



Bauingenieurwesen

MassivBAUKonstruktion

Rheinland-Pfälzische Technische Universität  
Kaiserslautern-Landau

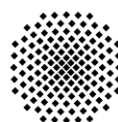
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion

apl.-Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele  
Darian Stork M.Eng.

Paul-Ehrlich-Straße 60  
67663 Kaiserslautern

Telefon: +49 (0)631 205-5054

catherina.thiele@rptu.de  
darian.stork@rptu.de



**Universität Stuttgart**

Institut für Werkstoffe im Bauwesen

Universität Stuttgart

Fakultät 2 – Bau und Umweltingenieurwissenschaften  
Institut für Werkstoffe im Bauwesen  
Abteilung Befestigungs- und Verstärkungsmethoden

Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann  
Hitesh Lakhani M.Tech.

Pfaffenwaldring 4  
70569 Stuttgart

Telefon: +49 (0)711 685-63957

jan.hofmann@iwb.uni-stuttgart.de  
hitesh.lakhani@iwb.uni-stuttgart.de

## Abschlussbericht DIBt

Forschungsvorhaben:  
Abminderung der Tragfähigkeit von Befestigungen im  
Mauerwerk unter Brandbeanspruchung

## Abschlussbericht DIBt

Forschungsvorhaben: Abminderung der Tragfähigkeit von Befestigungen im Mauerwerk unter Brandbeanspruchung

Förderstelle: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)  
Kolonnenstraße 30 B  
10829 Berlin

Bearbeiter: Darian Stork  
0631/205-5054  
darian.stork@rptu.de

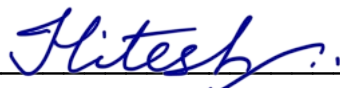
Hitesh Lakhani  
0711/685-63957  
hitesh.lakhani@iwb.uni-stuttgart.de

Datum: 16.10.2025



---

Darian Stork, M.Eng.



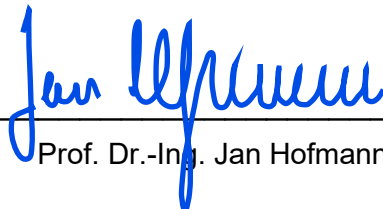
---

Hitesh Lakhani, M.Tech.



---

apl. Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele



---

Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Allgemeine Informationen.....</b>	<b>5</b>
<b>2. Zielsetzung.....</b>	<b>5</b>
<b>3. Literaturstudie .....</b>	<b>6</b>
3.1 Richtlinien und Normen .....	6
3.1.1 Nachweisverfahren von Einzelbefestigungen in Mauerwerk (TR 054 [3]) ....	6
3.1.2 Bestimmung des Feuerwiderstands von Injektions- und Schraubankern (EAD 330076 [8] und EAD 330460 [9]).....	7
3.1.3 Nachweisverfahren von Injektionsankern im Brandfall in Beton TR 082 [12]	9
3.1.4 Feuerwiderstand gegenüber Stahlversagen nach DIN EN 1992-4 Anhang D [11]     11	
3.1.5 Durchführung von Feuerwiderstandsprüfungen (DIN EN 1353-1 [15]) .....	12
3.2 Stand der Wissenschaft.....	13
3.2.1 Feuerwiderstand von Injektionsankern in Mauerwerk [4] .....	13
<b>4. Grundlagen zum Tragverhalten von Schraub- und Injektionsankern .....</b>	<b>15</b>
4.1 Allgemeines.....	15
4.2 Schraubanker .....	15
4.3 Injektionsanker .....	17
<b>5. Versuchsdurchführung.....</b>	<b>19</b>
5.1 Material .....	19
5.1.1 Mauerwerk .....	19
5.1.2 Mauermörtel.....	20
5.1.3 Betonschrauben.....	20
5.2 Versuchsaufbauten .....	21
5.2.1 Einzelstein Prüfungen .....	21
5.2.2 Steinpaket Prüfungen.....	23
5.2.3 Wand Prüfungen .....	25
5.3 Versuchsprogramm .....	27
5.3.1 Prüfungen im gerissenen oder feuchten Mauerwerk .....	28
<b>6. Ergebnisse.....</b>	<b>30</b>
6.1 Steinausbruch und -spalten .....	30
6.2 Herausziehen des Befestigungsmittels .....	33
6.3 Stahlversagen der Edelstahlschrauben .....	34
6.4 Herausziehen eines Steins .....	35
<b>7. Auswertung.....</b>	<b>36</b>
7.1 Gemeinsame Auswertung aller Steinversagensarten .....	36
7.1.1 Einfluss von Rissen und Feuchtigkeit.....	37
7.1.2 Auswertung der Ergebnisse: Trendlinie im 5%-Quantil.....	38
7.1.3 Auswertung der Ergebnisse: Umhüllende Funktion .....	39
7.1.4 Auswertung der Ergebnisse: Auswertung nach EAD [10] .....	41
7.1.5 Vergleich mit den Reduktionsfaktoren nach EAD 330460 [9] .....	41
7.2 Stahlversagen .....	43

7.2.1	Edelstahl .....	43
7.2.2	Kohlenstoffstahl .....	44
7.3	Verbundversagen von Injektionsankern.....	44
<b>8.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>46</b>
8.1	Allgemeines.....	46
8.2	Empfehlungen für die Regelwerke.....	47
8.2.1	Versuchsdurchführung .....	47
8.2.2	Bemessung des Untergrundversagens auf Grundlage der Kalttragfähigkeiten .....	48
8.2.3	Widerstandswerte für die Versagensart Stahlversagen .....	49
8.2.4	Verbundversagen von Injektionsankern .....	49
8.2.5	Ermittlung des Feuerwiderstands für die Produktbewertung.....	50
<b>9.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>51</b>

## 1. Allgemeine Informationen

Das Forschungsprojekt „Abminderung der Tragfähigkeit von Befestigungen im Mauerwerk unter Brandbeanspruchung“ unterstützt und finanziert durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) wurde im Zeitraum von September 2023 bis zum August 2025 an der Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau und Universität Stuttgart bearbeitet. Neben dem DIBt haben die Firmen fischerwerke GmbH & Co. KG, HECO-Schrauben GmbH & Co. KG, Hilti Aktiengesellschaft und Adolf Würth GmbH & Co. KG das Projekt finanziell und beratend unterstützt.

## 2. Zielsetzung

Der Bedarf an fundierten Widerstandswerten für Befestigungen in Mauerwerk unter Brandbeanspruchung nimmt weiter zu. Nicht nur viele Neubauten werden weiterhin in Mauerwerksbauweise errichtet, sondern auch etwa 70 % der Bestandsbauten in Deutschland wurden in dieser Bauweise ausgeführt [1, 2]. Vor allem bei diesen rückt das Thema Brandschutz aktuell immer stärker in den Fokus. Aus diesem Grund müssen auch Befestigungen im Verankerungsgrund Mauerwerk unter Brandbeanspruchung sicher ausgeführt und nachgewiesen werden können.

Derzeit ist eine solche Ausführung nur mit Befestigungsmitteln möglich, die während des Bewertungsprozesses im Brandfall getestet wurden und für die entsprechende Feuerwiderstandswerte in der Produktbewertung aufgeführt sind. Dies bedeutet zum einen, dass bereits ausgeführte Befestigungen in Bestandsgebäuden gegebenenfalls nicht für neue Brandschutzanforderungen nachgewiesen werden können, und zum anderen, dass die Hersteller einen enormen Prüfaufwand für ihre Produkte in den zahlreichen verschiedenen Mauerwerksarten betreiben müssen.

Mit diesem Forschungsprojekt wird eine wissenschaftliche Grundlage geschaffen, die zur Bewertung der Tragfähigkeit von Befestigungen in Mauerwerk aus Kalksandvollsteinen und Vollmauerziegeln unter Brandbeanspruchung herangezogen werden kann. Ziel ist die Definition von untergrundabhängigen Abminderungsfaktoren für die Versagensarten Steinausbruch, Steinspalten und Herausziehen des Befestigungsmittels, sodass eine Nachweisführung analog zum Nachweiskonzept des TR 054 [3] auf Grundlage der Kalttragfähigkeiten für den Brandfall ermöglicht wird. Darüber hinaus sollen bereits gewonnene Erkenntnisse aus Forschungsvorhaben mit Befestigungen in Beton auf den Verankerungsgrund Mauerwerk übertragen werden. Dies betrifft beispielsweise die Stahltragfähigkeit oder die Verbundtragfähigkeit von Injektionsankern im Brandfall [4, 5, 6, 7].

Zusätzlich werden die Einflüsse von Rissen und Feuchtigkeit im Mauerwerk auf die Tragfähigkeit der Befestigungen im Brandfall untersucht, da zum aktuellen Zeitpunkt nicht bekannt ist, ob beispielsweise ein erhöhter Feuchtigkeitsanteil im Mauerwerk zu größeren Abplatzungen führt.

Einen weiteren Forschungsschwerpunkt bildet die Quantifizierung des Einflusses des Versuchsaufbaus auf die Versuchsergebnisse. Derzeit werden die Versuche nach EAD 330076 [8] und EAD 333460 [9] geregelt. Beide Dokumente verweisen im Abschnitt der Feuerwiderstandsprüfungen auf EAD 330232 [10], berücksichtigen dabei jedoch nicht die verschiedenen Prüfmöglichkeiten – wie etwa das Prüfen in einer gemauerten Wand mit Auflast oder das Prüfen von Einzelsteinen ohne Auflast.

### 3. Literaturstudie

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik gegeben. Dabei werden die derzeit gültigen Richtlinien und Normen berücksichtigt sowie wissenschaftliche Veröffentlichungen zum behandelten Themenbereich dargestellt.

#### 3.1 Richtlinien und Normen

##### 3.1.1 Nachweisverfahren von Einzelbefestigungen in Mauerwerk (TR 054 [3])

Das Nachweisverfahren für nicht-redundante Befestigungssysteme in Mauerwerk wird in TR 054 [3] geregelt. Mithilfe dieses Dokuments können Injektions- und Schraubanker, die in einer Produktbewertung (ETA) nach EAD 330076 [8] bzw. EAD 330460 [9] geregelt sind, nachgewiesen werden. Es wird sowohl das Vorgehen zur Nachweisführung bei Umgebungstemperaturen als auch unter Brandbeanspruchung definiert.

Da dieses Forschungsvorhaben den Feuerwiderstand von Befestigungen thematisiert, wird nachfolgend ausschließlich auf das Nachweisverfahren unter Brandbeanspruchung eingegangen. Tabelle 3-1 zeigt die zu führende Nachweise unter Zugbeanspruchung im Brandfall.

Tabelle 3-1: Erforderliche Nachweise unter Zugbeanspruchung [3]

Stahlversagen	$N_{Ed,fi}^h \leq N_{Rk,s,fi} / \gamma_{M,fi}$	(1)
Herausziehen des Befestigungsmittels	$N_{Ed,fi}^h \leq N_{Rk,p,fi} / \gamma_{M,fi}$	(2)
Steinausbruch	$N_{Ed,fi} \leq N_{Rk,b,fi} / \gamma_{M,fi}$ $N_{Ed,fi}^g \leq N_{Rk,b,fi}^g / \gamma_{M,fi}$	(3)
Herausziehen des Mauersteins	$N_{Ed,fi} \leq N_{Rk,pb,fi} / \gamma_{M,fi}$	(4)

mit:	$N_{Ed,fi}^h$	der Bemessungswert der Einwirkung des höchstbelasteten Ankers
	$N_{Rk,s,fi}$	der charakteristische Widerstand gegen Stahlversagen im Brandfall
	$N_{Rk,p,fi}$	der charakteristische Widerstand gegen Herausziehen im Brandfall
	$N_{Rk,b,fi}$	der charakteristische Widerstand gegen Steinausbruch im Brandfall
	$N_{Rk,b,fi}^g$	der charakteristische Widerstand gegen Steinausbruch einer Ankergruppe im Brandfall
	$N_{Rk,pb,fi}$	der charakteristische Widerstand gegen Steinherausziehen im Brandfall
	$\gamma_{M,fi}$	der Teilsicherheitsbeiwert des Materials im Brandfall

Dabei verweist der TR 054 [3] bei den Widerstandswerten  $N_{Rk,s,fi}$ ,  $N_{Rk,p,fi}$ ,  $N_{Rk,b,fi}$  und  $N_{Rk,b,fi}^g$  auf die jeweiligen Produktbewertungen, sodass die Nachweisführung nur für Befestigungsmittel möglich ist, die Feuerwiderstandswerte in der Produktbewertungen angegeben haben. Der Widerstand gegen das Herausziehen eines Steins aus der Wand  $N_{Rk,pb,fi}$  erfolgt rechnerisch auf Grundlage eines konservativen Bemessungsvorschlags von Reichert und Thiele [4].

Ein Bemessungsverfahren auf Grundlage der Tragfähigkeit bei Umgebungstemperatur, wie es beispielsweise für Befestigungen in Beton in DIN EN 1992-4 Anhang D [11] geregelt ist, wird nicht aufgeführt.

### **3.1.2 Bestimmung des Feuerwiderstands von Injektions- und Schraubankern (EAD 330076 [8] und EAD 330460 [9])**

Die Ermittlung des Feuerwiderstands von Injektions- und Schraubankern wird in den entsprechenden EADs [8] [9] geregelt. Die Befestigungsmittel sollen in der ungünstigsten Setzposition installiert und analog zu EAD 330232 [10] geprüft werden. Konkrete Vorgaben zum Versuchsaufbau werden dabei jedoch nicht definiert. In der Praxis haben sich daher folgende Vorgehensweisen etabliert:

- Prüfung in Einzelsteinen
- Prüfung in kleinformatigen Steinpaketen mit Möglichkeit zur Vorspannung
- Prüfung in gemauerten Wänden mit Möglichkeit zur Vorspannung

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt analog zu EAD 330232 [10] anhand einer linearen Regressionsanalyse (vgl. Abbildung 3-1).

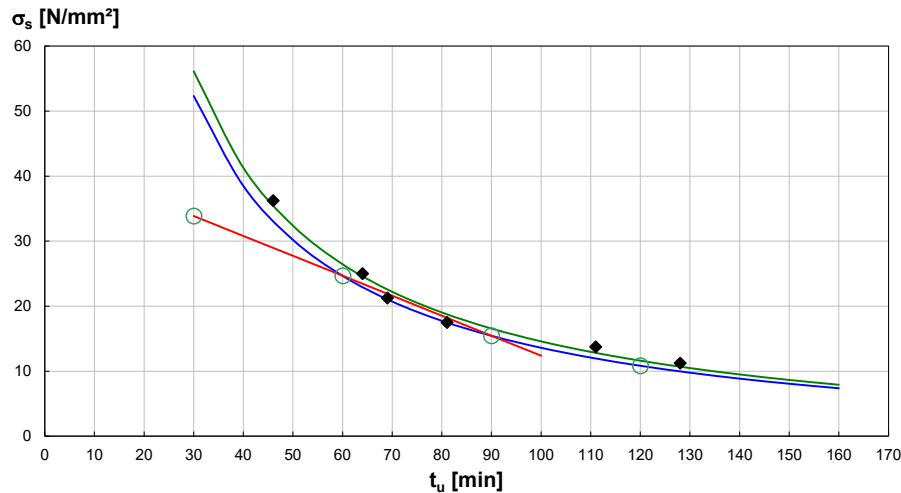


Abbildung 3-1: Exemplarische Auswertung von Ergebnissen aus Feuerwiderstandsprüfungen nach EAD 300232 [10]

Tritt ein Untergrundversagen in den Versuchen auf, erfolgt die Auswertung der Ergebnisse nicht auf dem Stahlspannungsniveau  $\sigma_s$  sondern auf dem Prüflastniveau  $N_p$ . Anschließend werden die ermittelten Feuerwiderstände (R30 bis R120) für alle Versagensarten übernommen und in der Produktbewertung angegeben, sodass die Feuerwiderstände auf Grundlage der maßgebenden Versagensart auch für alle anderen Versagensarten gelten [8, 9]:

$$N_{Rk,s,fi} = N_{Rk,p,fi} = N_{Rk,b,fi} \quad (5)$$

mit:  $N_{Rk,s,fi}$  der charakteristische Widerstand gegen Stahlversagen im Brandfall

$N_{Rk,p,fi}$  der charakteristische Widerstand gegen Herausziehen im Brandfall

$N_{Rk,b,fi}$  der charakteristische Widerstand gegen Steinausbruch im Brandfall

Für Injektionsanker ist es nach EAD 330076 [8] zwingend erforderlich Feuerwiderstandsprüfungen durchzuführen, um Feuerwiderstände in der Produktbewertung definieren zu können. Für Schraubanker hingegen wurden die Bemessungsgleichungen nach DIN EN 1992-4 Anhang D [11] für Herausziehen des Befestigungsmittels sowie den kegelförmigen Betonausbruch in EAD 330460 [9] übernommen. Damit wurde eine Möglichkeit geschaffen, konservative Feuerwiderstandswerte auf Grundlage der Tragfähigkeiten bei Umgebungstemperatur zu ermitteln. Die Durchführung von Feuerwiderstandsprüfungen für Schraubanker ist somit nicht erforderlich, um Feuerwiderstandswerte in der Produktbewertung angeben zu können.

Für den Widerstand gegen Herausziehen des Schraubankers ergibt sich [9]:

$$N_{Rk,p,fi(30-90)} = 0,7 \cdot 0,25 \cdot N_{Rk,p} \quad (6)$$

$$N_{Rk,p,fi(120)} = 0,7 \cdot 0,20 \cdot N_{Rk,p} \quad (7)$$

Sowie für den Widerstand gegen Steinausbruch [9]:

$$N_{Rk,b,fi(30-90)} = 0,7 \cdot N_{Rk,b} \cdot h_{ef} / 200 \quad (8)$$

$$N_{Rk,b,fi(120)} = 0,7 \cdot 0,8 \cdot N_{Rk,b} \cdot h_{ef} / 200 \quad (9)$$



bzw. [9]:

$$N_{Rk,fi(30-90)}^g = 0,7 \cdot N_{Rk}^g \cdot h_{ef} / 200 \quad (10)$$

$$N_{Rk,fi(120)}^g = 0,7 \cdot 0,8 \cdot N_{Rk}^g \cdot h_{ef} / 200 \quad (11)$$

mit:  $N_{Rk,p,fi}$  der charakteristische Widerstand gegen Herausziehen im Brandfall  
 $N_{RK,p}$  der charakteristische Widerstand gegen Herausziehen  
 $N_{Rk,b,fi}$  der charakteristische Widerstand gegen Steinausbruch im Brandfall  
 $N_{Rk,b}$  der charakteristische Widerstand gegen Steinausbruch  
 $N_{Rk,fi}^g$  der charakteristische Widerstand einer Ankergruppe unter Zugbeanspruchung im Brandfall  
 $N_{Rk}^g$  der charakteristische Widerstand einer Ankergruppe unter Zugbeanspruchung  
 $h_{ef}$  der effektiven Verankerungstiefe des Ankers

Dabei wurden die Gleichungen nach DIN EN 1992-4 Anhang D [11] um den Faktor 0,7 ergänzt, der den Einfluss von im Brandfall entstehenden Rissen im Mauerwerk berücksichtigen soll.

### 3.1.3 Nachweisverfahren von Injektionsankern im Brandfall in Beton TR 082 [12]

Im TR 082 [12] wurde der unter anderem von Al-Mansouri [13], Reichert [6] sowie Thiele, Patil und Reichert [5] vorgestellte Bemessungsvorschlag für in Beton verankerte Injektionsanker unter Brandbeanspruchung in eine Richtlinie überführt. Hierzu wird zunächst die Temperatur entlang der Verankerungstiefe des Injektionsankers mittels thermischer Simulationen ermittelt. Mithilfe der simulierten Temperaturen und der produktspezifischen Verbundspannungs-Temperatur-Beziehung, die in der jeweiligen Produktbewertung angegeben ist, kann die temperaturabhängige Verbundspannung an jeder Stelle der Ankerstange bestimmt werden. Wird diese Verbundspannung über die Verankerungstiefe integriert, ergibt sich die Tragfähigkeit des Injektionsankers. Das Vorgehen ist schematisch in der folgenden Abbildung dargestellt.

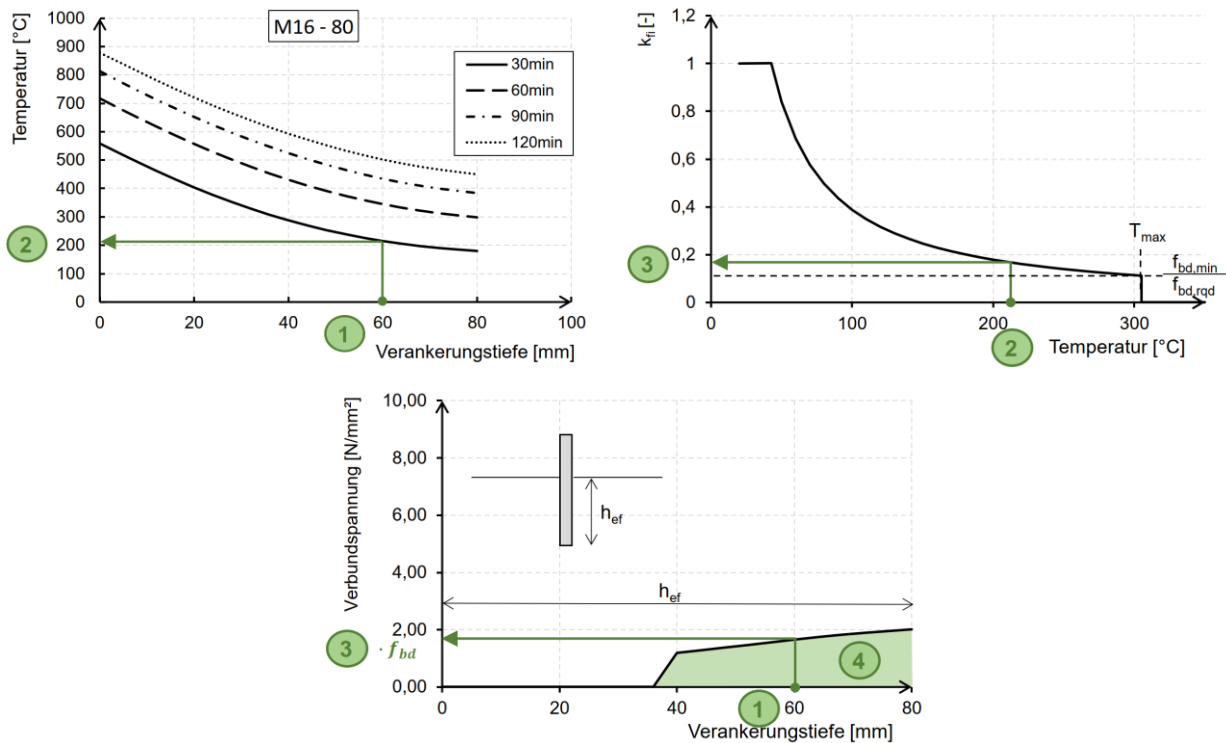


Abbildung 3-2: Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Injektionsankern im Brandfall [6]

Die Berechnung erfolgt auf Grundlage der Verbundspannung im gerissenen Beton  $\tau_{Rk,cr}$  und ergibt sich zu:

$$N_{Rk,p,fi}^0 = \pi \cdot d \cdot \psi_{sus,fire} \cdot \int_0^{h_{ef}} \tau_{Rk,fi}(\theta(x)) \cdot dx \approx \pi \cdot d \cdot \psi_{sus,fire} \cdot \sum_0^{h_{ef}} k_{fi,p}(\theta(x)) \cdot \tau_{Rk,cr} \cdot \Delta x \quad (12)$$

- mit:
- $N_{Rk,p,fi}^0$  der charakteristische Widerstand gegen kombiniertes Versagen aus Herausziehen und Betonausbruch eines Injektionsankers im Brandfall
  - $d$  der Durchmesser der Ankerstange
  - $\psi_{sus,fire}$  der Faktor zur Berücksichtigung des Einflusses einer Dauerbelastung auf die Verbundspannung unter Brandbeanspruchung
  - $\tau_{Rk,fi}(\theta)$  die charakteristische Verbundspannung im gerissenen Beton im Brandfall
  - $k_{fi,p}(\theta)$  der temperaturabhängige Reduktionsfaktor der Verbundspannung im Brandfall
  - $\tau_{Rk,cr}$  die charakteristische Verbundspannung in gerissenen Beton C20/25 bei Umgebungstemperatur aus der Produktbewertung

Darüber hinaus wird im TR 082 [12] ein alternatives Verfahren zur Bestimmung des Feuerwiderstands bei Stahlversagen definiert. Abweichend von dem in DIN EN 1992-4 Anhang D [11] geregelten tabellarischen Verfahren (vgl. Abschnitt 3.1.4), erfolgt die Bestimmung des Feuerwiderstands hier über temperaturabhängige Abminderungsfaktoren der Fließgrenze von Stahl aus DIN EN 1993-1-2 [14], die mithilfe des Anhangs A derselben Norm auf die Stahlzugfestigkeit übertragen werden können. Tabelle 3-2 stellt die entsprechenden Abminderungsfaktoren dar.

Tabelle 3-2: Temperaturreduktionsfaktoren für Stahlversagen  $k_{fi,s}(\theta_s)$  für Gewindestangen als Ankerstange [12]

Threaded rods with coarse pitch threads, with steel grades from 4.6 to 10.9 in accordance with EN ISO 898-1, and steel grades A4 in accordance with EN ISO 3506 series	
$\theta_s$ (°C)	$k_{fi,s}$
20	1,0
300	1,0
400	$f_{yk} / f_{uk}$
500	$0,78 \cdot f_{yk} / f_{uk}$
600	$0,47 \cdot f_{yk} / f_{uk}$
700	$0,23 \cdot f_{yk} / f_{uk}$
800	$0,11 \cdot f_{yk} / f_{uk}$
900	$0,06 \cdot f_{yk} / f_{uk}$
1000	$0,04 \cdot f_{yk} / f_{uk}$
1100	$0,02 \cdot f_{yk} / f_{uk}$
1200	0
For intermediate values of steel temperature, linear interpolation may be used.	

Mithilfe des temperaturabhängigen Abminderungsfaktors  $k_{fi,s}(\theta_s)$  ergibt sich der Feuerwiderstand einer Gewindestange zu:

$$N_{Rk,s,fi(t)} = k_{fi,s}(\theta_s) \cdot N_{Rk,s} \quad (13)$$

mit:  $N_{Rk,s,fi(t)}$  der charakteristische Zugwiderstand für Stahlversagen zum Zeitpunkt  $t$  im Brandfall

$k_{fi,s}(\theta_s)$  der temperaturabhängige Abminderungsfaktor für Stahlversagen im Brandfall

$N_{Rk,s}$  die charakteristische Zugwiderstand für Stahlversagen bei Umgebungstemperatur aus der Produktbewertung

### 3.1.4 Feuerwiderstand gegenüber Stahlversagen nach DIN EN 1992-4 Anhang D [11]

In DIN EN 1992-4 Anhang D [11] ist ein vereinfachtes Nachweisverfahren für Verankerungen in Beton unter Brandbeanspruchung definiert. Dieses basiert auf den Tragfähigkeiten des Produkts bei Umgebungstemperatur. Zusätzlich sind Stahlspannungen  $\sigma_{Rk,s,fi}$  tabelliert, die auf der sicheren Seite liegende Werte zur Ermittlung des Widerstands für Stahlversagen unter Brandbeanspruchung darstellen.

$$N_{Rk,s,fi} = \sigma_{Rk,s,fi} \cdot A_s \quad (14)$$

mit:  $N_{Rk,s,fi}$  die charakteristische Zugtragfähigkeit für Stahlversagen im Brandfall

$\sigma_{Rk,s,fi}$  die charakteristische Zugfestigkeit eines Befestigungselements für Stahlversagen im Brandfall

$A_s$  der Spannungsquerschnitt des Befestigungselements

Tabelle 3-3: Charakteristische Zugfestigkeit eines Befestigungselementes aus Kohlenstoffstahl unter Brandeinwirkung [11]

Befestigungselemente Bolzen/Gewindedurchmesser	Verankerungstiefe $h_{ef}$ [mm]	Charakteristische Zugtragfähigkeit $\sigma_{Rk,s,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ] eines ungeschützten Befestigungselementes, hergestellt aus Kohlenstoffstahl nach EN 10025, im Fall von Brandeinwirkung			
		30 min (R15 bis R30)	60 min (R45 und R60)	90 min (R90)	120 min (≤ R120)
Ø 6	≥ 30	10	9	7	5
Ø 8	≥ 30	10	9	7	5
Ø 10	≥ 40	15	13	10	8
Ø 12 und größer	≥ 50	20	15	13	10

### 3.1.5 Durchführung von Feuerwiderstandsprüfungen (DIN EN 1353-1 [15])

Das EAD 330232 [10] als Referenzdokument für Feuerwiderstandsprüfungen von Befestigungsmitteln in Mauerwerk (vgl. Abschnitt 3.1.2) verweist auf die DIN EN 1363-1 [15] und die Verwendung der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) als Grundlage der Prüfungen. Die ETK, definiert nach Gleichung (15) und dargestellt in Abbildung 3-3, beschreibt die Aufheizkurve, nach der der Brandofen gesteuert wird.

$$T = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) + 20 \quad (15)$$

mit:  $T$  die mittlere Ofentemperatur [°C]  
 $t$  die Zeit [Minuten]

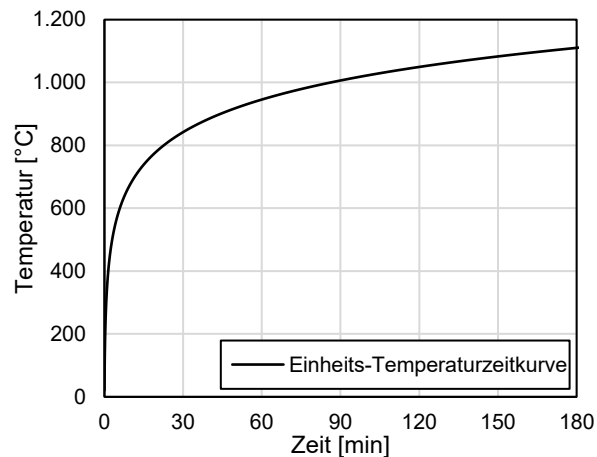


Abbildung 3-3: Einheits-temperaturzeitkurve nach DIN EN 1363-1 [15]

Dabei muss die Ofentemperatur die folgenden Grenzwerte einhalten:

- Nach den ersten 10 min der Prüfung darf zu keinem Zeitpunkt die von einem Thermoelement im Ofen aufgezeichnete Temperatur von der entsprechenden Temperatur der Einheits-Temperaturzeitkurve um mehr als 100 K abweichen.
- $d_e \leq 15\%$  für  $5 < t \leq 10$ ;  
 $d_e \leq (15 - 0,5 (t - 10)) \%$  für  $10 < t \leq 30$ ;

$$d_e \leq (5 - 0,083 (t - 30)) \%$$

für  $30 < t \leq 60$ ;

$$d_e \leq 2,5\%$$

für  $t > 60$

Dabei ist:

$$d_e = \frac{A - A_s}{A_s} \cdot 100$$

Dabei ist:

$d_e$  die prozentuale Abweichung;

$A$  die Fläche unterhalb der tatsächlichen Ofen-(mittleren) Temperaturzeitkurve;

$A_s$  die Fläche unterhalb der Einheits-Temperaturzeitkurve;

$t$  die Zeit, in Minuten.

### 3.2 Stand der Wissenschaft

Derzeit gibt es kaum wissenschaftliche Untersuchungen zu Befestigungen in Mauerwerk unter Brandbeanspruchung. Neben einem Forschungsvorhaben, das sich mit Verbunddübeln im Brandfall in Mauerwerk beschäftigt [4], können jedoch auch Erkenntnisse aus Untersuchungen an Verankerungen in Beton – insbesondere zum Versagensfall Stahlversagen – übertragen werden.

#### 3.2.1 Feuerwiderstand von Injektionsankern in Mauerwerk [4]

In Reichert und Thiele [4] wurden Untersuchungen an Injektionsankern in verschiedenen Mauerwerksuntergründen durchgeführt, darunter sowohl Loch- als auch Vollsteine. Für die Vollsteine konnte in der Arbeit das für Verankerungen in Beton aufgestellte Berechnungsmodell [5, 6] bestätigt werden. In dem Forschungsvorhaben wurden Mauerziegel- und Porenbetonvollsteine untersucht. Das Berechnungsverfahren liefert konservative Ergebnisse für Mauerziegel als Verankerungsgrund. Für die Porenbetonsteine ergeben sich in der thermischen Simulation deutlich höhere Temperaturen entlang der Verbundfuge als bei Mauerziegeln. Das Berechnungsmodell liefert für diese Steine im Gegensatz zu den Versuchsergebnissen rechnerisch keinen Feuerwiderstand. Kalksandvollsteine wurden in dem Forschungsvorhaben nicht betrachtet. Zudem wurden weder Siebhülsen verwendet noch Fugenpositionen getestet. Es wird die Vermutung aufgestellt, dass Siebhülsen aufgrund des niedrigen Schmelzpunkts von Kunststoff einen negativen Einfluss auf den Feuerwiderstand haben könnten.

Darüber hinaus werden in dem Forschungsvorhaben angepasste Feuerwiderstände im Hinblick auf Stahlversagen vorgeschlagen. Diese beruhen auf den Versuchsergebnissen von Injektions-

ankern in Beton [5] und werden auf den Verankerungsgrund Mauerwerk übertragen. Die Anpassung bezieht sich auf die derzeit angewendeten, normierten Werte (vgl. Abschnitt 3.1.4 und Tabelle 3-3). Die vorgeschlagenen Werte sind in Tabelle 3-4 dargestellt.

Tabelle 3-4: Angepasste Feuerwiderstandswerte für die Versagesart Stahlversagen für Kohlenstoffstahl 5.8 und größer nach [4, 5]

Gewindedurchmesser	Verankerungstiefe $h_{ef}$ [mm]	Charakteristische Zugtragfähigkeit $\sigma_{Rk,s,fi}$ [N/mm <sup>2</sup> ] eines ungeschützten Befestigungselementes, hergestellt aus Kohlenstoffstahl, im Falle einer Brandeinwirkung			
		30 min (R15 bis R30)	60 min (R45 und R60)	90 min (R90)	120 min (≤ R120)
M6	≥ 30	14	12	9	7
M8	≥ 30	20	15	11	9
M10	≥ 40	25	19	14	11
M12 und größer	≥ 50	30	23	16	13

## 4. Grundlagen zum Tragverhalten von Schraub- und Injektionsankern

### 4.1 Allgemeines

Das Tragverhalten von Schraub- und Injektionsankern unter Zugbelastung in Vollsteinen unterscheidet sich nicht wesentlich von dem in ungerissenem Beton [16, 17]. Grundsätzlich entsprechen die möglichen Versagensarten von Ankern in Mauerwerk aus Vollziegeln und Kalksandstein denen von Ankern in Beton. Unter Zugbelastung sind insbesondere folgende Versagensarten möglich:

1. Stahlversagen
2. Steinausbruch
3. Herausziehen
4. Spalten des Mauerwerks

Die Versagenslast kann außerdem dadurch begrenzt sein, dass der als Ankergrund dienende Stein aus dem Mauerwerksverband herausgezogen wird. Dieser Versagensmodus wird als Steinausziehen bezeichnet. Die zugehörige Versagenslast hängt von den Eigenschaften der wirksamen Mantelfläche ab und damit insbesondere von der Steingröße, dem Grad der Fugenfüllung, der Mörtelfestigkeit sowie der Auflast auf das Mauerwerk.

### 4.2 Schraubanker

Der Schraubanker verfügt über ein gehärtetes Spezialgewinde, das sich beim Setzen in den Ankergrund einschneidet. Hierzu wird er in ein zylindrisches Bohrloch eingeschraubt. Zur Verbesserung des Einschneidens sind die untersten Gewindegänge in der Regel gezahnt. Der Bohrl Lochdurchmesser ist auf die Schraubengeometrie abgestimmt, sodass das Gewinde zuverlässig in den Ankergrund einschneidet. Auf diese Weise entsteht eine mechanische Verbindung (Abbildung 4-1), über die die Lasten in den Ankergrund übertragen werden.

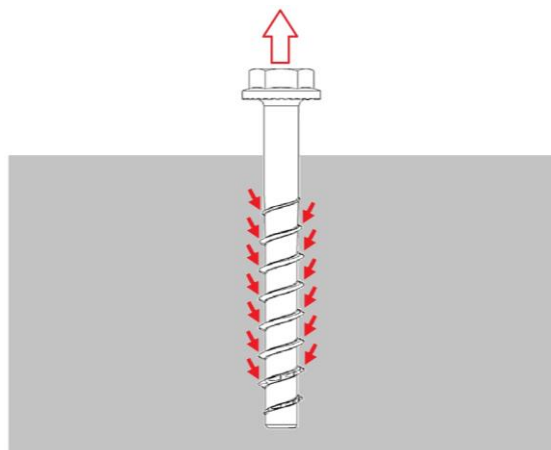


Abbildung 4-1 Lasteinleitung von Schraubanker im Vollstein unter Zugbelastung

Das Tragverhalten von Schraubankern wird wesentlich durch die Bohrlochtoleranzen und die Qualität der Montage beeinflusst. Werden die in den Beton oder das Mauerwerk eingeschnittenen Gewinde während der Installation beschädigt, kann der Anker seine Funktion nicht erfüllen. Tritt Stahlversagen auf, hängt die Bruchlast ausschließlich von der Stahlqualität (Stahltyp und Herstellungsverfahren) sowie vom Ankerdurchmesser ab.

Beim Steinausbruchversagen variiert die Größe des Ausbruchkegels in Abhängigkeit von Verankerungstiefe und Steingröße. Schrauben mit geringer Verankerungstiefe bilden einen Ausbruchkegel, der am ersten tragenden Gewinde an der Spitze der Schraube beginnt (Abbildung 4-2(a)). Mit zunehmender Verankerungstiefe entsteht im Verhältnis zur Verankerungstiefe ein kleinerer Kegel, während der verbleibende Teil der Schraube herausgezogen wird (Abbildung 4-2 (b)).

Wie im Beton ist auch das Herausziehen von Schraubankern aus Vollsteinen empfindlich gegenüber Beschädigungen der eingeschnittenen Gewinde, die während der Installation entstehen können. Im Mauerwerk stellt dies ein noch größeres Problem dar, da die erforderlichen Montage-drehmomente im Vergleich zu Beton deutlich geringer sind. Ein übermäßiges Drehmoment kann zu lokalen Materialschäden im Bereich der Gewinde führen.

Abhängig von den Gewindeabmessungen, der Gewindelänge, dem Schraubendurchmesser, der Art des Schraubankers sowie den Bohrlochtoleranzen kann es auch zu einem Herausziehen des Befestigungsmittels kommen, bei dem das Material des Ankergrundes lokal abgeschert wird (Abbildung 4-2 (c)).

Bei kleinen Steinformaten (z. B. NF) tritt hingegen das Spalten des Steins am häufigsten auf.

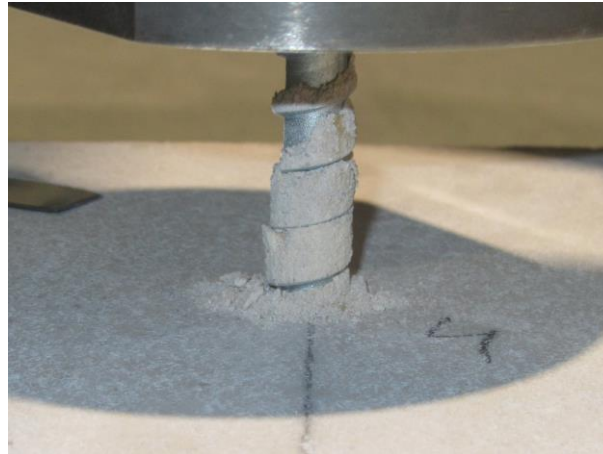


(a) Vollständiger Steinausbruch



(b) Kombiniertes Steinbruch- und Herausziehversagen





(c) Lokales Scherversagen des Materials während des Herausziehens

Abbildung 4-2 Bilder von typischem Steinausbruch- und Herausziehversagen von Schrauben unter zentrischer Zugbelastung

### 4.3 Injektionsanker

Der Injektionsanker überträgt die Zuglast in einem Vollstein durch Stoffschluss, also durch die Verbindung zwischen Injektionsmörtel und Stein (Abbildung 4-3). Die Kräfte im Kontaktbereich zwischen Gewindestange und Injektionsmörtel werden über die Verzahnung der Gewinde mit dem ausgehärteten Mörtel eingeleitet. Wie im Beton haben daher sowohl die Festigkeit des Mörtels als auch die Art und Sorgfalt der Bohrlochreinigung einen entscheidenden Einfluss auf die Tragfähigkeit des Ankers.

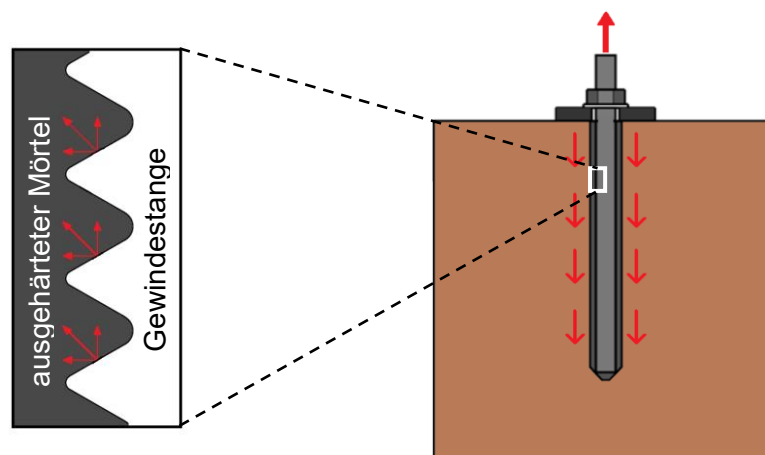


Abbildung 4-3 Lastübertragung von Injektionsankern in Vollsteinen unter Zugbelastung

Die mit dem Ankergrund verbundenen Versagensarten – Steinausbruch, Steinspalten und Steinauszug – entsprechen denen der Schraubanker. Abhängig von der Verankerungstiefe des Ankers und der Leistungsfähigkeit des Mörtels können bei Injektionsankern zudem verschiedene Formen des Herausziehversagens auftreten (Abbildung 4-4).

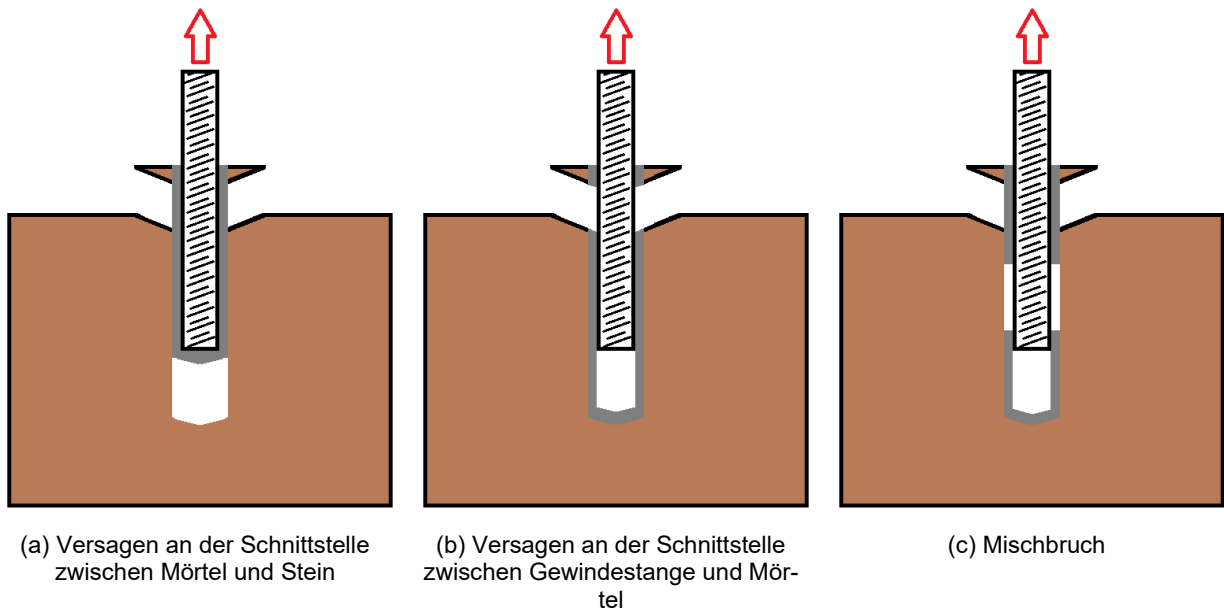


Abbildung 4-4 Herausziehversagen von Injektionsankern unter zentrischer Zugbelastung

## 5. Versuchsdurchführung






In diesem Abschnitt wird die Versuchsdurchführung beschrieben. Zunächst werden die verwendeten Mauersteine und Mörtel einschließlich ihrer Materialeigenschaften vorgestellt. Anschließend erfolgt die Darstellung der Versuchsaufbauten sowie der zugehörigen Probekörper. Abschließend wird das Versuchsprogramm erläutert.

### 5.1 Material

#### 5.1.1 Mauerwerk

Die Versuche wurden mit Mauerziegel- und Kalksandstein-Vollsteinen durchgeführt. Es wurden die Steinformate NF, 3DF und XL getestet. Tabelle 5-1 zeigt die verwendeten Steine sowie die jeweils bestimmten Materialeigenschaften. Die Bestimmung der Druckfestigkeit und Rohdichte erfolgte gemäß DIN EN 772-1 [18] bzw. DIN EN 772-13 [19].

Tabelle 5-1: Materialeigenschaften der verwendeten Steine

Steintyp	Bezeichnung	Druckfestigkeit		Rohdichte
		$f_{cm}$	$f_b$	$\rho_m$
[-]	[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kg/dm <sup>3</sup> ]
	KS 20-2,0 NF	42,6	23,0	1,72
	KS 12-1,8 3DF	40,5	29,2	1,66
	MZ 20-2,0 NF	90,6	75,1	1,91
	MZ 20-2,0 3DF	66,3 / 47,3 <sup>1)</sup>	58,7 / 42,4 <sup>1)</sup>	1,84 / 1,80 <sup>1)</sup>
	KS XL 16-2,0 (367x150x498 mm)	-	-	-

<sup>1)</sup> Aufgrund der unterschiedlichen Ergebnisse der Zugversuche wurde eine weitere Prüfung durchgeführt

### 5.1.2 Mauermörtel

Bei den Versuchen an Steinpaketen sowie vollständig gemauerten Wänden (vgl. Abschnitt 5.2) wurde ein Putz- und Mauermörtel der Festigkeitsklasse M2,5 verwendet. Die Mauerarbeiten wurden durch ein ortsansässiges Bauunternehmen ausgeführt. Bei dem Mörtel handelt es sich um einen Kalkzementmörtel. Zu jedem Probekörper wurden drei Mörtelprismen hergestellt, an denen die Druck- und Biegezugfestigkeit gemäß DIN EN 1015-11 [20] geprüft wurde. Die Ergebnisse der Prüfungen sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 5-2: Biegezug- und Druckfestigkeit der Mörtelprismen

Probekörperbezeichnung	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
[-]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
MZ-3DF-Referenzwand	1,70	4,13
KS-3DF-Referenzwand	1,99	4,55
MZ-3DF-Brandwand-1	1,89	4,24
MZ-3DF-Brandwand-2	1,76	4,01
KS-3DF-Brandwand-3	1,79	3,84
KS-3DF-Brandwand-4	1,71	4,29
MZ-3DF-Brandwand-5	1,82	4,01
KS-3DF-Brandwand-6	1,91	4,82
MZ-3DF-Brandwand-7	1,99	4,21
MZ-3DF-Steinpaket-1	1,36	3,59
KS-3DF-Steinpaket-2	1,38	3,67
MZ-3DF-Steinpaket-3	1,34	3,47
KS-3DF-Steinpaket-4	1,50	3,95
MZ-3DF-Steinpaket-5	1,32	3,68
KS-3DF-Steinpaket-6	1,60	3,94
MZ-3DF-Steinpaket-7	1,42	3,59
KS-NF-Steinpaket-8	1,53	3,82
MZ-NF-Steinpaket-9	1,42	3,62

### 5.1.3 Betonschrauben

Zur Versuchsdurchführung wurden Edelstahlschrauben der unterstützenden Firmen fischerwerke GmbH & Co. KG, HECO-Schrauben GmbH & Co. KG, Hilti Aktiengesellschaft und Adolf Würth GmbH & Co. KG in den Größen Ø6 mm bis Ø12 mm verwendet. Die Nennung genauer Produktbezeichnungen sowie eine produktspezifische Zuordnung der Versuchsergebnisse erfolgt aus Gründen der Anonymisierung nicht.

Edelstahl weist im Vergleich zu Kohlenstoffstahl günstigere Hochtemperatureigenschaften im Hinblick auf den Festigkeitsverlust auf [11, 14]. Da das Hauptziel des Forschungsvorhabens die Ermittlung untergrundabhängiger Abminderungsfaktoren des Mauerwerks ist, wurden Schraubanker aus Edelstahl gewählt, um die Anzahl an Versuchen mit Stahlversagen als Versagensart zu reduzieren.

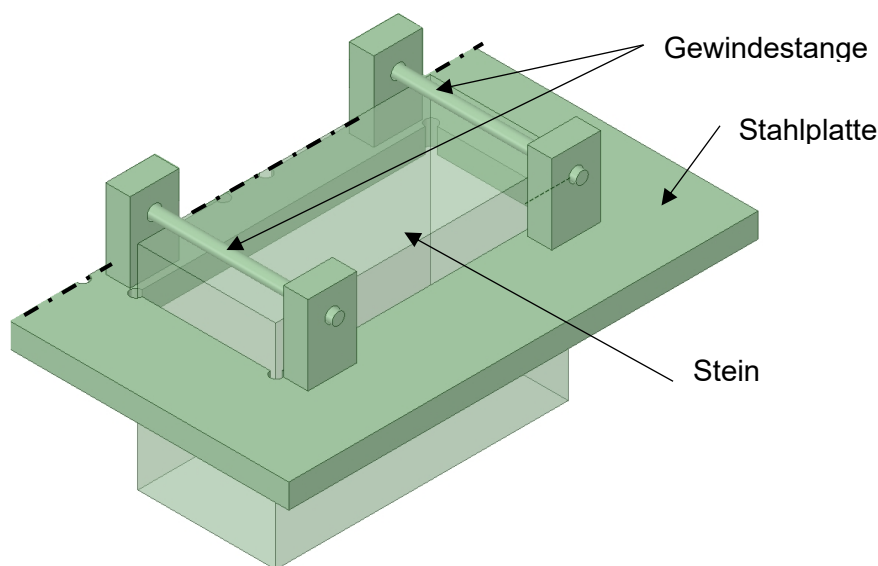
## 5.2 Versuchsaufbauten

### 5.2.1 Einzelstein Prüfungen

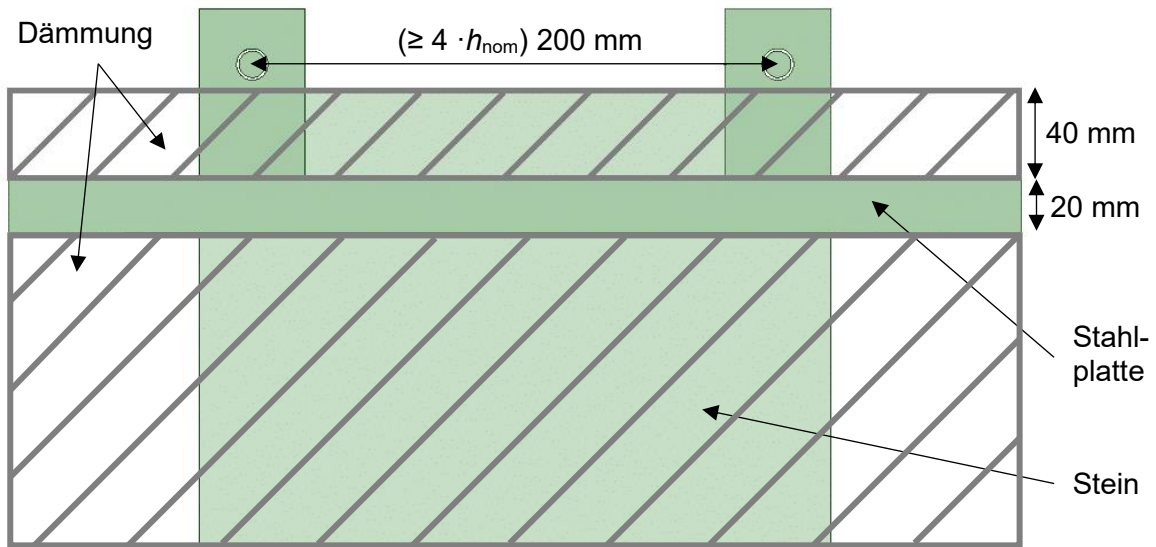
Beim Versuchsverfahren mit Einzelsteinen werden die Steine mithilfe einer Haltevorrichtung aus einer Stahlplatte mit Aussparungen sowie Gewindestangen abgestützt (Abbildung 5-1 (a)). Die Stahlplatte verfügt über drei Aussparungen, sodass bis zu drei Einzelsteine gleichzeitig geprüft werden können. Gleichzeitig dient sie als Plattform für den Abstützrahmen.

Wie in Abbildung 5-1 (b) dargestellt, werden die Stahlplatte und die Steinoberflächen – mit Ausnahme der Fläche, in der der Anker installiert ist – mit Mineralwolle isoliert. Dadurch wird sichergestellt, dass die Brandbeanspruchung ausschließlich von der Ankerseite erfolgt. Die komplette Baugruppe, bestehend aus der Haltevorrichtung und dem Stein mit dem durch das Anbauteil, (Zugadapter gemäß EAD 330232 [10]) installierten Anker, wird anschließend auf den Ofenboden gestellt.

Die zentrische Zugbelastung auf die Anker wird über die Zugadapter eingeleitet, die mit einer Belastungsstange verbunden sind. Der innerhalb des Ofens befindliche Teil der Belastungsstange wird durch ein Keramikrohr isoliert. Die Stange ragt durch die Abdeckblöcke aus dem Ofen heraus und ist mit einer Ausziehstange gekoppelt, die wiederum durch den Zylinder (hydraulisch oder pneumatisch) sowie die Kraftmessdose geführt wird (vgl. Abbildung 5-2).



(a) 3D-Ansicht



(b) Vorderansicht

Abbildung 5-1: Haltevorrichtung für Versuchsverfahren mit einzelnen Steinen

Die erforderlichen Dauerlasten werden durch Regulierung des Drucks im hydraulischen bzw. pneumatischen Zylinder aufgebracht und gesteuert. Während des Brandversuchs erfolgt eine kontinuierliche Überwachung und Aufzeichnung der Lasten mithilfe der Kraftmessdose und des Datenerfassungssystems. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus ist in Lakhani und Hofmann [21] enthalten.

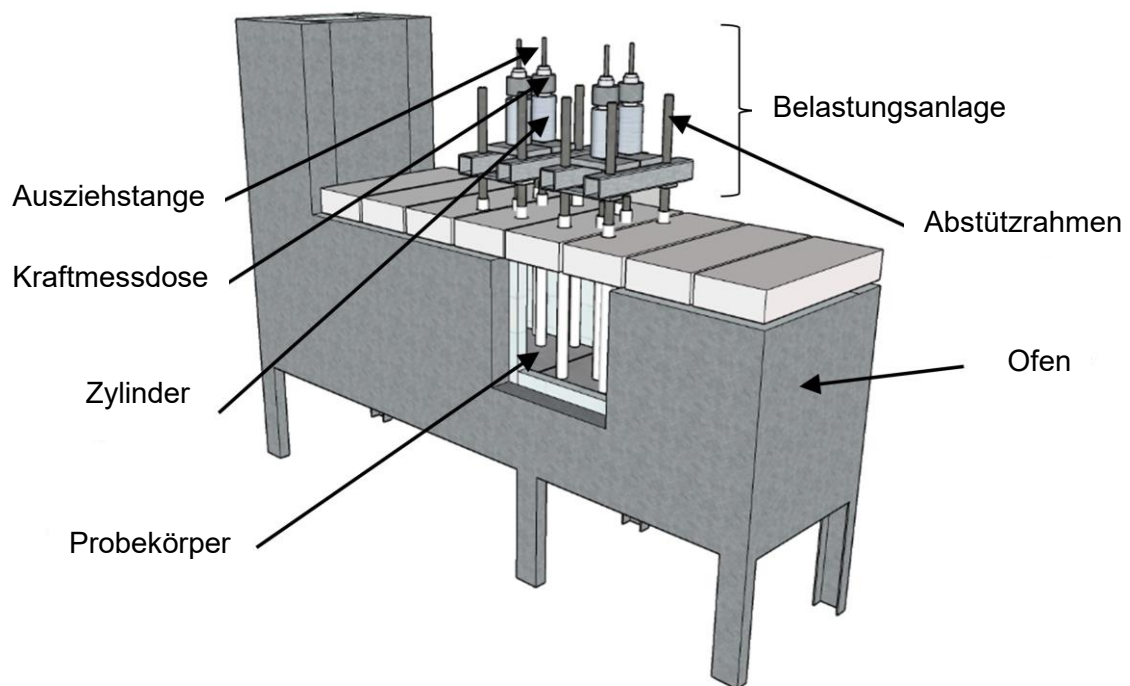


Abbildung 5-2: Schematische Darstellung der Versuchseinrichtung und der Belastungsanlage [21]

### 5.2.2 Steinpaket Prüfungen

Eine weitere Prüfmöglichkeit stellt die Verwendung von Steinpaketen dar. Diese werden durch das Aufeinandermörteln von zwei bis drei Steinen zwischen zwei Stahlplatten hergestellt, die durch eine Gewindestange miteinander verbunden sind. Abbildung 5-3 zeigt exemplarisch einen Probekörper mit Kalksandsteinen im 3DF-Format. Die Grundplatte (rechts im Bild) ist mit einem Innengewinde versehen, in das die Gewindestange eingedreht werden kann. Die Deckplatte (links im Bild) besitzt ein Durchgangsloch.



Abbildung 5-3:Steinpaket-Probekörper KS 3DF

Die Gewindestangen können im eingebauten Zustand waagerecht aus dem Brandofen herausgeführt werden und dienen – in Kombination mit einem Rohrprofil und zwei Kraftaufnehmern – zur Aufbringung einer Vorspannung auf das Steinpaket. Der Probekörper im eingebauten Zustand sowie die Vorrichtung zur Lastaufbringung sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Die Vorspannung kann durch das Anziehen und Lösen der Muttern oder alternativ durch den Einsatz zusätzlicher Hydraulikzylinder gesteuert werden.



Abbildung 5-4: Probekörper im eingebauten Zustand



Abbildung 5-5: Seitliche Ofenabdichtung und Konstruktion zur Lastaufbringung



Das Zuggestell wird, wie in Abbildung 5-4 dargestellt, am Steinrand auf dem Probekörper aufgestellt. Die Stützen des Gestells wurden mithilfe eines Winkelprofils fixiert und gesichert. Der gezeigte Versuchsaufbau ermöglicht die Prüfung von Befestigungsmitteln in der Steinmitte sowie mit kleineren Exzentrizitäten. Größere Ausmitten oder Randpositionen können aufgrund der Abstützvorrichtung und des oberen Ofenabschlusses jedoch nicht geprüft werden.

Die Belastung der Befestigungsmittel erfolgt außerhalb des Brandofens. An die Zugadapter gemäß EAD 330232 [10] wird eine Gewindestange über ein Anbauteil und einen Bolzen angeschlossen. Diese wird vertikal aus dem Brandraum herausgeführt. Außerhalb des Brandraums kann die Belastung entweder über einen Hydraulikzylinder oder mithilfe von Totlasten in Verbindung mit Umlenkrollen aufgebracht werden.



Abbildung 5-6: Konstruktion zur Lastaufbringung mittels Umlenkrollen und Todlasten



### 5.2.3 Wand Prüfungen

Neben den beiden Versuchsaufbauten für Kleinbrandöfen ist auch die Prüfung in großen Brandöfen möglich. Dieser Versuchsaufbau wurde bereits von Reichert und Thiele [4] vorgestellt und erläutert. Als Probekörper dienen in einen U-Profil-Rahmen gemauerte Wände. Die U-Profile fungieren dabei als Wandhalterung, die ein Hineinziehen der Wand in den Brandraum infolge der Dübelbelastung verhindert. Es können bis zu sechs Befestigungsmittel gleichzeitig geprüft werden. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Wandprobekörper mit den installierten Befestigungsmitteln im eingebauten und nicht eingebauten Zustand.



Abbildung 5-7: Wandprobekörper mit installierten Befestigungsmitteln



Abbildung 5-8: Eingebauter Wandprobekörper mit installierten und isolierten Zugstangen

Anders als bei den Versuchsaufbauten aus den Abschnitten 5.2.1 und 5.2.2 ist bei der Wandprüfung keine Abstützung auf dem Probekörper erforderlich. Dies ermöglicht eine freie Positionierung der Befestigungsmittel in der Wand, sodass auch die Prüfung fugennaher Positionen durchgeführt werden kann. Abbildung 5-9 zeigt den Versuchsstand schematisch. Der Brandraum des großen Prüfofens wird durch ein Zusatzbauteil (1) auf eine Größe von 1,0 m × 1,5 m × 1,0 m verkleinert und so positioniert, dass er ausschließlich durch einen Brenner (2) beheizt wird. Die Befestigungsmittel sind in dem gemauerten Wand-Probekörper (3) installiert. Die Zugstangen werden quer durch den Brandraum auf die gegenüberliegende Seite geführt. Dort befindet sich eine weitere, z. B. aus Porenbeton gemauerte Wand (4), in der Öffnungen entsprechend der Positionen der Befestigungsmittel vorgesehen sind, um eine zentrische Belastung sicherzustellen.

Die Belastungsvorrichtung ist an einem außerhalb des Brandraums angeordneten Stahlrahmen (5) montiert. Die Belastung selbst erfolgt über Umlenkrollen und Totlasten (6) oder über Hydraulikzylinder. [4]

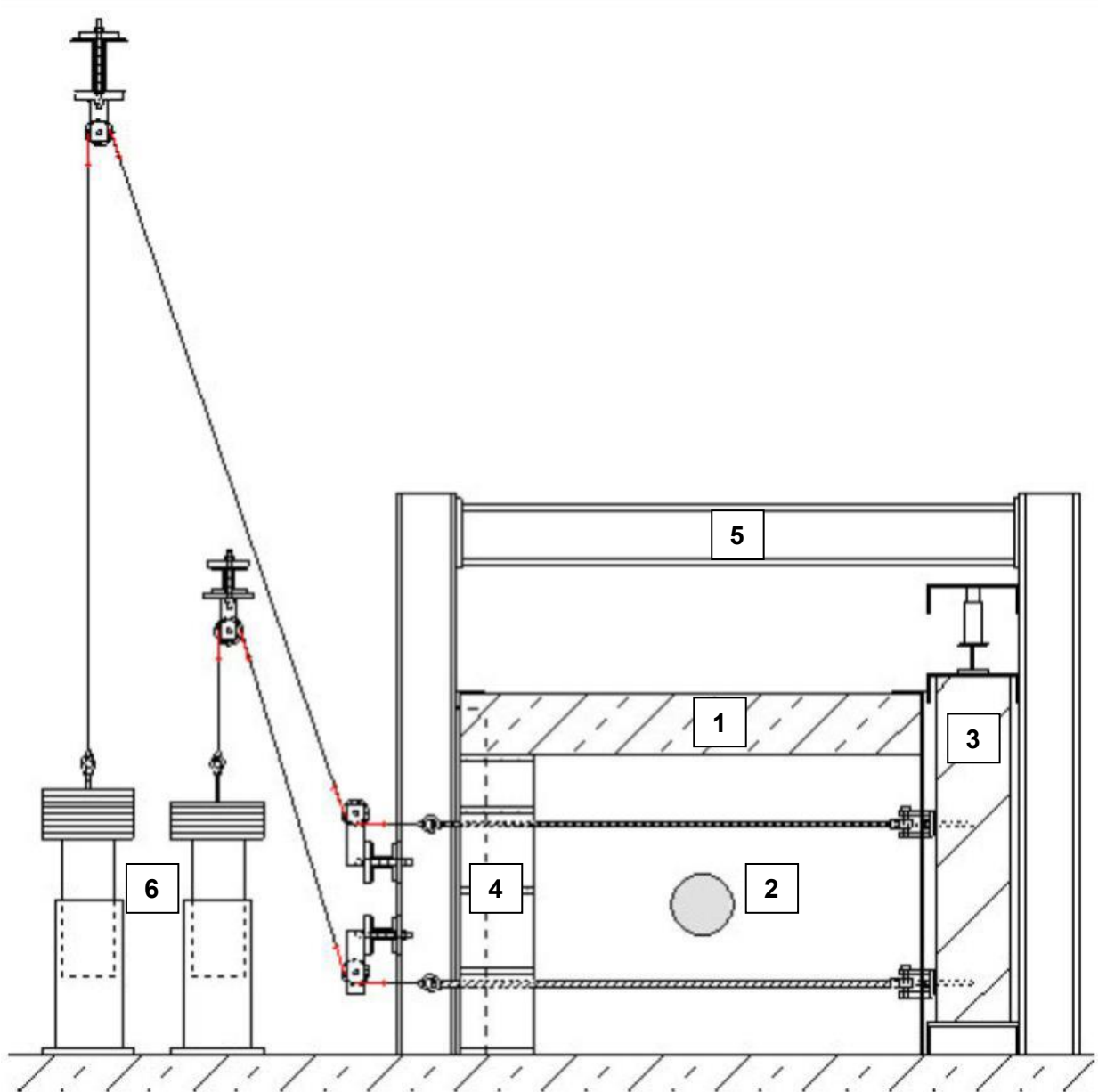


Abbildung 5-9: Schematische Darstellung des Versuchsstands [4]

### 5.3 Versuchsprogramm

Die Versuche wurden in zwei Versuchsserien unterteilt. In der ersten Versuchsserie, dargestellt in Tabelle 5-3 wurden erste Tests zu den Versagensarten Herausziehen des Schraubankers sowie Steinausbruch / -spalten durchgeführt. Auf Grundlage der Ergebnisse dieser ersten Versuchsserie wurde anschließend das Versuchsprogramm für die zweite Versuchsserie festgelegt (vgl. Tabelle 5-4).

Tabelle 5-3: Versuchsprogramm der ersten Versuchsserie

Brandversuche									
Stein	Probekörper	Riss	Format	Anker- durchmesser	h <sub>nom</sub>	Herausziehen	Steinausbruch/ Steinspalten		
KS	Einzelstein	gerissen	3DF	6	45	3			
							3		
KS nass	Wand	ungerissen					3		
							3		
KS						gerissen		3	
				ungerissen		3			
	Einzelstein	gerissen		10	50		3		
								3	
KS nass	Wand	ungerissen						3	
								3	
KS			gerissen					3	
			ungerissen			3			
MZ	Einzelstein	gerissen	3DF	6	45	3			
							3		
MZ nass	Wand	ungerissen					3		
							3		
MZ						gerissen		3	
				ungerissen		4			
	Einzelstein	gerissen		10	50		3		
								3	
MZ nass	Wand	ungerissen						3	
								3	
MZ			gerissen					3	
			ungerissen			3			
Summe:						37	36		
Referenzversuche									
KS	Einzelstein	gerissen	3DF	6	45	6			
KS							6		
KS nass	Wand	ungerissen					6		
							6		
KS						gerissen		6	
KS				ungerissen		6			
KS	Einzelstein	gerissen		10	50		6		
KS								6	
KS nass	Wand	ungerissen						6	
								6	
KS			gerissen					6	
KS			ungerissen			6			
MZ	Einzelstein	gerissen	3DF	6	45	6			
MZ							6		
MZ nass	Wand	ungerissen					6		
							6		
MZ						gerissen		6	
MZ				ungerissen		6			
MZ	Einzelstein	gerissen		10	50		6		
MZ								6	
MZ nass	Wand	ungerissen						6	
								6	
MZ			gerissen					6	
MZ			ungerissen			6			
Summe:						60	60		

Tabelle 5-4: Versuchsprogramm der zweiten Versuchsserie

Brandversuche							
Stein	Probekörper	Riss	Format	Anker- durchmesser	$h_{nom}$	Herausziehen	Steinausbruch/ Steinspalten
KS	Einzelstein	ungerissen	3DF	6	45		3
	Steinpaket						2
	Einzelstein			8	50	3	
	Steinpaket					2	
	Einzelstein		12	50		3	
	Steinpaket					2	
	Einzelstein				NF		3
	Steinpaket						2
MZ	Einzelstein	ungerissen	3DF	6	45		3
	Steinpaket						2
	Einzelstein			8	50	3	
	Steinpaket					2	
	Einzelstein		12	50		3	
	Steinpaket					2	
	Einzelstein				NF		3
	Steinpaket						2
Summe:						10	30
Referenzversuche							
KS	Einzelstein	ungerissen	3DF	6	45		3
	Steinpaket						5
	Einzelstein			8	50	3	
	Steinpaket					5	
	Einzelstein		12	50		3	
	Steinpaket					5	
	Einzelstein				NF		3
	Steinpaket						5
MZ	Einzelstein	ungerissen	3DF	6	45		3
	Steinpaket						5
	Einzelstein			8	50	3	
	Steinpaket					5	
	Einzelstein		12	50		6	
	Steinpaket					5	
	Einzelstein				NF		6
	Steinpaket						5
Summe:						16	54

Für die Versuche zu den Versagensarten Steinausbruch und Steinspalten wurden Bohrer der Größe  $d_{cut,m}$  verwendet. Um das Herausziehen des Schraubankers gezielt herbeizuführen, kamen Bohrer mit einem Bohrereckmaß  $\gg d_{cut,max}$  sowohl für die Brand- als auch die Referenzversuche zum Einsatz. Die genauen Installationsparameter sowie die geprüften Lasten sind im entsprechenden Abschnitt des Kapitels 6 aufgeführt.

### 5.3.1 Prüfungen im gerissenen oder feuchten Mauerwerk

In Tabelle 5-3 sind sowohl Versuche im feuchten Mauerwerk – in der Tabelle als nass bezeichnet – als auch im gerissenen Mauerwerk aufgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, den Einfluss von Rissen und Feuchtigkeit im Mauerwerk auf die Tragfähigkeit des Befestigungsmittels experimentell zu ermitteln.

Für die Versuche in nassem Mauerwerk wurden die Probekörper vor der Installation des Befestigungsmittels mindestens 24 Stunden vollständig unter Wasser gelagert, sodass von einer vollständigen Wassersättigung ausgegangen werden kann. Anschließend wurden die Befestigungsmittel in den nassen Probekörpern installiert und in den Brandofen eingebaut.

Zur Ermittlung des Einflusses von Rissen wurden die Mauersteine mittig aufgetrennt. In den Einzelsteinversuchen wurde ein 0,3 mm starkes Stahlblech zwischen die beiden Steinstücke eingelegt und die Probekörper anschließend gegen das Prüfgestell verkeilt. Bei der Wandherstellung hingegen wurden die Steine von den Maurern zusammengesetzt und normal eingemauert. Durch dieses Vorgehen entstanden in den Wänden Rissbreiten von 0,3 mm bis 0,8 mm. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Probekörper der gerissenen Versuche im Einzelstein (links) und in der Wand (rechts).

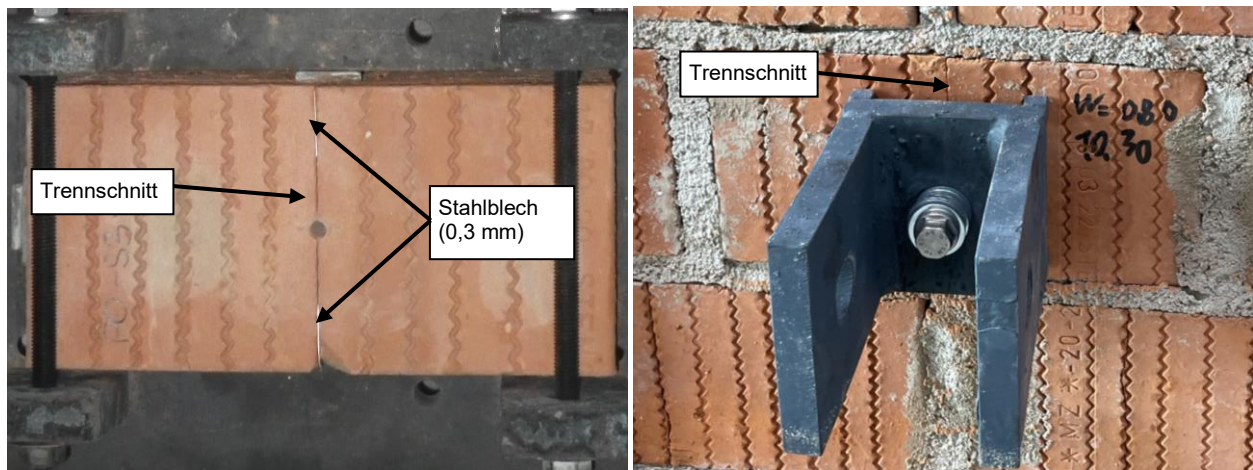


Abbildung 5-10: Im Riss installierte Befestigungsmittel im Einzelstein (links) und in der Wand (rechts)



## 6. Ergebnisse

In den nachfolgenden Unterabschnitten werden die Ergebnisse der Brand- und Referenzversuche dargestellt. Bei den Versuchen zeigte sich, dass die jeweils angestrebte Versagensart (vgl. Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4) nicht in allen Fällen eintrat. Die Versuchsergebnisse werden im Folgenden nach der jeweils beobachteten Versagensart gegliedert dargestellt.

### 6.1 Steinausbruch und -spalten

Für die Brandversuche der Versuchsreihe Steinausbruch und -spalten wurden Bohrer der Größe  $d_{\text{cut,m}}$  verwendet (vgl. Abschnitt 5.3). Bei einigen Versuchen der Versuchsreihe zum Herausziehen des Befestigungsmittels kam es trotz der Verwendung eines Bohrers Bohrereckmaß  $\gg d_{\text{cut,max}}$  zu einem Ausbruch- oder Spaltversagen des Mauersteins. Auch diese Ergebnisse werden in diesem Abschnitt dargestellt und sind in Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 aufgeführt. Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2 stellen die Ergebnisse grafisch in Form eines Diagramms dar.

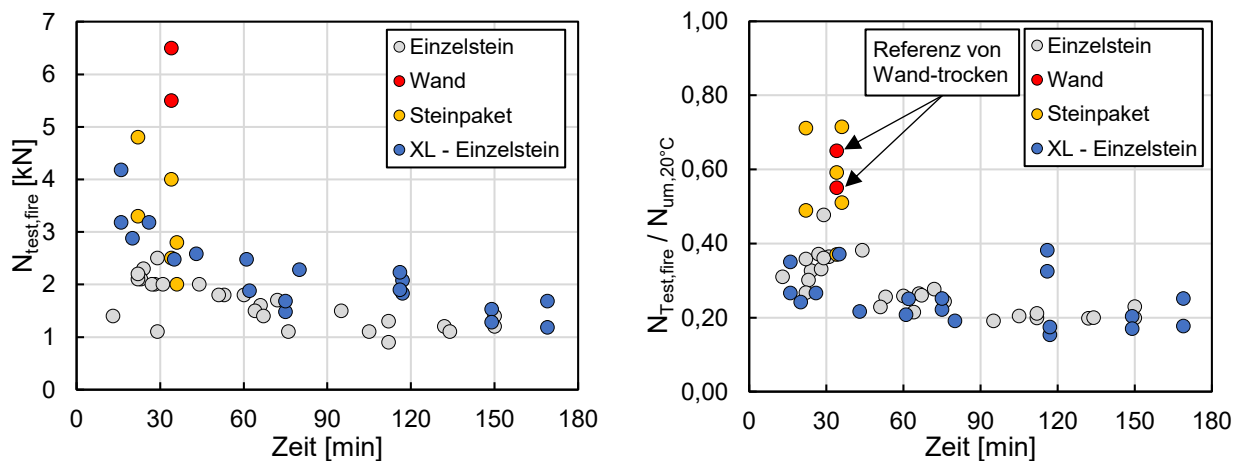


Abbildung 6-1: Versuchsergebnisse Steinausbruch und -spalten in Kalksandsteinen, dargestellt auf Prüflastniveau (links) und bezogen auf die Referenzversuche (rechts)

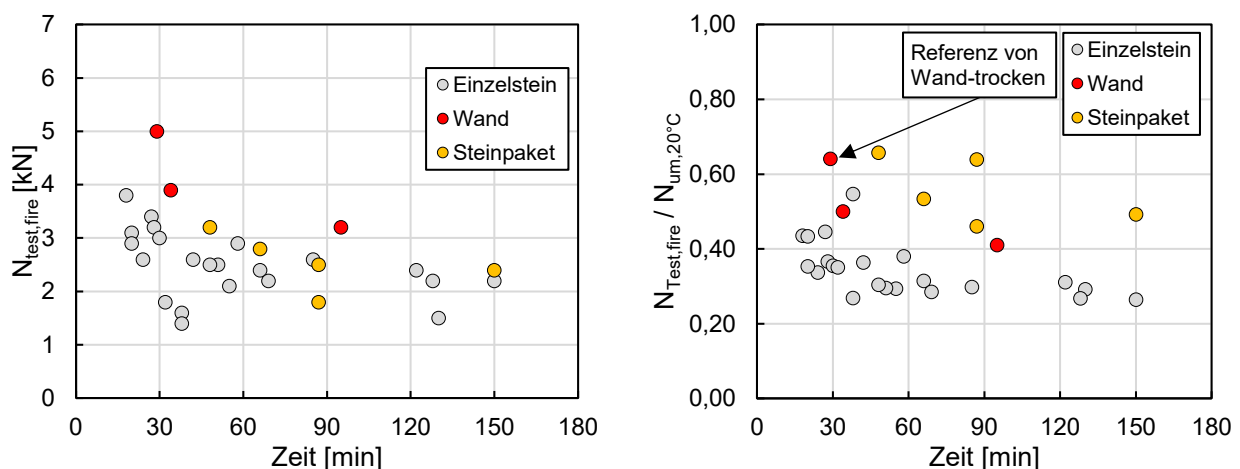


Abbildung 6-2: Versuchsergebnisse Steinausbruch und -spalten in Mauerziegeln, dargestellt auf Prüflastniveau (links) und bezogen auf die Referenzversuche (rechts)

Tabelle 6-1: Versuchsergebnisse Steinausbruch und -spalten in Kalksandsteinen

Testart	Steinart	Ø - Schraube	Ø - Bohrer	Verankerungs- tiefe	MW-Referenzversuche N <sub>um,20°C</sub>	Prüflast N <sub>test,fire</sub>	N <sub>test,fire</sub> / N <sub>um,20°C</sub>	Versagenszeit	Versagensart	Kommentar		
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[-]	[min]	[-]	[-]		
Einzelstein trocken	3DF	10	10,23	50	7,05	2,30	0,33	24	Ausbruch			
						1,80	0,26	53	Ausbruch			
						1,40	0,20	150	kein Versagen			
Einzelstein nass					6,05	2,00	0,33	28	Ausbruch			
						1,60	0,26	66	Ausbruch			
						1,20	0,20	132	Ausbruch			
Einzelstein gerissen					5,24	2,50	0,48	29	Ausbruch			
						2,00	0,38	44	Ausbruch			
						1,20	0,23	150	kein Versagen			
Wand nass			10,30		10,00	6,50	0,65	34	Ausbruch	Referenz von Wand-trocken		
						5,50	0,55	34	Ausbruch			
Steinpaket trocken		NF	12		12,32	6,75	3,30	0,49	22	Ausbruch		
	4,80						0,71	22	Ausbruch			
	3DF					8	8,82	3,92	2,80	0,71	36	Ausbruch
		2,00	0,51		36				Ausbruch			
		6,76	4,00		0,59			34	Ausbruch			
	2,50		0,37		34	Ausbruch						
XL Einzelstein trocken	>3DF	10	10,22	60	11,94	3,18	0,27	16	Ausbruch			
						4,18	0,35	16	Ausbruch			
						3,18	0,27	26	Ausbruch			
						2,48	0,21	61	Ausbruch			
						2,58	0,22	43	Ausbruch			
						2,28	0,19	80	Ausbruch			
						2,88	0,24	20	Ausbruch			
						1,83	0,15	117	Ausbruch			
						2,08	0,17	117	Ausbruch			
						10	10,22	40	7,52	1,88	0,25	62
		1,53	0,20	149	Ausbruch							
		1,28	0,17	149	Ausbruch							
		6,68	2,48	0,37	35				Ausbruch			
			1,68	0,25	169				Ausbruch			
			1,18	0,18	169				Ausbruch			
		5,85	2,23	0,38	116				Ausbruch			
			1,90	0,32	116				Ausbruch			
		6,68	1,48	0,22	75				Ausbruch			
			1,68	0,25	75				Ausbruch			
		Einzelstein trocken	3DF	6	6,33				45	6,98	2,10	0,30
						1,80	0,26	60			Ausbruch	
1,50	0,21					64	Ausbruch					
12	12,31			50	7,87	2,10	0,27	22	Ausbruch			
						1,80	0,23	51	Ausbruch			
						1,50	0,19	95	Ausbruch			
			4,52		1,40	0,31	13	Ausbruch				
					1,10	0,24	76	Ausbruch				
					0,90	0,20	112	Ausbruch				
8	8,85		6,15		2,20	0,36	22	Ausbruch				
					1,70	0,28	72	Ausbruch				
					1,30	0,21	112	Ausbruch				
			3DF	6	6,7	45	5,39	2,00	0,37	27	Ausbruch	
								1,40	0,26	67	Ausbruch	
								1,10	0,20	105	Ausbruch	
							5,50	2,00	0,36	31	Ausbruch	
1,10	0,20							134	Ausbruch			
3,05	1,10							0,36	29	Ausbruch		

Tabelle 6-2: Versuchsergebnisse Steinausbruch und -spalten in Mauerziegeln

Testart	Steinart	Ø - Schraube	Ø - Bohrer	Verankerungs- tiefe	MW-Referenzversuche N <sub>um, 20°C</sub>	Prüflast N <sub>test, fire</sub>	N <sub>test, fire</sub> / N <sub>um, 20°C</sub>	Versagenszeit	Versagensart	Kommentar	
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[-]	[min]	[-]	[-]	
Einzelstein trocken	3DF	10	10,23	50	7,63	3,40	0,45	27	Ausbruch		
						2,90	0,38	58	Ausbruch		
						2,40	0,31	66	Ausbruch		
Einzelstein nass		10	10,23	50	8,73	3,80	0,44	18	Ausbruch		
						3,20	0,37	28	Ausbruch		
						2,60	0,30	85	Ausbruch		
Einzelstein gerissen		10	10,23	45	8,33	2,20	0,26	150	kein Versagen		
Einzelstein trocken		6	6,70			1,60	0,27	38	Ausbruch		
Einzelstein gerissen						1,40	0,55	38	Ausbruch		
Einzelstein nass		6	6,70	50	7,14	3,10	0,43	20	Ausbruch		
						2,60	0,36	42	Ausbruch		
						2,10	0,29	55	Ausbruch		
Wand trocken		10	10,30	50	7,80	3,20	0,41	95	Ausbruch		
						3,90	0,50	34	Ausbruch		
Wand nass		10	10,30	45	5,24	2,80	0,53	66	Ausbruch		
Steinpaket trocken		6	6,30			50	4,87	3,20	0,66	48	Ausbruch
	2,40			0,49	150			kein Versagen			
	NF	12	12,32	50	3,91	2,50	0,64	87	Ausbruch		
						1,80	0,46	87	Ausbruch		
Einzelstein trocken	3DF	6	6,33	45	8,45	3,00	0,36	30	Ausbruch		
						2,50	0,30	51	Ausbruch		
		2,60	0,34	24	Ausbruch						
	12	12,31	50	7,71	2,40	0,31	122	kein Versagen			
					2,20	0,29	69	Ausbruch			
					1,80	0,35	32	Ausbruch			
	NF	12	12,31	50	5,13	1,50	0,29	130	kein Versagen		
						2,90	0,35	20	Ausbruch		
						2,50	0,30	48	Ausbruch		
3DF	8	8,85	50	8,21	2,20	0,27	128	Ausbruch			

Die Versagensarten Steinausbruch und Steinspalten sind in den Tabellen unter dem Sammelbegriff Ausbruch zusammengefasst. Referenzversuche an nassen Wänden wurden nicht durchgeführt. Die Ergebnisse der Einzelsteinversuche in Kalksandsteinen zeigen bei der Versagensart Herausziehen vergleichbare Traglasten in den Referenzserien unter trockenen (5,39 kN) und nassen Bedingungen (5,50 kN). Bei der Versagensart Steinausbruch wiesen die nassen Kalksandsteine hingegen rund 14 % geringere Tragfähigkeiten auf. In Mauerziegeln ergaben die Zugversuche in nassen Steinen 14 % höhere Tragfähigkeiten bei der Versuchsserie zum Herausziehen des Befestigungsmittels und 20 % höhere Tragfähigkeiten in der Versuchsserie zum Steinausbruch im Vergleich zu den Versuchsserien in trockenen Steinen. Dieser Effekt kann jedoch nicht allein auf den Einfluss der Feuchtigkeit zurückgeführt werden, da die Druckfestigkeitsprüfungen der Steine (vgl. Tabelle 5-1) eine Abweichung von 19 N/mm<sup>2</sup> (40%) zeigten und somit ebenfalls die Referenztragfähigkeiten beeinflusst haben könnten. Aus diesem Grund werden die Brandversuche in nassen Wänden auf die Referenzversuche an trockenen Wänden bezogen. Die als „XL-Einzelstein“ bezeichneten Versuche wurden im Rahmen einer separaten Versuchsreihe, unabhängig von diesem Forschungsvorhaben, am IWB Stuttgart durchgeführt. Dabei dienten großformatige Kalksandstein-Planelemente als Verankerungsgrund für die Befestigungsmittel. Der XL-Kalksandstein wies die Abmessungen 367 × 150 × 498 mm auf. Nach Herstellerangaben betrug seine Festigkeitsklasse 16 MPa bei einer Rohdichte von 2,0 kg/dm<sup>3</sup>.



## 6.2 Herausziehen des Befestigungsmittels

Die Versagensart Herausziehen des Befestigungsmittels konnte trotz der Verwendung eines Bohrers Bohrereckmaß  $\gg d_{\text{cut,max}}$  nur in wenigen Versuchen gezielt hervorgerufen werden. In den Referenzversuchen wurde dieselbe Bohrergröße verwendet, was zu einer deutlichen Reduzierung der Referenzlasten führte. Die nachfolgenden Tabellen und Abbildungen geben einen Überblick über die erzielten Versuchsergebnisse.

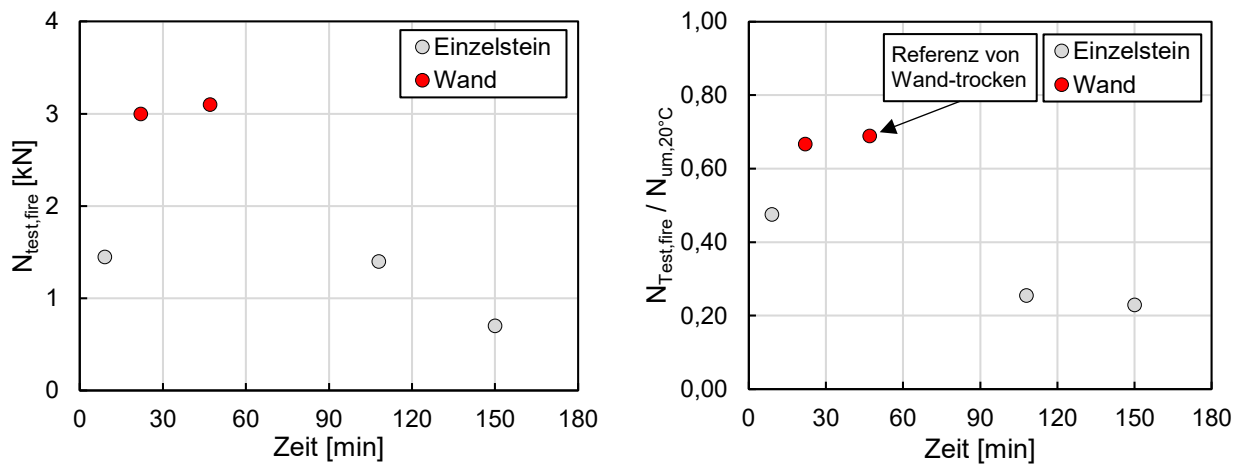


Abbildung 6-3: Versuchsergebnisse Herausziehen des Befestigungsmittels in Kalksandsteinen, dargestellt auf Prüflastniveau (links) und bezogen auf die Referenzversuche (rechts)

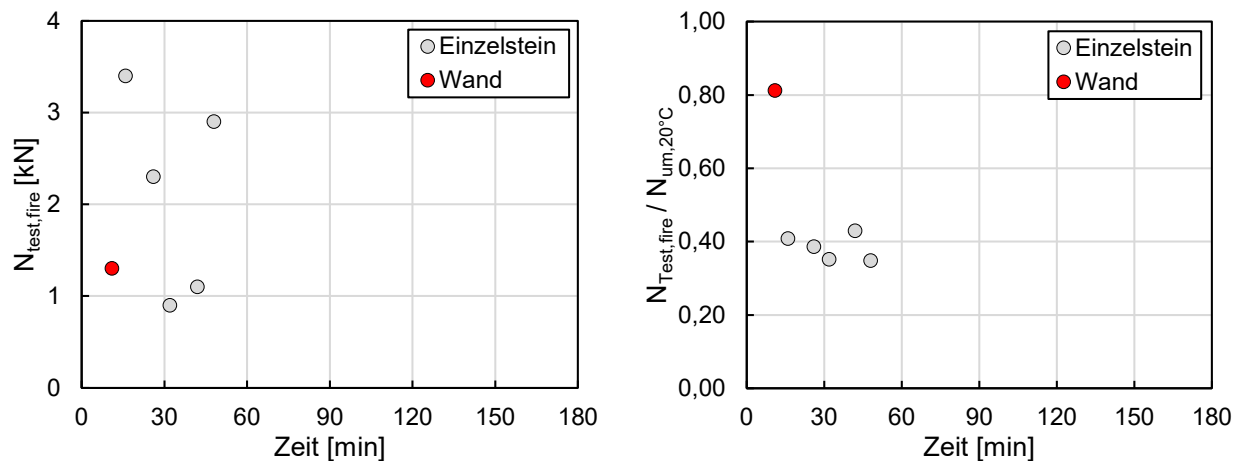


Abbildung 6-4: Versuchsergebnisse Herausziehen des Befestigungsmittels in Mauerziegeln, dargestellt auf Prüflastniveau (links) und bezogen auf die Referenzversuche (rechts)

Tabelle 6-3: Versuchsergebnisse Herausziehen in Kalksandsteinen

Testart	Steinart	Ø - Schraube	Ø - Bohrer	Verankerungstiefe	MW-Referenzversuche $N_{\text{um,20}^\circ\text{C}}$	Prüflast $N_{\text{test,fire}}$	$N_{\text{test,fire}} / N_{\text{um,20}^\circ\text{C}}$	Versagenszeit	Versagensart	Kommentar
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[-]	[min]	[-]	[-]
Einzelstein nass	3DF	6	6,70	45	5,50	1,40	0,25	108	Herausziehen	
Einzelstein gerissen					3,05	1,45	0,48	9	Herausziehen	
						0,70	0,23	150	kein Versagen	
Wand trocken					4,50	3,00	0,67	22	Herausziehen	
Wand nass					4,50	3,10	0,69	47	Herausziehen	Referenz von Wand-trocken

Auch für die Versagensart Herausziehen des Befestigungsmittels wurden keine Referenzversuche an nassen Wänden durchgeführt. Aus diesem Grund wurden die Referenzlasten aus den Versuchen in trockenen Wänden verwendet (vgl. Anmerkungen in Abschnitt 6.1).

Tabelle 6-4: Versuchsergebnisse Herausziehen in Mauerziegeln

Testart	Steinart	Ø - Schraube	Ø - Bohrer	Verankerungstiefe	MW-Referenzversuche $N_{um, 20^\circ C}$	Prüflast $N_{test, fire}$	$N_{test, fire} / N_{um, 20^\circ C}$	Versagenszeit	Versagensart	Kommentar
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[-]	[min]	[-]	[-]
Einzelstein trocken	3DF	6	6,70	45	5,96	2,30	0,39	26	Herausziehen	
				45	2,56	1,10	0,43	42	Herausziehen	
		10	10,23	50	8,33	0,90	0,35	32	Herausziehen	
						3,40	0,41	16	Herausziehen	
Einzelstein gerissen						2,90	0,35	48	Herausziehen	
Wand gerissen		6	6,70	45	1,6	1,30	0,81	11	Herausziehen	

### 6.3 Stahlversagen der Edelstahlschrauben

In diesem Abschnitt werden die Versuchsergebnisse dargestellt, bei denen statt eines Steinversagens ein Stahlversagen der Schraubanker aus Edelstahl aufgetreten ist. Der Großteil der Versuche wurde mit Schraubankern des Durchmessers 6 mm und 10 mm durchgeführt, sodass für diese Größen die meisten Ergebnisse vorliegen. Die Resultate sind in Abbildung 6-5 sowie Tabelle 6-5 dargestellt. Die Umrechnung auf die Stahlspannung  $\sigma_{s, fire}$  erfolgte unter Verwendung der folgenden Schaftdurchmesser:

- 5,7 mm als Durchmesser des Schraubenschafts der 6 mm Schraube
- 7,9 mm als Durchmesser des Schraubenschafts der 8 mm Schraube
- 9,9 mm als Durchmesser des Schraubenschafts der 10 mm Schraube

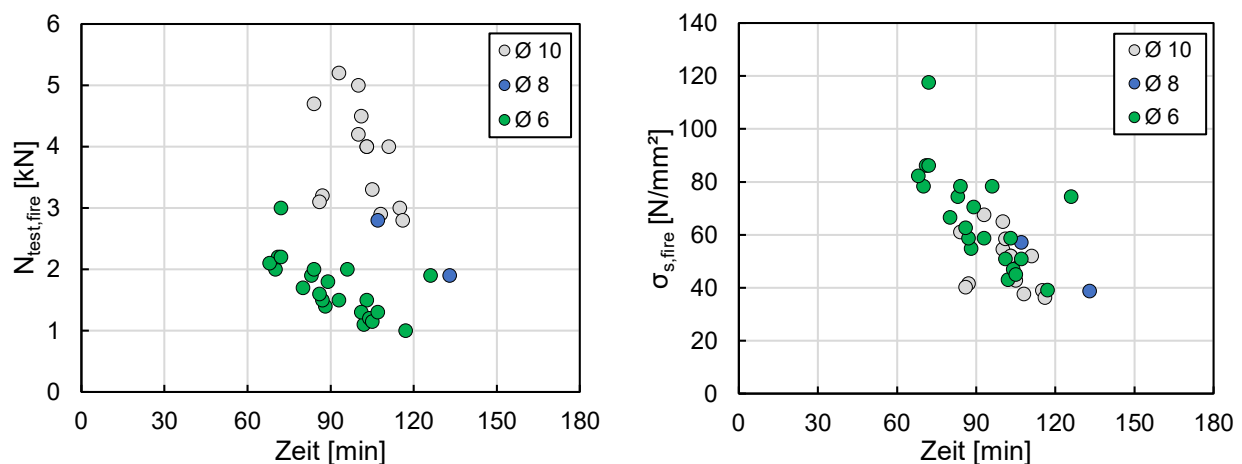


Abbildung 6-5: Versuchsergebnisse Stahlversagen mit Edelstahlschrauben in Mauerziegeln und Kalksandsteinen, dargestellt auf Prüflastniveau (links) und auf Stahlspannungsniveau (rechts)

Tabelle 6-5: Versuchsergebnisse Stahlversagen in Kalksandsteinen und Mauerziegeln

Testart	Steinart	Ø - Schraube	Ø - Bohrer	Verankerungs- tiefe	Prüflast N <sub>test,fire</sub>	Versagenszeit	Versagensart	Kommentar	
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[min]	[-]	[-]	
Wand trocken	KS 3DF	10	10,30	50	5,00	100	Stahlversagen		
					4,00	103	Stahlversagen		
					3,00	115	Stahlversagen		
Wand gerissen					5,20	93	Stahlversagen		
					4,20	100	Stahlversagen		
					2,90	108	Stahlversagen		
Wand nass			3,20	87	Stahlversagen				
Steinpaket trocken		6	6,33	45	3,00	72	Stahlversagen		
			6,70		1,50	103	Stahlversagen		
Wand trocken					2,00	70	Stahlversagen		
					1,40	88	Stahlversagen		
Wand gerissen					1,70	80	Stahlversagen		
	1,10				102	Stahlversagen			
	2,20				71	Stahlversagen			
Wand nass	1,50				87	Stahlversagen			
Wand trocken	MZ 3DF	10	10,30	50	4,70	84	Stahlversagen		
					2,80	116	Stahlversagen		
Wand gerissen					4,00	111	Stahlversagen		
					3,10	86	Stahlversagen		
					4,50	101	Stahlversagen		
					4,00	103	Stahlversagen		
					3,30	105	Stahlversagen		
Steinpaket trocken		6	6,30	45	1,30	101	Stahlversagen		
			6,33		2,00	96	Stahlversagen		
Einzelstein trocken			6,70		1,90	126	Stahlversagen		
			6,73		1,20	104	Stahlversagen		
					2,10	68	Stahlversagen		
					1,80	89	Stahlversagen		
					1,50	93	Stahlversagen		
					2,20	72	Stahlversagen		
Wand nass			6,70		1,90	83	Stahlversagen		
					1,60	86	Stahlversagen		
					1,15	105	Stahlversagen		
					1,00	117	Stahlversagen		
		8	8,82	50	2,80	107	Stahlversagen		
					1,90	133	Stahlversagen		
Steinpaket trocken		6	6,69	45	1,30	107	Stahlversagen		
					2,00	84	Stahlversagen		

#### 6.4 Herausziehen eines Steins

Neben den zuvor beschriebenen Versagensarten ist auch ein Versagen der Mörtelfuge – also das Herausziehen eines Steins aus der Wandscheibe – denkbar. Diese Versagensart konnte aufgrund der verwendeten Prüfaufbauten nur bei den Wandversuchen indirekt mituntersucht werden, da bei den beiden anderen Aufbauten jeweils auf dem geprüften Stein abgestützt wurde (vgl. Abschnitt 5.2). In keiner der Wandprüfungen wurde jedoch ein vollständiges oder auch nur teilweises Herausziehen eines Steins beobachtet.

## 7. Auswertung

In diesem Abschnitt werden verschiedene Ansätze zur Auswertung der in Abschnitt 6 dargestellten Versuchsergebnisse und zur Ermittlung der Abminderungsfaktoren vorgestellt

### 7.1 Gemeinsame Auswertung aller Steinversagensarten

Während die Versuchsergebnisse mit der Versagensart Steinausbruch/-spalten in Kalksandsteinen (vgl. Abbildung 6-1) einen klaren Trend aufweisen, streuen die Ergebnisse in Mauerziegeln deutlich stärker (vgl. Abbildung 6-2). Die Versagensart Herausziehen des Befestigungsmittels konnte in beiden Verankerungsuntergründen nur in wenigen Fällen beobachtet werden, sodass eine separate Auswertung nicht zielführend erscheint. Insgesamt zeigen die Versagensarten Steinausbruch/-spalten und Herausziehen in Kalksandstein und Mauerziegel eine gute Übereinstimmung, sodass eine gemeinsame Betrachtung sinnvoll ist (vgl. Abbildung 7-1). Die gemeinsame Betrachtung der Versagensarten ist auch vor dem Hintergrund gerechtfertigt, dass die charakteristischen Widerstände in den Produktbewertungen bisher nicht nach Versagensart differenziert werden. Dort wird in der Regel der charakteristische Widerstand  $N_{Rk} = N_{Rk,b} = N_{Rk,p}$  angegeben. Häufig wird im Bewertungsverfahren lediglich die kritische Randposition geprüft, sodass der Widerstand als  $N_{Rk} = N_{Rk,b} = N_{Rk,p} = N_{Rk,b,c} = N_{Rk,p,c}$  angegeben wird. Eine Bemessung im Brandfall könnte daher nach dem folgenden Schema erfolgen:

$$N_{Rk,fi} = N_{Rk} \cdot \psi_{fi}(t_{fi}) \quad (16)$$

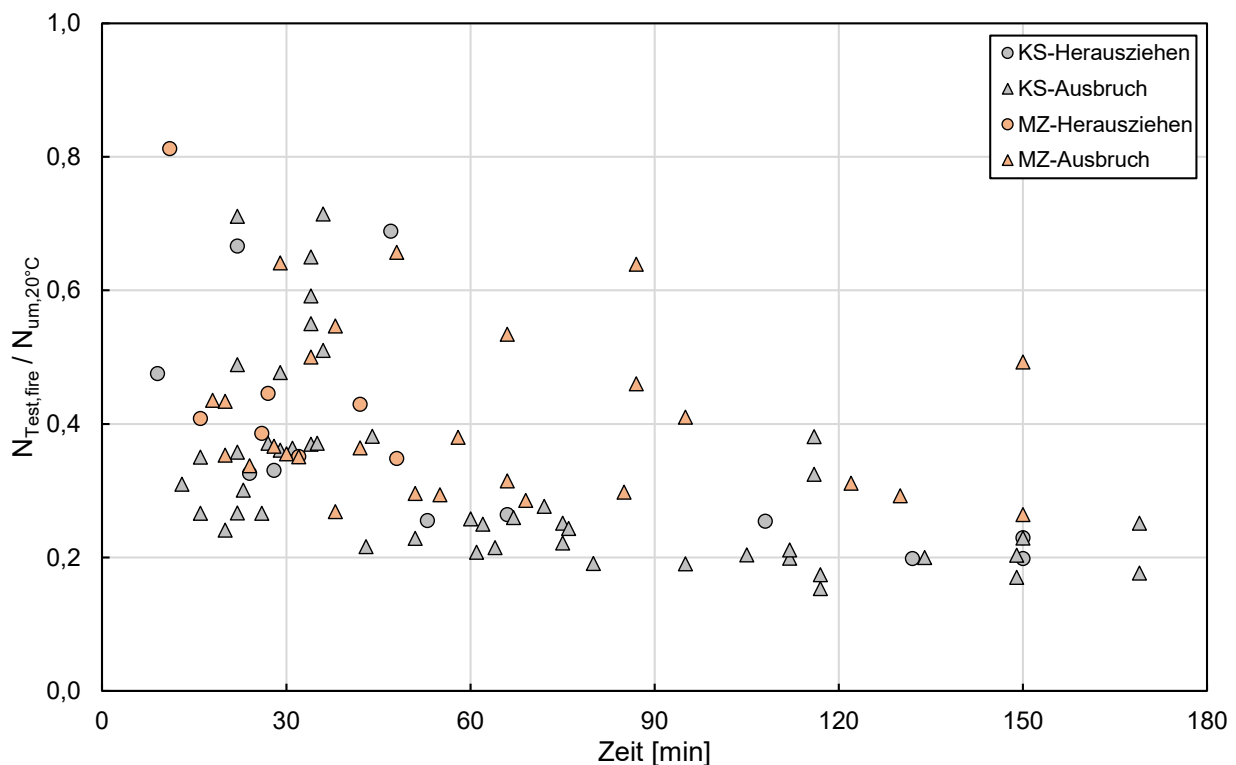


Abbildung 7-1: Alle Versuchsergebnisse der Versagensarten Herausziehen des Befestigungsmittels sowie Steinausbruch/-spalten in Kalksandsteinen und Mauerziegeln bezogen auf die Referenzversuche

### 7.1.1 Einfluss von Rissen und Feuchtigkeit

Neben der Bestimmung der Abminderungsfaktoren stand auch die Beurteilung von während des Brandes entstehenden Rissen sowie der Einfluss von nassem Mauerwerk im Fokus. Hierzu wurden Brand- und Referenzversuche an zuvor aufgetrennten Steinen sowie an 24 Stunden wassergelagerten Steinen bzw. Wänden (vgl. Abschnitt 5.3.1) durchgeführt. Lediglich an den Wandscheiben wurden keine nassen Referenzversuche vorgenommen, sodass die Brandergebnisse auf die trockenen Referenzversuche bezogen werden. Dies erscheint praktikabel, da die Versuche an den Einzelsteinen ein in etwa vergleichbares Traglastniveau ergeben haben. In der nachfolgenden Abbildung sind die Rissversuche sowie die Versuche an nassen Wänden aus Abbildung 7-1 markiert.

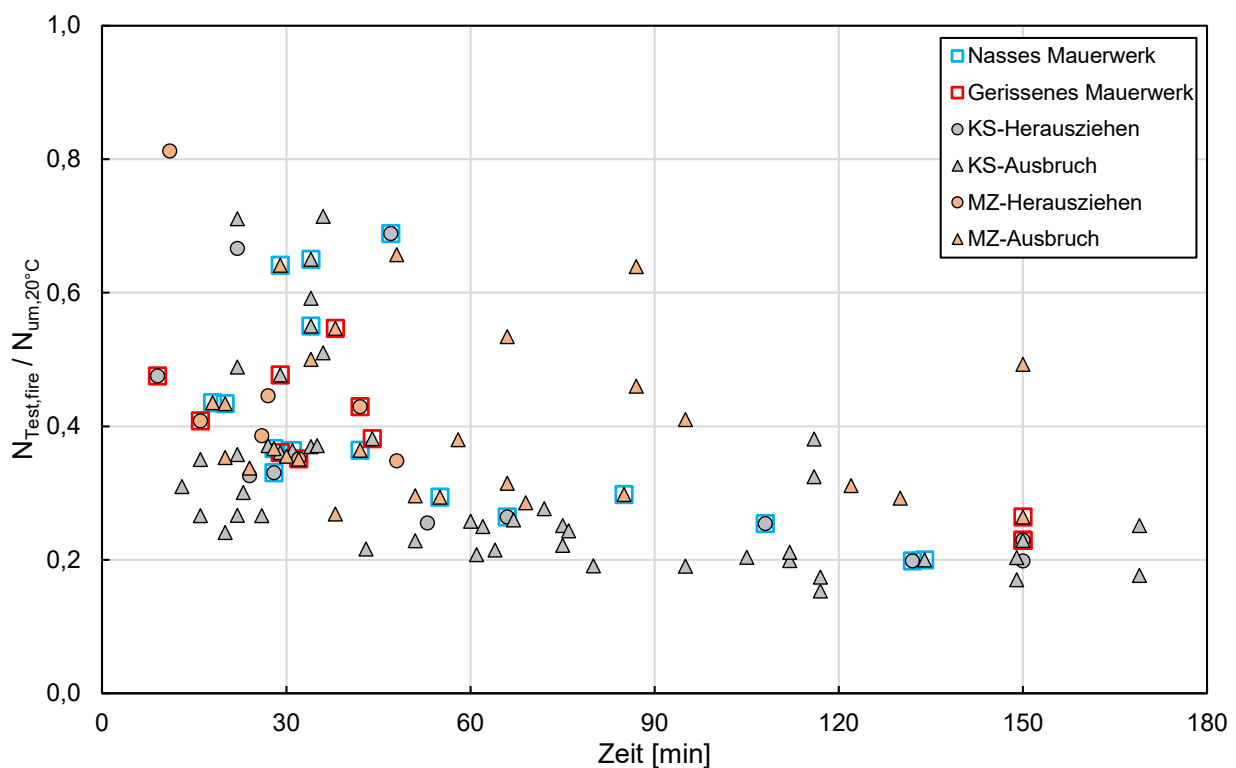


Abbildung 7-2: Alle Versuchsergebnisse der Versagensarten Herausziehen des Befestigungsmittels sowie Stein- ausbruch/-spalten inkl. Markierung der nassen und gerissenen Tests in Kalksandsteinen und Mauerziegeln bezogen auf die Referenzversuche

Die Versuchsergebnisse liegen im mittleren Bereich des gesamten Streubands. Durch den Vergleich von nassen und gerissenen Brandversuchen mit den entsprechenden nassen und gerissenen Referenzversuchen lassen sich andere Einflussfaktoren ausschließen, sodass eine isolierte Betrachtung der Aspekte Rissbildung und Feuchtigkeit möglich ist. Die Entstehung von Rissen während eines Brandereignisses wurde bei den ungerissenen Brandversuchen implizit mitgeprüft und ist daher bereits in den resultierenden Abminderungsfaktoren enthalten. Das separate Testen von gerissenen und nassen Probekörpern erlaubt es, den Einfluss alleiniger Feuchtigkeit oder alleiniger Rissbildung im Brandfall zu ermitteln. Da die Ergebnisse im Streuband der

Gesamtheit der Versuche liegen, ist eine gesonderte Betrachtung oder Berücksichtigung im Nachweis nicht erforderlich.

### 7.1.2 Auswertung der Ergebnisse: Trendlinie im 5%-Quantil

In diesem Abschnitt wird ein erster statistischer Auswertungsvorschlag vorgestellt. Da die Ergebnisse für Kalksandstein einen klaren Trend aufweisen und die Ergebnisse für Mauerziegel in allen Fällen gleichwertig oder besser sind, erfolgt die Bestimmung der Abminderungsfaktoren ausschließlich auf Grundlage der Kalksandsteinergebnisse. Die Übertragung auf den Verankerungsgrund Mauerziegel ist im Anschluss möglich. Es wird eine Potenzfunktion als Trendlinie durch die Datenpunkte der Kalksandsteinergebnisse gelegt. Die Potenzfunktion wird so weit nach unten verschoben, dass 5 % der Messwerte unterhalb der Kurve liegen. Dazu wurde zunächst der Fehler – also der Abstand des jeweiligen Datenpunkts zur Trendlinie – ermittelt. Anschließend wurde das 5 %-Quantil dieser Fehler berechnet und zur Verschiebung der Kurve verwendet. Die so angepasste Funktion stellt damit eine geglättete, modellgestützte Approximation des empirischen 5 %-Quantils dar. Die Abminderungsfaktoren ergeben sich aus den Funktionswerten der verschobenen Potenzfunktion zu den Zeitpunkten 30, 60, 90 und 120 Minuten.

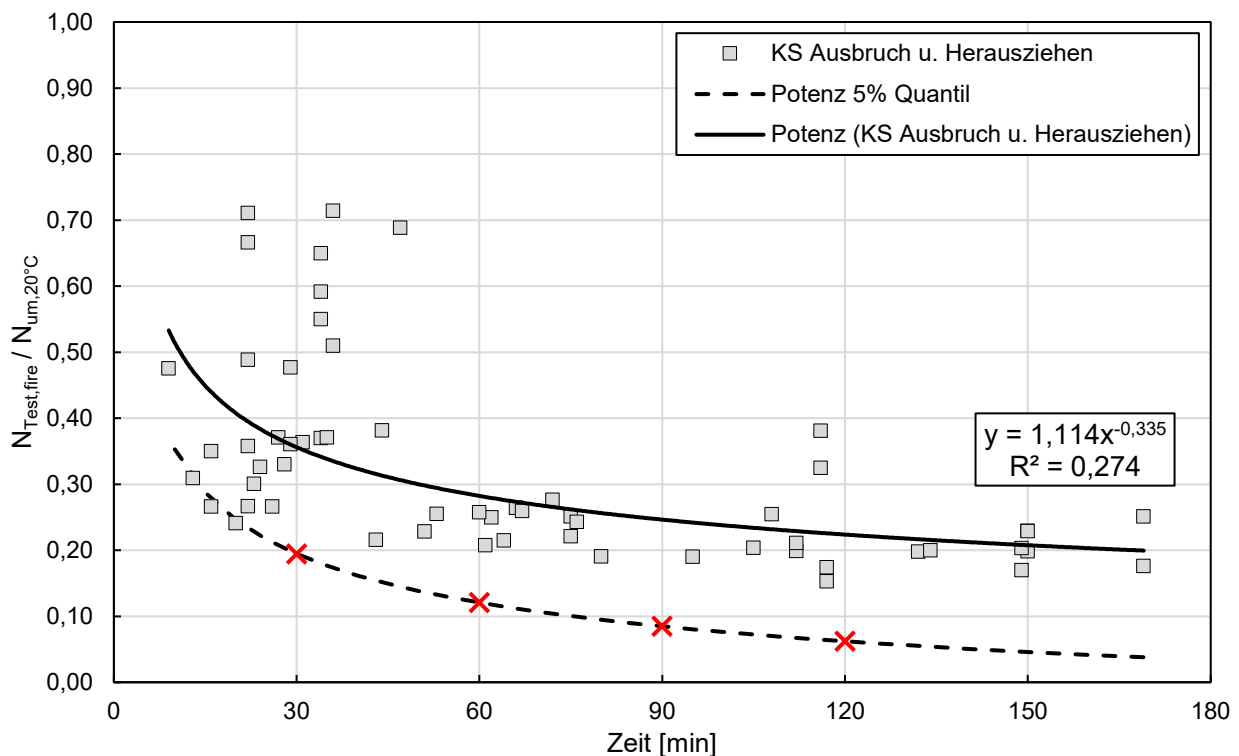


Abbildung 7-3: Ermittlung der Abminderungsfaktoren durch Verschieben der Trendlinie in das 5% Quantil

Die Trendlinie bildet die Messdaten mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,274$  nur eingeschränkt ab. Dies zeigt sich auch nach der Verschiebung der Trendlinie auf das 5 %-Quantil, bei der die Funktion so angepasst wird, dass 5 % der Messwerte darunterliegen. Insbesondere für

Branddauern von mehr als 30 Minuten führt dieses Vorgehen zu einer sehr konservativen Darstellung. Auf Basis dieser verschobenen Trendlinie ergeben sich die folgenden Abminderungsfaktoren:

Tabelle 7-1: Abminderungsfaktoren ermittelt durch Verschieben der Trendline in das 5% Quantil

Abminderungsfaktor $\psi_{fi}$	
R30	0,19
R60	0,12
R90	0,08
R120	0,06

### 7.1.3 Auswertung der Ergebnisse: Umhüllende Funktion

Aufgrund der sehr konservativen Abbildung der Ergebnisse für Branddauern von mehr als 30 Minuten bei Verwendung der Trendline im 5% Quantil wurde ein alternativer Auswertungsansatz entwickelt. Dabei wird eine Funktion bestimmt, die die Versuchsergebnisse an deren Unterseite abbildet, sodass kein Datenpunkt unterhalb der Kurve liegt. Die so ermittelte Funktion ergibt sich zu folgender Gleichung und ist in Abbildung 7-4 dargestellt:

$$f(x) = 0,57 \cdot x^{-0,29} \quad (17)$$

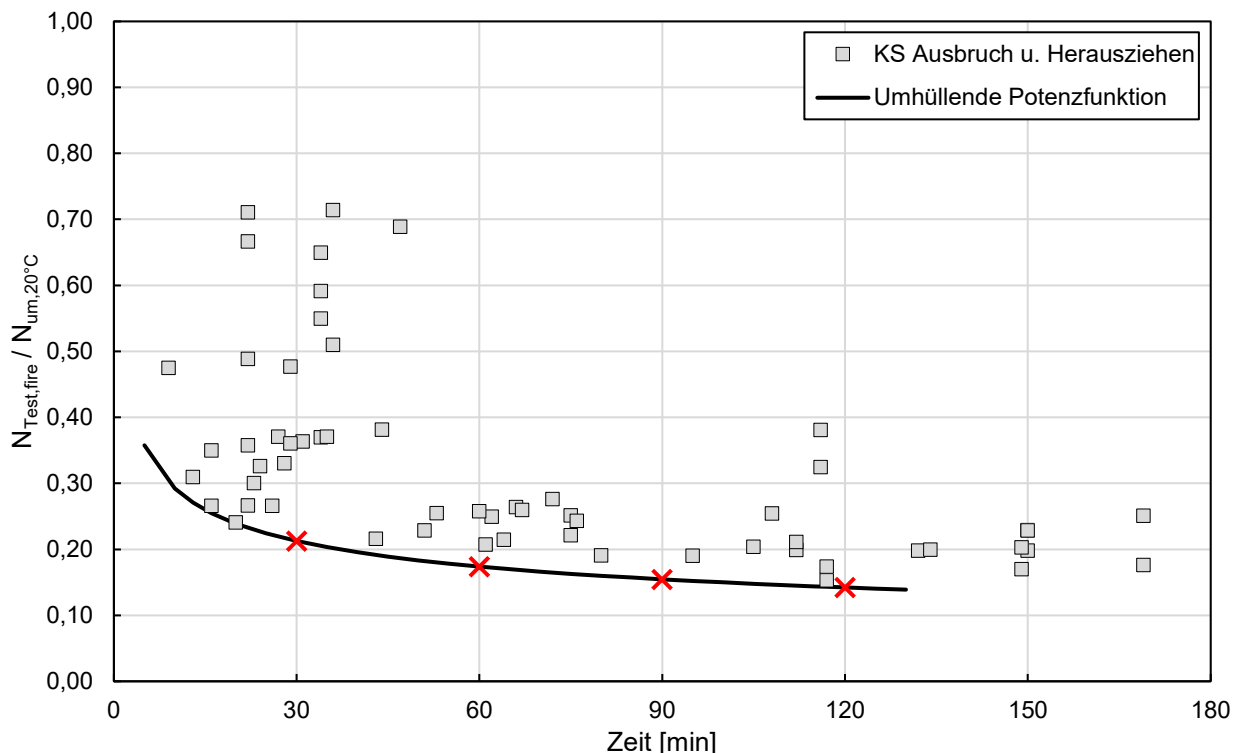


Abbildung 7-4: Ermittlung der Abminderungsfaktoren durch Bildung einer umhüllenden Funktion

Die ermittelte Funktion bildet die Unterkante der Datenreihe gut ab und stellt dennoch insbesondere für Branddauern über 30 Minuten konservative Werte sicher. Die daraus abgeleiteten Abminderungsfaktoren ergeben sich zu:

Tabelle 7-2: Abminderungsfaktoren ermittelt durch Bildung einer umhüllenden Funktion

Abminderungsfaktor $\psi_{fi}$	
R30	0,21
R60	0,17
R90	0,15
R120	0,14

Alternativ kann die Auswertung der umhüllenden Funktion analog zum Vorgehen in den derzeit gültigen EADs erfolgen. Dazu wird eine Gerade durch die Funktionswerte bei 60 und 90 Minuten gebildet und bis zum Zeitpunkt 30 Minuten extrapoliert. Dies führt zu einer Reduzierung des Abminderungsfaktors bei 30 Minuten, während die Faktoren für die längeren Branddauern unverändert bleiben. Das Vorgehen ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

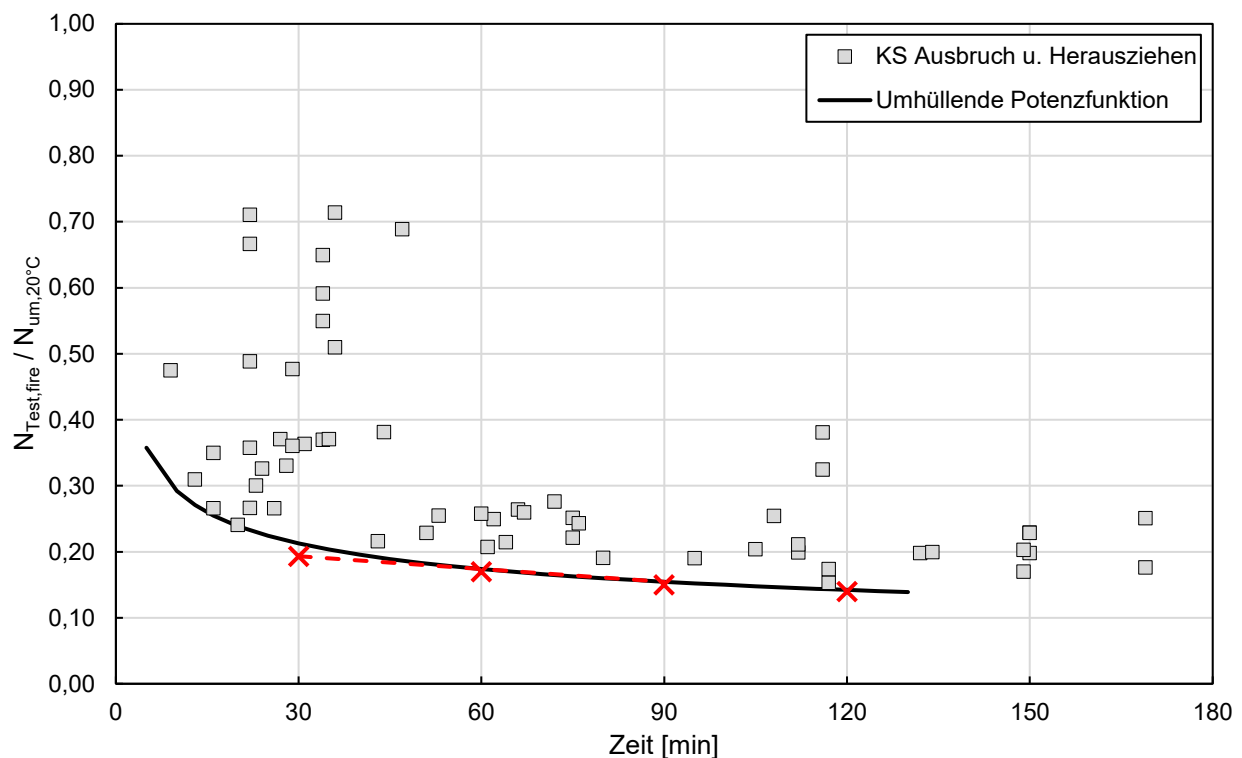


Abbildung 7-5: Ermittlung der Abminderungsfaktoren durch Bildung einer umhüllenden Funktion und Extrapolation der Abminderungsfaktoren bei 60 und 90 Minuten auf 30 Minuten

Die daraus resultierenden Abminderungsfaktoren sind in Tabelle 7-3 dargestellt. Durch dieses Vorgehen reduziert sich die Tragfähigkeit bei 30 Minuten um 2 Prozentpunkte.

Tabelle 7-3: Abminderungsfaktoren ermittelt durch Bildung einer umhüllenden Funktion und Extrapolation der Abminderungsfaktoren bei 60 und 90 Minuten auf 30 Minuten

Abminderungsfaktor $\psi_{fi}$	
R30	0,19
R60	0,17
R90	0,15
R120	0,14



### 7.1.4 Auswertung der Ergebnisse: Auswertung nach EAD [10]

Als letzter Auswertungsvorschlag wird im Folgenden das Vorgehen nach den derzeit gültigen EADs [10] angewendet. Das Verfahren basiert auf der linearen Regressionsmethode, bei der eine Funktion ermittelt und bis zum untersten Datenpunkt verschoben wird.

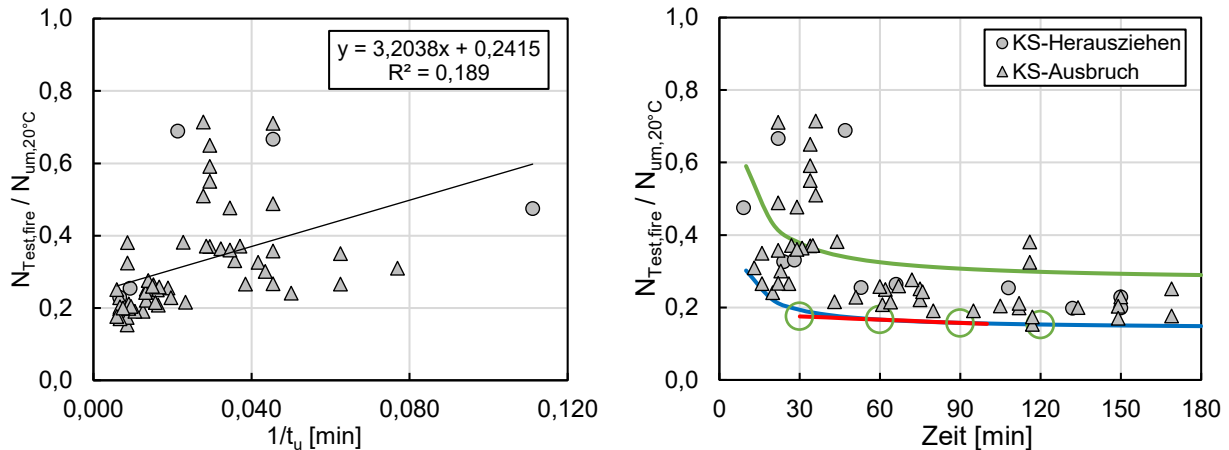


Abbildung 7-6: Ermittlung der Abminderungsfaktoren nach dem EAD-Verfahren, dargestellt ist die Ermittlung der Regressionsgerade (links) sowie die finale Auswertung (rechts)

Die Auswertung nach dem EAD-Verfahren liefert die folgenden Abminderungsfaktoren:

Tabelle 7-4: Abminderungsfaktoren ermittelt durch Auswertung mittels EAD-Verfahren

Abminderungsfaktor $\psi_{fi}$	
R30	0,18
R60	0,17
R90	0,16
R120	0,15

### 7.1.5 Vergleich mit den Reduktionsfaktoren nach EAD 330460 [9]

Wie in Abschnitt 3.1.2 erläutert, können die Feuerwiderstandswerte von Schrauben in Vollsteinen gegen Herausziehen und Steinausbruch anhand der Gleichungen (6) und (7) sowie (8) und (9) aus EAD 330460 [9] berechnet werden. Die Regeln basieren auf den Vorschriften für Beton, ergänzt um einen zusätzlichen Abminderungsfaktor von 0,7.

Die Abminderungsfaktoren gemäß EAD 330460 [9] sind in Tabelle 7-5 zusammengefasst. Ein Vergleich mit den in diesem Projekt ermittelten Versuchsergebnissen ist in Abbildung 7-8 dargestellt.

Es ergeben sich für die getestete Einbindetiefe  $h_{nom}$  (= 50 mm) identische Abminderungsfaktoren für Herausziehen und Steinausbruch.

Tabelle 7-5: Abminderungsfaktoren nach EAD 330460 [9]

Feuerwiderstandsklasse	Herausziehen	Steinausbruch
R30-90	$= 0,7 \cdot 0,25 = 0,175$	$= 0,7 \cdot 50/200 = 0,175$
R120	$= 0,7 \cdot 0,20 = 0,14$	$= 0,7 \cdot 0,8 \cdot 50/200 = 0,14$

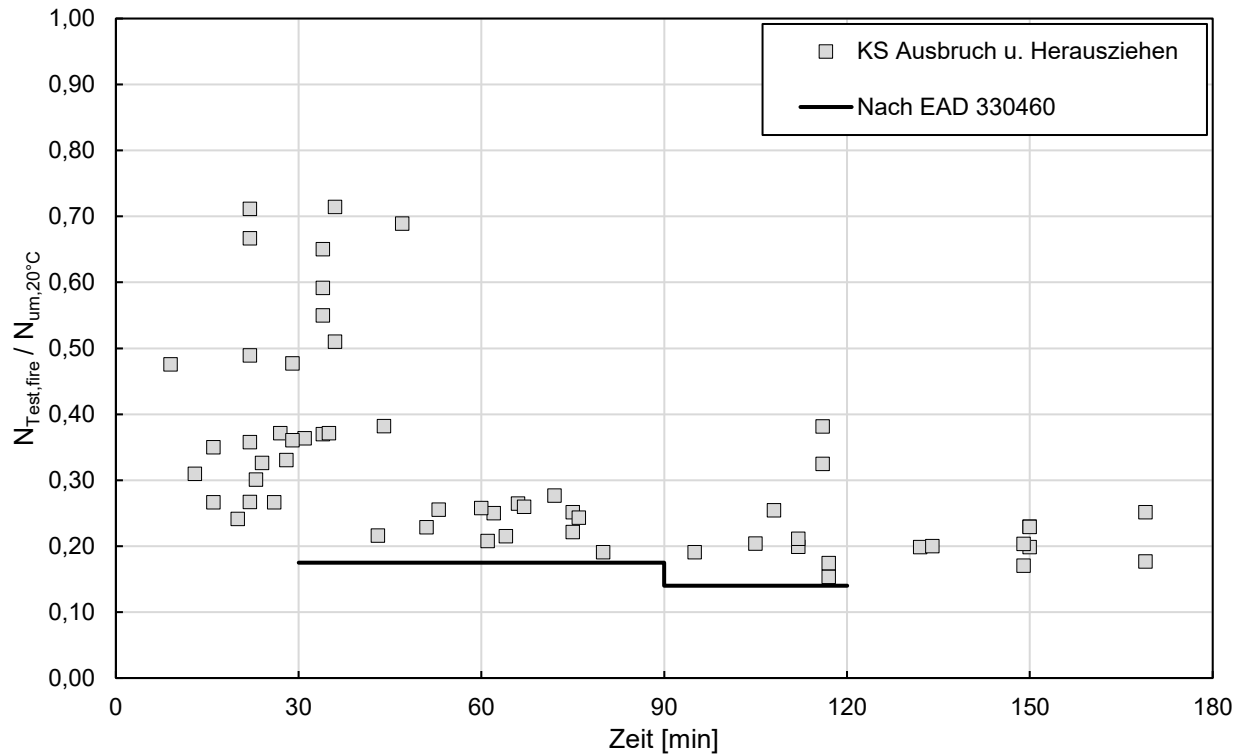


Abbildung 7-7: Vergleich der Abminderungsfaktoren gemäß EAD 330460 [9] mit den Versuchsergebnissen

## 7.2 Stahlversagen

In diesem Abschnitt werden die Erkenntnisse zum Feuerwiderstand gegenüber Stahlversagen in Mauerwerk erläutert und durch die Versuchsergebnisse dieses Forschungsvorhabens ergänzt. Grundsätzlich wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens nur Brandversuche mit Schraubankern aus Edelstahl durchgeführt. Folglich lassen sich keine neuen Erkenntnisse zum Stahlversagen von Kohlenstoffstahl über die Ergebnisse von Reichert und Thiele [4] hinaus ableiten.

### 7.2.1 Edelstahl

In Abschnitt 6.3 sind die Versuchsergebnisse dargestellt, bei denen ein Stahlversagen aufgetreten ist. Die Versuche wurden mit Edelstahlschrauben der Durchmesser 6, 8 und 10 mm von verschiedenen Herstellern durchgeführt. Die Ergebnisse können den in DIN EN 1992-4 Anhang D [11] angegebenen konservativen Stahlspannungen für Befestigungsmittel aus nichtrostendem Stahl,  $\sigma_{Rk,s,fi}$ , gegenübergestellt werden (vgl. Abbildung 7-8). Es ist deutlich zu erkennen, dass die gemessenen Prüfergebnisse die Werte der Norm [11] deutlich überschreiten.

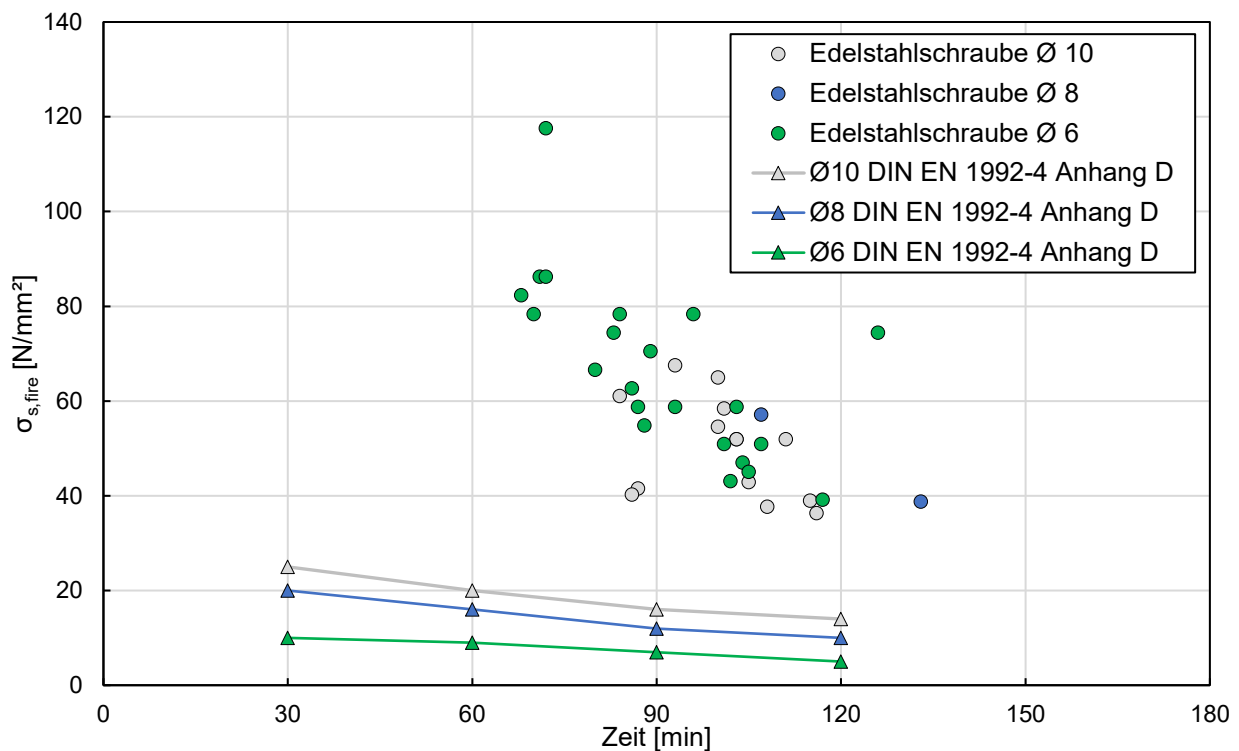


Abbildung 7-8: Versuchsergebnisse Stahlversagen der Edelstahlschrauben den charakteristischen Stahlspannungen nichtrostender Stähle aus DIN EN 1992-4 Anhang D [11] gegenübergestellt

Die Abbildung verdeutlicht, dass sich die Durchführung von Feuerwiderstandsprüfungen in jedem Fall lohnt. Eine Festlegung verbesserter Stahlspannungen ist an dieser Stelle jedoch nicht möglich, da zahlreiche Faktoren, wie etwa der Herstellungsprozess oder die Härtung der Schraube, von Hersteller zu Hersteller variieren. Es wird daher weiterhin empfohlen, die konservativen

Werte aus DIN EN 1992-4 Anhang D [11] zu verwenden, wenn der Feuerwiderstand gegen Stahlversagen ohne eigene Feuerwiderstandsprüfungen angegeben werden soll.

Da in Reichert und Thiele [4] gezeigt wurde, dass die in Beton ermittelten Stahlspannungen auch für Mauerwerksuntergründe gelten, können aus Sicht der Autoren die Ergebnisse der Feuerwiderstandsprüfungen in Beton (sofern diese in Stahlversagen resultierten) auf die Mauerwerksuntergründe Kalksandstein und Mauerziegel übertragen werden. Dadurch entfällt der sonst erforderliche mehrfache Prüfaufwand.

### **7.2.2 Kohlenstoffstahl**

Für Befestigungen aus Kohlenstoffstahl wurden in diesem Forschungsvorhaben keine zusätzlichen Erkenntnisse gewonnen. Der bisherige Kenntnisstand ist in Abschnitt 3.2.1 auf Grundlage der Ergebnisse an Injektionsankern von Reichert und Thiele [4] dargestellt. Dort wurden für Gewindestangen höhere Stahlspannungen  $\sigma_{Rk,s,fi}$  als in DIN EN 1992-4 Anhang D [11] vorgeschlagen. Diese Werte können jedoch – analog zur Begründung in Abschnitt 7.2.1 – aufgrund unterschiedlicher Herstellungs- und Härteprozesse nicht ohne Weiteres auf alle Schraubanker übertragen werden. Daher wird auch für Schraubanker aus Kohlenstoffstahl weiterhin die Verwendung der konservativen Stahlspannungen aus DIN EN 1992-4 Anhang D [11] empfohlen. Feuerwiderstandsprüfungen, die bereits in Beton zu einem Stahlversagen von Schraubankern aus Kohlenstoffstahl geführt haben, können auf die Verankerungsgründe Kalksandstein und Mauerziegel übertragen werden.

### **7.3 Verbundversagen von Injektionsankern**

Das Tragverhalten von Injektionsankern wurde bereits in einem vorangegangenen Forschungsvorhaben von Reichert und Thiele [4] untersucht. Dabei wurden Versuche an verschiedenen Mauerwerksuntergründen aus Loch- und Vollsteinen durchgeführt. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass eine Berechnung auf Grundlage der Verbundspannungs-Temperatur-Beziehung des jeweiligen Injektionsmörtels in Kombination mit simulierten Temperaturprofilen – analog zum Vorgehen in Beton – für Vollsteine möglich ist. Diese Berechnung liefert konservative Ergebnisse im Vergleich zu den durchgeführten Tests. Die unterschiedlichen Dämmeigenschaften der verschiedenen Mauerwerksarten werden dabei durch die thermische Simulation berücksichtigt und führen zu entsprechend geringeren oder höheren Temperaturen entlang der Verbundfuge.

Die in diesem Forschungsvorhaben ermittelten Abminderungsfaktoren für die Steinversagensarten können auf Injektionsanker übertragen werden. Der Großteil der Versuchsergebnisse führte zu Steinausbruch oder Steinspalten und ist daher analog auf Injektionsanker anwendbar. Bei der Auswertung wurden auch die Versuche berücksichtigt, die in einem Herausziehen des Schrau-

bankers resultierten. Da diese Ergebnisse im Streubereich der Steinausbruch- und Steinspalten-  
ergebnisse liegen, beeinflussen sie die Abminderungsfaktoren nicht in einem Ausmaß, das für  
Injektionsanker andere oder höhere Werte ermöglichen würde.

## **8. Zusammenfassung und Ausblick**

### **8.1 Allgemeines**

In den Feuerwiderstandsprüfungen wurden drei verschiedene Prüfaufbauten eingesetzt. Während die Wandprüfung die Realität am besten abbildet und die höchsten Feuerwiderstandswerte für Befestigungen liefert, sind auch vereinfachte Prüfungen möglich. Dazu zählen die Versuche an Einzelsteinen sowie an aufeinander gemörtelten Steinpaketen. Diese Varianten reduzieren den Herstellungsaufwand der Probekörper, da keine vollständigen Wände erforderlich sind, und ermöglichen den Einsatz in Kleinbrandöfen, wodurch Zeit- und Kostenaufwand geringer ausfallen. Gleichzeitig liefern sie konservativere Ergebnisse.

Durch die Kombination der Referenzversuche bei Umgebungstemperatur mit den Ergebnissen der Feuerwiderstandsprüfungen konnten relative Tragfähigkeiten im Brandfall für die verschiedenen Versagensarten ermittelt werden. Dabei zeigte sich, dass das Herausziehen des Befestigungsmittels nur in wenigen vereinzelt Tests auftrat; der Großteil der Versuche führte zu Ausbruch- oder Spaltversagen. Die Ergebnisse für Mauerziegel und Kalksandsteine zeigten ähnliche Tendenzen, wobei Mauerziegel leicht bessere Werte aufwiesen. Auch Versuche an gerissenen oder nassen Steinen lagen im gleichen Streubereich, sodass eine gesonderte Berücksichtigung dieser Bedingungen nicht erforderlich ist. Die Rissbildung während der Brandeinwirkung wird durch die Versuche implizit erfasst.

Auf Basis des erkennbaren Trends der Ergebnisse in Kalksandsteinen wurde vorgeschlagen, diese Daten für die Auswertung heranzuziehen und auf Mauerziegel zu übertragen. Mit den ermittelten Abminderungsfaktoren und den charakteristischen Tragfähigkeiten aus den Produktbewertungen kann der Feuerwiderstand der Befestigungen somit auch ohne eigene Feuerwiderstandsprüfungen ermittelt werden.

Verbesserte Vorschläge für Stahlspannungen unter Brandbeanspruchung können aufgrund der unterschiedlichen Herstellungsprozesse der Schraubanker nicht einheitlich definiert werden. Bestehende Erkenntnisse erlauben jedoch, die Ergebnisse aus Feuerwiderstandsprüfungen in Beton auf Mauerwerksuntergründe zu übertragen, sodass zusätzlicher Prüfaufwand zur Bestimmung des Stahlversagens entfällt.

## 8.2 Empfehlungen für die Regelwerke

Auf Grundlage der durchgeführten Versuche werden in diesem Abschnitt Empfehlungen für die Regelwerke abgeleitet. Diese umfassen Hinweise zur Auswahl und Verwendung möglicher Prüfaufbauten sowie zur Durchführung der Versuche. Darüber hinaus werden Vorgehensweisen zur Ermittlung des Feuerwiderstands gegenüber einem Versagen des Mauerwerksuntergrunds auf Basis der Kalttragfähigkeiten der Befestigungsmittel sowie zum Feuerwiderstand gegenüber Stahlversagen dargestellt.

### 8.2.1 Versuchsdurchführung

In Abschnitt 5.2 wurden die verwendeten Prüfaufbauten beschrieben, die sich in ihrer Komplexität und Flexibilität unterscheiden. Für die Kleinprüföfen kamen zwei Varianten zum Einsatz: Einzelsteinprüfungen und Prüfungen an vorgespannten Steinpaketen. Beide erfordern einen vergleichsweise geringen Herstellungsaufwand.

Die Einzelsteinprüfung stellt die konservativste Methode dar. Durch das Aufbringen einer Vorspannung von  $0,20 \text{ N/mm}^2$  – wie in den EAD 330460 [9] und EAD 330076 [8] für Mauerwerksprüfungen vorgeschrieben – lassen sich tendenziell geringfügig bessere Ergebnisse bei der Prüfung von Steinpaketen erzielen. Bei beiden Varianten ist keine bzw. nur eine eingeschränkte Verdrehungsbehinderung an den Stoßfugen vorhanden, sodass entstehende Risse häufig direkt zu einem Versagen führen.

Als dritte Variante wurden Wandprüfungen vorgestellt. Dieser Aufbau ist deutlich komplexer und zeitintensiver im Aufbau, bildet jedoch das reale Brandszenario bisher am genauesten ab. Er ermöglicht zudem eine frei wählbare Setzposition des Befestigungsmittels, auch in Fugennähe, sowie das Aufbringen der Vorspannung von  $0,20 \text{ N/mm}^2$ . Da die Stoßfugen im Mauerwerksverband in der Regel vermörtelt oder verzahnt sind, entsteht eine Verdrehungsbehinderung, die bei auftretenden Rissen zum Aufrechterhalten der Tragfähigkeit beitragen kann. In den Versuchen wurden Wandprobekörper mit Abmessungen von etwa  $1,00 \times 1,00 \text{ m}$  verwendet. Abhängig von den Abmessungen der Wand, der Anzahl der geprüften Verankerungen und deren Position kann es zu zusätzlichen Biegebelastungen in der Wand kommen. Diese durch die belasteten Anker hervorgerufenen horizontalen Verformungen verstärken die thermische Durchbiegung infolge der Brandeinwirkung. Aus Sicht der Autoren ist es daher für Wandprüfungen sinnvoll, eher kleinere und gedrungene Probekörper zu verwenden.

Grundsätzlich sind alle beschriebenen Prüfaufbauten für Feuerwiderstandsprüfungen in Mauerwerk geeignet und sollten zugelassen werden. Die Wandprüfung bildet die Realität bisher am besten ab, während die Einzelstein- und Steinpaketprüfung ein konservativeres Prüfen ermöglichen und in der Praxis durch den geringeren Umbauaufwand auch geringere Prüfkosten verursachen.

Die an gerissenen und nassen Steinen durchgeführten Tests (vgl. Abschnitt 7.1.1) haben gezeigt, dass weder vorhandene Risse noch Feuchtigkeit das Tragverhalten unter Brandbeanspruchung zusätzlich negativ beeinflussen. Da die Rissbildung durch Brandeinwirkung bei den ungerissenen Tests implizit miterfasst wird, sind gesonderte Prüfungen an gerissenen Steinen nicht erforderlich. Auch nasses Mauerwerk muss im Brandfall nicht gesondert untersucht werden.

Der weitere Qualifizierungsprozess, einschließlich der Verwendung der Anbauteile, des Auswertverfahrens (vgl. EAD 330232 [10]) sowie der gemeinsamen Betrachtung von Kalksandstein und Mauerziegel im Brandfall (vgl. EAD 330460 [9]), erscheint auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse weiterhin praktikabel.

## 8.2.2 Bemessung des Untergrundversagens auf Grundlage der Kalttragfähigkeiten

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens war die Ermittlung von Abminderungsfaktoren, mit deren Hilfe eine Bemessung auf Grundlage der Kalttragfähigkeiten aus den jeweiligen Produktbewertungen möglich wird. Ein vergleichbares Verfahren existiert bereits für Befestigungen in Beton und ist in DIN EN 1992-4 Anhang D [11] beschrieben.

Da im Bewertungsverfahren für Befestigungsmittel in Mauerwerksuntergründen häufig gemischte Versagensarten auftreten, werden in der Regel keine nach Versagensart getrennten charakteristischen Tragfähigkeiten ausgewiesen. Stattdessen erfolgt meist eine Vereinheitlichung zu  $N_{Rk}$  (vgl. Abschnitt 7.1). Aus diesem Grund wurde die zunächst angedachte Definition von getrennten Abminderungsfaktoren für einzelne Versagensarten verworfen. Die Ergebnisse der Brandprüfungen bestätigten diese Entscheidung.

In den Abschnitten 7.1.2 bis 7.1.4 wurden verschiedene Auswertemethoden vorgestellt. Aus Sicht der Autoren bietet sich die Verwendung der umhüllenden Funktion aus Abschnitt 7.1.3 an, da sie die schlechtesten Versuchsergebnisse am zuverlässigsten abbildet und zugleich zu praktikablen Abminderungsfaktoren führt als die verschobene Trendlinie aus Abschnitt 7.1.2. Die auf diesem Auswerteverfahren basierenden Abminderungsfaktoren ergeben sich zu:

Tabelle 8-1: Vorgeschlagene Abminderungsfaktoren

Abminderungsfaktor $\psi_{fi}$	
R30	0,21
R60	0,17
R90	0,15
R120	0,14

Die Bemessung kann mit dem folgenden Verfahren für Verankerungen der Durchmesser 6 - 12 mm und einer Verankerungstiefe  $\geq 50$  mm in Kalksandsteinen und Mauerziegel der Steinformate NF oder größer durchgeführt werden:



$$N_{Rk,fi,30} = N_{Rk} \cdot \psi_{fi,30} \quad (18)$$

$$N_{Rk,fi,60} = N_{Rk} \cdot \psi_{fi,60} \quad (19)$$

$$N_{Rk,fi,90} = N_{Rk} \cdot \psi_{fi,90} \quad (20)$$

$$N_{Rk,fi,120} = N_{Rk} \cdot \psi_{fi,120} \quad (21)$$

Die Abminderungsfaktoren wurden als Verhältnis der Referenztragfähigkeiten auf Mittelwertniveau zu den in den Brandversuchen ermittelten Tragfähigkeiten bestimmt. Durch Anwendung dieser Abminderungsfaktoren auf die charakteristischen Widerstände aus den Produktbewertungen ergeben sich konservative Feuerwiderstände.

### 8.2.3 Widerstandswerte für die Versagensart Stahlversagen

Neben dem Versagen des Untergrunds kann es auch im Mauerwerk zum Stahlversagen des Befestigungsmittels kommen. Reichert und Thiele [4] konnten zeigen, dass die in Beton ermittelten Ergebnisse zum Stahlversagen unter Brandbeanspruchung auch für Mauerwerk gelten. Zudem wurden dort erhöhte Stahlspannungen für den vereinfachten Nachweis von Gewindestangen vorgeschlagen.

Aus Sicht der Autoren lassen sich diese erhöhten Werte jedoch nicht ohne Weiteres auf Schraubanker übertragen, da sich diese in Geometrie, Herstellungs- und Härteprozessen unterscheiden. Eine allgemeingültige Festlegung ist daher nicht möglich. Folglich wird weiterhin die Verwendung der konservativen Stahlspannungen aus DIN EN 1992-4 Anhang D [11] empfohlen – sowohl für Schraubanker aus Kohlenstoffstahl als auch aus Edelstahl. Zwar zeigen die Ergebnisse aus Abschnitt 6.3 und 7.2.2 ein deutliches Übersteigen der in der Norm [11] angegebenen Werte, sie erlauben jedoch keine verlässliche Ableitung erhöhter Stahlspannungen für alle Schraubanker.

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus Reichert und Thiele [4] erscheint es jedoch praktikabel, die Ergebnisse aus Feuerwiderstandsprüfungen in Beton auf Mauerwerksuntergründe wie Kalksandstein und Mauerziegel zu übertragen. Dadurch muss der Feuerwiderstand gegenüber Stahlversagen nur einmal ermittelt werden.

### 8.2.4 Verbundversagen von Injektionsankern

Das Verbundversagen von Injektionsankern unter Brandbeanspruchung hängt neben den Eigenschaften des Verankerungsgrunds und der Ankerstange auch vom verwendeten Injektionsmörtel ab. Für die rechnerische Bestimmung des Feuerwiderstands ist daher der temperaturabhängige, produktspezifische Abminderungsfaktor des Injektionsmörtels erforderlich. Dieser muss für den Verankerungsgrund Mauerwerk entweder ermittelt oder bestätigt werden. Weitere Informationen hierzu finden sich in Reichert und Thiele [4].

Die in diesem Forschungsvorhaben ermittelten Abminderungsfaktoren zur Beurteilung der Untergrundversagensarten (Abschnitt 8.2.2) können ebenfalls auf Injektionsanker übertragen werden.

### 8.2.5 Ermittlung des Feuerwiderstands für die Produktbewertung

Zur Bestimmung des Feuerwiderstands von Schraubankern für die jeweilige Produktbewertung werden zwei Vorgehensweisen vorgeschlagen, die in Tabelle 8-2 dargestellt sind. Bei Injektionsankern ist zusätzlich ein produktspezifischer Abminderungsfaktor erforderlich, um den Widerstand gegen Herausziehen zu bestimmen. Details hierzu sind in Reichert und Thiele [4] beschrieben.

Tabelle 8-2: Vorgehensweisen zur Bestimmung des Feuerwiderstands von Schraubankern

	Verfahren A	Verfahren B
	Vereinfachtes Verfahren	Experimentelles Verfahren
Stahlversagen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Übertragung der Feuerwiderstandswerte von Beton auf Mauerwerk.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Getestet und ausgewertet gemäß der gültigen EAD.</li> <li>Eine gemeinsame Auswertung von Kalksandsteinen und Mauerziegel sollte weiterhin ermöglicht werden (jeweils 3 Tests je Untergrund).</li> </ul>
Steinausbruch, Herausziehen und Spalten	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verwendung der vorgeschlagenen Reduktionsfaktoren nach Tabelle 8-1</li> </ul>	
Gültigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verankerungen der Durchmesser 6 - 12 mm und einer Verankerungstiefe <math>\geq 50</math> mm</li> <li>Kalksandsteinen und Mauerziegel (nur Vollsteine) der Steinformate NF oder größer.</li> <li>Rand- und Fugenabstand:  <math>c_{j\perp,fi} = c_{j\perp}/0,75</math>  <math>c_{j\parallel,fi} = c_{j\parallel}/0,75</math>  <math>c_{min,fi} = \max\left\{300 \text{ mm}; 2 \cdot h_{nom}\right\}</math> </li> <li>Nur für einseitige Brandbeanspruchung.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nur für die untersuchte Kombination aus Anker und Stein gültig.</li> <li>Bei der Bewertung werden verschiedene Versagensarten gemeinsam ausgewertet. Eine Übertragung auf andere Steine sollte ausschließlich durch erfahrende Gutachter erfolgen.</li> </ul>

Das Verfahren A ermöglicht die Bestimmung von Feuerwiderstandswerten für die Produktbewertung, ohne dass Feuerwiderstandsprüfungen im Mauerwerk durchgeführt werden müssen. Die dabei ermittelten Abminderungsfaktoren führen tendenziell zu niedrigeren Werten als die realen Versuchsergebnisse, sodass mit dem Verfahren B höhere Feuerwiderstandswerte erzielt werden können.

## 9. Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e.V., „Deutschland baute auch 2020 auf Mauersteine: Statistisches Bundesamt: Mehrheit der Bauherren baut mineralisch,“ [Online]. Available: <https://mauerwerk.online/download/dgfm-pm-05-2021-marktzahlen-2020/?wpdmdl=5447&refresh=655740cf88c3f1700217039>. [Zugriff am 17.11.2023].
- [2] H. Simons, „Mauerwerk: Klimafreundlich und wirtschaftlich in die Zukunft?,“ [Online]. Available: <https://www.ibau.de/akademie/wissenswertes/mauerwerk-die-bauweise-der-zukunft/>. [Zugriff am 17.11.2023].
- [3] EOTA, TR 054; Design methods for anchorages with metal injection anchors and screw anchors for use in masonry, 2023.
- [4] M. Reichert; C. Thiele, Feuerwiderstand von Befestigungen im Mauerwerk, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2018.
- [5] C. Thiele; M. Patil; M. Reichert, Verbunddübel im Brandfall, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2018.
- [6] M. Reichert, Zur Bestimmung des Feuerwiderstands von Injektionsankern mit variabler Verankerungstiefe in Beton, Kaiserslautern: Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2020.
- [7] M. Reick, Brandverhalten von Befestigungen mit großem Randabstand in Beton bei zentrischer Zugbeanspruchung, Stuttgart: Dissertation, Universität Stuttgart, 2001.
- [8] EOTA, „EAD 330076-01-0604 Metal injection anchors for use in masonry,“ 2021.
- [9] EOTA, „330460-00-0604 Screw anchor for use in masonry,“ September 2020.
- [10] EOTA, „EAD 330232-01-0601 Mechanical fasteners for use in concrete,“ December 2019.
- [11] DIN EN 1992-4:2019-04, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 4: Bemessung der Verankerung von Befestigungen in Beton; Deutsche Fassung EN 1992-4:2018, Berlin.
- [12] EOTA, TR 082; Design of bonded fasteners in concrete under fire conditions, 2024.
- [13] O. Al-Mansouri, Behavior of bonded anchors in concrete under fire. Civil Engineering. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai, 2020.
- [14] DIN EN 1993-1-2:2010-12, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1993-1-2:2005 + AC:2009, Berlin.

- [15] DIN EN 1363-1: Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1:Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 1363-1:2020, Berlin.
- [16] R. Eligehausen und R. Mallee, Befestigungstechnik im Beton- und Mauerwerkbau, Ernst & Sohn, 2000.
- [17] A. Meyer, Zum Tragverhalten von Injektionsdübeln in Mauerwerk, Stuttgart: Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2025.
- [18] DIN EN 772-1: Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit; Deutsche und Englische Fassung EN 772-1:2011+A1:2015, Berlin.
- [19] DIN EN 772-13: Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 13: Bestimmung der Netto- und Brutto-Trockenrohdichte von Mauersteinen (außer Natursteinen); Deutsche Fassung EN 772-13:2000, Berlin.
- [20] DIN EN 1015-11: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel; Deutsche Fassung EN 1015-11:2019, Berlin.
- [21] H. Lakhani und J. Hofmann, „Concrete Cone Failure of Post Installed Fasteners During Fire,“ *ce/papers*, Bd. 6, Nr. 1, pp. 373-380, 2023.