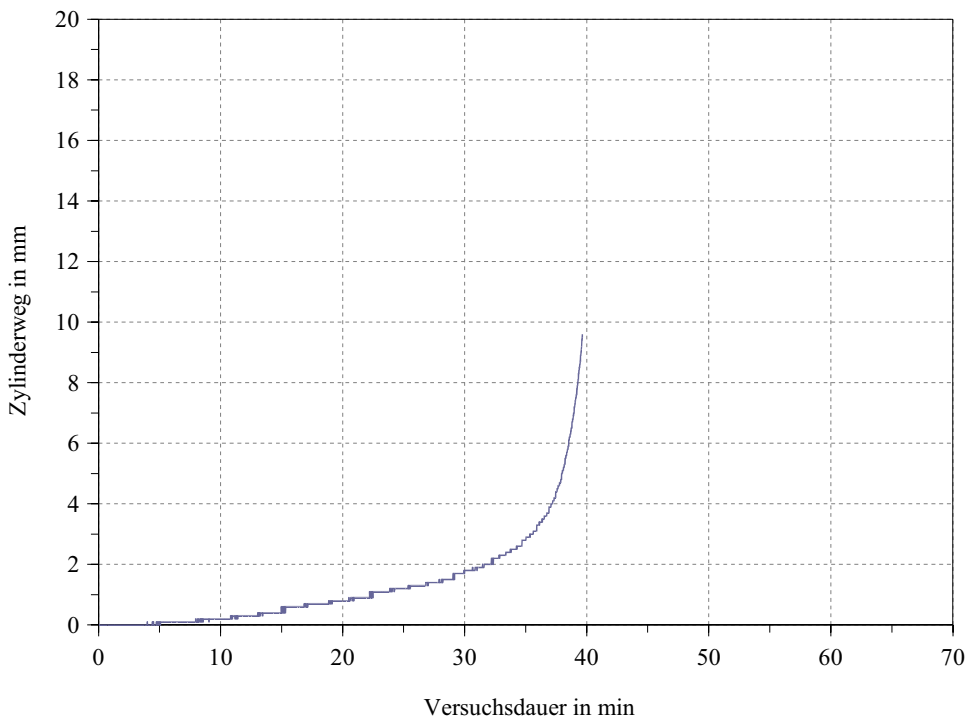
Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 280 mm

Belastung ($R_{k,fi}$): 141,6 kN

Stabdübelanzahl: 8 Stk

Zylinderweg in der kalten Phase des Versuches (Aufbringung der Vorlast $R_{k,fi}$)**Zylinderweg während des Brandversuches (Vorlast $R_{k,fi}$ konstant)**

Probekörper Typ Va

Versuchsdatum: 26.02.2004

Stabdübeldurchmesser: 20 mm

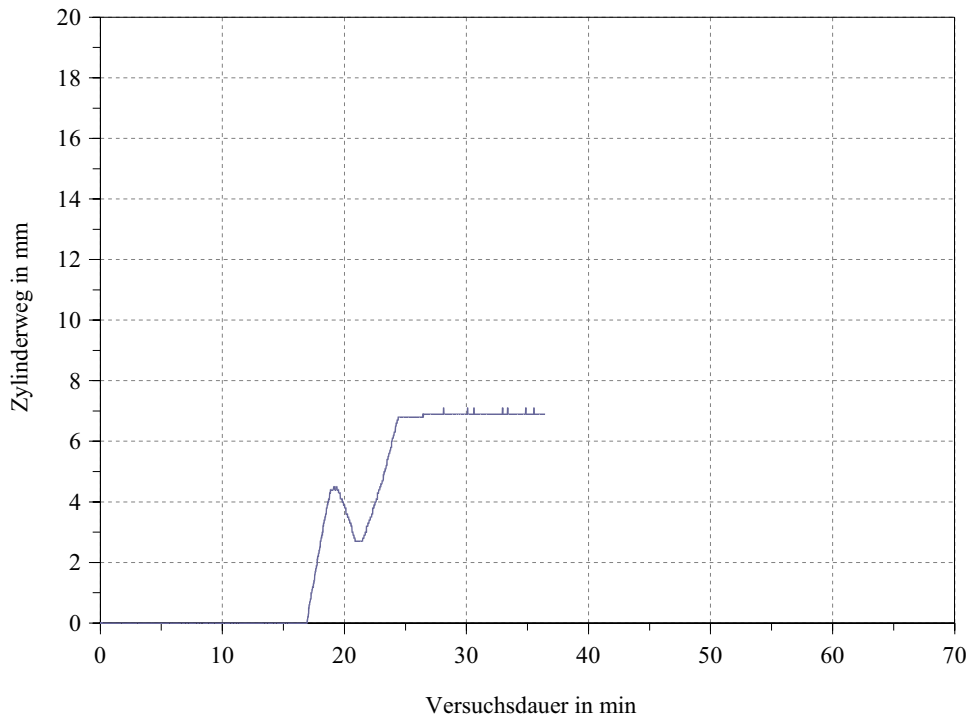
Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 400 mm

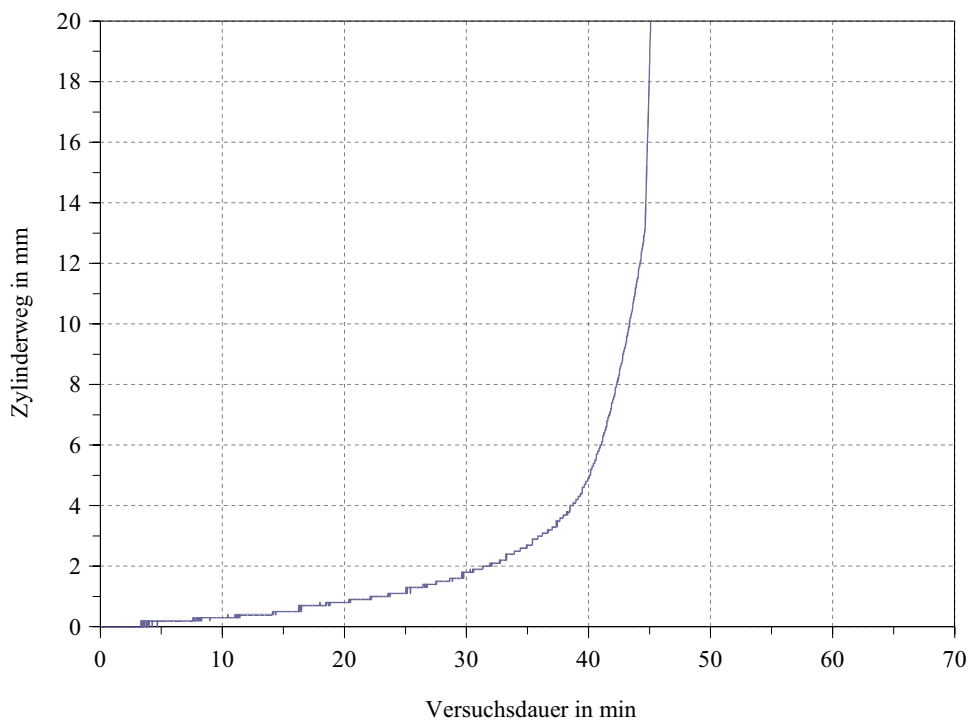
Belastung ($R_{k,fi}$): 183,3 kN

Stabdübelanzahl: 8 Stk

Zylinderweg in der kalten Phase des Versuches (Aufbringung der Vorlast $R_{k,fi}$)



Zylinderweg während des Brandversuches (Vorlast $R_{k,fi}$ konstant)



Probekörper Typ Vb

Versuchsdatum: 17.02.2004

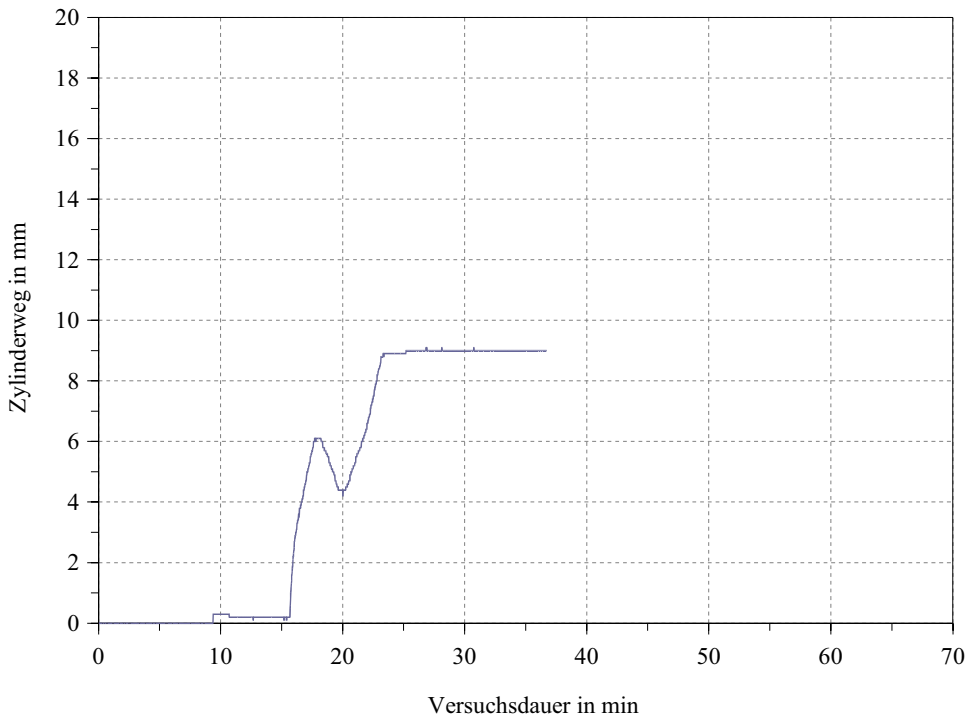
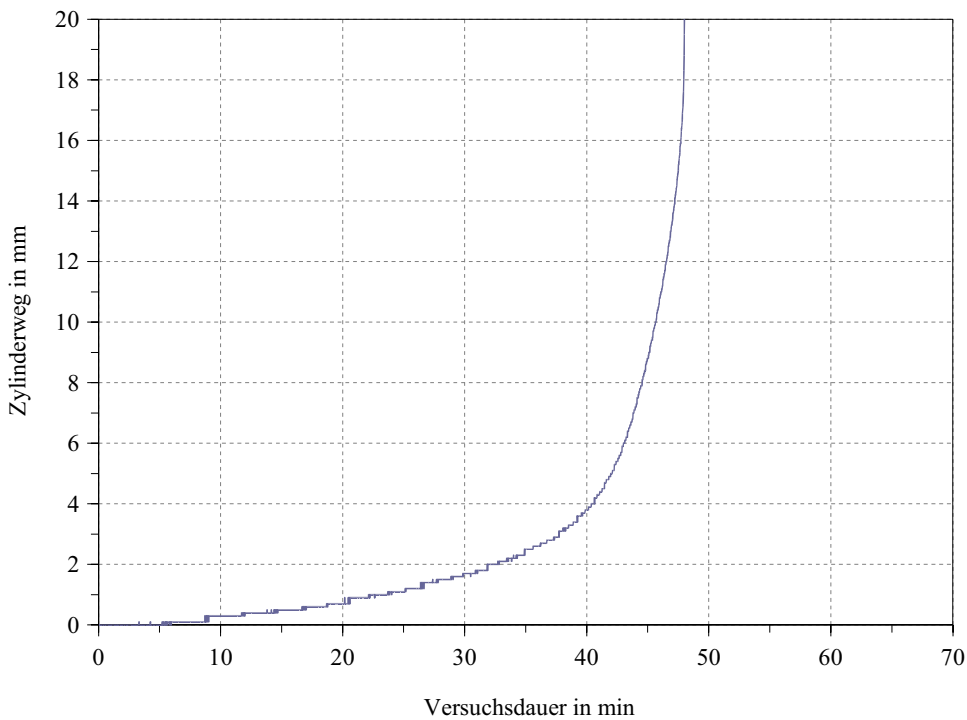
Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 400 mm

Belastung ($R_{k,fi}$): 183,3 kN

Stabdübelanzahl: 8 Stk

Zylinderweg in der kalten Phase des Versuches (Aufbringung der Vorlast $R_{k,fi}$)**Zylinderweg während des Brandversuches (Vorlast $R_{k,fi}$ konstant)**

Probekörper Typ VIa

Versuchsdatum: 24.02.2004

Stabdübeldurchmesser: 20 mm

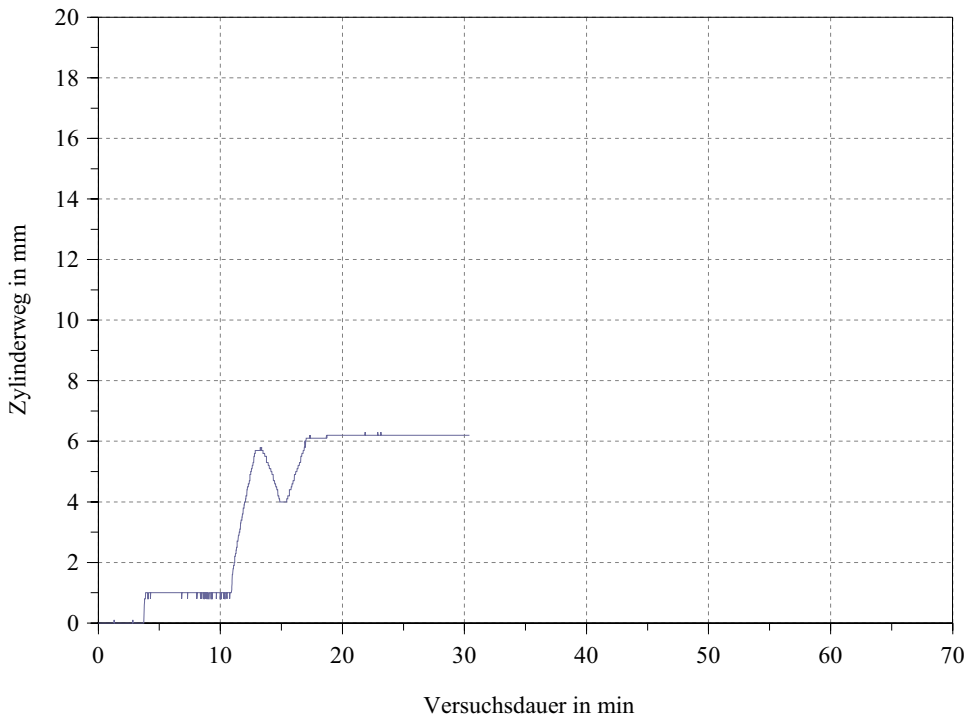
Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 400 mm

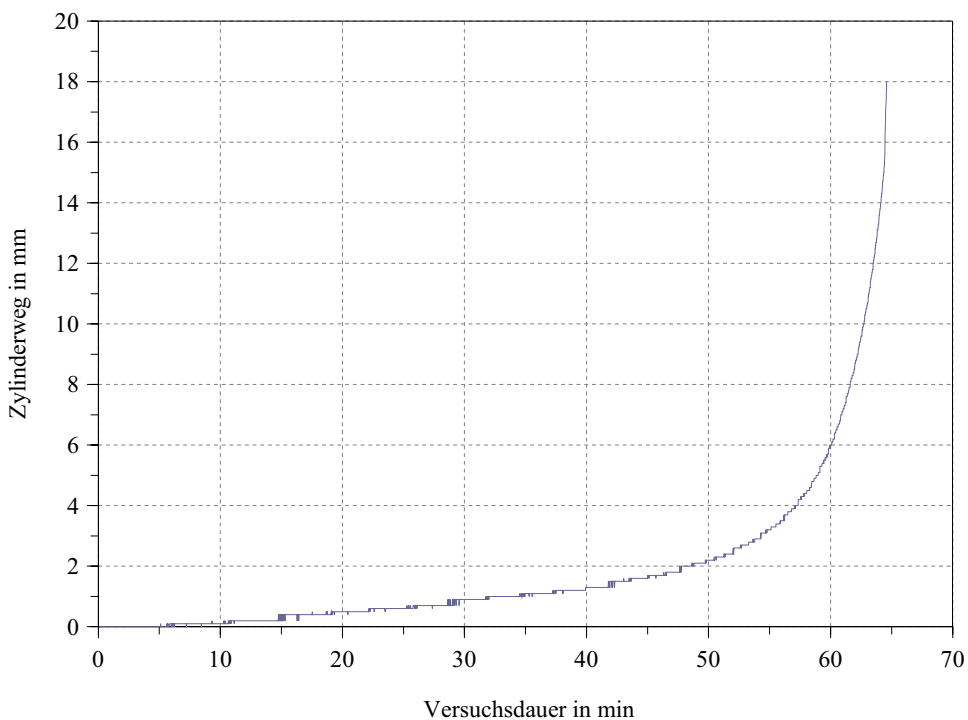
Belastung ($R_{k,fi}$): 114,1 kN

Stabdübelanzahl: 8 Stk

Zylinderweg in der kalten Phase des Versuches (Aufbringung der Vorlast $R_{k,fi}$)



Zylinderweg während des Brandversuches (Vorlast $R_{k,fi}$ konstant)



Probekörper Typ VIb

Versuchsdatum: 20.02.2004

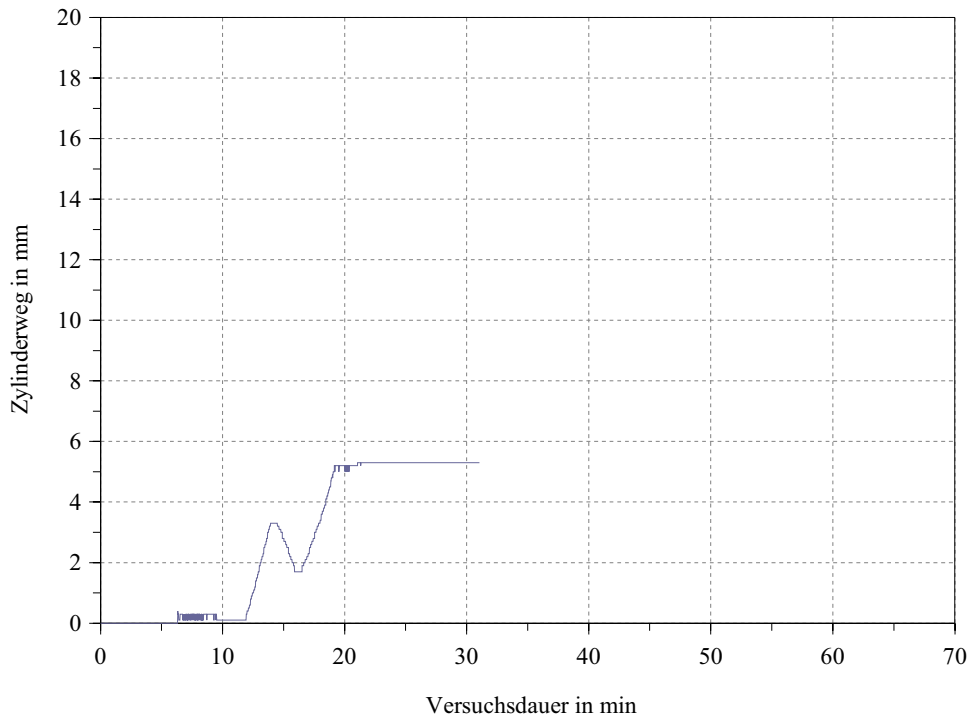
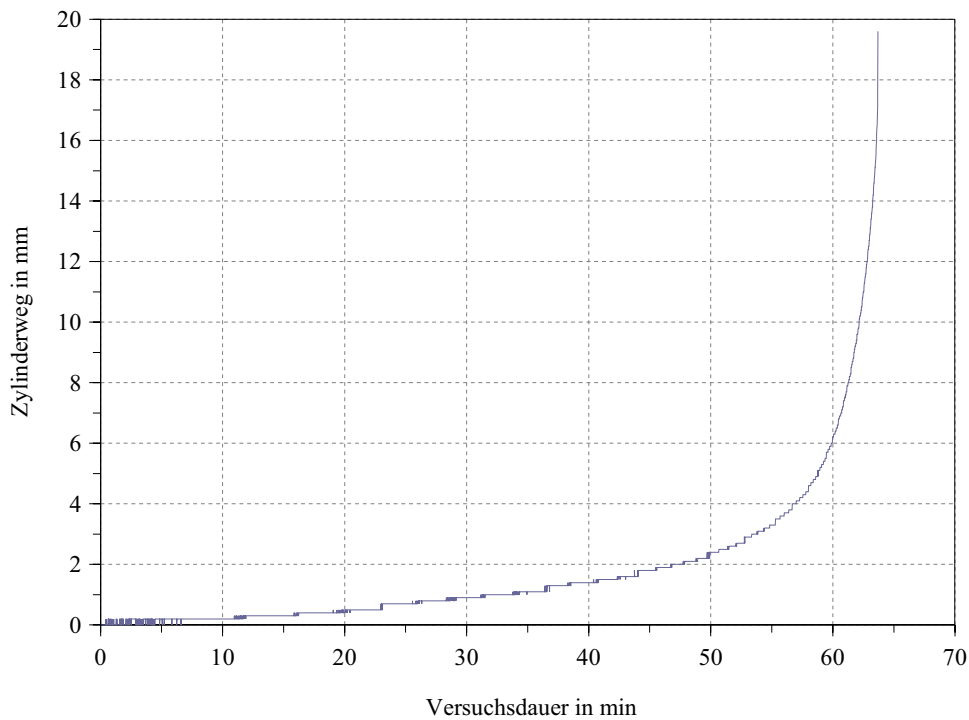
Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 400 mm

Belastung ($R_{k,fi}$): 114,1 kN

Stabdübelanzahl: 8 Stk

Zylinderweg in der kalten Phase des Versuches (Aufbringung der Vorlast $R_{k,fi}$)**Zylinderweg während des Brandversuches (Vorlast $R_{k,fi}$ konstant)**

Anhang I

Verformung der Verbindungsmittel

Zur Ermittlung der Versagensfälle nach K.W. Johansen [8] wurden die Stabdübel nach den Versuchen aus den Probekörpern ausgebaut und vermessen. Im nachfolgenden Abschnitt sind jeweils die charakteristische Stabdübel der entsprechenden Verbindung dargestellt und klassifiziert. Das Rastermaß der Unterlage beträgt 8 mm. An dieser Stelle sei angemerkt, dass nicht alle Stabdübel sich für eine Bestimmung des Versagensfalls geeignet haben. Zu begründen ist dieser Umstand mit dem Aufbau und der Verfahrensweise der Prüfeinrichtung.

Aufgrund der kraftgesteuerten Aufbringung der Zugkraft war es nicht möglich sofort nach Versagen der Verbindung den Versuch abubrechen. Daher resultierte eine erhöhte Belastung einzelner Stabdübel während andere Stabdübel der gleichen Verbindung bereits keine Kräfte mehr aufnehmen mussten. Folglich kam es zu Verformungen an einzelnen Stabdübeln, die nicht repräsentativ für die Ermittlung des Versagensfalls sein können.

Probekörper Typ I (Kaltversuch)

Versuchsdatum: 19.11.2003

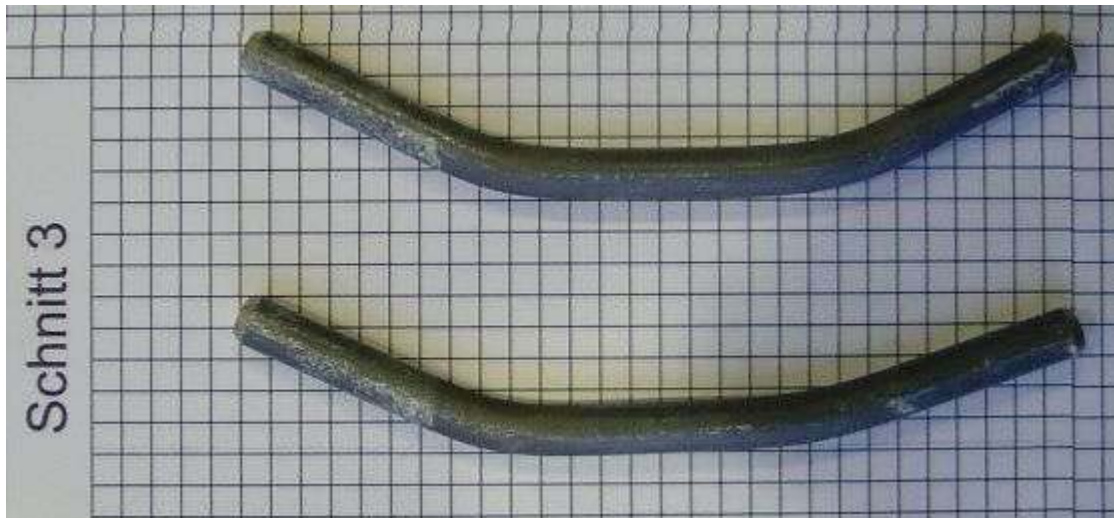
Prüfung: Belastungsverfahren

Höchstlast (F_{\max}): 159,0 kN

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Stabdübellänge: 200 mm

Stabdübelanzahl: 8 Stk

**Versagensfall 3****Probekörper Typ Ia (Brandversuch)**

Versuchsdatum: 29.01.2004

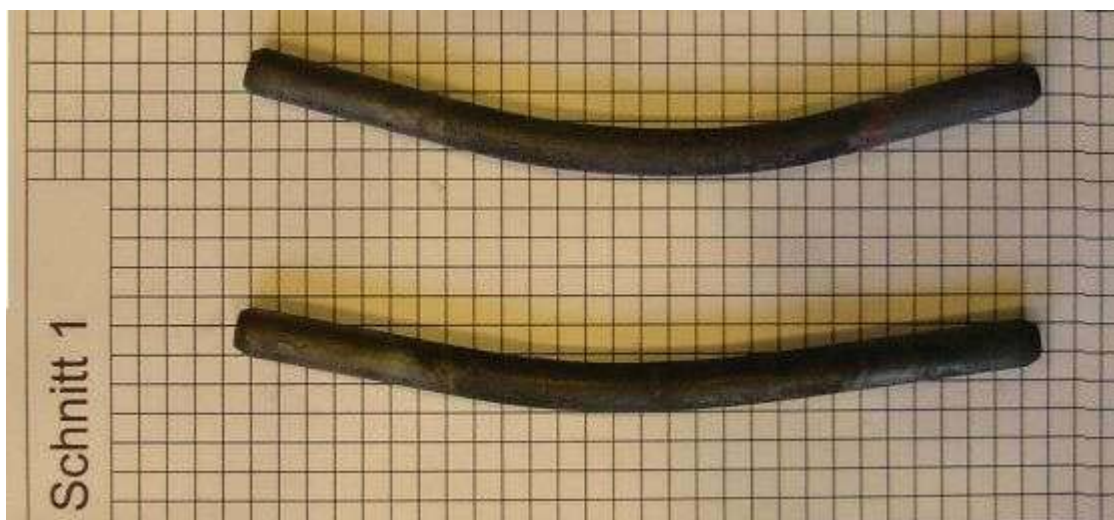
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Versuchsdauer: 39,10 min

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Stabdübellänge: 200 mm

Vorbelastung: 59,10 kN

**Versagensfall 3**

Probekörper Typ Ib (Brandversuch)

Versuchsdatum: 03.02.2004

Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Versuchsdauer: 36,28 min

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Stabdübellänge: 200 mm

Vorbelastung: 59,10 kN

**Versagensfall 3****Probekörper Typ II (Kaltversuch)**

Versuchsdatum: 14.11.2003

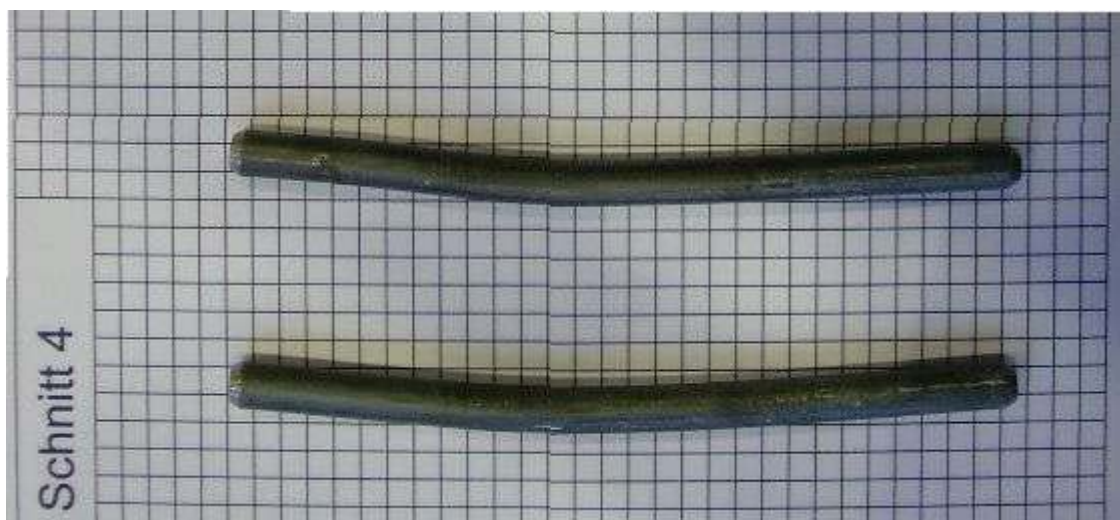
Prüfung: Belastungsverfahren

Höchstlast (F_{max}): 280,4 kN

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Stabdübellänge: 200 mm

Stabdübelanzahl: 16 Stk

**Versagensfall 1**

Probekörper Typ IIa (Brandversuch)

Versuchsdatum: 21.01.2004

Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Versuchsdauer: 33,82 min

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Stabdübellänge: 200 mm

Vorbelastung: 110,30 kN

**Versagensfall 1****Probekörper Typ IIb (Brandversuch)**

Versuchsdatum: 27.01.2004

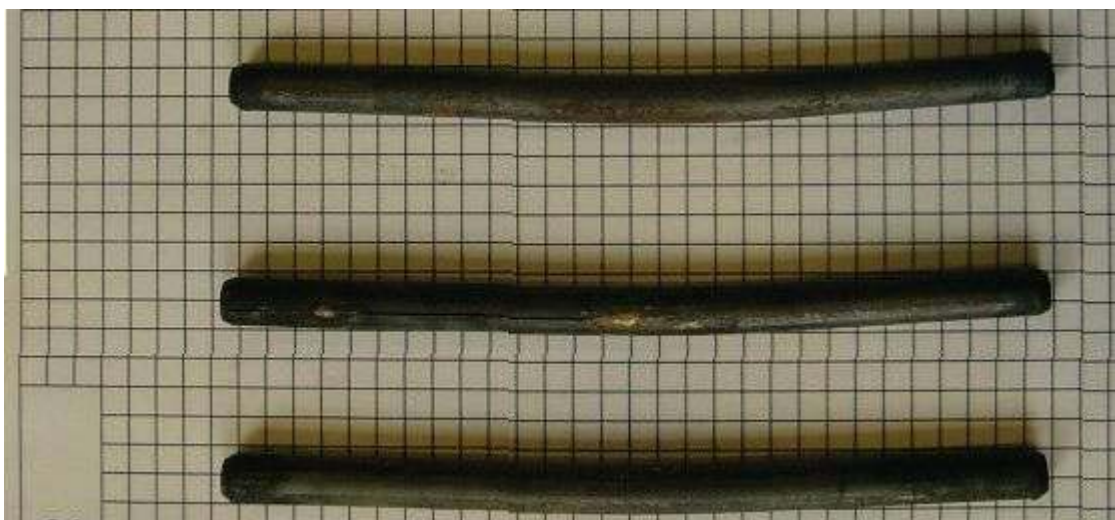
Brandbelastung: Einheits-Temperaturzeitkurve

Versuchsdauer: 32,72 min

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Stabdübellänge: 200 mm

Vorbelastung: 110,30 kN

**Versagensfall 1**

Probekörper Typ III (Kaltversuch)

Versuchsdatum: 13.11.2003

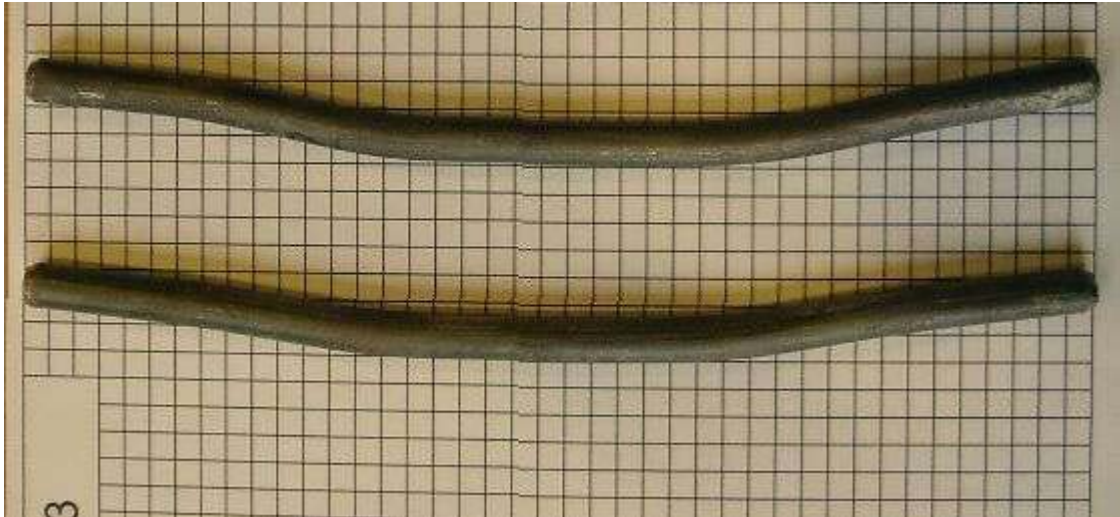
Prüfung: Belastungsverfahren

Höchstlast (F_{\max}): 319,0 kN

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Stabdübellänge: 280 mm

Stabdübelanzahl: 16 Stk

**Versagensfall 4****Probekörper Typ IIIa (Brandversuch)**

Versuchsdatum: 15.01.2004

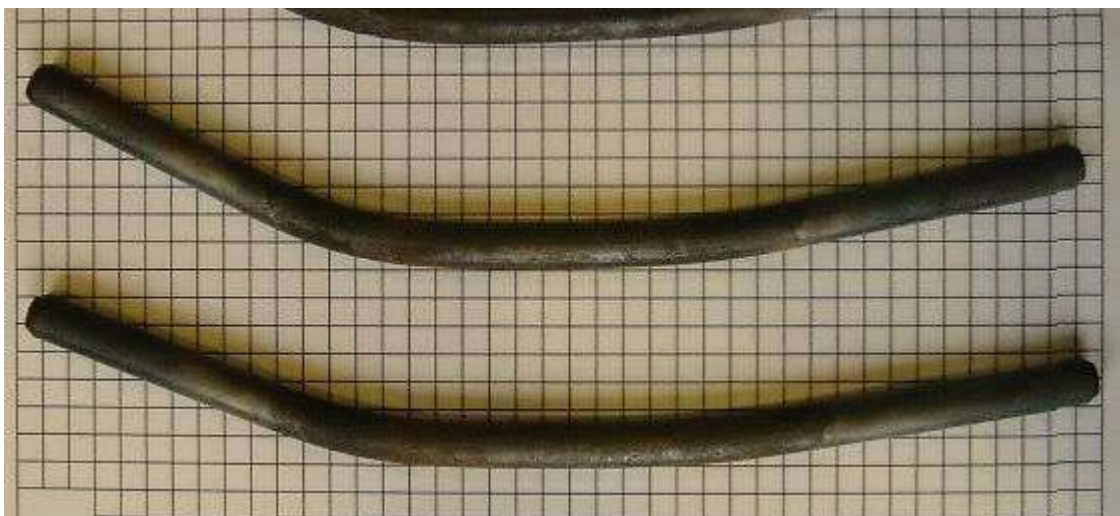
Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Versuchsdauer: 40,65 min

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Stabdübellänge: 280 mm

Vorbelastung: 140,20 kN

**Versagensfall 3**

Probekörper Typ IIIb (Brandversuch)

Versuchsdatum: 13.01.2004

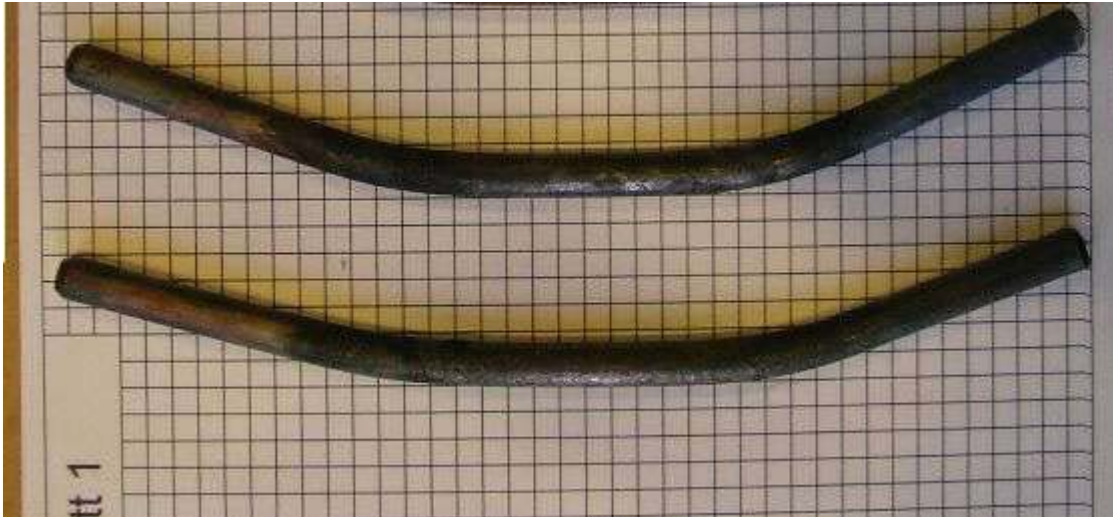
Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Versuchsdauer: 42,62 min

Stabdübeldurchmesser: 12 mm

Stabdübellänge: 280 mm

Vorbelastung: 140,20 kN

**Versagensfall 3****Probekörper Typ IV (Kaltversuch)**

Versuchsdatum: 13.11.2003

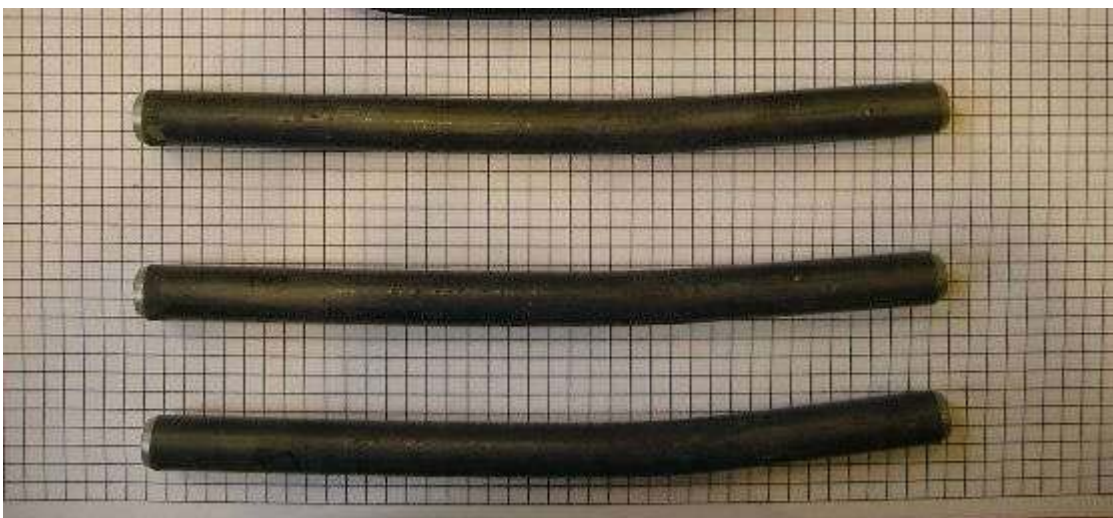
Prüfung: Belastungsverfahren

Höchstlast (F_{\max}): 301,7 kN

Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Stabdübellänge: 400 mm

Stabdübelanzahl: 8 Stk

**Versagensfall 1**

Probekörper Typ IVa (Brandversuch)

Versuchsdatum: 05.02.2004

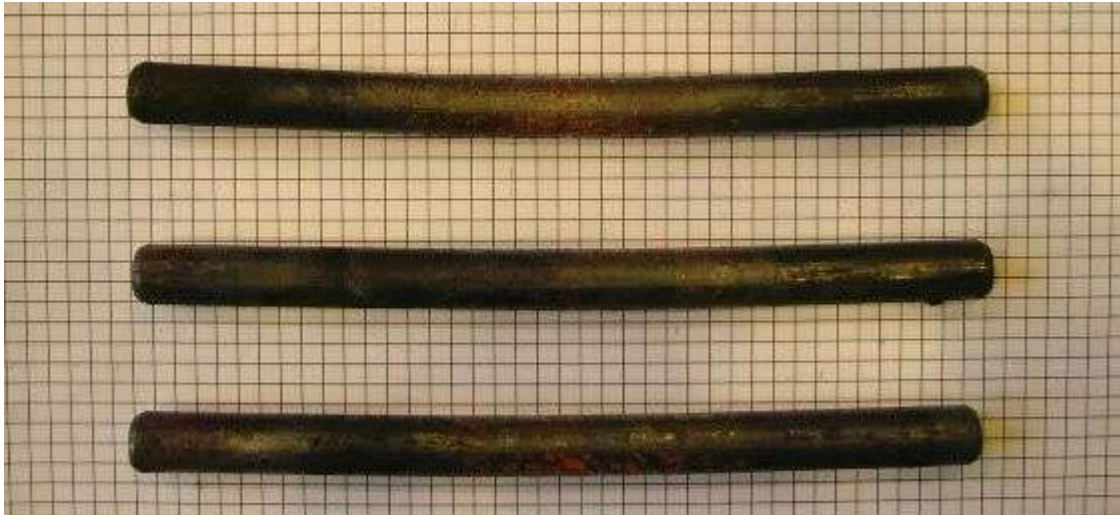
Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 280 mm

Versuchsdauer: 37,78 min

Vorbelastung: 141,60 kN

**Versagensfall 1****Probekörper Typ IVb (Brandversuch)**

Versuchsdatum: 12.02.2004

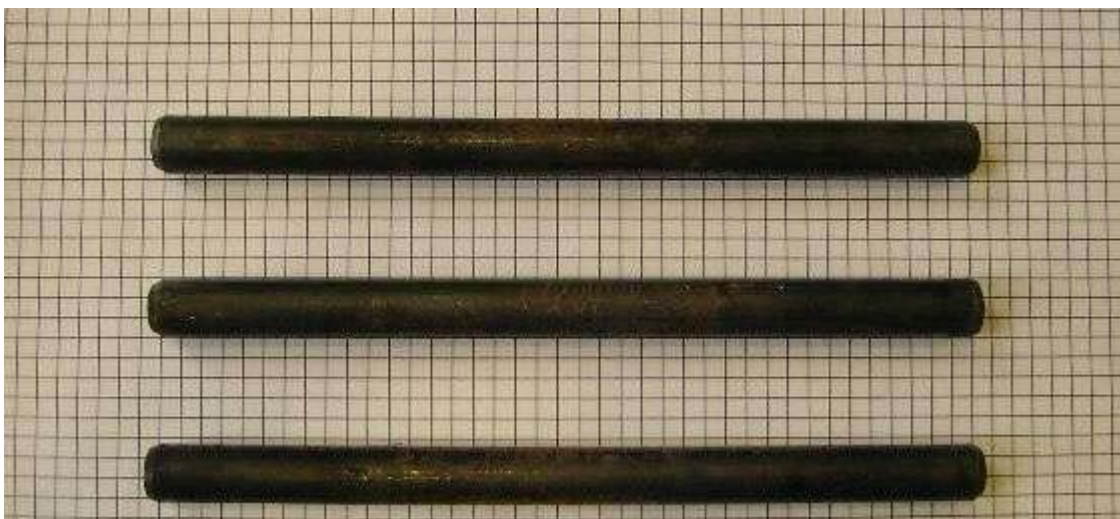
Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 280 mm

Versuchsdauer: 39,65 min

Vorbelastung: 141,60 kN

**Versagensfall 1**

Probekörper Typ V (Kaltversuch)

Versuchsdatum: 19.11.2003

Prüfung: Belastungsverfahren

Höchstlast (F_{\max}): 395,6 kN

Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Stabdübellänge: 400 mm

Stabdübelanzahl: 8 Stk

**Versagensfall 1****Probekörper Typ Va (Brandversuch)**

Versuchsdatum: 20.02.2004

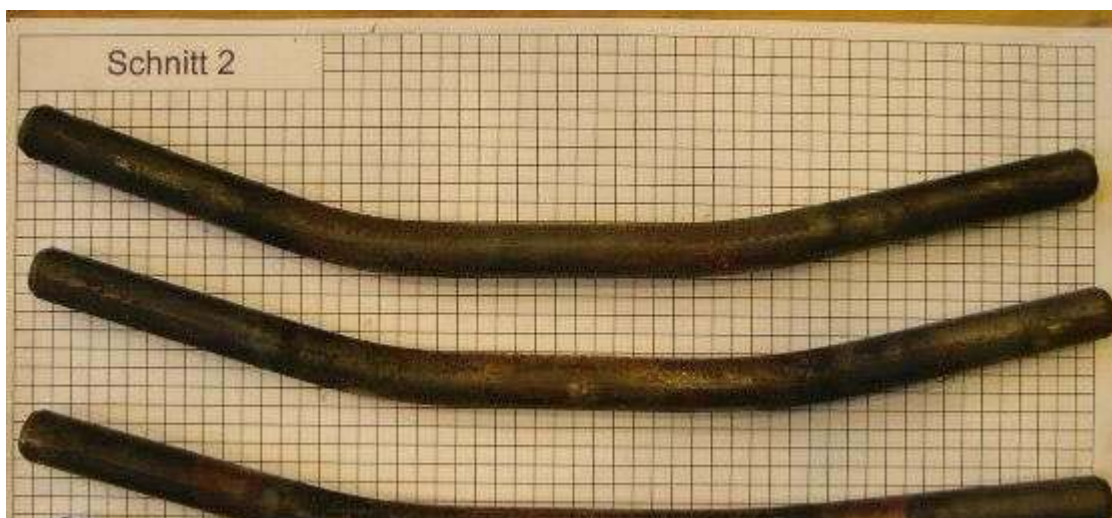
Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Versuchsdauer: 45,18 min

Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Stabdübellänge: 400 mm

Vorbelastung: 183,30 kN

**Versagensfall 3**

Probekörper Typ Vb (Brandversuch)

Versuchsdatum: 12.02.2004

Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Brandlast: Einheits-Temperaturzeitkurve

Stabdübellänge: 400 mm

Versuchsdauer: 48,07 min

Vorbelastung: 183,30 kN

**Versagensfall 3****Probekörper Typ VI (Kaltversuch)**

Versuchsdatum: 20.11.2003

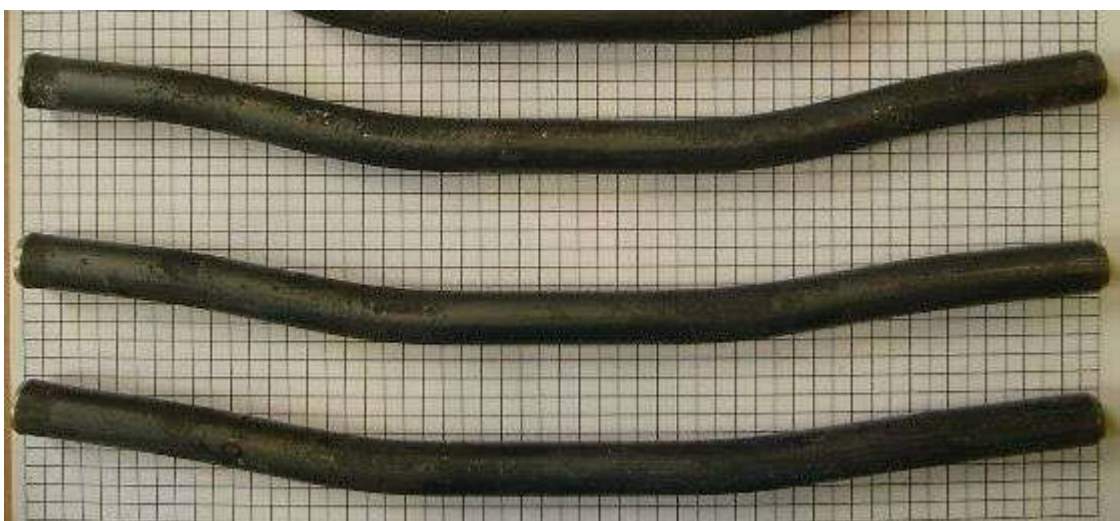
Stabdübeldurchmesser: 20 mm

Prüfung: Belastungsverfahren

Stabdübellänge: 400 mm

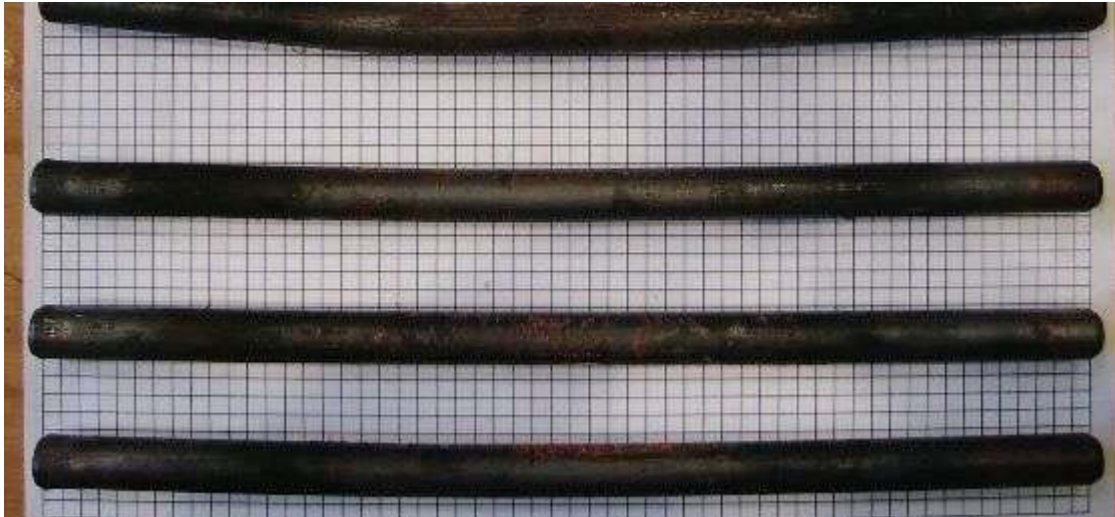
Höchstlast (F_{\max}): 400,3 kN

Stabdübelanzahl: 8 Stk

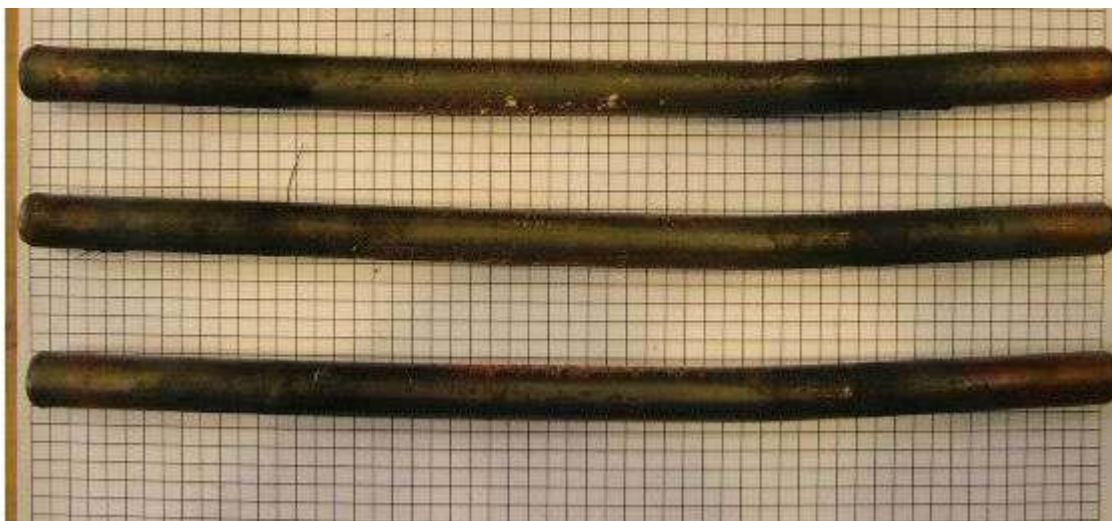
**Versagensfall 4**

Probekörper Typ VIa (Brandversuch)

Versuchsdatum:	25.02.2004	Stabdübeldurchmesser:	20 mm
Brandlast:	Einheits-Temperaturzeitkurve	Stabdübellänge:	400 mm
Versuchsdauer:	64,58 min	Vorbelastung:	114,20 kN

**Versagensfall 1****Probekörper Typ VIb (Brandversuch)**

Versuchsdatum:	17.02.2004	Stabdübeldurchmesser:	20 mm
Brandlast:	Einheits-Temperaturzeitkurve	Stabdübellänge:	400 mm
Versuchsdauer:	63,68 min	Vorbelastung:	114,20 kN

**Versagensfall 1**