

Diplomarbeit

Untersuchung von Prüfverfahren für die Bestimmung der Mauermörtelfestigkeit bei bestehendem Ziegelmauerwerk

Master`s Thesis:

Research into the test methods

to determine the strength of wall mortar existing within brick masonry

Sylwia Wallner

e00727277@student.tuwien.ac.at

Matr.Nr. 00727277

Datum: 11.12.2018

Kurzfassung

Diese Arbeit beschreibt Methoden für die Ermittlung der Mauermörtelfestigkeit im Objekt. Die Bewertung und der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Prüfmethode ist durch geführte Laborversuche argumentiert. Es ist gleichzeitig eine Analyse und eine Interpretation der Ergebnisse. Dabei werden der Einsatz der unterschiedlichen Methoden und der Einfluss auf die Mauerwerksfestigkeit beschrieben.

ABSTRACT

This paper describes methods for determining the strength of masonry mortar in an object. The evaluation and the connection between different test methods is argued by guided laboratory tests. It is simultaneously an analysis and an interpretation of the results. The use of the different methods and the influence on the masonry strength are described.

Inhaltverzeichnis

ABSTRACT	3
1 Einleitung.....	6
2 Literatur.....	7
3 Grundlagen	8
3.1 Mauermörtel nach EN 998-2 „Festlegungen für Mörtel in Mauerwerksbau“	8
3.2 Prüfung der Mörtel Eigenschaften nach ÖNORM EN 1015.....	9
3.2.1 ÖNORM EN 1015-01 „Bestimmung der Korngrößenverteilung“	9
3.2.2 ÖNORM EN 1015 -02: Probeabnahme von Mörteln und Herstellung von Prüfmörteln 10	
3.2.3 ÖNORM EN 1015 -11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel 11	
3.3 Eindringverfahren für die Ermittlung der Mauermörtelfestigkeit	15
3.4 Stempeldruckverfahren für die Ermittlung der Mauermörtelfestigkeit	18
3.5 Mauerstein bzw. Mauerziegel nach EN 771-1	21
3.6 Prüfverfahren für Mauersteine nach EN 772-1	23
3.7 Mauersteinprüfung mit dem Rückprallhammer	26
3.8 Mauerwerk nach ÖNORM EN 1996 (EC 6).....	27
3.8.1 Charakteristische Druckfestigkeit des Mauerwerkes.....	28
3.8.2 Charakteristische Schubfestigkeit vom Mauerwerk.....	29
3.8.3 Verformung von Mauerwerk (Spannungs-Dehnung-Linie).....	30
3.9 Mauerwerk in Nationalnorm ÖNORM B 1996.....	31
3.9.1 Ermittlung der Mauerwerkdruckfestigkeit nach ÖNORM B 1996-3	31
3.9.2 Teilsicherheitsbeiwert γ_M für Grenzzustand der Tragfähigkeit	32
4 Versuche.....	33
4.1 Einführung	33
4.2 Mauermörtel und die Festigkeiten, Mörtel einpassung Rezeptursuche	34
4.2.1 Biegezugfestigkeit,- und Druckfestigkeitsprüfung an Prismen	35
4.2.2 Stempeldruckversuche.....	37
4.2.3 Eindringverfahren	39
4.2.4 Vergleich der Mörteluntersuchungsverfahren.....	43
4.3 Ziegelfestigkeiten	46
4.3.1 Druckversuche im Labor	46
4.3.2 Rückprallhammer.....	49
4.3.3 Vergleich.....	51
4.4 Mauerwerkfestigkeiten.....	52
4.4.1 Druckversuche an Pfeiler.....	52
4.4.2 Vergleich der Mauerwerkdruckfestigkeiten	58
5 Schlussfolgerung	59
Literaturverzeichnis:	60

Anhänge für die Diplomarbeit 61

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



1 Einleitung

Die Untersuchung des Mauerwerkes von Gründerzeithäusern in Wien gehört zu einer wesentlichen Aufgabe zur Beurteilung eines baulichen Zustandes. Um die Druckfestigkeit von Mauerwerk ermitteln zu können, wendet man die zerstörungsfreie, zerstörungsarme oder zerstörende Prüfverfahren an. Alle haben ihre Vor- und Nachteile. Unter der Bezeichnung *Zerstörungsfrei* werden Berechnungen anhand Herstellerangaben bzw. Erfahrungswerte der Materialien bezeichnet. Somit kann man durch das Wissen des Herstellungsdatums eines Bauwerkes, beigelegter Ausführungsplanung, Bauwerkbegehung inkl. Abmessung tragender Elementen die Werte grob schätzen.¹

Oft sind für den Umbau eines bestehenden Gebäudes genaue Berechnungen für die Tragsicherheit und Standsicherheit des Bauwerkes erforderlich². Damit man einen Richtwert (charakteristischer Wert) der Festigkeit einer bestehenden Wand ermitteln kann, werden meistens Proben entnommen und im Labor untersucht. Die zerstörende Methode liefert lokal relativ genaue Ergebnisse für die Mauerwerkkomponenten³, über den Wassergehalt, Festigkeit bis zu dem mikroskopischen Zustand bzw. chemischen Aufbau. Durch die Anhaltung von Abnahmeregeln, Transport und in der Norm angegebenen Prüfungs- und Ermittlungssystematik sind wir in der Lage, relativ genau die Werte für das Mauerwerk und die Folgen des geplanten Umbaus zu beurteilen. Das Probevolumen entscheidet, ob es sich um eine zerstörende oder zerstörungsarme Prüfung handelt. Zu den zerstörenden Methoden gehören: eine Untersuchung der Druckfestigkeit eines bestehenden und von der Wand direkt abgenommenem Mauermörtel (**Stempeldruckverfahren**) und Druckversuche von ausgestemmtten Mauerwerksziegel⁴. Man kann auch ganze **Mauerwerkpfeiler in Druckversuch**⁵ prüfen. Die Probenentnahmen sind leider sehr zeitaufwendig und dadurch auch teuer. Manchmal ist eine Probenabnahme überhaupt nicht möglich⁶, z.B. wegen des Denkmalschutzes oder aus statischen Gründen. Der Transport bietet auch eine Herausforderung, damit entnommene Proben nicht beschädigt werden. Man muss beachten, dass eine trockene Probe auch andere Ergebnisse liefert, als die selbe feuchte Mörtelprobe. Es wurden neue zerstörungsfreie und zerstörungsarme Methoden entwickelt, um den Beurteilungsverlauf zu beschleunigen und um viele Schwierigkeiten bei der Probenabnahme umzugehen. Eine davon ist das **Ein-dringverfahren** (für die Ermittlung der Mörtelfestigkeit), eine zweite ist die Ermittlung der Ziegelfestigkeit mit dem **Rückprallhammer**.

In meiner Diplomarbeit wird einen Vergleich zwischen den Festigkeiten, die durch die alle drei Methoden ermittelt wurden, durchgeführt. Es wurden drei unterschiedliche Serien Vollziegel-mauerwerkskörper errichtet, die aus drei unterschiedlichen Mörteln, Kalk-, Kalkzement- und Trassmörtel bestehen. Dabei wurden alte Vollziegel verwendet.

¹ Erhaltung und Erneuerung vom Hochbauten Kapitel 4 Lastmethoden bzw. Materialkennwerte [9]

² ÖNORM EN 1998-3 Anhang D

³ d.h. für Mörtel und für dem Mauerstein

⁴ ÖNORM EN 772-1 [5]

⁵ ÖNORM EN 1052-1 [3]

⁶ Skriptum TU Wien Angewandte Gesteinskunde November 2013 Kapitel 4 [19]

2 Literatur

Das Mauerwerksgebiet ist in der Literatur relativ umfangsreich. Die wichtigsten Grundlagen für eine Festigkeitsrechnung eines Mauerwerkes liefern folgende europäische Normen:

- EN 998-2 „Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau“
- ÖNORM EN 1015 Ausgabe 2007-03-01 „Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk“
- ÖNORM EN 1015-02 „Probeabnahme von Mörteln und Herstellung von Prüfmörteln“
- ÖNORM EN 1015 -11: 1999/A1: 2006 „Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel“
- EN 771-1 „Festlegung für Mauersteine“
- EN 772-1 „Prüfverfahren für Mauersteine“
- EN 1996-1-1 (EC 6 Teil 1) „Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten“
- ÖN B 1996-3 Ausgabe 2016-07-01 (EC 6 Teil 3) „Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten“

Viele Informationen habe ich aus der Vorlesung und Skripten (*Hochbau 2* an der TU Wien bzw. *„Erhaltung und Erneuerung von Hochbauten“*), die durch den Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. Techn. Andreas Kolbitsch durchgeführt wurden, übernommen. Nützlich war die Vorlesung *Sanierung der Mauerwerke aus Naturstein* inkl. *„Skriptum Angewandte Gesteinskunde“* vom Prof. Andreas Rohatsch, die die Problematik der Untersuchung im Bestand und v.a. im Denkmal erklärt hat. Sehr hilfreich waren für mich alle Tipps, Erfahrungen bzw. Hilfen bei dem Umgang im Labor durch den Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Techn. Karl Deix, der mich durchgehend bei der Ausführung begleitet und unterstützt hat. Sehr interessant war der Forschungsartikel von Prov. A. Pauser über die Mörteluntersuchung anhand Eindringverfahren bzw. die Beschreibung der Stempeldruckmethode im Artikel der TVFA der TU Wien von Dipl.-Ing. Dr. Techn. Karl Deix. In der der Diplomarbeit vom Helmut Undesch *„Versuche zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Mauermörtel nach unterschiedlichen Verfahren“* 1990, Institut für Hochbau und Industriebau TU Wien, wurde umfangsreich über Mörteluntersuchungen geschrieben (besonders über Stempeldruckfestigkeitsermittlung). Die Bachelorarbeit von Lisa Baumgartner diente als Vergleich für meine Auswertung der Mörtel- und Ziegelfestigkeits.

3 Grundlagen

3.1 Mauermörtel nach EN 998-2 „Festlegungen für Mörtel in Mauerwerksbau“

Laut EN 998-2 ist ein Mauermörtel ein „Gemisch aus einem oder mehreren anorganischen Bindemitteln, Zuschlägen, Wasser, Zusatzstoffen und/oder Zusatzmitteln für Lager-, Stoß- und Längsfugen, Fugenglattstrich und nachträglichen Verfugen.“

Man unterscheidet drei Arten des Mauermörtels nach Art der Eigenschaften bzw. dem Verwendungszweck:

- Normalmauermörtel **G**- keine besonderen Eigenschaften
- Dünnbettmauermörtel **T**- Mauermörtel nach der Eignungsprüfung und definiertem max. Grobkornfraktion (2mm)
- Leichtmauermörtel **L**- nach der Eignungsprüfung und einer Trockenrohichte unter bestimmten Wert

Man unterscheidet sie nach Erstellungsort auf Werk-, oder Baustellenmauermörtel und Bindemittelart.

Aufgabe eines Mauermörtels ist eine Übertragung bzw. eine Verteilung von Druck und Scherkräften an die Mauersteine. Dadurch werden folgende Mörtelkennwerte maßgebend: die Druckfestigkeit⁷ und die Verbundfestigkeit⁸. Die Druckfestigkeit ist in die Druckfestigkeitsklassen (Tabelle 1) durch die Hersteller nach der Eignungsprüfung⁹ einzuordnen. Die durch Laboruntersuchungen gelieferten Werte dürfen die Mörtelklasse nicht unterschreiten.

Die Verbundfestigkeit darf der Hersteller anhand Laborprüfungen mit einer Steinart laut *EN 771* oder Werten aus *Anhang C der Norm EN 998-2*¹⁰ angeben.

Laut Norm darf man die Inhaltstoffe, wie Bindemittel (so wie Zement oder Baukalk), Wasser und Sand nach Volumen oder Gewicht dosieren. Für Mauermörtel sollte man Sand mit dem Größtkorn von 2mm verwenden.

Klasse	M 1	M 2,5	M 5	M 10	M 15	M20	M d
Druckfestigkeit N/mm ²	1	2,5	5	10	15	20	d

Tabelle 1 Mörtelklassen Tabelle 1 EN 998-2

⁷ EN 1015-11 *Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit vom Festmörtel*

⁸ *Haftfestigkeit zwischen dem Mörtel und Stein, senkrecht zu Fuge EN 998-2*

⁹ Prüfung für Mauermörtel nach ÖNORM EN 1015-11

¹⁰ folgende Werte für die charakteristische Anfangsscherfestigkeit sind im Anhang C angegeben

- für Normal und Leichtmauermörtel=0,15N/mm²

-und 0,3 N/mm² für Dünnbettmörtel.

3.2 Prüfung der Mörtel­eigenschaften nach ÖNORM EN 1015

3.2.1 ÖNORM EN 1015-01 „Bestimmung der Korn­größen­verteilung“

Die ÖNORM EN 1015 beschreibt im Teil 1 den Ablauf der Korn­größen­analyse. Es ist eine Siebung der Sandmenge durch übereinander gestellte Siebe in einem Siebturm. Dieser trennt stufenweise die Sandkörner beginnend mit 8mm (ganz oben) bis 0,063 (ganz unten) auf bestimmte Fraktionen. Die durch das Gerät erzeugte Vibrationen beschleunigen die Siebung. Dieses Verfahren nennt man Trockensiebung.



Abb. 1 Korn­größen­verteilung anhand Trockensiebung; Bestimmung der Sieblinie im Labor anhand eines Siebturms; S. Wallner 2018

3.2.2 ÖNORM EN 1015 -02: Probeabnahme von Mörteln und Herstellung von Prüfmörteln

Der Teil 2 der Norm EN 1015 beschreibt, wie eine Frischmörtelprobe (die direkt auf der Baustelle erstellt, von einer Lieferung, bzw. direkt vom Betonmischer abgenommen wurde oder aus Produktion im Werk kommt) für eine Eignungsprüfung vorbereitet werden muss.

Die richtige Temperatur der Probe bei der Abnahme liegt zwischen +20 und ± 5 °C. Die Norm gibt die max. Menge des Feststoffgehaltes in kg an, die man in einem Mischer nach EN 196-1 oder in dem Zwangsmischer verarbeiten darf (Tabelle 3). Die Konsistenz sollte (laut Tabelle 2) für eine bestimmter Rohdichte folgendes Ausbreitmaß aufweisen.

Ein Verlauf der Herstellung in Labor anhand Mischer¹¹ erfolgt folgendermaßen:

- Wasser eingeben,
- nach 30 Sekunden Feststoff dazugeben,
- danach noch 60 Sekunden mischen.

Mischvorgang für den Zwangsmischer:

- Wasser eingeben,
- nach 15s Sekunden Feststoff dazugeben,
- 120-180s mischen lassen (beim Kalkmörtel länger).

Rohdichte des Frischmörtels (kg/m ³)	Ausbreitmaß (mm)
> 1 200	175 ± 10
> 600 bis ≤ 1 200	160 ± 10
> 300 bis ≤ 600	140 ± 10
≤ 300	120 ± 10

Tabelle 2 Definiertes Ausbreitmaß definierter Mörtelarten, bezogen auf die Rohdichte des Frischmörtels, EN 1015-02 Tabelle 2

Frischmörtelmischung	Mischer nach EN 196-1	Zwangsmischer
Feststoffgehalt (kg)	1,8 bis 3,0	30 bis 50
Volumen (dm ³)	0,5 bis 2,5	25 bis 75

Tabelle 3 Feststoffgehalt und Volumen von Mörtelmischungen, EN 1015-02 Tabelle 1

¹¹ Mischer nach EN 196-1

3.2.3 ÖNORM EN 1015 -11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel

Der Teil 11 der Norm EN 1015 beschreibt, wie die Herstellung der Prismen aus frischen Mörtel für die Eignungsprüfung ablaufen sollte. Dort wird das Werkzeug, wie die Metallformen für die Prismen (Abb. 2), Stampfer für die Verdichtung mit einem Gewicht von 50g und 12 mm Seitenlänge, Lagerkammer mit der Temperatur von (20 ± 2) °C und eine relative Luftfeuchte von 95 oder 65%, Klemmvorrichtung, Mineralöl, weiße Baumwollgazen (bzw. Baumwollwindel), Filterpapier, Plastikbeutel, zwei Glasplatten, Abstreichlinear, Rost für eine Durchgelüftete Lagerung, und Mauerkelle erwähnt.

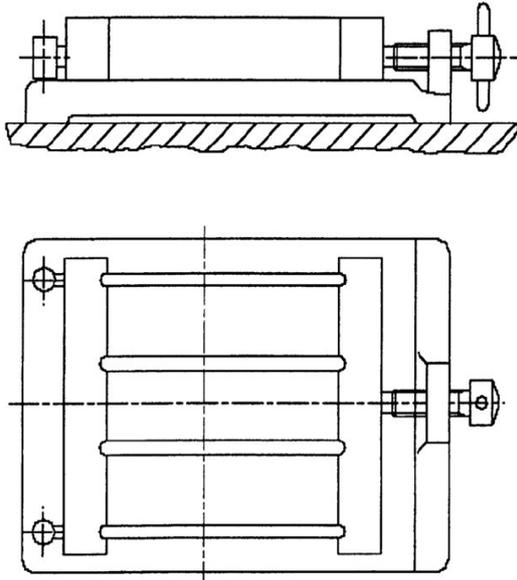


Abb. 2 Form zur Herstellung der Prüfkörper Bild A.1 EN 1015-11

- Anschließend wird alles umgedreht und am geeigneten Ort abgestellt
- 5kg Gewicht werden drauf gestellt.
- Nach drei Stunden die Last, die Filterpapiere und die Gase vorsichtig entfernen und in Feuchtkammer lagern. Man kann für die ersten Tage die Proben in eine Folie dicht einwickeln, um die 95% relative Luftfeuchte anzuhalten.
- Nach 5 Tagen ausschalen und nach sieben Tagen an Raumluft und Raumtemperatur lagern (Raumluft und Raumtemperatur werden mit 65% Relativfeuchte angenommen, genaue Angaben siehe Tabelle 4).

Es sollten drei solche Prismen (siehe Abb.4) erstellt werden, die bei der Biegezugsprüfung in zwei Teile Brechen und sechs neue Prüfkörper für die Druckversuche erzeugen (Abb.5). Die Festigkeitsprüfungen sollten nach 28 Tagen Trocknung durchgeführt werden.

Für frischen Mörtel¹² muss man das Ausbreitmaß¹³ messen und aufzeichnen.

In Kapitel 11 sind die genauen Masse der Prismen (**160x40x40mm**) und der Herstellungsvorgang definiert:

- Die Formen mit Mineralöl einstreichen, damit sie an den Form nicht haften.
- Auf eine Glasplatte zwei Baumwollgazen legen und drauf die eingölte Metallform.
- Man füllt die Formen in zwei Vorgängen, dabei jede Lage mit 25 Stößen mit dem Stampfer verdichten.
- Übermengen gleicht man mit dem Lineal ab.
- Danach mit zwei Baumwollgazen und sieben Filterpapieren abdecken
- Das Ganze mit einer zweite Glasplatte zudecken und umdrehen.
- Die jetzt obrige Platte kurz entfernen, um die Filterpapiere darauf legen zu können, danach wieder mit der Platte zudecken.



Abb. 3 Ausbreitmaßmessung im TU Labor

¹² Mörtel laut EN1015-2 und Probevolumen > 1,5l

¹³ Ausbreitmaßmessung laut EN 101 5-3 muss in Verarbeitungszeit erfolgen. Der Mörtel sollte noch 5-10s händisch gerührt werden und auf den Heagemann Rütteltisch in 2 Lagen aufgebracht werden. Mit dem Lineal soll er abgeglichen werden und auf 15 Schläge gestartet. Danach misst man den Durchmesser der Masse ab.

Mörtelart	Vorbereitung	Lagerungsdauer in Tagen bei einer Temperatur von $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$		
		Relative Luftfeuchte		
		$(95 \pm 5) \%$ oder im Plastikbeutel		$(65 \pm 5) \%$
		in der Form	ausgeschalt	ausgeschalt
Luftkalk-Mörtel	7.2.3	5	2	21
Luftkalk-Zementmörtel mit einem Zementanteil $\leq 50 \%$ der Gesamtmasse des Bindemittels	7.2.3	5	2	21
Zement und Luftkalk-Zementmörtel mit einem Luftkalkanteil $\leq 50 \%$ der Gesamtmasse des Bindemittels	7.2.2	2	5	21
Mörtel mit anderen hydraulischen Bindemitteln	7.2.2	2	5	21
Verzögerte Mörtel	7.2.2	5	2	21

Tabelle 4 Vorbereitung und Lagerung der Prüfkörper, EN1015-11 Tabelle.1



Abb. 4 Fertige Proben für die Biegezugversuche (3 Stk. pro Mörtelart) erstellt im Labor TU Wien, DA Sylwia Wallner 2018



Abb. 5 Fertige Proben (nach dem Biegezugversuch) für die Druckversuche (6 Stk pro Mörtelart) erstellt im Labor TU Wien, DA Sylwia Wallner 2018

3.2.3.1 Biegezugfestigkeitsmessung nach EN 1015-11 Kapitel 8

Bei der Biegezugfestigkeitsprüfung ist laut Norm eine stoßfreie Belastung mit einer Einzellast in der Mitte bis zum Bruch einzubringen, wobei der Auflagerabstand 100mm beträgt. Die Belastungsgeschwindigkeit ist zwischen 10-50N/s einzustellen. Das Versagen der Probe sollte in 30-90s auftreten. Die Maschine selbst muss die in Tabelle 5 angegebenen Anforderungen erfüllen. Die Biegezugfestigkeit wird anhand Formel 1 in N/mm² ausgerechnet.

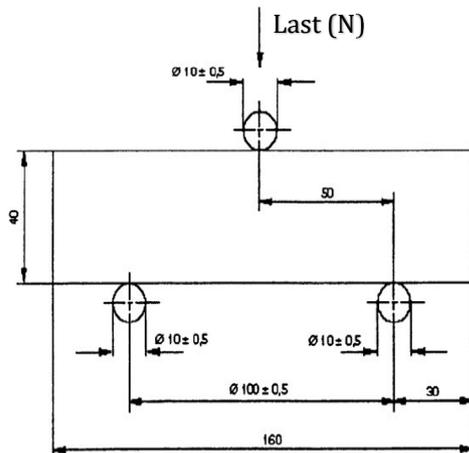


Abb. 6 Schema laut Bild 1 der EN 1015-11 -Prüfung der Biegezugfestigkeit

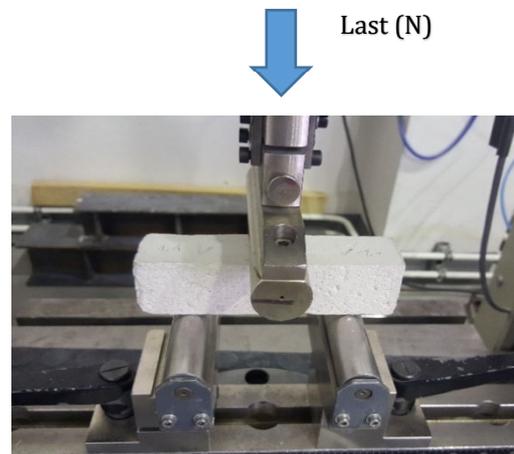


Abb. 7 Biegezugprüfung an Prismen, DA Sylwia Wallner 11.12.2017

Formel 1 Formel für die Biegezugfestigkeit (Kapitel 8.3 der ONORM EN1015-11)

$$f = 1,5 \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2}$$

f -Biegezugfestigkeit (N/mm²)

F -Bruchlast (N)

l -Auflagerabstand (100 mm ansetzen)

b -Breite (mm)

d -Höhe (mm)

(Für b und d dürfen die Formabmessungen angesetzt werden.)

höchstzulässige relative Spannweite %	höchstzulässige relative Anzeigeabweichung %	höchstzulässige relative Nullpunktabweichung %
2,0	± 2,0	± 0,4

Tabelle 5 Anforderungen an Prüfmaschinen EN 1015-11 Anhang B Tabelle B1

3.2.3.2 Druckfestigkeitsmessung nach EN 1015-11 Kapitel 9

Für die Druckfestigkeitsprüfung verwendet man die übergebliebenen Probenhälften der Biegezugversuche. Die Stirnseite der Prüfwürfel stellt man seitlich zu der Krafrichtung der Maschinen ein, damit die Druckplatte und die Kraft auf die ausgeschalte und glatte Oberfläche gleichmäßig wirken kann. Die Last muss stoßfrei mit der in der Tabelle 6 eingepasste Geschwindigkeit eingebracht werden. Die Last muss stoßfrei mit der in der Tabelle 6 eingepasste Geschwindigkeit eingebracht werden. Die aufgezeichnete Höchstlast (P in (N)) dividiert durch die Druckfläche (A , $40 \times 40 \text{ mm}^2 = 1600 \text{ mm}^2$) ergibt die Druckfestigkeit σ in N/mm^2 (siehe Formel 2). Die Druckfestigkeit ist auf $0,05 \text{ N/mm}^2$ abzurunden, der Mittelwert auf $0,1 \text{ N/mm}^2$.

Mauermörtel		Putzmörtel	
Kategorie	Belastungsgeschwindigkeit (N/s)	Kategorie	Belastungsgeschwindigkeit (N/s)
M 1	50	CS I	50
M 2,5	100	CS II	100
M 5	200	CS III	200
M 10	400	CS IV	400
M 15	400		
M 20	400		

Tabelle 6 Vorschläge für Belastungsgeschwindigkeiten Tabelle B.1 Anhang B EN 1015-11

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Formel 2 Druckfestigkeit}$$

σ -Druckfestigkeit (N/mm^2)

P-Bruchlast (N)

A-Druckfläche (in dem Fall die Fläche der Druckplatte $40 \times 40 \text{ mm}$)



Abb. 8 Belastung der Prüfkörper (im Labor der TU Wien, DA Sylwia Wallner 2018)



Abb. 9 Zerstörung der Probe (DA Sylwia Wallner 2018)

3.3 Eindringverfahren für die Ermittlung der Mauermörtelfestigkeit

Dies ist ein Verfahren, um die Mörtelfestigkeit an einem bestehenden Mauerwerk ohne Laboruntersuchungen ermitteln zu können. Es zählt zu den zerstörungsarmen Methoden zur Ermittlung der Mörtelfestigkeit und basiert auf der Abhängigkeit der Druckfestigkeit gegen die Eindringung einer genormten Metallschneide auf die Mauermörteloberfläche.

Wie Prof. A.Pauser in seinem Artikel¹⁴beschreibt, wird die Mörteldruckfestigkeitsprüfung in der Mauerwerksfuge mit dem Rückprallhammer nach Schmidt mit speziell normierter Prüfschneide durchgeführt. Die Schneide wird mit einer Schlagenergie von 0,735N/m zehnmal in die Fuge geführt und die Eindringtiefe zwischen dem ersten und letzten Schlag gemessen.¹⁵Die Mörtelfestigkeit ist von der Differenz der Eindringtiefen d_{1-10} (Abb.10) abhängig und durch Formel 3¹⁶ zu ermitteln: Der Eindringvorgang darf durch keine Mörtelreste verschmutzt werden. Die Schneide selber darf keine Mängel und Risse aufweisen. Der Abstand zwischen der Prüfstellen darf nicht geringer werden als 50mm. Die geprüfte Mörtelfuge sollte glatt werden.

Formel 3 Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren

$$\beta_E = \frac{8}{d_{1-10}}$$

β_E - Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren

d_{1-10} -Differenz zwischen ersten und zehntem Schlag
in mm

Alle Einzelwerte β_E , die um mehr als 25% abweichen, soll man vernachlässigen. Daraus bildet man eine Mittelwert, um eine Festigkeit eines Bereiches festzulegen.

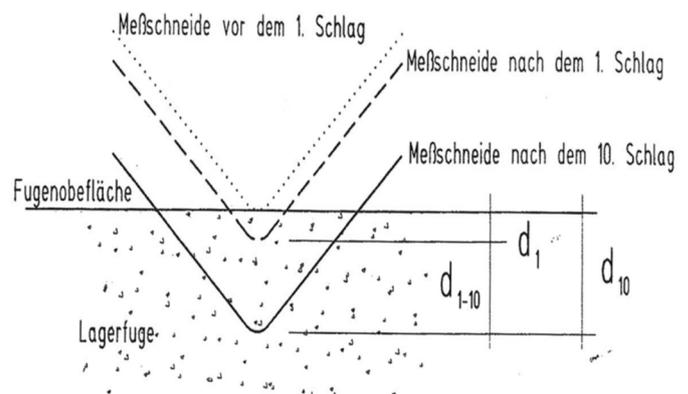


Abb. 10 Grundprinzip des Eindringverfahrens Abbildung. 3.2 [15]

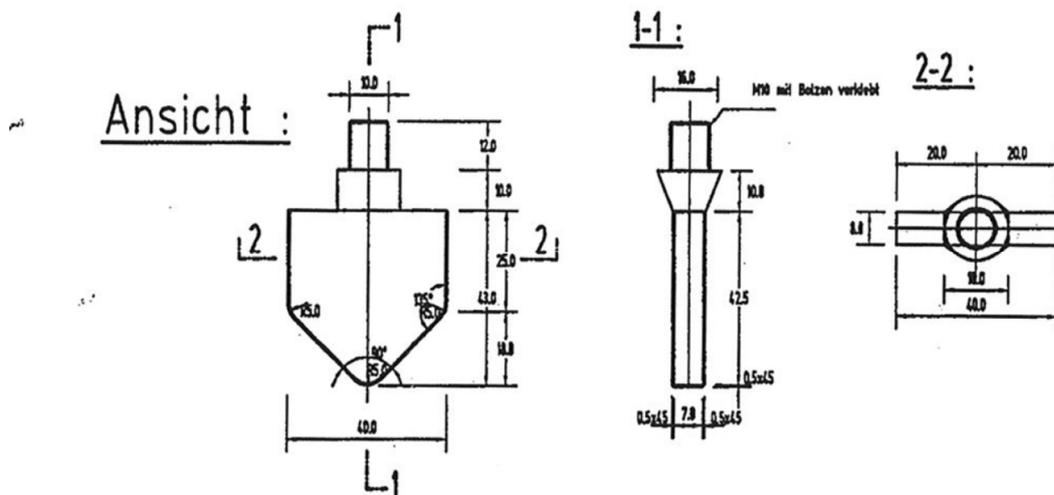


Abb. 11 Schneideform zur Bestimmung der Mörtelfestigkeit in der Fuge (Abbildung. 3.1, Pauser A. [15])

¹⁴ Forschungsartikel von Prof.A.Pauser [15]

¹⁵ Man muss markieren an der Schneidespitze mit einem Strich die Eindringtiefe nach den ersten und zehnten Schlag.

¹⁶ Formel berücksichtigt keine Ziegelform- bzw. Verbundmauerwerksabminderungen [15]

In dem Artikel vom Prof.A.Pauser befindet sich Formel für die Ermittlung der Mauerwerkdruckfestigkeit aus unterschiedlichen Mauersteinen (Formel 4 und 5).

$$f_k = 0,55 * f_b^{0,65} * \beta_E^{0,15}$$

Formel 4 Mauerwerkdruckfestigkeit für Vollziegelmauerwerk ermittelt anhand Mörtelwerten nach Eindringverfahren ÖNORM B 3350

$$f_k = 0,50 * f_b^{0,65} * \beta_E^{0,15}$$

Formel 5 Mauerwerkdruckfestigkeit für Hohlziegelmauerwerk ermittelt anhand Mörtelwerten nach Eindringverfahren ÖNORM B 3350

Eine Umrechnung der Mörtelfestigkeit in der Fuge auf genormte Mörteldruckfestigkeit ist nach der vom Kompiller[11] Formel 6 möglich.

$$f_m = \sqrt{f_{st.15} + 0,3} - 0,55$$

Formel 6 Umrechnung der Mörtelfestigkeit in der Fuge auf die normierte Mörteldruckfestigkeit nach Kompiller [11]

f_m -Normmörteldruckfestigkeit laut EC6

$f_{st.15}$ -Mörteldruckfestigkeit in der Fuge durch Eindringverfahren ermittelt

Ein direkter Übergang von Eindringtiefen bis genormte Mörtelfestigkeit erfolgt mittels Formel 7.

$$\text{Formel 7} \quad f_m = \left(\frac{4,0}{d_{1-10}}\right)^{0,60}$$

f_m -Normmörteldruckfestigkeit laut EC6

d_{1-10} -Differenz zwischen ersten und zehntem Schlag in mm (Eindringverfahren)

Herr Prof.A.Pauser berücksichtigte dabei keinen Einfluss der Spannungen in der Fuge (in Folge von Auflast, tragenden Gewicht). Er geht davon aus, dass so lange die Spannungen unten 1N/mm^2 bleiben, wird das die Ergebnisse der Mörteldruckfestigkeit nicht beeinflussen können. Er versicherte, dass so lange die Eindringtiefe (d_{1-10}) 1mm überschreitet, entspricht das der Mörtelfestigkeit von $2,5\text{N/mm}^2$. Damit liegt die Anwendungsgrenze der Methode ab der Eindringung von $d_{1-10}=1\text{mm}$ und der Mörtelfestigkeit bis $2,5\text{N/mm}^2$.

$$d_{1-10} = 1\text{mm} \Rightarrow \beta_E = 8\text{N/mm}^2 = f_m = 2,5\text{N/mm}^2$$

Die Zuverlässigkeit des Verfahrens und die Genauigkeit der Formel 3 wurde weiter an der TU Wien untersucht. Eine Festigkeitsformelbestimmung anhand Untersuchungen bildet untere Abbildung 12. Weitere Angaben lieferten Untersuchungen vom KADNAR [14], die den Einfluss der Mörtelfeuchtigkeit auf die Mörtelfestigkeit beschrieben. Es hat sich herausgestellt, dass es sich im Vergleich zu dem Trockenen mit einer Feuchte von 8% zu einer Festigkeitsabminderung von 40% kommt. Das bedeutet nur, dass die Methode sehr empfindlich auf den Mörtelzustand (feuchte) ist (Abb.13). Die beide Studenten haben durch die Forschung eine neue Formel (Formel 8) entwickelt. Entspricht der Wert $f_{m.Ein}$ nicht der normierten Druckfestigkeit, ist die laut Formel 9 weiterhin umzurechnen. Der laut Formel 9 daraus ermittelte Mittelwert der Mörteldruckfestigkeit wird man in statischen Berechnungen¹⁷ verwenden dürfen.

Formel 8 Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren KADNAR [14]

$$f_{m.Ein} = \frac{9}{d_{1-10}}$$

$f_{m.Ein}$ -Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren

d_{1-10} -Differenz zwischen erstem und zehntem Schlag in mm

$$\bar{f}_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{m,i} \quad , n = \sum_i x_i < 25\% \text{ Abweichung}$$

Formel 9 Ausscheidung der Abweichungen

¹⁷ Nachweis laut EC 6

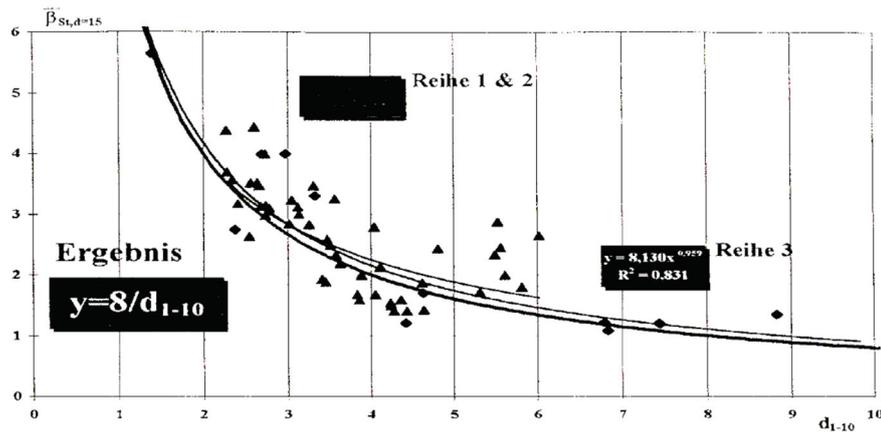


Abb. 12 Beziehung zwischen d_{1-10} und der Mörtelfestigkeit in der Fuge [16]

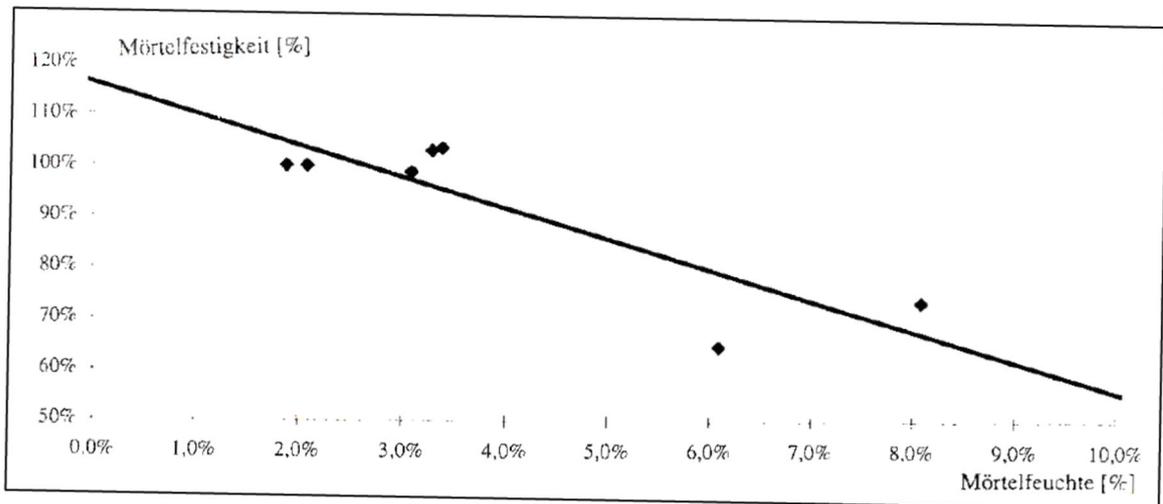


Abb. 13 Abhängigkeit der Mörtelfestigkeit in der Fuge von Feuchtigkeitsgehalt ([14] Abbildung 6)

3.4 Stempeldruckverfahren für die Ermittlung der Mauermörtelfestigkeit

Die Stempeldruckmethode wurde durch das Hochbauinstitut an der TU in Wien in 1990J entwickelt. Das Verfahren ist in der ÖNORM B 4004-1 als mögliche Untersuchungsmethode im Bestand vorgegeben. Bei dem Verfahren sind Mörtelblättchen aus einer Lagerfuge abzunehmen, die danach mit dem Gips auf beiden Seiten abgeglichen werden müssen (Abb.15). Diese Methode ist für Mörtel mit der Festigkeit unter 3N/mm^2 bevorzugt anzuwenden.



Abb. 14 Ausgestemte vom Mauerwerk Mörtelblättchen (DA SW 2018)



Abb. 15 Abgleichen mit dem Gips

Die Gipsschicht sollte ungefähr 5mm stark sein und eine 5cm große Scheibe bilden. Man sollte mehrere Proben vorbereiten, um einen Referenzwert zu bekommen. Ausgetrocknete Proben untersucht man unter der Druckbelastung bis zum Versagen. Die Druckfestigkeit wird dabei stark schwanken. Man sollte Werte die um mehr als 20% abweichen, ausscheiden.

Diese Thematik wurde schon mehrmals untersucht. Es wurde der Einfluss der Mörtelprobe-
stärke an der Festigkeit geprüft, aber auch ein Vergleich der Stempeldruckverfahren gegen nor-
mierte Prismenuntersuchung gemacht. Einige Untersuchungen werden im Artikel „Der Mörtel
macht's“¹⁸ beschrieben. Dabei wurden drei unterschiedliche Mörtelarten erstellt (Tabelle 7) und
ein Vergleich der Ergebnisse aus Stempeluntersuchung und



Abb. 16 Druckfläche (DA SW 2018)

Prismenuntersuchung¹⁹ erstellt. (siehe Abb 18). Damalige Untersuchungen an der TU zeigten, dass die größere Mörtelstärke einen negativen Einfluss auf die Festigkeit hatte. (Abb.19)



Abb. 17 Belastung der Stempelprobe (DA SW 2018)

¹⁸ Vom Dipl.-Ing.Dr.Techn Karl Deix [8]

¹⁹ Untersuchung der Mörteldruckfestigkeit an Prismen laut ÖN EN 1015-11

Der Umrechnungsfaktor zwischen den Ergebnissen der Stempel- auf die Prismenfestigkeit liegt zwischen 2 und 3 (Abb.18). Vereinfacht kann bei üblichen Mörtelfestigkeiten der Faktor 2 angesetzt werden.

	Zement CEM II-A	Luftkalk	Sand 0/1	W/B-Wert	Druckfestigkeit P in N/mm ²
Serie A	0,5	1	7,5	1,06	2,40
Serie B	-	1	6	0,93	1,12
Serie C	-	1	10	0,66	0,95

Tabelle 7 Drei verschieden rezeptierte Mörtelanmischungen, Tabelle aus dem Artikel [8]

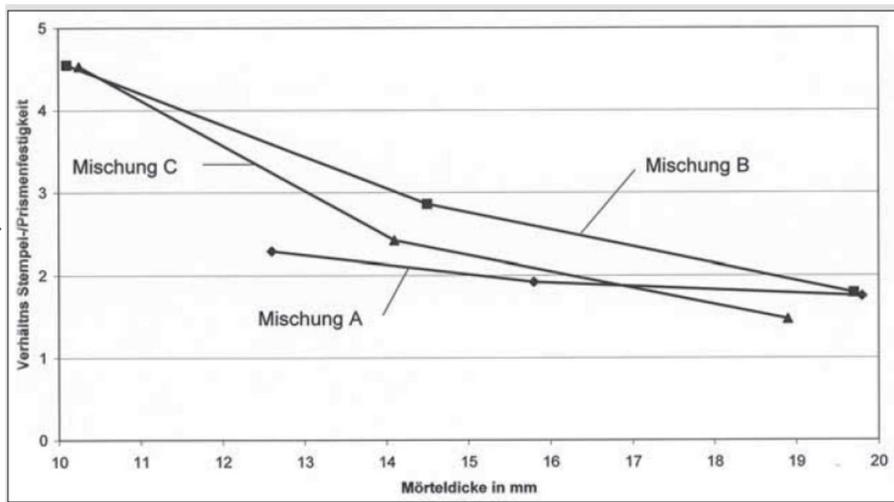


Abb. 18 Zusammenhang zwischen Mörteldicke und dem Verhältnis von Stempel- und Prismenfestigkeit (Abb. 4 [8])

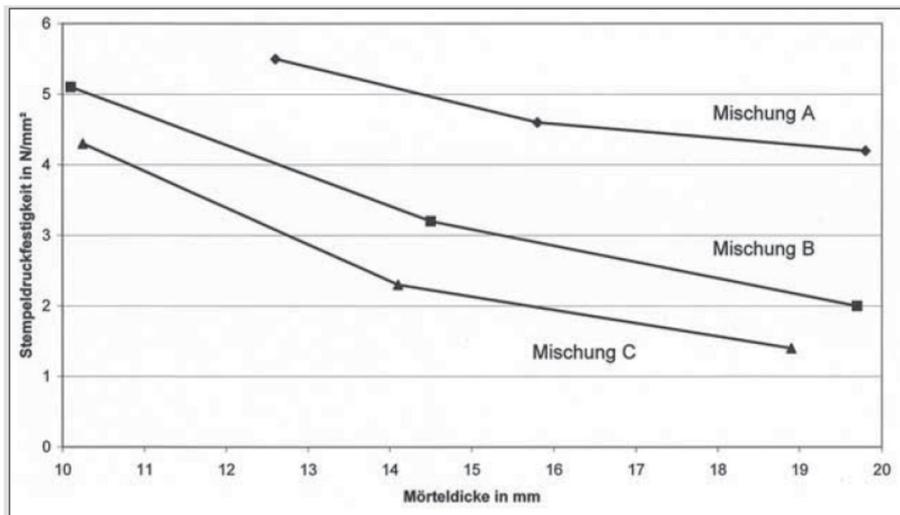


Abb. 19 Zusammenhang zwischen Mörteldicke und Stempeldruckfestigkeit (Abb. 3 [8])

Für das Verhältnis α (Stempel/Prismenfestigkeit) gibt Helmut Undesch in seiner DA [12] für Kalkmörtel und Kalkzementmörtel eine Regressionskurve an (siehe Abb. 20 und 21). Der Parameter α liegt für die Fugenstärke von 15mm auch zwischen 2 und 3. Die durch ihm geprüften Lagerfugenproben waren nicht stärker als 10 bis 25mm und die Gipsschichtstärke lag unter 10mm. Der Mörtelprobendurchmesser betrug 50mm.

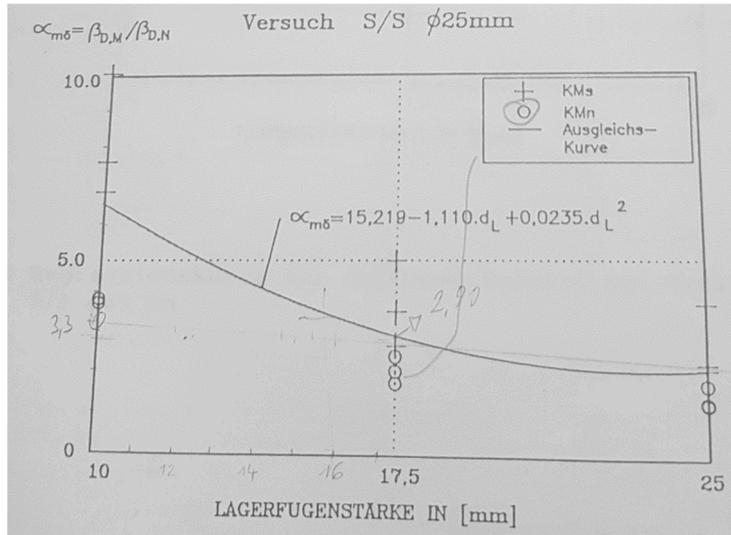


Abb. 20 Regressionskurve für Kalkmörtel* (DA Helmut Undesch Abb. 48 [12])

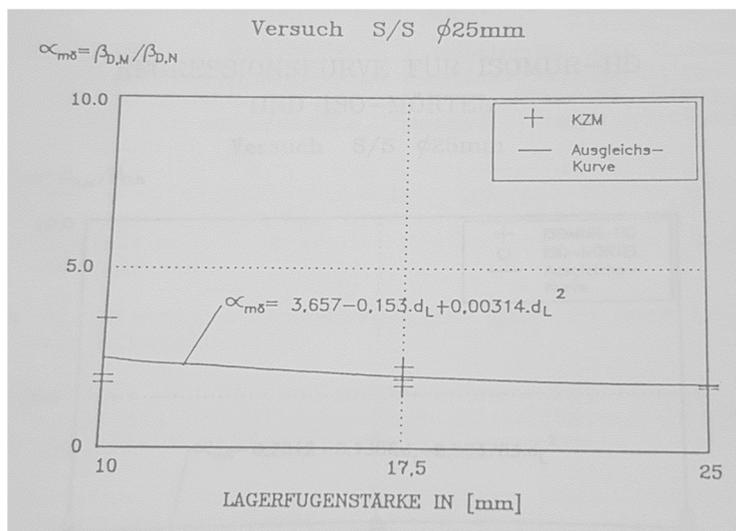


Abb. 21 Regressionskurve für Kalkzementmörtel* (DA Helmut Undesch Abb. 49 [12])

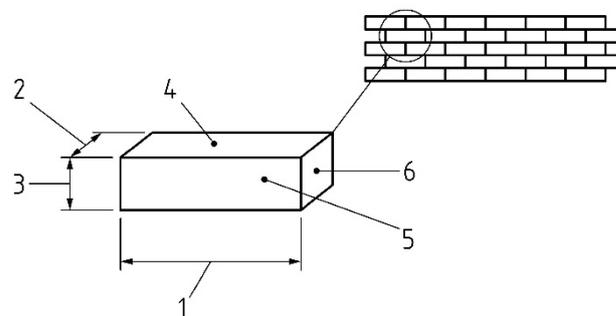
*Lagerfugenprobenstärke 10-25mm, Gipsschichtstärke bis 10mm, Mörtelprobendurchmesser=50mm.

3.5 Mauerstein bzw. Mauerziegel nach EN 771-1

Teil 1 der Norm EN 771 unter dem Titel „Festlegung für Mauersteine“ definiert den Begriff „Mauerstein“ als ein „vorgeformtes Element zur Herstellung von Mauerwerk“. Mauerziegeln werden als „...aus Ton oder anderen tonhaltigen Stoffen mit oder ohne Sand, Brennstoffen oder anderen Zusätzen hergestellt ist und bei einer ausreichend hohen Temperatur gebrannt wird, um einen keramischen Verbund zu erzielen“ definiert. Es gibt auch eine Unterteilung auf Grund von Einbaubereichen.



Einen Ziegel beschreibt man durch seine Abmessungen in folgender Reihenfolge: L/B/H in mm und seine Seitenflächen durch normierte Begriffe laut unterer Abbildung 22



Legende

1	Länge	3	Höhe	5	Sichtfläche (Läuferfläche)
2	Breite	4	Lagerfläche	6	Sichtfläche (Stirnfläche)

ANMERKUNG Die Bezeichnungen beziehen sich auf die übliche Verwendung des Mauersteins in einer Wand.

Abb. 22 Abmessungen und Oberflächen Bild 1 EN 771-1

Die Norm definiert folgende Begriffe:

Normierte Druckfestigkeit: Festigkeit, die auf einen lufttrockenen und equivalenten Mauerstein 100x100mm umgerechnet wird (Verweisung auf ÖNORM EN 772-1).

Deklariertes Wert: Zahlenwert des Herstellers, mit bestimmter Genauigkeit und angegebener Schwankung.

Mittlere Druckfestigkeit von Mauerstein: arithmetischer Mittelwert, ausgerechnet aus Einzelwerten der Druckfestigkeit mehreren Mauersteine.

Bei einer Berechnung der Standsicherheit wird man den durch Hersteller angegebenen Mittelwert für die Druckfestigkeit in Berechnungen verwenden. Bei der Abnahme der gelieferten Mauersteine und einer Prüfung nach EN 772-1 darf der Mittelwert der Festigkeit der Proben nicht kleiner werden als der deklarierte durch den Hersteller. Kein Ziegel darf schwächer sein als 80% des deklarierten Wertes.

Bei Standsicherheitsberechnungen für die **Verbundfestigkeit** der Mauerziegel mit Mörtel wird man zur charakteristischen Anfangsscherfestigkeit nach EN 1052-3 verwiesen. Die Werte sind durch Vorgabewerte²⁰ oder einer Prüfung²¹ festzulegen.

Für tragende Bauteile ist eine Verbundfestigkeit der Mauerziegel mit Mörtel als charakteristische Anfangsscherfestigkeit²² erforderlich und anzugeben.

Die Prüfkörpermenge für die Ermittlung bestimmter Mauerziegeleigenschaften sind tabellarisch in der ÖNORM EN 771-1 erfasst (siehe Tabelle 8).

Eigenschaft	Abschnittsnummer	Prüfverfahren	Anzahl der Mauersteine ^a	
Maße	5.3.1	EN 772-16	10	
Ebenheit der Lagerflächen	5.3.1.2.4	EN 772-20	3	
Planparallelität der Lagerflächen	5.3.1.2.5	EN 772-16	3	
Form und Ausbildung	5.3.2	EN 772-16 EN 772-3 EN 772-9	10	
Brutto-Trockenrohichte	5.3.3.1	EN 772-13	10	
Netto-Trockenrohichte	5.3.3.2	EN 772-13	10	
Druckfestigkeit	5.1 und 5.3.4	EN 772-1	10	
Wärmeschutztechnische Eigenschaften	5.3.5	EN 1745	—	
Wasserdampfdurchlässigkeit	5.3.12	EN 1745 oder EN ISO 12572		
Frostwiderstand	5.3.6	b	c	
Wasseraufnahme	5.3.7	EN 772-21 (Außenbauteile) EN 772-7 (Mauersteine für Feuchtesperrschichten)	10 10	
Anfängliche Wasseraufnahme	5.3.8	EN 772-11	10	
Übliche Feuchtedehnung	5.3.10	b	c	
Gehalt an aktiven löslichen Salzen	5.3.9	EN 772-5	10	
Brandverhalten	5.3.11	EN 13501-1	—	
Verbundfestigkeit	5.3.13	EN 1052-3	Probe- körper des Typs I	Probe- körper des Typs II
		Verfahren A	27	18
		Verfahren B	18	12
Gefährliche Stoffe	5.3.14	Nationale Bestimmungen am vorgesehenen Verwendungsort	Nationale Bestimmungen	
^a Sofern möglich, z. B. wenn Mauersteine durch eine Prüfung nicht beeinflusst worden sind, dürfen dieselben Steine für weitere Prüfungen verwendet werden. ^b Die Prüfung ist nach den am vorgesehenen Verwendungsort der Mauersteine geltenden Bestimmungen durchzuführen. ^c Die zu prüfende Anzahl ist in den jeweiligen Bestimmungen angegeben.				

Tabelle 8 Anzahl der U-Ziegelzahl für bestimmte Prüfungen (Tabelle A2 EN 771-1)

²⁰ deklarierte Werte ÖNORM EN 998-2 Anhang C

²¹ Prüfung nach EN 1052-3

²² Ein Wert ermittelt anhand einer Prüfung nach EN 1052-3 oder deklarierte Werte nach ÖNORM EN 998-2 Anhang C

3.6 Prüfverfahren für Mauersteine nach EN 772-1

Die Norm EN 772-1 „*Prüfverfahren für Mauersteine*“ beschreibt den Verlauf der Druckfestigkeitsprüfung für die Mauersteine. Man sollte mind. sechs Ziegel²³ (Mauersteine) für die Prüfung verwenden. Damit die Drucklast gleichmäßig auf die Fläche wirken kann, muss man die Oberfläche z.B. durch Abschleifen (Abschnitt 7.2.4 der ÖNORM EN 772-1) bzw. Abgleichen (Abschnitt 7.2.5.1. der ÖNORM EN 772-1) vorbereiten.

Für die Prüfung muss die Oberfläche abgeglichen werden. Die Ziegel sollte man zuerst anfeuchten. Danach errichtet man den Zementmörtel mit höherer Festigkeit als der Stein vorgesehen hat bzw. ca. 30N/mm². Für die Vorbereitung der Probe braucht man eine glatte Platte (Edelstahl oder Glas), die mit einem Öl einzustreichen ist. Drauf richtet man eine 5mm starke Schicht aus dem Zementmörtel und richtet die Ziegel mit Hilfe einer Wasserwaage horizontal aus. Durch das Andrücken verdichtet man den Mörtel, damit keine Hohlräume entstehen.



Abb. 23 Abgleichen der Lagerflächen mit dem Zementmörtel DA S.Wallner 2018

Erst wenn die erste untere Lagerfuge fertig und starr ist, kann man die Ziegel umdrehen und die zweite Lagerfuge errichten. Dazwischen sollte man die Steine abdecken, damit der Zementmörtel nicht zu schnell austrocknet und sich die erwartete Festigkeit entwickelt. Die Lagerung ist in 90% der Relativluftfeuchte am Anfang vorgeschrieben. Sinnvoll ist es die Proben mit der Folie dicht abzudecken und in die Lagerkammer zu legen. Für die Festigkeitsprüfung müssen die Proben einen lufttrockenen Zustand erreichen. Um einen lufttrockenen Zustand der Probe sicher zu stellen, muss man die Probe konditionieren²⁴.

Die Druckfestigkeitsprüfung der Ziegel erfolgt in einer Druckprüfmaschine. Eine Prüfmaschine muss die Anforderungen laut Tabelle 1 der Norm EN 772-1 erfüllen.

²³ Oder die Produktnorm bzw. EN771-1 gibt andere Zahl vor

²⁴ Methoden in Abschnitt 7.3 der EN 772-1 genau beschrieben. Es ist zu eine Lagerung 14Tage in Temp.>15°C und unter 65% Rel Luftfeuchte. Wenn eine Wiegung nach 14 Tage in Abstand von 24 Stunden eine Massenverlust unter 0.2% ergibt, ist die Probe prüfungsreif.

Fertige Ziegel werden einzeln zentrisch an die Druckplatte der Druckmaschine aufgelegt. Darauf wird vollflächig und stoßfrei eine steigende Last (Tabelle 2 der ÖNORM EN 772-1) aufgebracht, die bis zur Zerstörung der Probe führt. Die Geschwindigkeit ist aber so anzupassen, dass die Höchstlast erst nach einer Minute erreicht wird. Die Festigkeit σ der Ziegel errechnet man aus der Höchstlast P (in N) dividiert durch die Bruttofläche²⁵. A (mm^2). Das Ergebnis ist auf $0,1 \text{ N/mm}^2$ abzurunden. Die Druckfestigkeit ist ein Mittelwert allen Proben auf $0,1 \text{ N/mm}^2$ gerundet.



Abb. 24 Druckfestigkeitsprüfung an der Ziegel (TU Labor DA S.Wallner 2018)



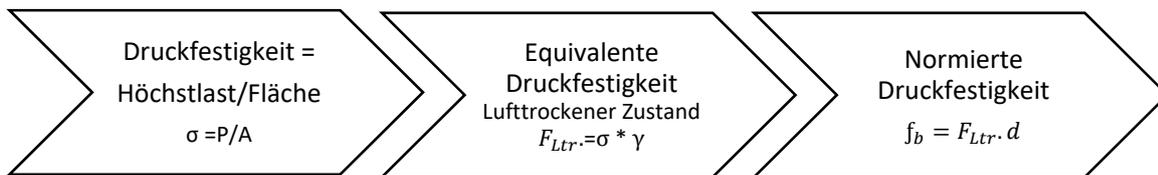
Abb. 25 Versagensbild der Ziegel (TU Labor DA S.Wallner 2018)

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Formel 10 Formel für die Druckfestigkeit für die Mauersteine (Angaben dafür enthält Kapitel 9 EN 772-1)

σ -Druckfestigkeit (N/mm^2)
 P -Bruchlast (N)
 A -Bruttofläche²⁶

Eine Umrechnungssystematik der Druckfestigkeit σ in die normierte Druckfestigkeit f_b bildet die untere Grafik ab.



Die Umrechnung auf die „*Äquivalente Druckfestigkeit*“ berücksichtigt die Konditionierungsart. Anbei Parameter γ für bestimmte Konditionierungsverfahren:

- | | |
|---|--------------|
| 1. Konditionierung bis zum Erreichen des lufttrockenen Zustandes | $\gamma=1$ |
| 2. Konditionierung bis zu einem Zustand mit 6% Feuchtegehalt | $\gamma=1$ |
| 3. Konditionierung bis zum Erreichen des ofentrockenen Zustandes | $\gamma=0,8$ |
| 4. Konditionierung durch Lagerung in Wasser | $\gamma=1,2$ |

²⁵ Bruttofläche nach EN 772-16, ist gleich der Fläche der Lagerfuge bei Vollziegel

Für die Umrechnung auf die **normierte Druckfestigkeit** f_b multipliziert man die Festigkeit in trockenem Zustand F_{Ltr} mit dem Formfaktor d^{26} .

$$f_b = F_{Ltr} \cdot d$$

Formel 11 Formel für die normierte Druckfestigkeit

Breite mm Höhe ^a mm	50	100	150	200	≥ 250
40	0,80	0,70	-	-	-
50	0,85	0,75	0,70	-	-
65	0,95	0,85	0,75	0,70	0,65
100	1,15	1,00	0,90	0,80	0,75
150	1,30	1,20	1,10	1,00	0,95
200	1,45	1,35	1,25	1,15	1,10
≥ 250	1,55	1,45	1,35	1,25	1,15
ANMERKUNG Die lineare Interpolation zwischen nebeneinanderliegenden Werten des Formfaktors ist zulässig.					
^a Höhe nach der Oberflächenbehandlung.					

Tabelle 9 Formfaktor d zur Berücksichtigung der geprüften Maße der Probekörper nach der Oberflächenbehandlung (Tabelle A.1 EN 772-1)

3.7 Mauersteinprüfung mit dem Rückprallhammer

Es ist eine zerstörungsfreie Methode für die Ermittlung der Beton- bzw. Ziegeldruckfestigkeit. Sie wird anhand des speziellen Schmidt Hammers durch eine schlagartige punktuelle Prüfung der Beton- bzw. Mauersteinoberfläche ausgeführt. Der Hersteller²⁷ des Gerätes beschreibt die Funktion folgendermaßen: „Der Bolze schlägt mit einer definierten Energie auf die Oberfläche und je nach Betonhärte prallt die Hammermasse mehr oder weniger weit zurück. Dieser Rückprall wird vom Gerät gemessen und gibt Auskunft über die Härte und Festigkeit des Betons.“ Das Gerät speichert die Rückprallkraft in Diagrammform (Diagramm 1). Die Messwerte werden nicht direkt ansetzbar. Die Wertumrechnung basiert anhand vom Erfahrungswerten der untersuchten Mauersteine.²⁸

Diagramm 1 Rückpralldiagramm

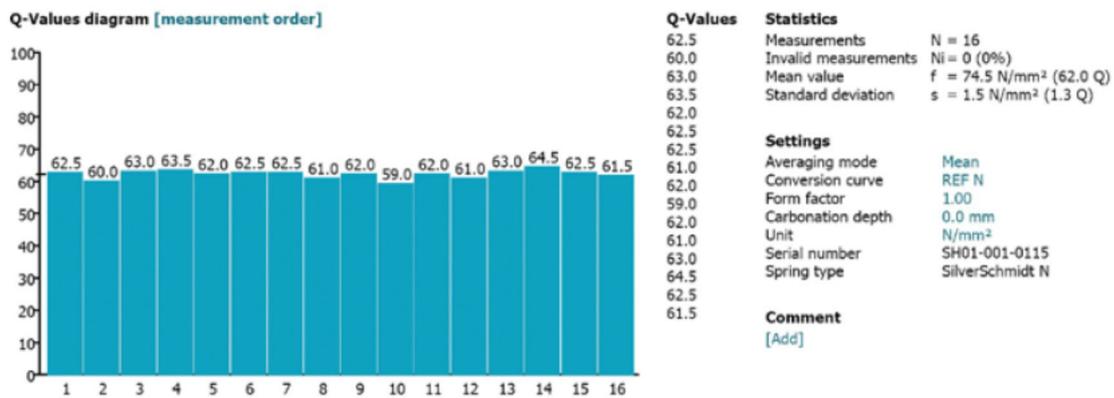


Abb. 26 Prüfung eines belasteten Pfeilers mit dem Rückprallhammer (S.Wallner 2018).

²⁷ <https://sibet.de/product/ruckprallhammer>

²⁸ <https://www.zt-pech.at/angebote/mauerwerkspruefung/>

3.8 Mauerwerk nach ÖNORM EN 1996 (EC 6)

Die ÖNORM EN 1996-1-1 (EC 6) „Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten“ in Teil 1 gibt allgemeine Regeln für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Mauerwerksbauten an. Die Parameter werden in jedem Land bestimmt und in einem Nationaldokument veröffentlicht.

Die Norm beschreibt das **Mauerwerk** als: „*Gefüge aus Mauersteinen die in einem bestimmten Verband verlegt und mit Mörtel verbunden worden sind.*“ Dabei bedeutet ein Mauerwerkverband eine Verlegungssystematik der Mauerseite. Ein Mauerwerk besitzt durch den Verband und die Komponenten bestimmte Festigkeiten. Dabei entspricht der charakteristische Wert einem 5% Fraktile. Das bedeutet in der Praxis, dass die Wahrscheinlichkeit einen Versuchswert unter dem charakteristischen Wert zu bekommen 5%, d.h. 95% überschreiten das Wert.

Die **Druckfestigkeit** eines Mauerwerkes ist eine Festigkeit gegen Drucklast, die keine Verformungen, Exzentrizitäten der Last bzw. Schlankheit berücksichtigen.

Eine **Schubfestigkeit** wird beim Mauerwerk als eine Festigkeit gegen einer Horizontallast verstanden.

Die **Haftfestigkeit** eines Mörtels (Adhäsion) ist die Zug- bzw. Scherfestigkeit in der Kontaktfläche des Mörtels zu dem Mauerstein.

Eine **Lagerfuge** ist eine Mörtelschicht zwischen den Lagerflächen der Mauersteinen.

Eine **Tragende Wand** ist eine Wand, die außen dem Eigengewicht noch die Verkehrslasten übernimmt. Eine Schubwand übernimmt die in ihrer Ebene wirkende Querkraft (Horizontallast).

Bei der Mauerwerksbemessung ist ein Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit zu berechnen²⁹.

Der Bemessungswert der Materialeigenschaften ist der charakteristische Wert dividiert durch γ_M ³⁰. Man verwendet es bei dem Grenzzustand der Tragfähigkeit und bei außergewöhnlichen Bemessungssituationen. Bei dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist für $\gamma_M=1$ empfohlen. Baustellenmörtel müssen Anforderungen laut EN 1996-2 erfüllen, Werkmörtel die von EN 998-2.

Mauermörtel werden nach Festigkeitsklassen beschriftet (z.B. M5 = 5N/mm² Druckfestigkeit) oder nach Rezept in Volumenteilen (z.B. Zement:Kalk:Sand=1:1:5).

Normal Mauermörtel ist ein Mörtel, der die Eignungsprüfung nach EN 998-2 erfüllt, oder einem Rezeptmörtel nach EN 998-2 entspricht. Die Druckfestigkeitsprüfung ist laut ÖNORM EN1015-11 durchzuführen. Es ist ein ausreichender Verbund von Mörtel sowie Mauersteinen notwendig, dieser wird als Anfangsscherfestigkeit³¹ (Haftscherfestigkeit) bezeichnet. Weiters wirkt sich die Anfangsscherfestigkeit auf die Biegehaftzugfestigkeit³² des Mauerwerkes aus. Für die Berechnung von Mauerwerken werden nichtlineare Methoden (Spannung Dehnung Rechnung) angewendet bzw. die Elastizitätstheorie für einem linear-elastisches Material.

²⁹ unter der in der EN 1991 Einwirkungen und Kombinationsregeln und Teilsicherheitsbeiwerte nach 1990

³⁰ Ein Nationalparameter, Die Nationalparametern für die ÖNORM EN 1996 enthält die ÖN B 1996 in der der Tabelle 1

³¹ EN 1052-3 Tabelle 3.4

³² EN 1052-5

3.8.1 Charakteristische Druckfestigkeit des Mauerwerkes

Die ÖNORM EN 1996 in Teil 1 definiert die Hauptformel für die charakteristische Druckfestigkeit. Die Formel 12 gibt den Zusammenhang der Mauerwerksdruckfestigkeit und der Mauerwerkskomponenten³³ an.

$$f_k = K * f_b^\alpha * f_m^\beta$$

Formel 12 charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk (Formel 3.1 EN1996-1-1)

f_k die charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk in N/mm²

K-eine Konstante, die-sofern notwendig-nach 3.6.1.2(3) und/oder 3.6.1.2.(6) zu modifizieren ist

α, β -Konstanten

f_b die normierte Mauersteindruckfestigkeit in Lastrichtung N/mm²

f_m die Druckfestigkeit des Mauermörtels N/mm²

Die Anwendungsgrenzen der obigen Gleichung sollten in Bezug auf f_m und f_b , den Variationskoeffizienten der Versuchsergebnisse und die Mauersteingruppen angegeben werden. Der Zusammenhang zwischen f_k , f_m und f_b ist in drei Formeln abgebildet, die der Mörtelart (Normal-, Leicht- und Dünnbettmörtel) und der Mauersteinart angepasst wurden. Die K Werte für das Mauerwerk mit Normalmörtel, Leichtmörtel und Dünnbettmörtel werden in der Tabelle 3.3 der EN1996-1-1 inbegriffen.

Formel 13 charakteristische Druckfestigkeit vom Mauerwerk mit Normal- und Leichtmörtel (Formel 3.2 EN 1996-1-1)

$$f_k = K * f_b^{0,7} * f_m^{0,3}$$

Formel 14 charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk mit Dünnbettmörtel mit Lagerfugenstärke 0,5-3mm und Mauerziegeln der Gruppen 1 und 4, Kalksandsteinen, Betonsteinen, Porenbetonsteinen (Formel 3.3 EN 1996-1-1)

$$f_k = K * f_b^{0,85}$$

Formel 15 charakteristische Druckfestigkeit vom Mauerwerk mit Dünnbettmörtel mit Lagerfugenstärke 0,5-3mm und Mauerziegeln der Gruppen 2 und 3 (Formel 3.4 EN 1996-1-1)

$$f_k = K * f_b^{0,7}$$

³³ Tabelle 3.3 EN 1996-1-1 oder Tabelle 3.1 in Nationalen Anhang

3.8.2 Charakteristische Schubfestigkeit vom Mauerwerk

Die charakteristische Schubfestigkeit f_{vk} vom Mauerwerk darf man mit Hilfe von Versuchen oder einer Formel ermitteln:

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0,4f\sigma_d \leq 0,065f_b, f_{vlt},$$

Formel 16 charakteristische Schubfestigkeit eines Mauerwerkes mit Normalmörtel (Formel 3.5 EN 1996-1-1)

- f_{vk} – die charakteristische Schubfestigkeit eines Mauerwerkes
- f_{vk0} -die charakteristische Haftscherfestigkeit ohne Auflast (Anfangsscherfestigkeit, anhand Versuchen nach EN 1052-3 bzw. 1052-4 ermittelt)
- σ_d - Bemessungsdruckspannung rechtwinkelig zur Schubkraft, in diesen Querschnitt, als Mittelwert der Vertikalspannung im überdruckten Bereich der den Schubwiderstand sicherstellt.
- f_b - normierte Mauersteindruckfestigkeit
- f_{vlt} – der Grenzwert von f_{vk}

Die Abgrenzung der Formel ($0,065f_b, f_{vlt}$) ist im nationalem Anhang definiert. Weitere Abweichungen der Formel sind im Kapitel 3.6.2 der EN 1996-1-1 festgelegt. Die Schubtragfähigkeit einer Wand kann man aus der unterstehenden Gleichung ermitteln.:

Formel 17 Schubtragfähigkeit einer Wand (6.13 EN 1996-1-1)

$$V_{Rd} = f_{vd} t l_c$$

- l_c - Länge der überdruckter Wandlänge als Zugvernachlässigung
- t- Wanddicke
- f_{vd} - Bemessungswert der Schubfestigkeit (ein Mittelwert der vertikalen Druckspannung im überdruckten Teil)

3.8.3 Verformung von Mauerwerk (Spannungs-Dehnung-Linie)

Die Spannungs-Dehnungs-Linie eines unter Druck belasteten Mauerwerks verläuft nicht linear (Abb. 27). Sie hängt weiters von der Mauersteinart ab.

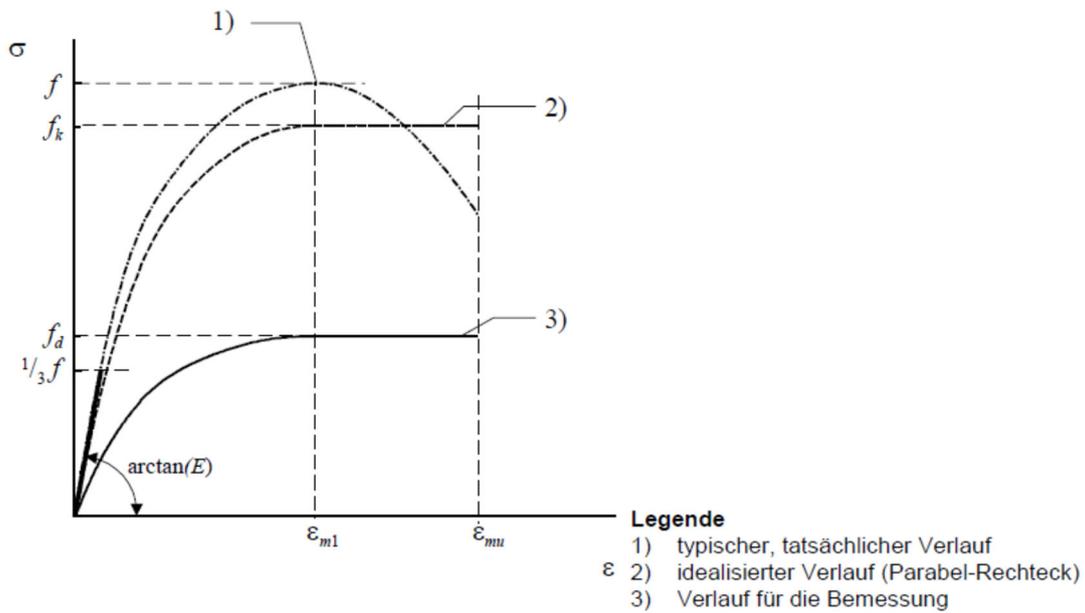


Abb. 27 Spannungs-Dehnungs-Linie für Mauerwerk bei Druckbeanspruchung (Bild 3.2 ÖNORM EN 1996-1-1)

3.9 Mauerwerk in Nationalnorm ÖNORM B 1996

Die österreichische Bau Norm : ÖNORM B 1996 ist eine Ergänzung zur europäischen Norm EN 1996 (Eurocode 6). Die beide Normen sind zusammen anzuwenden, dabei enthält die österreichische Version nationale Parametern, die für Bauten in diesem Land bei Hoch- und Ingenieurbauten gelten. Die Norm ÖN B 1996 in Teil 3 beschreibt die Prüfung von:

- bestehenden Mauerwerken
- verfestigten Mauerwerken
- Deckenauflagern.

3.9.1 Ermittlung der Mauerwerkdruckfestigkeit nach ÖNORM B 1996-3

Im Kapitel 4.4 der Norm ÖN B 1996-3 befindet sich die Formel für die Berechnung der Mauerwerkdruckfestigkeit (Charakteristische Mauerwerkdruckfestigkeit). Für meine DA war das Kapitel 4 der Norm entscheidend. Die schon im Kapitel 3.8.1 erwähnte Formel 12 wird wiederholt:

Formel 18 Charakteristische Mauerwerkdruckfestigkeit (gleich wie Formel 12)

$$f_k = K * f_b^\alpha * f_m^\beta$$

K-Beiwert (Tabelle 10)

f_b -normierte Druckfestigkeit eines Mauersteines

f_m -Druckfestigkeit eines Mauermörtels

α β Exponenten laut Tabelle 10

Mauersteinart	Normalmörtel	Dünnbettmörtel ^a						Leichtmörtel mit einer Rohdichte					
		Dicke 1 mm bis 3 mm			600 kg/m ³ bis 800 kg/m ³			über 800 kg/m ³ bis 1500 kg/m ³					
		K	α	β	K	α	β	K	α	β	K	α	β
Ziegel	Gruppe 1	0,60	0,65	0,25	0,90	0,70	0,00	0,35	0,65	0,25	0,50	0,65	0,25
	Gruppe 2	0,55	0,65	0,25	0,70	0,70	0,00	0,30	0,65	0,25	0,40	0,65	0,25
	Gruppe 3	0,50	0,65	0,25	0,50	0,70	0,00	0,25	0,65	0,25	0,30	0,65	0,25
Beton	Gruppe 1	0,60	0,65	0,25	0,75	0,85	0,00	0,50	0,65	0,25	0,55	0,65	0,25
	Gruppe 2	0,55	0,65	0,25	0,70	0,85	0,00	0,45	0,65	0,25	0,50	0,65	0,25
	Gruppe 3	0,50	0,65	0,25	0,60	0,85	0,00	- ^b	0,65	0,25	- ^b	0,65	0,25
Porenbeton	Gruppe 1	0,60	0,65	0,25	0,75	0,85	0,00	0,50	0,65	0,25	0,55	0,65	0,25

^a Mörteldruckfestigkeit $f_m \geq 10 \text{ N/mm}^2$

^b Es liegen keine gesicherten Prüfungsdaten vor; die Mauerwerks-Druckfestigkeit ist aus Prüfungen zu ermitteln.

Tabelle 10 Beiwerte K und Exponenten α , β zur Ermittlung der Mauerwerks-Druckfestigkeit (Tabelle 3 ÖN B 1996-3)

Ausnahmen und Angaben für die Anwendung der Formel 18:

-Bei Mauerwerken mit Leichtmörtel vermauert darf als Steinfestigkeit f_b max. 15 N/mm^2 eingesetzt werden.

-Verbandsmauerwerk (Fugen quer und entlang zur Wandebene) mit Normalmörtel muss man die errechnete Mauerwerkdruckfestigkeit f_k um 20% verringern.

-Man darf max. 20 N/mm^2 für Mörteldruckfestigkeit f_m verwenden.

Die Mörteldruckfestigkeit f_m darf nicht größer als f_b eingesetzt werden. Die Norm ÖNORM B 1996-3 gibt die errechnete und tabellarisch gefasste Werte für die Mauerwerkdruckfestigkeit mit bestimmten Mörtel und Ziegelgruppen an³⁴.

³⁴ Tabelle 4 bis 9 ÖNORM B 1996-3

3.9.2 Teilsicherheitsbeiwert γ_M für Grenzzustand der Tragfähigkeit

Tabelle 11 enthält die Teilsicherheitsbeiwerte für Mauersteine in Grenzzustand der Tragfähigkeit.

Nachweis bei Bestandsobjekten nach ÖN B 1996-3

Material	γ_M
Mauerwerk aus:	
Steinen der Kategorie I und Mörtel nach Eignungsprüfung	2,00
Steinen der Kategorie I und Rezeptmörtel	2,20
Steinen der Kategorie II	2,50
Füllbeton bei Mantelbetonbauweise	1,88

Tabelle 11 Teilsicherheitsbeiwerte für das Material Tabelle 1 ÖN B 1996-3

In Anhang D der Norm wurden Anforderungen für die Prüfung von Bestandsobjekte gelegt. Wenn man den Kenntnisstand KL 3³⁵ erfüllen muss, ist eine Prüfserie pro angefangenen 1000m² Bruttogeschossfläche und mindestens zwei Prüfserien pro Bestandshaus vorgeschrieben. Für den Kenntnisstand KL2 nur 50% davon und für dem KL1 20%.

Eine Prüfserie bedeutet:

-3 Einzelprüfkörper

z.B. Abnahme von 3 Mauerfeilern³⁶

-3 Prüfstellen bei der Komponentenmessung

z.B. Entnahme von 3 Stellen x 10 Mörtelplättchen/Stelle bei der Anwendung von Stempeldruckverfahren bei der Mörteluntersuchung laut EN 998-2 mit der Festigkeit unter 5N/mm², (3x10=30 Einzelwerte für die Mittelwertbildung der Prüfserie)

Entnahme aus 3 Prüfstellen 5 Ziegeln/Stelle (eine Ausnahme zur EN 772-1) (3x5=15 Einzelwerte für die Mittelwertbildung von der Prüfserie)

-6 Prüfstellen bei der Komponentenmessung mittels Rückprallhammer oder Eindringverfahren von Ort

z.B. 6 Stellen x 10 Werte für die Mörtel/Stelle mit Eindringverfahren gemessen (6x10=60 Einzelwerte für die Mittelwertbildung von der Prüfserie)

6 Stellen x 10 Werte für die Ziegel/Stelle mit Rückprallhammer gemessen (6x10=60 Einzelwerte für die Mittelwertbildung von der Prüfserie)

Der **charakteristische Wert der Wandfestigkeit** f_k ist ein Mittelwert einer Prüfserie dividiert durch **1,2**. Nur wenn der so errechnete Wert noch immer größer ist als der kleinste Serienwert, wird man den kleineren als charakteristischen einsetzen müssen.³⁷

Man darf entweder an einer sicheren Seite liegende Materialparameter inkl. visuellen Befund oder gesicherte Prüfungsergebnisse verwenden. Wenn ein Gutachten vorliegt, indem die Mauersteinart und Mörteldruckfestigkeit definiert wurde, darf man für die Berechnung die charakteristische Anfangsscherfestigkeit nach Tabelle 3 (ÖN 1996-1-1) anwenden. Wenn keine Mörteldruckfestigkeit geprüft wurde, muss man als charakteristische Scherfestigkeit den Wert $f_{vk,0} = 0$ einsetzen. Das ist eine nicht zufriedenstellende Lösung für den EB Nachweis.

³⁵ nach ÖNORM B 1998-3

³⁶ Rilem-Prüfkörper Mindestabmessungen laut EN 1052-1

³⁷ nach ÖNORM B 1998-3 Anhang D 2.1

4 Versuche

4.1 Einführung

Um die üblich im Objekt vorhandenen geringen Mörtelfestigkeiten zu erhalten, wurden mehrere Reihen an Versuchen durchgeführt. Das Ziel war unterschiedliche Mörtel herzustellen, die eine Festigkeit von 0,5 bis 3 N/mm² aufweisen. Schlussendlich wurden die Bindemittel (Luftkalk, Kalkzement und Trass) verwendet, mit deren weite Bereiche der Festigkeit abgedeckt werden können. Eine genaue Rezeptur wird das Kapitel 4.2 enthalten.

Aus den erstellten Mörteln wurden Pfeiler (4 Pfeiler pro Mörtelart siehe Abb.37, 38 und 39) gemauert und aus dem restlichen Mörtel Prismen laut Kapitel 3.2.3 erstellt. Drei von vier Pfeilern wurden nach mindestens 28 Tagen Lagerung zuerst mit den zerstörungsfreien Methoden³⁸ unter 150 und 300kN Belastung untersucht. Danach wurden diejenige drei Pfeiler vollständig in der Prüfmaschine bis zum Bruch belastet (orange Felder Abb.28). Der übergebliebene Pfeiler aus jede Serie (gelbe Felder Abb.28) wurde zerlegt und der Komponentenprüfung im Labor³⁹ unterzogen. Die Prismen wurden ebenfalls nach mind. 28-tägigem Abwarten im Labor untersucht⁴⁰. Die nächsten Kapitel zeigen die schrittweise erbrachte Untersuchungsergebnisse.

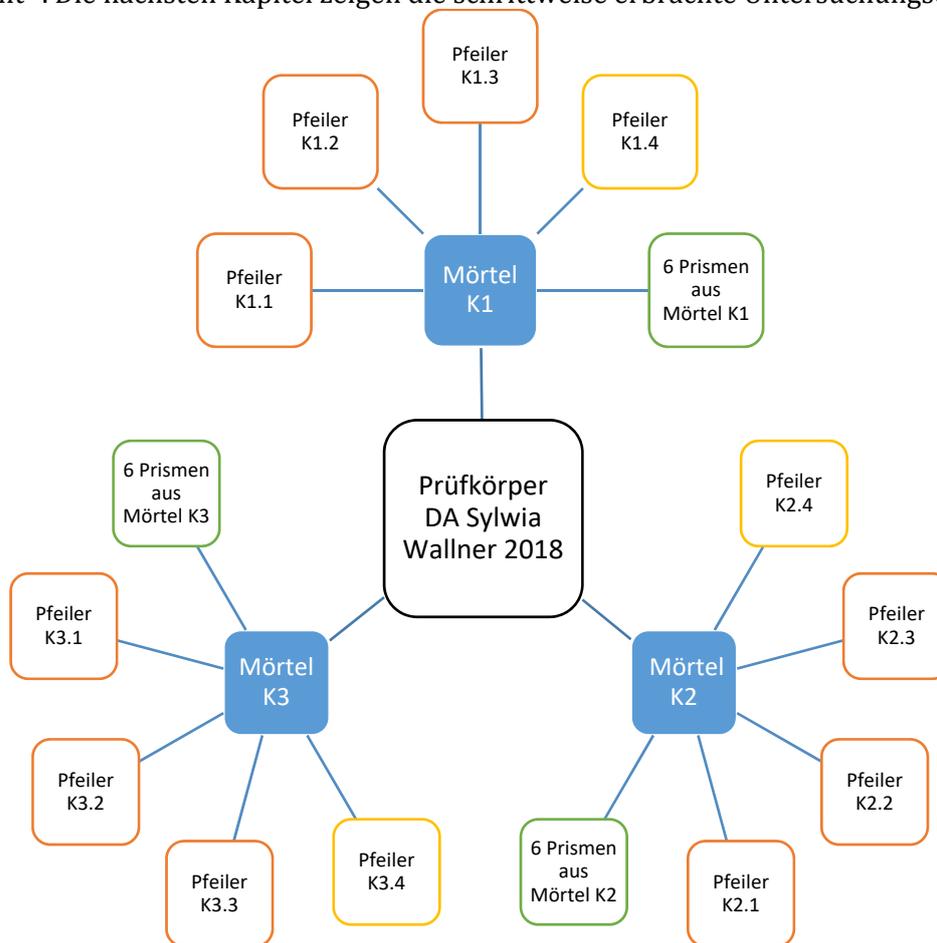


Abb. 28 Probevolumen

³⁸ Rückprallhammerprüfung für die Ermittlung der Ziegelfestigkeit (Kapitel 3.7) und Eindringverfahrenmethode für die Mörtelfestigkeit (Kapitel 3.3)

³⁹ Prüfverfahren für ausgestemmtten Mörtel und Ziegeln (Kapitel 3.6 und Kapitel 3.4 dieser DA)

⁴⁰ Prüfverfahren für Mörtel (Versuche an Prismen Kapitel 3.2.3.1 und 3.2.3.2)

4.2 Mauermörtel und die Festigkeiten, Mörtleinpassung Rezeptursuche.

Es wurden drei unterschiedliche Mauermörtel erstellt. Die Mörtelrezepturen (für die Mauermörtel K1, K2 und K3) sind in Tabelle 12 erfasst.

Tabelle 12 Mörtelrezept

Rezept 1:	Mörtel K1	Kalkmörtel 1:3	
	Luftkalk (kg) (Jurat Weißkalkhydrat, Baukalk)	33,00	1
	Sand $0/1$ & $0/4$ (kg)	99,00	3
	Wasser (l)	an Konsistenz angepasst	

Rezept 2:	Mörtel K2	Kalkzementmörtel 1:0,125:3	
	Luftkalk (kg) (Jurat Weißkalkhydrat, Baukalk)	33,00	1
	Zement $1/8$ Kalk (kg)	4,125	0,125
	Sand $0/1$ & $0/4$ (kg)	99,00	3
	Wasser (l)	an Konsistenz angepasst	

Rezept 2:	Mörtel K3	Trassitplus 1:6	
	Trassitplus (kg) BAUMIT Hydraulischer Kalk	2,00	1
	Sand $0/1$ & $0/4$ (kg)	12,00	6
	Wasser (l)	an Konsistenz angepasst	

4.2.1 Biegezugfestigkeit,- und Druckfestigkeitsprüfung an Prismen

Laborversuche an den erstellten Prismen (6 Prismen pro Mörtelart für die Biegezugprüfung und danach 12 Würfeln für die Druckfestigkeitsprüfung pro Mörtelart) wurden analog zu Kapitel 3.2.3.1 und 3.2.3.2 durchgeführt und dabei fotografiert. Die Prüfung wurde im Labor des Fachbereiches „Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit“ an der TU Wien durchgeführt. Die Proben waren zwischen 50 und 60 Tage alt. Die gemessene Bruchlast und die errechneten Festigkeitswerte nach Formel 1 und Formel 2 für die bestimmte Mörtelarten sind in Anhang 1 meiner Diplomarbeit abgebildet.

Die Mittelwerte der Druck- und Biegezugfestigkeit für die drei Mörtelarten (Kalk-, Kalk-Zement,-und Trassmörtel) widmet sich die untere Tabelle 13. Die Einzelwerte sind im Anhang 1 enthalten.



Abb. 29 Mörtelfestigkeitsprüfung an Prismen

Tabelle 13 Mörteldruckfestigkeit und Biegezugfestigkeit an Prismen (Prüfung nach 1015-11)

Probe	Mörtelart	Mittelwert Biegezugfestigkeit	Mittelwert Druckfestigkeit
K1	Kalkmörtel	0,5	0,9
K2	Kalkzementmörtel	0,5	1,1
K3	Trassmörtel	1	3,2

Die Abhängigkeit der Rohdichte von der Druckfestigkeit sind in den unteren Diagramme 2-4 abgebildet. Dabei sind die Werte der jeweiligen Prismenhälften angeführt.

Diagramm 2 Abhängigkeit der Druckfestigkeit und Rohdichte bei Prismen aus Mörtel K1

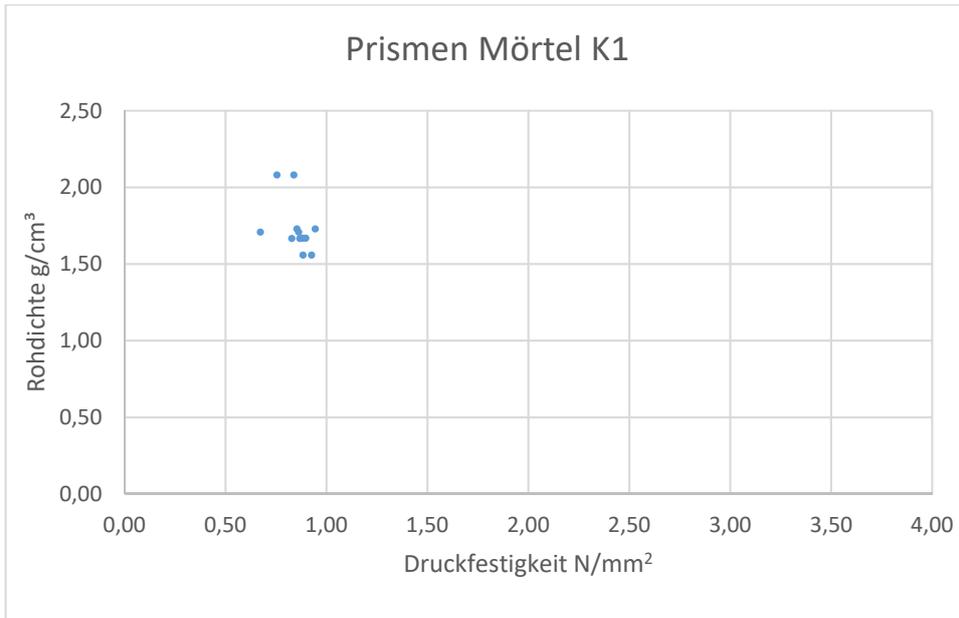


Diagramm 3 Abhängigkeit der Druckfestigkeit und Rohdichte bei Prismen aus Mörtel K2

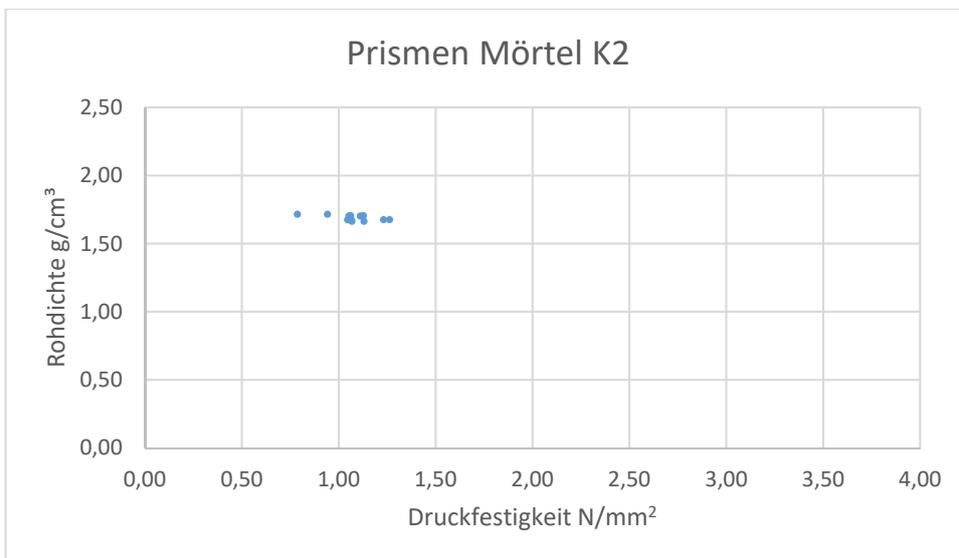
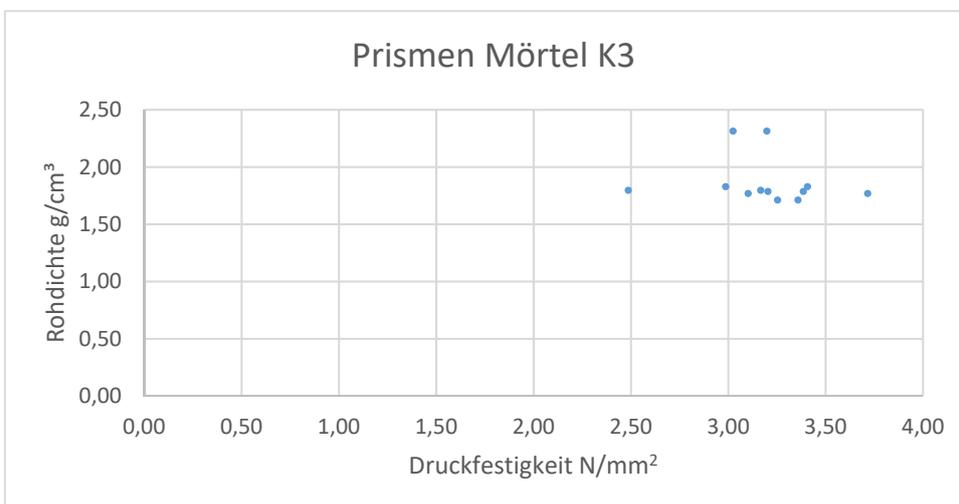


Diagramm 4 Abhängigkeit der Druckfestigkeit und Rohdichte bei Prismen aus Mörtel K3



4.2.2 Stempeldruckversuche

Für die Stempeldruckversuche sind die Proben, in Gegenteil zu der Untersuchung an den Prismen, aus einem bestehenden (früher gemauertem Pfeiler) entnommen. Nach der Vorbereitung, wie der Kapitel 3.4 beschreibt, sind die Proben in der selben Druckmaschine geprüft. Die Druckfestigkeit wurde aus der Formel 2 errechnet. Die Belastungsfläche war dieses Mal kreisförmig (mit der Durchmesser von 25mm). Die ca. 5 cm großen Stempel wurden stoßfrei bis zum Bruch belastet. Die unteren Abbildungen zeigen sich den Untersuchungsablauf und den Probenumfang. Das Alter des Mörtels betrug zwischen 78 und 147 Tagen .



Abb. 30 Prüfung der Druckfestigkeit an erstelltem Stempel

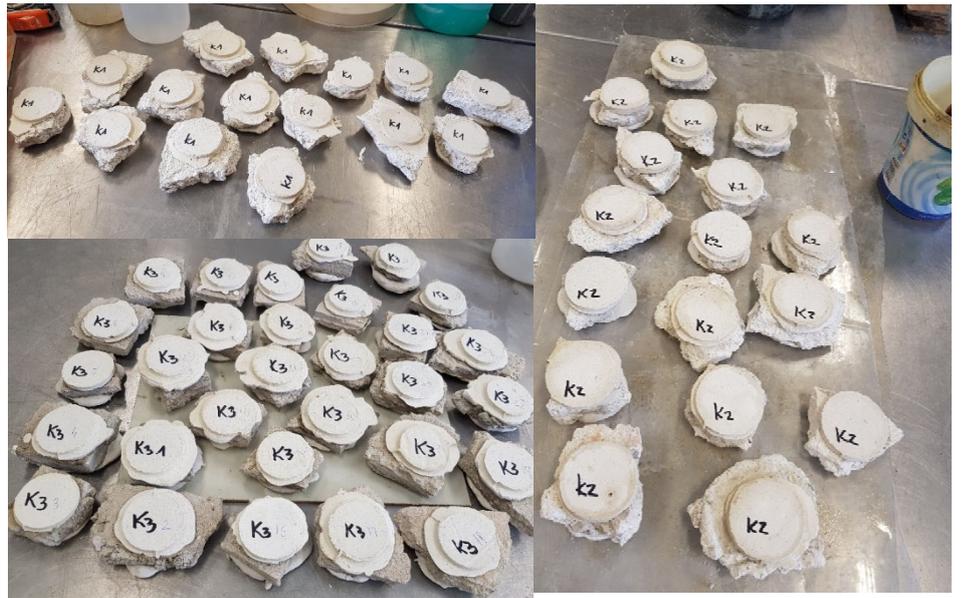


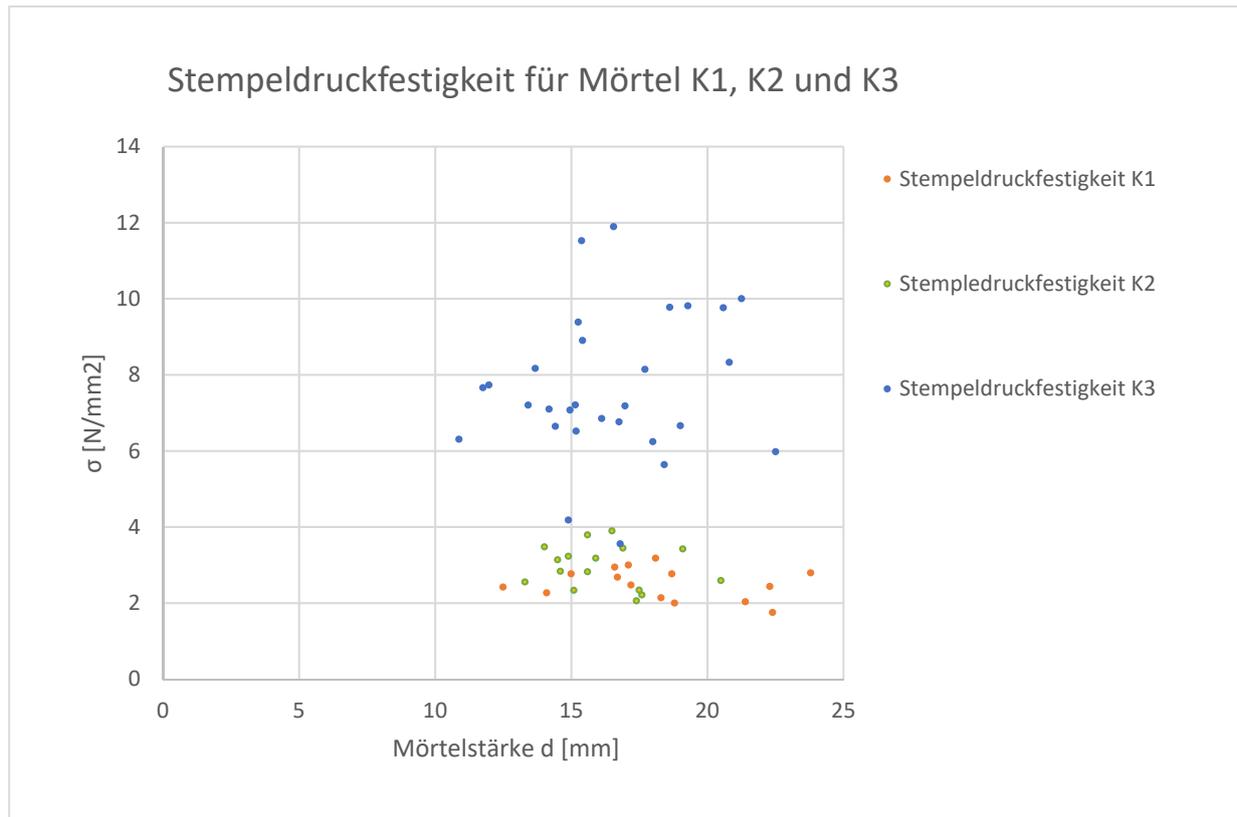
Abb. 31 Probenumfang für die Stempeldruckversuche



Abb. 32 Abgleichen der Mörtelplättchen mit dem Gipsmörtel

Die notierte Bruchlast und genaue Auswertung der Stempeldruckfestigkeit für jede Probe enthält der Anhang 2. Die Festigkeit wurde anhand der Formel 2 errechnet, d.h. eine Festigkeit ergibt sich aus der Bruchlast dividiert durch die kreisförmige Druckfläche $A=490\text{mm}^2$.

Diagramm 5 Zusammenhang der Stempeldruckfestigkeit und der Mörtelstärke für Mörtel K1, K2 und K3.



Es zeigt sich im untersuchten Dickenbereich eine weitgehende Unabhängigkeit der Stempelmörtelfestigkeit von der Mörteldicke (siehe Diagramm 5).

Aus den gemessenen Werten (Anhang 2) wurden folgende Mittelwerte in Tabelle 14 für die Stempeldruckfestigkeit ermittelt.

Tabelle 14 Mörteldruckfestigkeit nach Stempeldruckverfahren für Mörtel K1, K2 und K3

Probe	Mörtelart	Zerstörende Druckkraft [N] (Mittelwert)	Mittelwert der Stempeldruckfestigkeit N/mm ²
K1	Kalkmörtel	1232 N	2,51
K2	Kalkzementmörtel	1503 N	2,96
K3	Trassmörtel	3759 N	7,66

4.2.3 Eindringverfahren

Die Messung der Eindringung wurden als erstes an dem Mauerpfeiler durchgeführt. Das Alter der Mauerpfeiler war zwischen 50-65 Tagen ab der Herstellung gerechnet. Die Untersuchung wurde auf dem belasteten Pfeiler zuerst unter der Belastung von 150kN und danach unter einer Belastung von 300kN durchgeführt.

Das Mörtel wurde wie in Kapitel 3.3 anhand eines Schmiehdammers mit der modifizierten



Abb. 33 Schmiehdammer mit der modifizierten Schneide

Schneide an dem bestehenden Mauerpfeiler untersucht. Man sucht sich eine glatte Lagerfuge aus und dringt mit dem Schmiehdammer 10 Mal in die Fuge an der bestimmten Stelle ein. Die Differenz zwischen erster und zehnter Eindringung unter jeder Belastung wurde notiert, um die Festigkeit nachträglich auszurechnen.

Für jeden Pfeiler wurden mindestens 10 Werte gemessen unter der Belastung von 150kN und noch einmal 10 Werte mit der Belastung von 300kN. Die Ergebnisse der Eindringung sind in den Tabellen 15 bis 17 abgebildet.

Tabelle 15 Gemessene Eindringungen (d_{1-10}) der Schneide in Mörtel K1 den drei belasteten Pfeiler 1.1, 1.2 und 1.3 Prüfungsalter 65 Tage.

K 1	Gemessene Eindringung in Millimeter (d_{1-10})					
	150kN	300kN	150kN	300kN	150kN	300kN
Stelle:	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3
1	12	14	8	9	8	5
2	12	13	10	8	10	10
3	8	12	9	8,5	10	10
4	14	11	6	12	5	7
5	10	15	8	10	8	8
6	8	6	10	8	9	8
7	8	12	7,5	9	7,5	9
8	9	12	9	8,5	12	9
9	12	12	8	9	7	9,5
10	8	11	8	9	8	6

Tabelle 16 Gemessene Eindringungen der Schneide (d_{1-10}) in Mörtel K2 den drei belasteten Pfeiler 2.1, 2.2 und 2.3. Prüfungsalter 65 Tage

K 2	Gemessene Eindringung in Millimeter (d_{1-10})					
	150kN	300kN	150kN	300kN	150kN	300kN
Stelle:	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3
1	5	6	3	2	2,5	4
2	3	4	5	3	2	3
3	2	3	2,5	2	4	3
4	2	2	3	2,5	3	5
5	4	2	2,5	3	5,5	4,5
6	2,5	2	2,5	2	3	4
7	2,5	3,5	3	2	3	2
8	2	2	3	3	2	2
9	3,5	4	3	1,5	3	2,5
10	4	2	3	2	3	3

Tabelle 17 Gemessene Eindringungen der Schneide (d_{1-10}) in Mörtel K3 den drei belasteten Pfeiler 3.1,3.2 und 3.3. Prüfungsalter 50 Tage.

K 3	Gemessene Eindringung in Millimeter (d_{1-10})					
	150kN	300kN	150kN	300kN	150kN	300kN
Vorbelastung:	150kN	300kN	150kN	300kN	150kN	300kN
Stelle/Pfeiler:	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3
1	4	3	3	1	5	3
2	2	3	1,5	2,5	2,5	2
3	1	2	1,5	2	2	2,5
4	1	2,5	3	1	2	2
5	2,5	3	3	4	1,5	2
6	3	3,5	2	2	1,5	1,5
7	2,5	2	4,5	3	2	2,5
8	1,5	2	3	2,5	2	2
9	2	2,5	4,5	2	2	4
10	2	4	5,5	2	2	2,5

Anhand Formel 3 wurde für jede Eindringung d_{1-10} (Tabelle 15 bis 17) eine Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren β_E ausgerechnet und danach eine Mittelwerte gebildet (siehe Tabelle 18 bis 20).

Tabelle 18 Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren Mörtel K1

K1	Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren β_E in N/mm ²											
Lfd.-Nr./Stelle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mittelwert	Standard-Abweichung in %
1,1 _{150kN}	0,67	0,67	1,00	0,57	0,80	1,00	1,00	0,89	0,67	1,00	0,8	21
1,1 _{300kN}	0,57	0,62	0,67	0,73	0,53	1,3*)	0,67	0,67	0,67	0,73	0,6	10
1,2 _{150kN}	1,00	0,80	0,89	1,33	1,00	0,80	1,07	0,89	1,00	1,00	1,0	16
1,2 _{300kN}	0,89	1,00	0,94	0,67	0,80	1,00	0,89	0,94	0,89	0,89	0,9	11
1,3 _{150kN}	1,00	0,80	0,80	1,60	1,00	0,89	1,07	0,67	1,14	1,00	1,0	26
1,3 _{300kN}	1,6*)	0,80	0,80	1,14	1,00	1,00	0,89	0,89	0,84	1,33	1,0	18

Tabelle 19 Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren Mörtel K2

K 2	Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren β_E in N/mm ²											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mittelwert	Standard-Abweichung in %
2,1 _{150kN}	1,6*)	2,67	4,00	4,00	2,00	3,20	3,20	4,00	2,29	2,00	3,0	28
2,1 _{300kN}	1,33*)	2,00	2,67	4,00	4,00	4,00	2,29	4,00	2,00	4,00	3,2	29
2,2 _{150kN}	2,67	1,6*)	3,20	2,67	3,20	3,20	2,67	2,67	2,67	2,67	2,8	9
2,2 _{300kN}	4,00	2,67	4,00	3,20	2,67	4,00	4,00	2,67	5,33*)	4,00	3,5	19
2,3 _{150kN}	3,20	4,00	2,00	2,67	1,45*)	2,67	2,67	4,00	2,67	2,67	2,9	23
2,3 _{300kN}	2,00	2,67	2,67	1,60	1,78	2,00	4,00	4,00	3,20	2,67	2,7	32

Tabelle 20 Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren Mörtel K3

K 3	Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren β_E in N/mm ²											
Lfd.-Nr./Stelle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mittelwert	Standard-Abweichung in %
3,1 _{150kN}	2*)	4,00	8*)	8*)	3,20	2,67	3,20	5,33	4,00	4,00	3,8	23
3,1 _{300kN}	2,67	2,67	4,00	3,20	2,67	2,29	4,00	4,00	3,20	2,00	3,1	24
3,2 _{150kN}	2,67	5,33	5,33	2,67	2,67	4,00	1,78	2,67	1,78	1,45*)	3,2	43
3,2 _{300kN}	8*)	3,20	4,00	8*)	2,00	4,00	2,67	3,20	4,00	4,00	3,4	22
3,3 _{150kN}	1,6*)	3,20	4,00	4,00	5,33	5,33	4,00	4,00	4,00	4,00	4,2	16
3,3 _{300kN}	2,67	4,00	3,20	4,00	4,00	5,33	3,20	4,00	2,00	3,20	3,6	26

*) Stark abweichende Werte wurden von der Mittelwertermittlung ausgeschieden.

Die Mittelwerte der Mörteldruckfestigkeit weisen keine eindeutige Korrelation zu steigender Belastung auf. Manchmal sind die Werte höher unter der Belastung von 150kN und manchmal niedriger (Tabelle 18, 19 und 20). Der Belastungszuwachs konnte vernachlässigt werden.

Danach wurde ein Gesamtmittelwert für jede Mörtelart K1-K3 gebildet und auf die normierte Druckfestigkeit anhand Formel 6 auf die Normierte Mörteldruckfestigkeit f_m umgerechnet (Tabelle 21).

Tabelle 21 Mörteldruckfestigkeit nach Eindringverfahren für Mörtel K1, K2 und K3

Probe	Mörtelart	Mittelwert Mörteldruckfestigkeit β_E	Normierte Druckfestigkeit $f_m = \sqrt{\beta_E + 0,3} - 0,55$
K1	Kalkmörtel	0,88	0,54
K2	Kalkzementmörtel	3,03	1,27
K3	Trassmörtel	3,53	1,41

4.2.4 Vergleich der Mörteluntersuchungsverfahren

Anbei ist ein Vergleich zwischen der mittleren Prismendruckfestigkeit und den einzelnen Stempeldruckfestigkeiten (Diagramm 6 bis 8). Die Proben sind von der selben Rezeptur und wurden in einer Druckmaschine im Labor geprüft. Die Form der gedruckten Prüfkörper ist unterschiedlich, so wie die Herkunft der Proben. Dabei kann man erkennen, dass die beiden Prüfverfahren unterschiedliche Ergebnisse liefern und der Umrechnungsfaktor zwischen 1 und 3 liegt.

Diagramm 6 Einzelergebnisse der Stempeldruckfestigkeit bei Mörtel K1

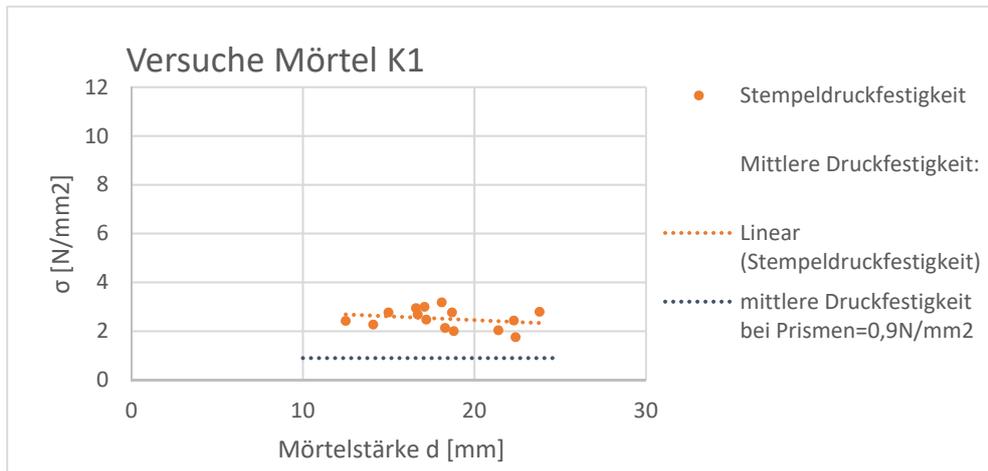


Diagramm 7 Einzelergebnisse der Stempeldruckfestigkeit bei Mörtel K2

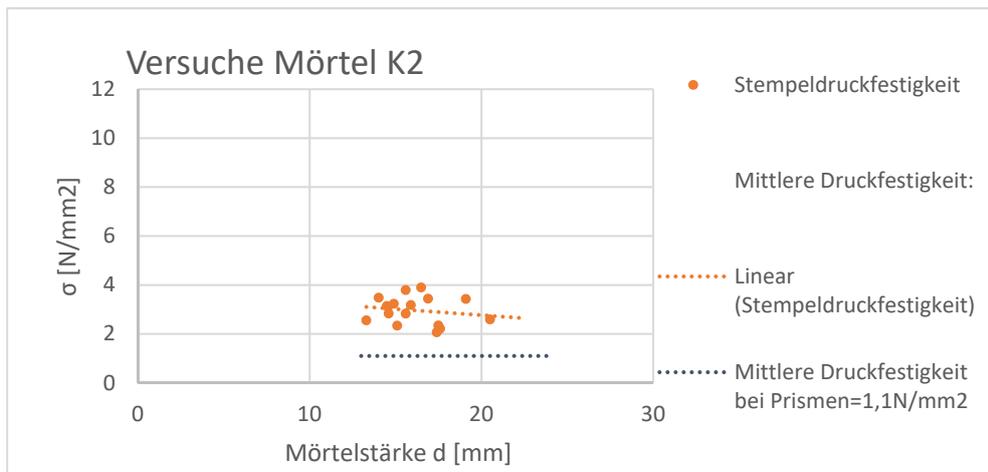
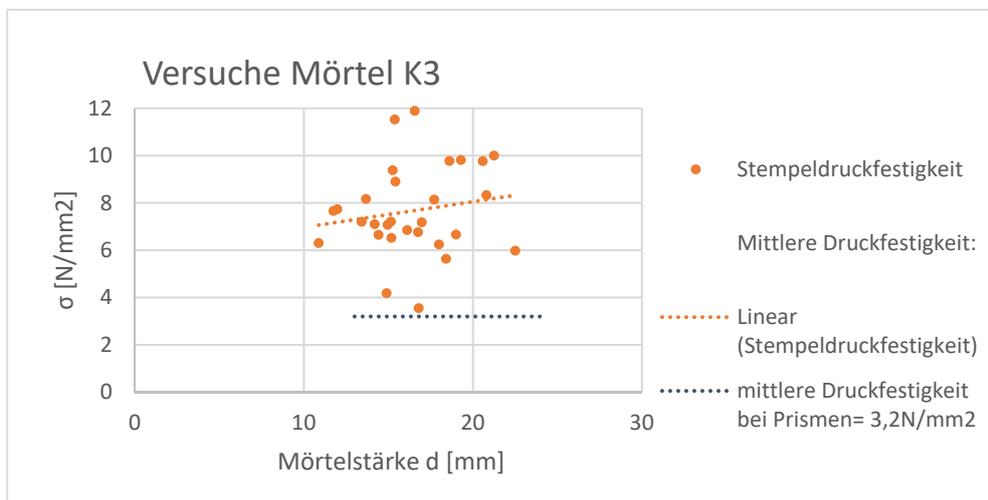


Diagramm 8 Einzelergebnisse der Stempeldruckfestigkeit bei Mörtel K3



Der Zusammenhang, der in Form von dem Parameter α = Stempeldruckfestigkeit/mittlere Prismendruckfestigkeit abgebildet ist, ist von der Mörtelstärke „d“ der Stempelplättchen wenig abhängig (siehe Diagramm 9 bis 11). Die α Werte sind in dem untersuchten Bereich (1 bis 2,5cm Mörtelfugenstärke) für die jeweiligen Mörtelmischungen relativ konstant. Folgende Mittelwerte für α wurden ermittelt:

$\alpha_{K1}=2,79$, $\alpha_{K2}=2,68$, $\alpha_{K3}=2,39$.

Diagramm 9 Einfluss der Mörtelstärke der Stempelplättchen K1 auf dem Parameter α

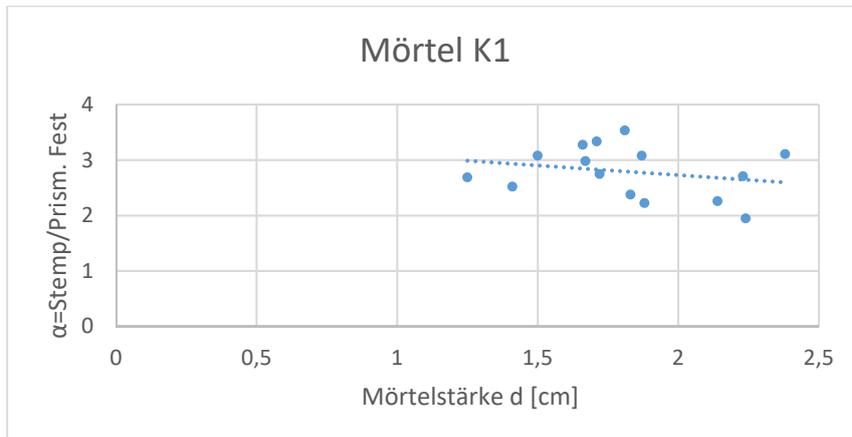


Diagramm 10 Einfluss der Mörtelstärke der Stempelplättchen K2 auf dem Parameter α

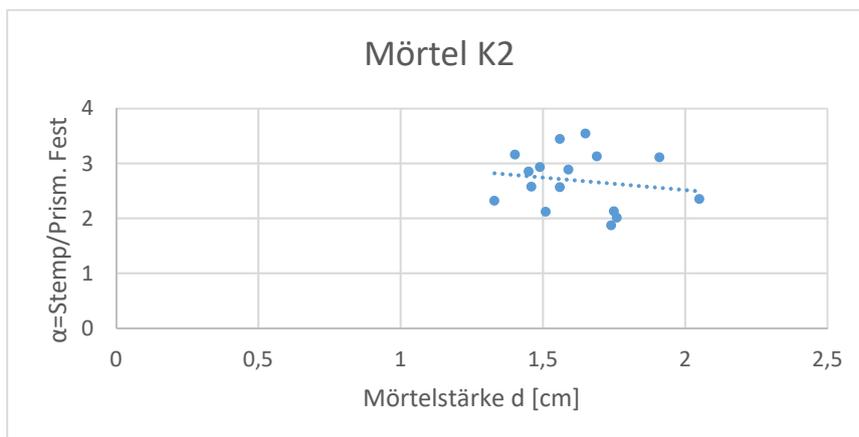
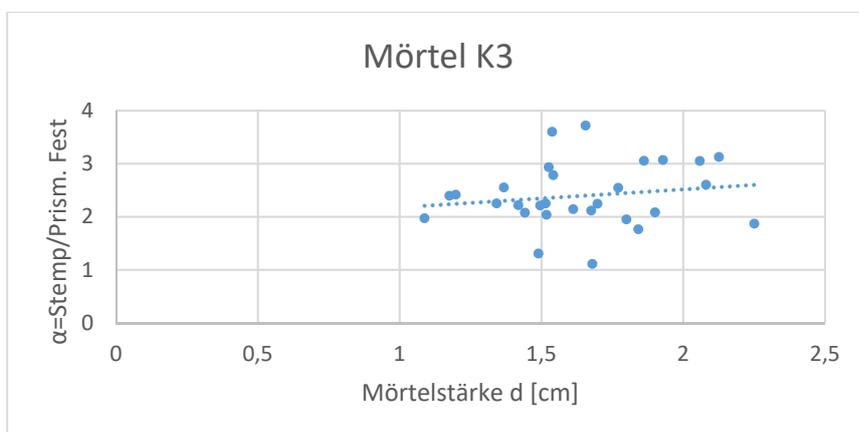


Diagramm 11 Einfluss der Mörtelstärke der Stempelplättchen K3 auf dem Parameter α



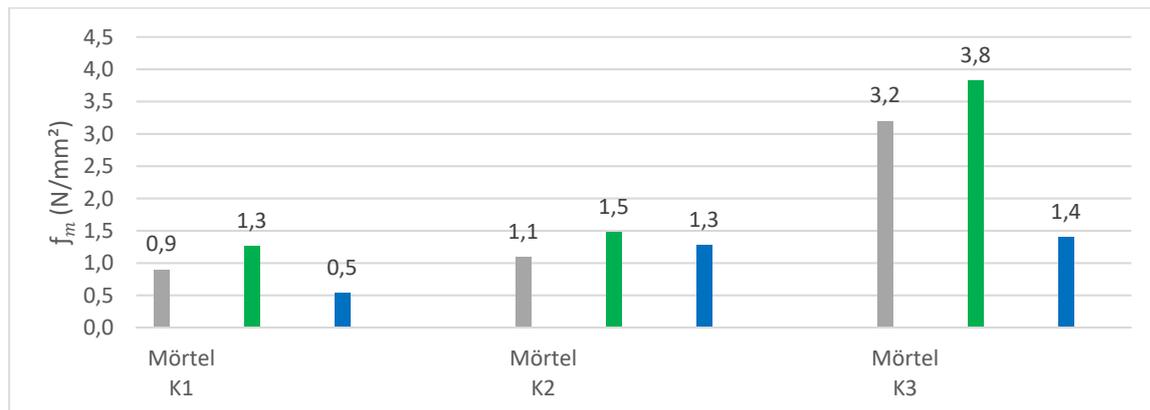
Eine Zusammenstellung der mittleren Mörtelfestigkeitswerte der drei unterschiedlichen Mörtelarten, die anhand von drei Prüfverfahren gemessen wurden, zeigen Tabelle 22 und Diagramm 12.

Tabelle 22 Gegenüberstellung der Mörtelfestigkeiten gemessen anhand der Prüfverfahren von den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.3 und dem Umrechnungsprinzip auf die normierte Mörteldruckfestigkeit f_m .

Untersuchungsverfahren	Mittelwert der gemessenen Druckfestigkeit (N/mm ²)	Umrechnung ⇒	normierte Mörteldruckfestigkeit f_m (N/mm ²)
Prismen Druckversuche K1	0,9	-	0,9
Prismen Druckversuche K2	1,1	-	1,1
Prismen Druckversuche K3	3,2	-	3,2
Stempeldruckversuche K1	2,51	Dividiert durch Faktor 2*	1,3
Stempeldruckversuche K2	2,96	Dividiert durch Faktor 2*	1,5
Stempeldruckversuche K3	7,66	Dividiert durch Faktor 2*	3,8
Eindringverfahren K1	0,88	$f_m = \sqrt{\beta_E + 0,3} - 0,55$	0,5
Eindringverfahren K2	3,03	$f_m = \sqrt{\beta_E + 0,3} - 0,55$	1,3
Eindringverfahren K3	3,53	$f_m = \sqrt{\beta_E + 0,3} - 0,55$	1,4

*vereinfacht wie im Kapitel 3.4 der DA

Diagramm 12 Normierte Mörteldruckfestigkeit ermittelt anhand der Prüfverfahren von den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.3.



Nach der Umrechnung der Festigkeit auf die Normfestigkeit f_m erkennt man eine Korrelation der Mörtelfestigkeit zwischen Prismen (grau Diagramm 12) und den Stempeldruckversuchen (grün Diagramm 12). Dabei konnte man sagen, dass man für festere Mörteln einen Umrechnungsparameter von 2,4 und für weniger feste Mörteln einen von 2,8 verwenden sollte, damit man genau der Prismenfestigkeit f_m entspricht. Eine Ausnahme weist die Umrechnung (anhand Formel 6) der Eindringverfahrensergebnisse auf die normierte Festigkeit auf, die für K1 und K3 stark abweichende Werte liefern (blau Diagramm 12).

4.3 Ziegelfestigkeiten

4.3.1 Druckversuche im Labor

Für die Komponentenprüfung im Labor wurden die Ziegel verwendet, die in Pfeiler eingebaut waren. Den letzten, nicht in der Druckmaschine gedruckten Pfeiler jeder Mörtelart, wurden händisch abgeklopft, um die Ziegel im Ganzen zu entnehmen. Die Ziegel wurden von Mörtelresten befreit und wie im Kapitel 3.6 beschrieben vorbereitet.



Abb. 34 Abgleichen der Ziegeln mit dem Zementmörtel 16.5.2018

Nach 40 Tagen Lagerung waren die Ziegel prüfungsreif. Die Untersuchung haben wir im Labor an der TU in eine Spezialmaschine gemacht. Die Probe habe ich zentrisch in die Maschine gelegt und unter der Druckbeanspruchung bis zur Zerstörung belastet.



Abb. 35 Druckfestigkeitsmessung an den Ziegeln 25.6.2018

Die maximale Drucklast wurde durch die Maschine aufgezeichnet. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 6kN/s. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23 Ziegeldruckversuche im Labor 25.06.2018

Probe	l (mm)	b (mm)	h (mm)	g Gewicht	Bruchlast Max. Druckkraft (kN)
1	288	137	70	4141,5	875,0
2	288	137	70	3972,5	835,3
3	288	135	65	4086	1435,2
4	288	140	70	4344,5	948,9
5	290	140	70	4343	941,3
6	290	135	75	4534	1182,8
7	293	140	75	4452,5	823,9
8	294	135	70	4231	1004,8
9	292	145	68	4285,5	748,5
10	295	140	75	4315,5	432,2
Mittelwert	290,6	138,4	70,8	4270,6	922,8

Eine Umrechnung auf die normierte Druckfestigkeit f_b für Mauersteine zeigt die Tabelle 24 und das Diagramm 13.

Tabelle 24 Umrechnung auf die normierte Mauersteindruckfestigkeit f_b .

Druckkraft F (N)	Konditionierung. Parameter γ	Formfaktor d	Druckfestigkeit F/A (N/mm ²)	Festigkeit im trockenen Zustand (N/mm ²)	$f_b = F_{Ltr} \cdot d$ normierte Druckfestigkeit (N/mm ²)
875030,0	1	0,80	22,2	22,2	17,7
835340,0	1	0,80	21,2	21,2	16,9
1435150,0	1	0,78	36,9	36,9	28,8*)
948920,0	1	0,79	23,5	23,5	18,6
941320,0	1	0,79	23,2	23,2	18,3
1182820,0	1	0,82	30,2	30,2	24,9
823850,0	1	0,81	20,1	20,1	16,3
1004760,0	1	0,80	25,3	25,3	20,3
748540,0	1	0,77	17,7	17,7	13,7
432200,0	1	0,81	10,5	10,5	8,5*)
922793,0			23,1	23,1	18,3

*) ausgeschiedene Werte durch starke Abweichung.

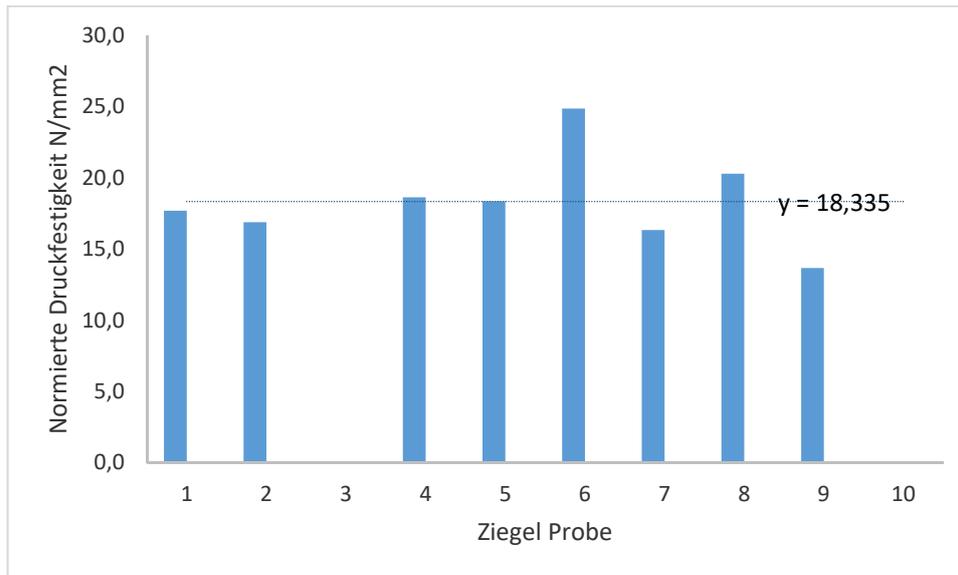
Diagramm 13 Verlauf der normierte Druckfestigkeit f_b an Einzelproben.

Tabelle 25 Mittelwert der normierten Druckfestigkeit der Mauerziegel (Prüfung nach EN772-1)

Probenanzahl: 10	Ziegeldruckfestigkeit N/mm ²	Equivalente Druckfestigkeit N/mm ²	Normierte Druckfestig- keit f_b N/mm ²
Mittelwert	23,1	23,1	18,3

4.3.2 Rückprallhammer

Die Rückprallhammerprüfung wurden an drei Pfeilern parallel zur Pfeilerprüfung (Kapitel 4.4.1) und Eindringprüfung für Mauermörtel (Kapitel 4.2.3.) und zwar unter der Belastung 150 und 300kN durchgeführt. Jeder Pfeiler wurde zuerst bis 150kN belastet und die Untersuchung an 20 unterschiedlichen Stellen⁴¹ vorgenommen. Danach wurde die Last bis 300kN erhöht und erneuert die Prüfung an 20 Stellen gemacht.



Als erstes wurden die Pfeiler mit dem Mörtel K1 mit dem Alter von 65 Tagen geprüft. Pfeiler mit dem Mörtel K2 und K3 wurden anschließend mit dem Alter von 65 und 50 Tagen geprüft. Die einzelnen Rückprallwerte für alle drei Pfeiler enthält der Anhang 3. Die mittleren Rückprallhärten für die Mauersteine f_{Ru} sind in Tabelle 26 erfasst. Dabei entspricht die Last von 150kN $\Rightarrow 1,1\text{N/mm}^2$, und die Last von 300kN $\Rightarrow 2,35\text{ N/mm}^2$ Druckspannung.

Abb. 36 Rückprallhärteprüfung an Pfeiler 3.1 unter der Belastung von 300kN.

Tabelle 26 mittlere Rückprallhärte der Ziegel, gemessen an Pfeilern mit bestimmten Mörtel K.

Probenanzahl: 3x3	Belastung 150kN	Belastung 300kN	Mittelwert f_{Ru} (N/mm ²)
K1	31,3	32,6	31,9
K2	30,0	31,6	30,8
K3	34,3	34,6	34,5

Die Rückprallwerte der Ziegel bei den Pfeilern K1 und K2 weisen einen Wertzuwachs nach der Erhöhung der Drucklast auf dem Mauerpfeiler von 150 auf 300kN auf (bis 10%, Tabelle 27 und 28). Bei dem Pfeiler K3 ist einen Wertzuwachs, aber auch eine Abminderung der Rückprallwert nach der Lasterhöhung zu sehen (Tabelle 29).

Tabelle 27 Mittelwerte der Rückprallwerte von den Pfeilern 1.1, 1.2 und 1.3 mit dem Mörtel K1 unter der Belastung von 150 und 300kN

3 Pfeilern mit Mörtel K1	Mittelwert der Rückprallwerte	Festigkeitserhöhung nach der Lasterhöhung in %
1,1 _{150kN}	31	
1,1 _{300kN}	32	2,7%
1,2 _{150kN}	31	
1,2 _{300kN}	31	0,3%
1,3 _{150kN}	32	
1,3 _{300kN}	35	10,7%

⁴¹ sichtbare Oberfläche der Ziegel

Tabelle 28 Mittelwerte der Rückprallwerte von den Pfeilern 2.1, 2.2 und 2.3 mit dem Mörtel K2 unter der Belastung von 150 und 300kN

3 Pfeilern mit Mörtel K2	Mittelwert der Rückprallwerte	Festigkeitserhöhung nach der Lasterhöhung in %
2,1 _{150kN}	29	
2,1 _{300kN}	31	5,1%
2,2 _{150kN}	31	
2,2 _{300kN}	33	5,8%
2,3 _{150kN}	30	
2,3 _{300kN}	31	4,5%

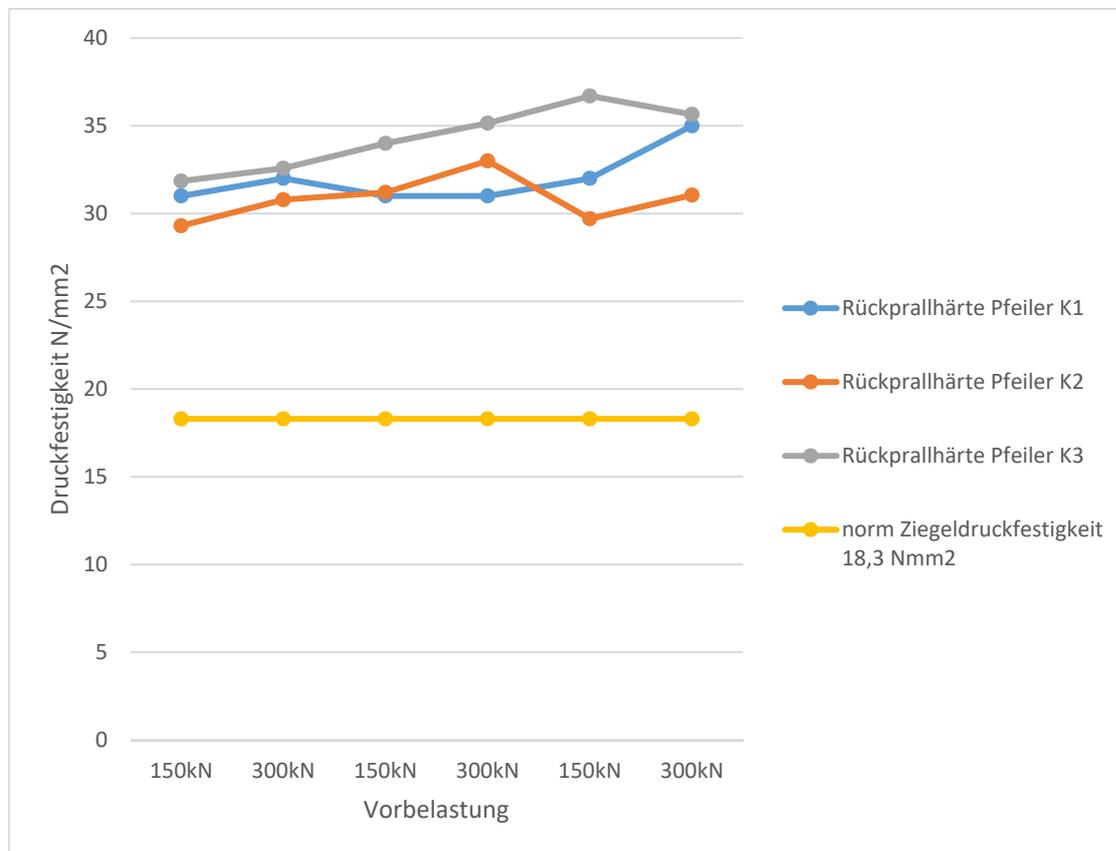
Tabelle 29 Mittelwerte der Rückprallwerte von den Pfeilern 3.1, 3.2 und 3.3 mit dem Mörtel K3 unter der Belastung von 150 und 300kN

3 Pfeilern mit Mörtel K3	Mittelwert der Rückprallwerte	Festigkeitserhöhung nach der Lasterhöhung in %
3,1 _{150kN}	32	
3,1 _{300kN}	33	2,3%
3,2 _{150kN}	34	
3,2 _{300kN}	35	3,4%
3,3 _{150kN}	37	
3,3 _{300kN}	36	-2,9%

4.3.3 Vergleich

Anhand der in den Kapiteln 4.3.1 und 4.3.2 ermittelten Werten für die Ziegelfestigkeit kann man feststellen, dass sie unterschiedliche Ergebnisse liefern und daher Umrechnungsparametern notwendig sind (siehe Diagramm 14).

Diagramm 14 Druckfestigkeiten der Ziegel, siehe Kapitel 4.3.1 und 4.3.2.



Die Parameter werden weiters für jede Pfeilerreihe wie folgt ermittelt: $\alpha = f_{Rü} / f_b$

$$\alpha_{K1} = 31,9 \text{ N/mm}^2 / 18,3 \text{ N/mm}^2 = 1,74$$

$$\alpha_{K2} = 30,8 \text{ N/mm}^2 / 18,3 \text{ N/mm}^2 = 1,68$$

$$\alpha_{K3} = 34,5 \text{ N/mm}^2 / 18,3 \text{ N/mm}^2 = 1,88$$

Würde man die Ziegeldruckfestigkeiten von Rückprallwerte in der Bachelorarbeit von Lisa Baumgartner⁴² ansehen, lässt sich ein Faktor von 1,78 ableiten.

⁴² Bachelorarbeit von Lisa Baumgartner unter dem Titel „Vergleich zerstörender und zerstörungsfreier Untersuchungen zur Druckfestigkeit von Mauerwerk“ [13]

4.4 Mauerwerkfestigkeiten

4.4.1 Druckversuche an Pfeiler

Wie im Kapitel 3.9.2 beschrieben, ist für eine Untersuchung an Bestandobjekten eine Pfeilerabnahme und eine Durchführung von Druckversuchen zulässig. Optimale Ergebnisse der Untersuchung liefert eine Serie, die aus drei Pfeilern⁴³ besteht. Dadurch wurden für jeden Mörtelart (K1-K3 wie im Kapitel 4.2 beschrieben) vier Pfeiler erstellt (drei für die Pfeiler-Druckversuche und einen für die Komponentenprüfung, siehe Abb.37, 38 und 39).



Abb. 37 Mauerpfeiler K 1.1, 1.2, 1.3 und 1.4, hergestellt am 27.11.2017



Abb. 38 Mauerpfeiler K 2.1, 2.2, 2.3 und 2.4, hergestellt am 19.12.2017



Abb. 39 Mauerpfeiler K 3.1, 3.2, 3.3 und 3.4, hergestellt am 13.3.2018

⁴³ Mindestabmessung einer Mauerwerkprobe (mind. 5 Scharen hoch und 4 Lagerfugen) EN 1052-1

Die erstellten Prüfkörper wurden als Ganzes in der Drückmaschine schrittweise belastet und die Erscheinungen der Zerstörung bzw. Bruchlasten notiert.



Abb. 40 Druckfestigkeitsprüfung an Pfeiler K1.1 (31.1.2018)

Die Pfeiler K1 waren stabil und augenscheinlich unbeschädigt bis zur Last von 300kN. Ab 300kN zeigten sich an den Pfeilern der Reihe K1 erste Rissen an den Ziegeln an. Der Pfeiler begann sich sichtbar zu dehnen, der weniger feste Mörtel wurde relativ lang (in Vergleich zu K2 und K3) aus der Fuge ausgedrückt bis die Kräfte durch die Ziegel übernommen wurden, was zu einer vollständigen Zerstörung der Pfeiler führte.

Die Pfeilern mit dem Mörtel K2 zeigen ebenfalls bei 300kN Belastung erste kleine Risse. Nach der Überschreitung von 500kN Drucklast bildeten sich schnell und regelmäßig Risse an den Ziegeln, bis die Bruchlast erreicht wurde (ca. 600-700kN).

Die Pfeiler K3 mit dem Trassmörtel sind deutlich fester. Es zeigt sich, bis zu 800-900kN Last, überhaupt keine Beschädigung an. Die Pfeilern halten bis zu 1070kN Drucklast (100 Tonnen!). Das Rissbild entwickelt sich schnell und unerwartet, und erst ab 900kN Belastung.



Abb. 41 regelmäßige Harr-Rissbildung an Pfeiler 2.2 (Belastung ca. 500kN)



Abb. 42 Erreichen der max. Bruchlast an Pfeiler K1.1 links, K2.1 Mitte, K3.2 rechts.

Die Bruchbilder zeigt die Abb. 42. Es ist zu erkennen, dass die Versagenserscheinung für die Pfeiler K1 und K2 deutlicher ist im Vergleich zu K3. Dazu konnte man noch sagen, dass der Pfeiler mit dem festeren Mörtel (K3) wenig Anzeichen der Bruchlasterreicherung gegeben hat. In Gegensatz dazu beginnt der Pfeiler mit dem Kalkmörtel deutlich vor dem Erreichen der Bruchlast abplatzen und Risse zeigen. Man kann sagen, dass die Risse an Mauersteinen ein Versagenszeichen geben und dadurch die wichtigsten Mauerwerkfestigkeitsparameter darstellen. Es wurde auch in der Formel 18 berücksichtigt, z.B. $f_b^{0,65}$ (Tabelle 10).

Diagramm 15 Druckkraftverlauf an drei Pfeiler mit dem Mörtel K1 bis max. Bruchlast. Prüflager 65 Tage

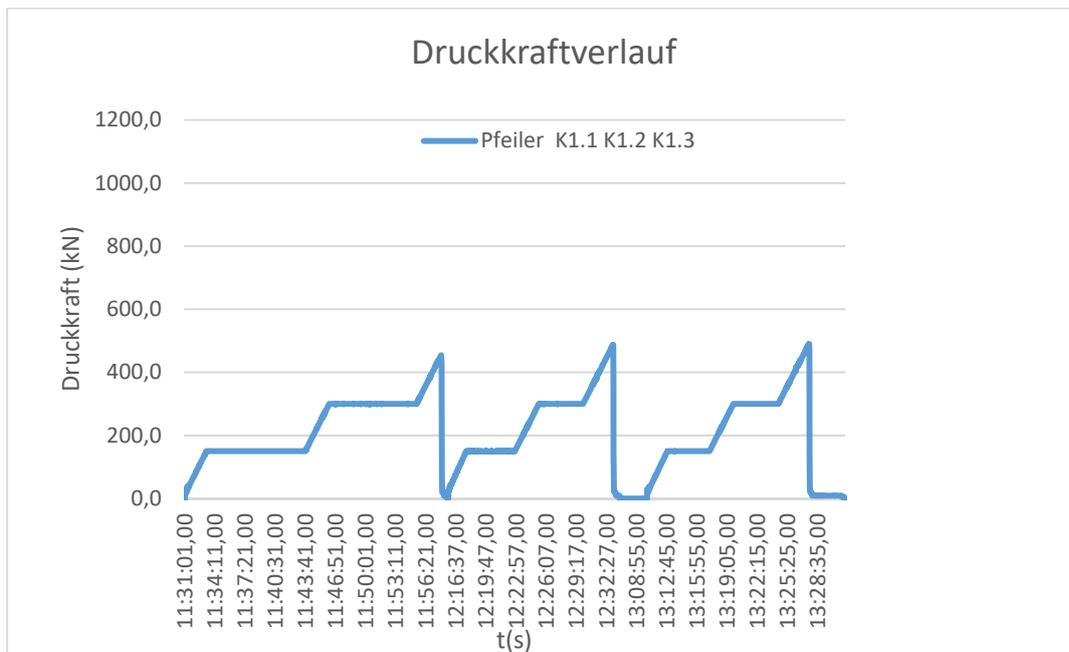
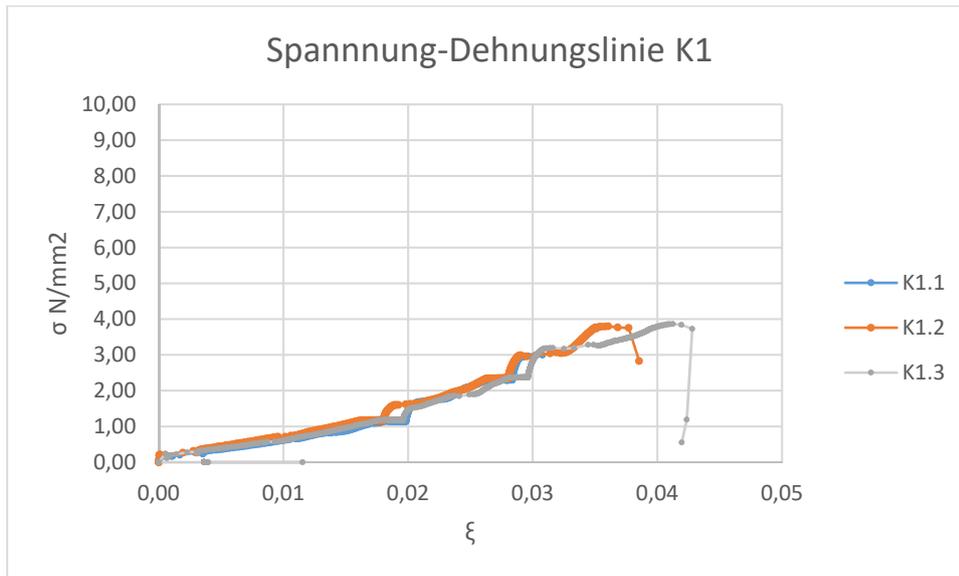


Diagramm 16 Spannung-Dehnungs-Linie Pfeilern mit Mörtel K1, Prüfalter 65 Tage



Prüfung am	31.1.2018	Pfeilerabmessungen			Mauerwerkfestigkeit
Serie K 1		B	L	H	N/mm2
Pfeiler	Gemessene Bruchlast (kN)	mm	Mm	mm	
K1.1	454	290	450	46,5	3,48
K1.2	487	285	450	45	3,80
K1.3	490	285	445	46,6	3,86
Mittelwert	477				3,71

Tabelle 30 Abmessung und Ermittlung der Mauerwerkfestigkeit für die Pfeiler der Serie K1, Prüfalter 65 Tage.

Diagramm 17 Druckkraftverlauf an drei Pfeilern mit dem Mörtel K2 bis max. Bruchlast. Prüfalter 65 Tage

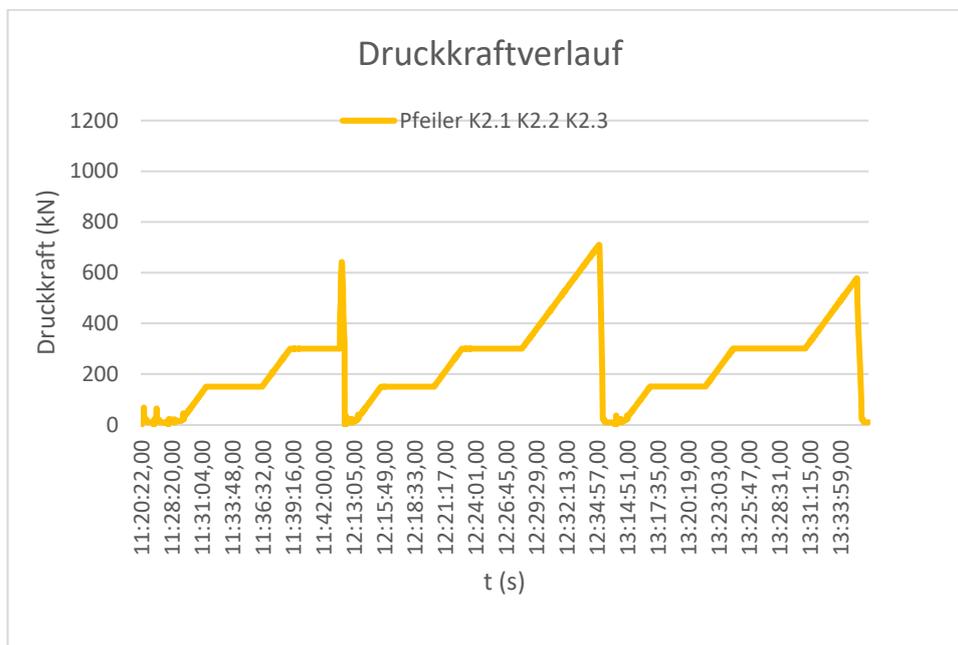
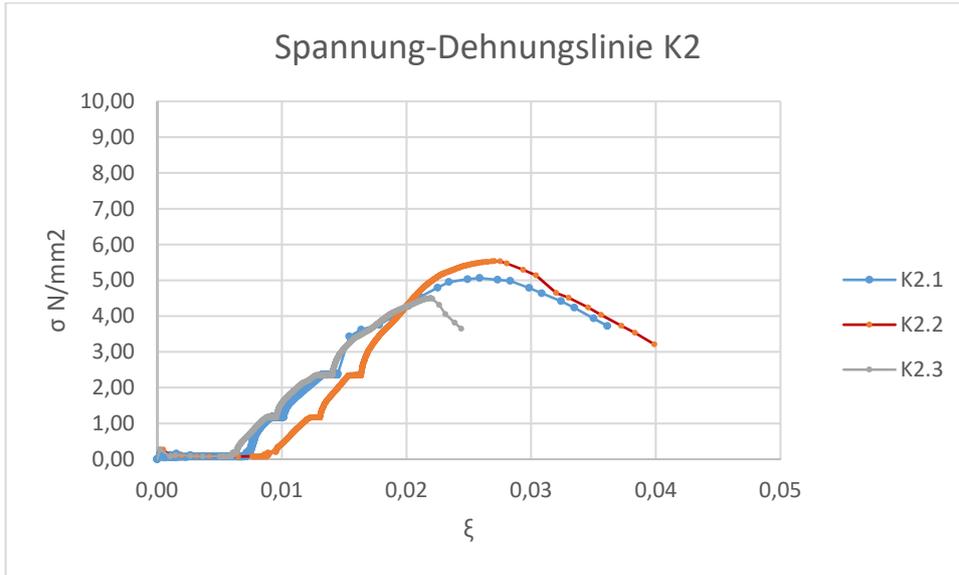


Diagramm 18 Spannung-Dehnungs-Linie Pfeiler mit Mörtel K2. Prüfalter 65 Tage.



Prüfung am	22.2.2018	Pfeilerabmessungen (mm)			Mauerwerkfestigkeit
		B	L	H	
Serie K 2					N/mm2
Pfeiler	Gemessene Bruchlast (kN)	mm	mm	mm	
K2.1	642	285	445	455	5,06
K2.2	710	285	450	440	5,54
K2.3	578	285	450	445	4,51
Mittelwert	643,33				5,03

Tabelle 31 Abmessung und Ermittlung der Mauerwerkfestigkeit für die Pfeiler der Serie K2 Prüfalter 65 Tage.

Diagramm 19 Druckkraftverlauf an drei Pfeilern mit dem Mörtel K3 bis max. Bruchlast. Prüfalter 50 Tage.

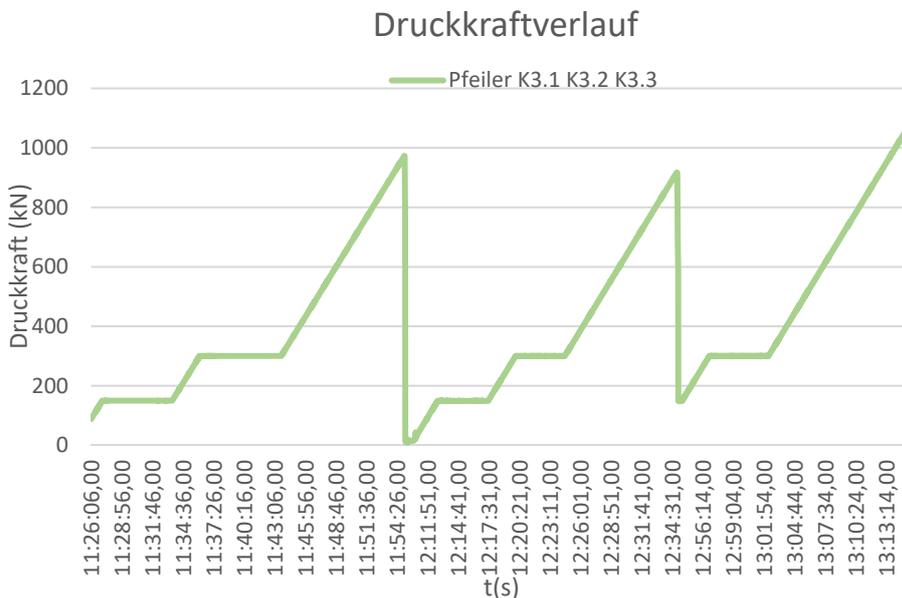
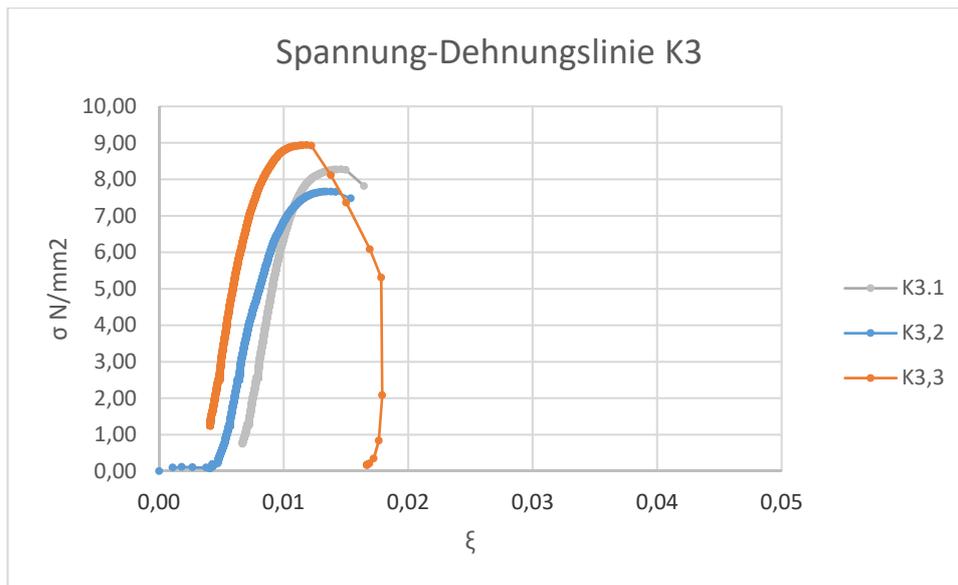


Diagramm 20 Spannung-Dehnungs-Linie Pfeiler mit Mörtel K3 Prüfalter 50 Tage



Prüfung am	2.5.2018	Pfeilerabmessungen (mm)			Mauerwerkfestigkeit
Serie K 3		B	L	H	N/mm2
Pfeiler	Gemessene Bruchlast (kN)	mm	mm	mm	
K3.1	973	280	420	420	8,27
K3.2	917	285	420	420	7,66
K3.3	1070	290	420	420	8,78
Mittelwert	986,67				8,24

Tabelle 32 Abmessung und Ermittlung der Mauerwerkfestigkeit für die Pfeiler der Serie K 3. Prüfalter 50 Tage

Anhand von Druckversuche an ganzen Pfeilern wurden folgende charakteristische Mauerwerkdruckfestigkeiten ermittelt (siehe Tabelle 33).

Serie:	Mittelwert Der Mauerwerkfestigkeit	γ laut Kapitel 3.9.3	Charakteristischer Wert der Mauerwerkdruckfestigkeit f_k (N/mm ²)
K1	3,71	1,2	3,09
K2	5,03	1,2	4,41
K3	8,24	1,2	6,86

Tabelle 33 charakteristische Mauerwerkdruckfestigkeiten Pfeilern Serie K1, K2 und K3.

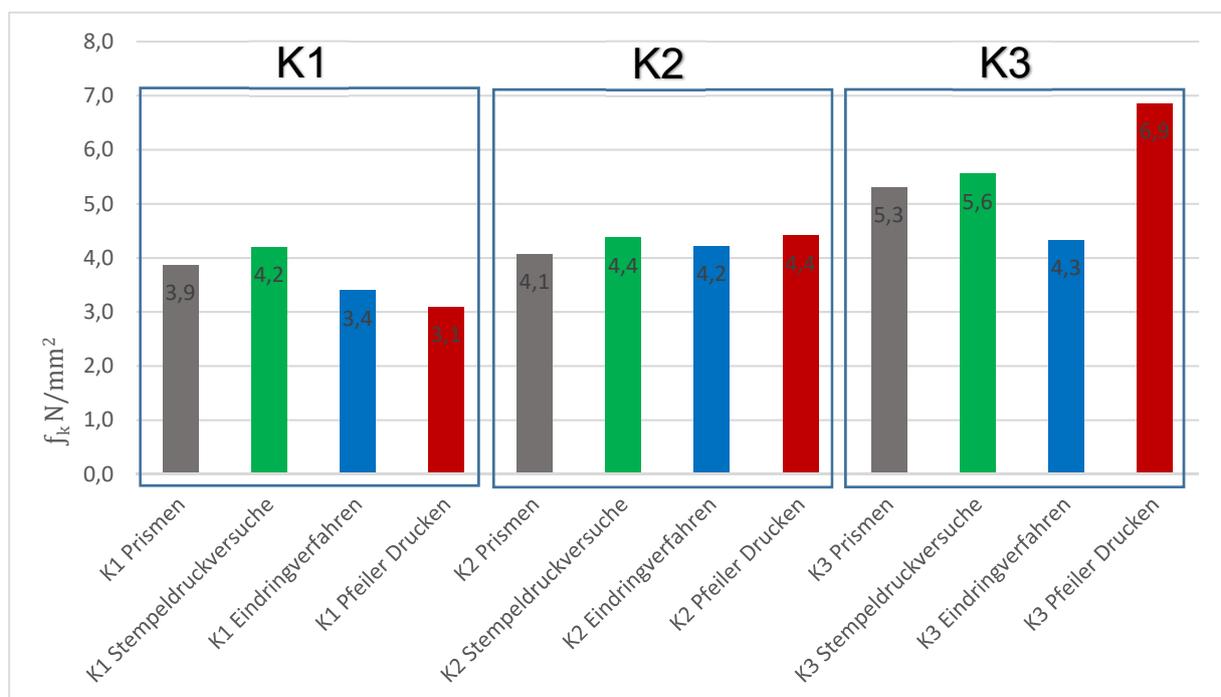
4.4.2 Vergleich der Mauerwerkdruckfestigkeiten

Dieses Kapitel enthält einen Vergleich aller früher beschriebenen Methoden für die Ermittlung der charakteristischen Mauerwerkdruckfestigkeit f_k . Anbei ist Auswertung der Festigkeiten f_k anhand der Komponentenprüfung⁴⁴ und Formel 18. Obwohl die Mörtelfestigkeitswerte f_m (Tabelle 34) sich stark untereinander unterscheiden, hat das einen geringen Einfluss auf die so errechnete Mauerwerkdruckfestigkeit f_k .

Tabelle 34 Ermittlung der charakteristischen Mauerwerkfestigkeit von Werten aus der Komponentenprüfung der Mörtelfestigkeiten f_m (Tabelle 22) und der normierten Steindruckfestigkeit $f_b=18,3 \text{ N/mm}^2$ (Tabelle 24) Für die Parametern K , α und β wurden entsprechend 0,6, 0,65 und 0,25 eingesetzt.(Tabelle 10)

	f_b (N/mm ²) normierte Ziegeldruckfestigkeit (Tabelle 24)	Mörtel Druckfestigkeit von Versuchen	f_m (N/mm ²) Normierte Mörtelfestigkeit (Tabelle 22)	$f_k = K * f_b^\alpha * f_m^\beta$ charakteristische Mauerwerksfestigkeit N/mm ²
Mörtel K1	18,3	Prismen Druckversuche	0,9	3,87
Mörtel K2	18,3	Prismen Druckversuche	1,1	4,07
Mörtel K3	18,3	Prismen Druckversuche	3,2	5,31
Mörtel K1	18,3	Stempeldruckversuche	1,3	4,20
Mörtel K2	18,3	Stempeldruckversuche	1,5	4,37
Mörtel K3	18,3	Stempeldruckversuche	3,8	5,55
Mörtel K1	18,3	Eindringverfahren	0,5	3,40
Mörtel K2	18,3	Eindringverfahren	1,3	4,22
Mörtel K3	18,3	Eindringverfahren	1,4	4,32

Diagramm 21 Vergleich der charakteristischen Mauerwerkdruckfestigkeiten f_k ermittelten anhand der Komponentenprüfung (grau, grün und blau, Werte aus Tabelle 34) und von Druckversuchen an ganzen Pfeilern (rot, Werte aus Tabelle 33)



⁴⁴ Prismen, Stempel und Eindringverfahren für Mörtelfestigkeitsermittlung (Kapitel 4.2.1-4.2.3), Druckversuche an den Ziegeln (Kapitel 4.3.1)

Die Festigkeiten f_k bei dem schwächeren Mörtel K1, die anhand der Komponentenprüfung ermittelt worden sind (Säule grau, grün und blau), liefern hohe Ergebnisse im Vergleich zu f_k der Mauerpfeilerprüfung (rote Säule Diagramm 21). Man darf aber nicht vergessen, dass die Mittelwerte (rote Säulen) durch 1,2 dividiert wurden. (Tabelle 33).

Bei den Pfeilern der Serie K2 und K3 ist die Mauerwerkdruckfestigkeit f_k , ermittelt anhand den Pfeilerdruckversuchen höher, als die Werte für f_k anhand der Komponentenprüfung, d.h. die Verfahren (Prismen, Stempel, Eindringverfahren) sind verwendungstauglich und liefern gesicherte Ergebnisse. Die Eindringverfahrensmethode (blau) liefert stark abweichende Ergebnisse, aber sie liefern Werte sozusagen weit auf der sicheren Seite im Vergleich zur Pfeilerprüfung (rot).

5 Schlussfolgerung

Für die Ermittlung der Mauerwerksdruckfestigkeit wurden zwölf Pfeilern (4 pro Mörtelart) errichtet. Die c.a. 28cm breite und 45cm lange Pfeiler wurden fünf Scharen hoch gemauert. Es wurden alte Ziegel, die aus einem Bestandsabbruch stammen, verwendet. An den Pfeilern wurden zerstörungsarme und zerstörungsfreie Prüfmethode angewendet, um die Komponentenfestigkeiten ermitteln zu können. Aus dem übergebliebenen Mauermörtel wurden Prismen für eine standardisierte Mörtelprüfung hergestellt. An den drei Pfeilern jeder Mörtelart (K1 bis K3) wurden Pfeilerdruckversuche gemacht. Ein Pfeiler von jedem Mörtel (K1-K3) wurde zerlegt, um die Komponenten (Mörtel und Ziegel) im Labor auf die Druckfestigkeit prüfen zu können. Aus der Untersuchungen lässt sich folgende Aussagen ableiten:

Für den Umrechnungsfaktor α für die Ziegeldruckfestigkeit, ermittelt aus der Druckversuche und Rückprallverfahren (Kapitel 4.3.3), ist einen Faktor α von 1,8 empfohlen. Lisa Baumgartner hat in ihrer DA einen Faktor von 1,78 ausgewiesen.

Die alte Ziegeln weisen sehr hohe Festigkeitsschwankungen auf, deswegen ist eine Entnahme von mind. 10 Prüfkörper sinnvoll für eine Mittelwertermittlung.

Die Mörtelfestigkeiten, die von Eindringverfahren geprüft wurden, weichen sehr stark von anderen Verfahren (Prismen- bzw. Stempeldruckverfahren) ab. Bei geringer Mörtelfestigkeit wirkt sich die Abweichung auf die Mauerwerkfestigkeit wenig aus.

Zusammenfassend lässt sich angeben, dass zerstörungsarme Prüfmethode durchaus geeignet sind, die Mauerwerksfestigkeiten abzuschätzen. Mit dem Mörtel-Eindringverfahren und Ziegel-Kugelschlagverfahren können realistische Mauerwerksfestigkeiten erhalten werden, wenn die geeignete Umrechnungsformel verwendet werden.

Literaturverzeichnis:

- [1] ÖNORM EN 998-2: Festlegungen für Mörtel in Mauerwerk, Teil 2: Mauermörtel, Ausgabe Dezember 2010
- [2] ÖNORM EN 1015: Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk, Teil 1, 2 und 11, Ausgabe 2007-03-01.
- [3] ÖNORM B 4008-1: Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Tragwerke, Teil 1: Hochbau, Ausgaben 2018-07
- [4] ÖNORM EN 771-1: Festlegungen für Mauersteine, Teil 1: Mauerziegel, Ausgabe 2011+A1 2015.
- [5] ÖNORM EN 772-1: Prüfverfahren für Mauersteine, Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit, Ausgabe 2015-12-15.
- [6] ÖNORM EN 1996, Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten, Teil 1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk 2016-03-01
- [7] ÖNORM B 1996-3: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten Teil 3 Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten, Ausgabe 2016-07-01
- [8] Deix K.: Der Mörtel macht's, Stempeldruckmethode, Festigkeitsuntersuchung von altem Ziegelmauerwerk Bautenschutz + Bausanierung, Heft 6/2008, Verlagsgesellschaft Rudolf Möller GmbH & Co. KG Köln 2008
- [9] Kolbitsch A.: Erhaltung und Erneuerung von Hochbauten, Skriptum TU Wien, Ausgabe 2016
- [10] <https://sibet.de/product/ruckprallhammer>
- [11] Kompiller B.: Versuche zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Mauermörtel Stempeldruckfestigkeit, Diplomarbeit TU Wien, Oktober 1993
- [12] Helmut U.: Versuche zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Mauermörtel nach unterschiedlichen Verfahren, Diplomarbeit 1990, Institut für Hochbau und Industriebau TU Wien
- [13] Baumgartner L.: Vergleich zerstörender und zerstörungsfreier Untersuchungen zur Druckfestigkeit von Mauerwerk, Bachelorarbeit 2017
- [14] Kadnar M. und Unger C.: Interdisziplinäre Seminararbeit „Untersuchung der Eigenschaften vom Kalkmörtel im Altbau, TU Wien
- [15] Pauser A.: Forschungsvorhaben H34/93, Empfehlungen zur Anwendung des Eindringverfahrens in der Praxis-TU Wien Institut für Hochbau und Industriebau
- [16] Forschungsvorhaben H34/93 Bestimmung der Festigkeit von Mauermörtel mittels Schlagversuchen/Grundlagenversuche zur Entwicklung eines In Situ Prüfverfahrens TU Wien Institut für Hochbau und Industriebau 1995
- [17] Deix K und Korjenic S.: Bestimmung der Tragfähigkeit von altem Ziegelmauerwerk und Untersuchung von neuen Iniektionsmaterialien gegen aufsteigende Feuchtigkeit, Österreichische Ingenieur- und Architekten- Zeitschrift 157 Jg Heft 7-12/2012
- [18] Korjenic S. und Deix K.: Bestimmung der Mörteldruckfestigkeit im Bestand mittels Eindringverfahren.
- [19] Rohatsch A.: Angewandte Gesteinskunde November 2013 Kapitel 4, Skriptum TU Wien.

Anhänge für die Diplomarbeit

Anhang 1 Biegezug und Druckfestigkeitsmessung an Prismen Auswertung

Probe:	Hersteller	Prüfalter	Prüfdatum	1. Lagerung	2. Lagerung		
K1	Sylwia Wallner	65	31.01.2018	22°C 95%RL	Raumluft		
	Herstell.	Uhrzeit Her- stell.	ausgeschalt	Ausschalalter	Bis	bis	
	27.11.2017	11:30	02.12.2017	5	02.12.2017	31.01.2018	
Lfd. Nr.	Gewicht G	Länge mm	Breite b mm	Höhe d mm	Rohdichte g/cm ³		
1/1	420,6	165,0	41,0	39,9	1,56		
1/2	520,7	166,7	38,5	39,0	2,08		
1/3	423,7	166,6	38,0	39,2	1,71		
1/4	420,2	162,9	39,4	39,3	1,67		
1/5	426,7	164,0	38,1	39,5	1,73		
1/6	422,8	162,5	39,4	39,6	1,67		
Mittelwert:					1,73		
Biegezugkraft F	Biegezugf.	Abweich.	Druck P		Druckfestigkeit		
N	N/mm ²	%	N	N	N/mm ²	N/mm ²	
<small>Belastungsgeschwindigkeit V = 20N/s</small>	$f = 1,5 \frac{F * l}{b * d^2}$		<small>Belastungsgeschwindigkeit V = 50N/s</small>		$F_{cd} = \frac{P}{A}$		
	<small>l = Auflagerabstand = 100mm</small>				<small>A = Druckfläche 40mm * 40mm = 1600mm²</small>		
1/1	250,90	0,58	15,7%	1415,0	1483,0	0,88	0,93
1/2	173,84	0,45	10,6%	1209,0	1342,0	0,76	0,84
1/3	166,67	0,43	14,1%	1381,0	1078,0	0,86	0,67
1/4	164,88	0,41	18,4%	1326,0	1390,0	0,83	0,87
1/5	204,30	0,52	3,5%	1512,0	1367,0	0,95	0,85
1/6	254,48	0,62	24,0%	1437,0	1414,0	0,90	0,88
	202,51	0,5				Mittelwert Druckfestigkeit	0,9

Probe:	Hersteller	Prüfalter	Prüfdatum	1. Lagerung	2. Lagerung		
K2	Sylvia Wallner	66	23.02.2018	22°C 95%RL	Raumluft		
	Herstell.	Uhrzeit Her- stell.	ausgeschalt	Ausschalalter	Bis	Bis	
	19.12.2017	11:30	24.12.2017	5	24.12.2017	23.02.2018	
Lfd. Nr.	Gewicht G	Länge mm	Breite b mm	Höhe d mm	Rohdichte g/cm ³		
2/1	429,8	161,5	38,9	39,9	1,71		
2/2	427,7	161,8	39,8	39,7	1,67		
2/3	426,2	161,4	38,9	39,9	1,70		
2/4	435,9	162,2	40,6	39,8	1,66		
2/5	427,1	162,2	39,6	39,7	1,67		
2/6	435,1	162,0	39,7	39,7	1,70		
Mittelwert:					1,69		
Biegezugkraft F	Biegezugf.	Abweich.	Druck P		Druckfestigkeit		
N	N/mm ²	%	N	N	N/mm ²		
Belastungsgeschwindigkeit V = 20N/s	$f = 1,5 \frac{F * l}{b * d^2}$		Belastungsgeschwindigkeit V = 50N/s		$F_{cd} = \frac{P}{A}$		
	l = Auflagerabstand = 100mm				A = Druckfläche 40mm * 40mm = 1600mm ²		
2/1	202,50	0,49	1,5%	1260,2	1508,9	0,79	0,94
2/2	195,30	0,47	3,4%	1704,3	1673,8	1,07	1,05
2/3	195,30	0,47	2,1%	1684,5	1779,5	1,05	1,11
2/4	215,00	0,50	3,8%	1810,0	1709,6	1,13	1,07
2/5	191,70	0,46	4,7%	2021,4	1971,3	1,26	1,23
2/6	211,50	0,51	4,9%	1699,3	1804,6	1,06	1,13
						Mittelwert	
	201,88	0,5				Druckfestig- keit	1,1

Probe:	Hersteller	Prüfalter	Prüfdatum	1. Lagerung	2. Lagerung		
K3	Sylwia Wallner	52	04.05.2018	22°C 95%RL	Raumluft		
	Herstell.	Uhrzeit Her- stell.	ausgeschalt	Ausschalalter	Bis	Bis	
	13.03.2018		18.03.2018	5		04.05.2018	
Lfd. Nr.	Gewicht G	Länge mm	Breite b mm	Höhe d mm	Rohdichte g/cm ³		
3/1	445,7	160,0	38,6	40,2	1,80		
3/2	458,9	160,0	30,4	40,8	2,31		
3/3	452,6	160,0	39,6	40,0	1,79		
3/4	444,4	160,0	37,9	40,1	1,83		
3/5	445,3	160,0	38,7	40,7	1,77		
3/6	451,1	160,0	41,2	40,0	1,71		
Mittelwert:					1,87		
Biegezugkraft F	Biegezugf.	Abweich.	Druck P		Druckfestigkeit		
N	N/mm ²	%	N	N	$F_{cd} = \frac{P}{A}$ N/mm ²		
<small>Belastungsgeschwindigkeit V = 20N/s</small>	$f = 1,5 \frac{F * l}{b * d^2}$		<small>Belastungsgeschwindigkeit V = 50N/s</small>		<small>A = Druckfläche 40mm * 40mm=1600mm²</small>		
3/1	487,45	1,17	12,6%	5068,2	3980,0	3,17	2,49
3/2	508,95	1,51	44,9%	4840,6	5118,5	3,03	3,20
3/3	492,82	1,17	12,1%	5127,4	5417,9	3,20	3,39
3/4	464,15	0,11	89,0%	5451,9	4779,6	3,41	2,99
3/5	467,52	1,09	5,1%	5946,4	4964,3	3,72	3,10
3/6	523,29	1,19	14,4%	5374,9	5206,3	3,36	3,25
						Mittelwert Druckfestig- keit	3,2
	490,70	1,0					

Anhang 2 Auswertung Stempeldruckversuche

Stempeldruckversuche Mörtel K1				
23.04.2018				
Prüfalter 147 Tage				
Probe				σ N/mm ²
		Mörtelstärke [mm]	Druckkraft	Stempeldruckfestigkeit
K1	1	15	1359,15	2,77
K1	2	12,5	1187,03	2,42
K1	3	23,8	1371,72	2,80
K1	4	18,7	1359,17	2,77
K1	5	18,8	982,62	2,00
K1	6	22,4	860,69	1,75
K1	7	17,2	1213,93	2,47
K1	8	18,1	1560	3,18
K1	9	14,1	1113,52	2,27
K1	10	16,6	1445,24	2,95
K1	11	16,7	1316,14	2,68
K1	12	22,3	1196	2,44
K1	13	18,3	1048,96	2,14
K1	14	17,1	1472,14	3,00
K1	15	21,4	998	2,03
Mittelwert		18,2	1232,287333	2,51

Stempeldruckversuche Mörtel K2				
23.04.2018				
Prüfalter 125 Tage				
Probe		Stärke	Druckkraft	σ N/mm ²
		Mörtel Stärke mm	N	Stempeldruckfestigkeit
K2	1	17,6	1086,62	2,21
K2	2	17,4	1011,31	2,06
K2	3	15,6	1386,07	2,83
K2	4	16,9	1689,1	3,44
K2	5	19,1	1680,14	3,42
K2	6	14,9	1585,1	3,23
K2	7	16,5	1913,24	3,90
K2	8	15,1	1145,79	2,34
K2	9	20,5	1271,31	2,59
K2	10	17,5	1149,38	2,34
K2	11	15,9	1560	3,18
K2	12	14,02	1707,03	3,48
K2	13	15,6	1861,24	3,79
K2	14	13,3	1253,38	2,55
K2	15	14,5	1540,27	3,14
K2	16	14,6	1391,45	2,84
Mittelwert		16,18875	1451,964375	2,96

Stempeldruckversuche Mörtel K3				
30.05.2018				
Prüfalter 78 Tage				
Probe		Stärke	Druckkraft	σ N/mm ²
		Mörtel Stärke mm	N	Stempeldruckfestigkeit
K3	1	15,26	4604,63	9,39
K3	2	22,51	2933,48	5,98
K3	3	16,12	3362,03	6,85
K3	4	18,00	3062,58	6,24
K3	5	14,19	3483,96	7,10
K3	6	14,96	3471,41	7,08
K3	7	21,26	4907,66	10,00
K3	8	18,42	2766,72	5,64
K3	9	19,29	4816,22	9,82
K3	10	11,76	3758,3	7,66
K3	11	10,88	3093,07	6,30
K3	13	18,62	4796,49	9,78
K3	14	16,56	5836,48	11,90
K3	15	13,68	4007,54	8,17
K3	16	16,80	1744,67	3,56
K3	17	15,18	3198,86	6,52
K3	18	13,42	3534,16	7,20
K3	19	17,71	3994,99	8,14
K3	20	20,81	4086,43	8,33
K3	21	16,98	3525,2	7,19
K3	22	16,76	3318,99	6,76
K3	23	11,98	3794,16	7,73
K3	24	20,59	4791,11	9,77
K3	25	14,42	3261,62	6,65
K3	26	15,38	5655,38	11,53
K3	27	19,01	3268,79	6,66
K3	28	14,9	2053,08	4,18
K3	29	15,15	3535,96	7,21
K3	30	15,42	4367,95	8,90
Mittelwert		16,41448276	3759,721379	7,66

Anhang 3 Rückprallwerte an den Ziegeln

K1	Rückprallwert Ziegel 31.1.2018					
	150kN	300kN	150kN	300kN	150kN	300kN
Stelle:	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3
1	32	32	31	34	34	29
2	32	30	32	30	34	34
3	25	32	31	32	41	38
4	34	30	33	31	34	37
5	28	32	32	31	27	39
6	34	32	28	28	30	36
7	32	38	32	38	28	32
8	30	34	34	27	32	36
9	29	28	28	37	36	25
10	32	28	34	32	29	29
11	28	33	28	27	25	38
12	37	30	35	32	37	28
13	26	33	30	33	30	30
14	24	30	32	29	34	42
15	33	28	25	31	31	34
16	30	30	34	35	26	40
17	36	32	32	31	26	43
18	33	38	30	30	31	42
19	34	35	34	31	38	32
20	31	32	30	28	33	30

K2	Rückprallwert Ziegel 22.2.2018					
	150kN	300kN	150kN	300kN	150kN	300kN
Stelle:	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3
1	28	29	34	37	30	30
2	28	30	35	34	33	30
3	30	31	38	33	33	39
4	28	27	31	39	25	31
5	36	34	29	32	28	27
6	25	31	32	32	37	36
7	30	46	32	28	30	28
8	31	28	28	30	36	36
9	27	32	32	32	34	28
10	32	30	31	28	32	30
11	33	27	34	33	30	30
12	30	36	30	39	28	32
13	26	34	30	32	34	30
14	24	26	29	36	29	33
15	26	28	36	30	25	28
16	30	28	31	30	25	30
17	32	26	28	38	24	36
18	30	31	31	34	25	27
19	32	31	27	32	22	32
20	28	30	26	31	34	28

	Rückprallwert Ziegel 2.5.2018					
K3	150kN	300kN	150kN	300kN	150kN	300kN
Stelle:	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3
1	32	30	32	29	38	37
2	35	30	36	40	46	40
3	29	36	32	34	32	35
4	29	30	34	38	30	37
5	36	30	34	32	40	37
6	34	32	38	33	34	35
7	32	37	32	29	32	34
8	27	34	32	34	39	36
9	31	34	39	38	34	34
10	26	31	32	32	36	34
11	32	35	30	34	32	32
12	34	32	28	33	32	34
13	35	38	38	39	32	34
14	32	36	32	35	43	34
15	34	28	28	33	32	37
16	30	28	41	44	37	48
17	32	30	32	34	46	34
18	30	38	40	32	44	31
19	34	30	33	40	37	37
20	33	33	37	40	38	33

	Rückprallwert					
	150kN	300kN	150kN	300kN	150kN	300kN
Stelle:	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3
1	32	32	31	34	34	29
2	32	30	32	30	34	34
3	25	32	31	32	41	38
4	34	30	33	31	34	37
5	28	32	32	31	27	39
6	34	32	28	28	30	36
7	32	38	32	38	28	32
8	30	34	34	27	32	36
9	29	28	28	37	36	25 *)
10	32	28	34	32	29	29
11	28	33	28	27	25	38
12	37	30	35	32	37	28
13	26	33	30	33	30	30
14	24	30	32	29	34	42
15	33	28	25	31	31	34
16	30	30	34	35	26	40
17	36	32	32	31	26	43
18	33	38	30	30	31	42
19	34	35	34	31	38	32
20	31	32	30	28	33	30
Mittel	31,0	31,9	31,3	31,4	31,8	35,2
Standard- abweichung in %	11,3	9,0	8,2	9,6	13,6	13,7
	16,0					
	1,1	1,1	1,2	1,2	1,3	1,3
Anzahl	20	20	20	20	20	20
Minimum	24	28	25	27	25	28
Maximum	37	38	35	38	41	43
Median	32	32	32	31	32	36
Mittel	31	32	31	31	32	35
Standardabw.	3,51	2,85	2,57	3,00	4,32	4,81
Max-Min	13	10	10	11	16	15

Stelle:	Rückprallwert					
	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3
1	28	29	34	37	30	30
2	28	30	35	34	33	30
3	30	31	38	33	33	39
4	28	27	31	39	25	31
5	36	34	29	32	28	27
6	25	31	32	32	37	36
7	30	46	32	28	30	28
8	31	28	28	30	36	36
9	27	32	32	32	34	28
10	32	30	31	28	32	30
11	33	27	34	33	30	30
12	30	36	30	39	28	32
13	26	34	30	32	34	30
14	24	26	29	36	29	33
15	26	28	36	30	25	28
16	30	28	31	30	25	30
17	32	26	28	38	24	36
18	30	31	31	34	25	27
19	32	31	27	32	22	32
20	28		26	31	34	28
Mittel	29,3	30,8	31,2	33,0	29,7	31,1
Standard- abweichung in %	10,1	15,0	9,8	10,1	14,7	10,9
	16,0					
	2,1	2,1	2,2	2,2	2,3	2,3
Anzahl	20	20	20	20	20	20
Minimum	24	26	26	28	22	27
Maximum	36	46	38	39	37	39
Median	30	30	31	32	30	30
Mittel	29	31	31	33	30	31
Stan- dardabw.	2,96	4,61	3,07	3,32	4,37	3,39
Max-Min	12	20	12	11	15	12

	Rückprallwert					
Stelle:	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3
1	32	30	32	29	38	37
2	35	30	36	40	46	40
3	29	36	32	34	32	35
4	29	30	34	38	30	37
5	36	30	34	32	40	37
6	34	32	38	33	34	35
7	32	37	32	29	32	34
8	27	34	32	34	39	36
9	31	34	39	38	34	34
10	26	31	32	32	36	34
11	32	35	30	34	32	32
12	34	32	28	33	32	34
13	35	38	38	39	32	34
14	32	36	32	35	43	34
15	34	28	28	33	32	37
16	30	28	41	44	37	48
17	32	30	32	34	46	34
18	30	38	40	32	44	31
19	34	30	33	40	37	37
20	33		37	40	38	33
Mittel	31,9	32,6	34,0	35,2	36,7	35,7
Standard- abweichung in %	8,5	10,1	11,1	11,4	13,7	10,0
	16,0					
	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,3
Anzahl	20	20	20	20	20	20
Minimum	26	28	28	29	30	31
Maximum	36	38	41	44	46	48
Median	32	32	33	34	37	35
Mittel	32	33	34	35	37	36
Stan- dardabw.	2,70	3,31	3,78	4,00	5,02	3,57
Max-Min	10	10	13	15	16	17

Anhang 4 Korngrößenverteilung

Korngröße			Menge (g)	
größer als	8	mm	1	g
Fraktion	8-4	mm	522,5	g
Fraktion	4-2	mm	1116	g
Fraktion	2-0.5	mm	1010,5	g
Fraktion	0.5-0.25	mm	2113,5	g
Fraktion	0.25-0.125	mm	532	g
Fraktion	0.125-0.063	mm	72,5	g
kleiner als	0,063	mm	24,5	g
		Σ	5392,5	g

Tabelle 1 Mörtelklassen Tabelle 1 EN 998-2	8
Tabelle 2 Definiertes Ausbreitmaß definierter Mörtelarten, bezogen auf die Rohdichte des Frischmörtels, EN 1015-02 Tabelle 2	10
Tabelle 3 Feststoffgehalt und Volumen von Mörtelmischungen, EN 1015-02 Tabelle 1	10
Tabelle 4 Vorbereitung und Lagerung der Prüfkörper, EN1015-11 Tabelle.1.....	12
Tabelle 5 Anforderungen an Prüfmaschinen EN 1015-11 Anhang B Tabelle B1	13
Tabelle 6 Vorschläge für Belastungsgeschwindigkeiten Tabelle B.1 Anhang B EN 1015-11	14
Tabelle 7 Drei verschieden rezeptierte Mörtelanmischungen [8].....	19
Tabelle 8 Anzahl der U-Ziegelzahl für bestimmte Prüfungen (Tabelle A2 EN 771-1).....	22
Tabelle 9 Formfaktor d zur Berücksichtigung der geprüften Maße der Probekörper nach der Oberflächenbehandlung (Tabelle A.1 EN 772-1).....	25
Tabelle 10 Beiwerte K und Exponenten α , β zur Ermittlungn der Mauerwerks-Druckfestigkeit (Tabelle 3 ÖN B 1996-3).....	31
Tabelle 11 Teilsicherheitsbeiwerte für das Material Tabelle 1 ÖN B 1996-3.....	32
Tabelle 12 Mörtelrezept.....	34
Tabelle 13 Mörteldruckfestigkeit und Biegezugfestigkeit an Prismen (Prüfung nach 1015-11).....	35
Tabelle 14 Mörteldruckfestigkeit nach Stempeldruckverfahren für Mörtel K1, K2 und K3.....	38
Tabelle 15 Gemessene Eindringungen (d_{1-10}) der Schneide in Mörtel K1 den drei belasteten Pfeiler 1.1, 1.2 und 1.3 Prüfungsalter 65 Tage.....	39
Tabelle 16 Gemessene Eindringungen der Schneide (d_{1-10}) in Mörtel K2 den drei belasteten Pfeiler 2.1, 2.2 und 2.3. Prüfungsalter 65 Tage.....	40
Tabelle 17 Gemessene Eindringungen der Schneide (d_{1-10}) in Mörtel K3 den drei belasteten Pfeiler 3.1,3.2 und 3.3. Prüfungsalter 50 Tage.....	40
Tabelle 18 Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren Mörtel K1	41
Tabelle 19 Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren Mörtel K2	41
Tabelle 20 Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren Mörtel K3	41
Tabelle 21 Mörteldruckfestigkeit nach Eindringverfahren für Mörtel K1, K2 und K3.....	42
Tabelle 22 Gegenüberstellung der Mörtelfestigkeiten gemessen anhand der Prüfverfahren von den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.3 und dem Umrechnungsprinzip auf die normierte Mörteldruckfestigkeit f_m ..	45
Tabelle 23 Ziegeldruckversuche im Labor 25.06.2018	47
Tabelle 24 Umrechnung auf die normierte Mauersteindruckfestigkeit f_b	47
Tabelle 25 Mittelwert der normierten Druckfestigkeit der Mauerziegel (Prüfung nach EN772-1)..	48
Tabelle 26 mittlere Rückprallhärte der Ziegel, gemessen an Pfeilern mit bestimmten Mörtel K.	49
Tabelle 27 Mittelwerte der Rückprallwerte von den Pfeilern 1.1, 1.2 und 1.3 mit dem Mörtel K1 unter der Belastung von 150 und 300kN.....	49
Tabelle 28 Mittelwerte der Rückprallwerte von den Pfeilern 2.1, 2.2 und 2.3 mit dem Mörtel K2 unter der Belastung von 150 und 300kN.....	50
Tabelle 29 Mittelwerte der Rückprallwerte von den Pfeilern 3.1, 3.2 und 3.3 mit dem Mörtel K3 unter der Belastung von 150 und 300kN.....	50
Tabelle 30 Abmessung und Ermittlung der Mauerwerkfestigkeit für die Pfeiler der Serie K1, Prüfalter 65 Tage.....	55
Tabelle 31 Abmessung und Ermittlung der Mauerwerkfestigkeit für die Pfeiler der Serie K2 Prüfalter 65 Tage.....	56
Tabelle 32 Abmessung und Ermittlung der Mauerwerkfestigkeit für die Pfeiler der Serie K 3. Prüfalter 50 Tage.....	57
Tabelle 33 charakteristische Mauerwerkdruckfestigkeiten Pfeilern Serie K1 bK2 und K3.	57
Tabelle 34 Ermittlung der charakteristischen Mauerwerkfestigkeit von Werten aus der Komponentenprüfung der Mörtelfestigkeiten f_m (Tabelle 20) und der normierten Steindruckfestigkeit $f_b=18,3N/mm^2$ (Tabelle 22) Für die Parametern K, α und β wurden entsprechend 0,6, 0,65 und 0,25 eingesetzt.(Tabelle 8).....	58

Abb. 1 Korngrößenverteilung anhand Trockensiebung; Bestimmung der Sieblinie im Labor anhand eines Siebturns; S. Wallner 2018.....	9
Abb. 2 Form zur Herstellung der Prüfkörper Bild A.1 EN 1015-11	11
Abb. 3 Ausbreitmaßmessung im TU Labor.....	11
Abb. 4 Fertige Proben für die Biegezugversuche (3 Stk. pro Mörtelart) erstellt im Labor TU Wien, DA Sylwia Wallner 2018	12
Abb. 5 Fertige Proben (nach dem Biegezugversuch) für die Druckversuche (6 Stk pro Mörtelart) erstellt im Labor TU Wien, DA Sylwia Wallner 2018.....	12
Abb. 6 Schema laut Bild 1 der EN 1015-11 -Prüfung der Biegezugfestigkeit.....	13
Abb. 7 Biegezugprüfung an Prismen, DA Sylwia Wallner 11.12.2017	13
Abb. 8 Belastung der Prüfkörper (im Labor der TU Wien, DA Sylwia Wallner 2018).....	14
Abb. 9 Zerstörung der Probe (DA Sylwia Wallner 2018).....	14
Abb. 10 Grundprinzip des Eindringverfahren Abbildung. 3.2 [15].....	15
Abb. 11 Schneideform zur Bestimmung der Mörtelfestigkeit in der Fuge (Abbildung. 3.1, Pauser A. [15]).....	15
Abb. 12 Beziehung zwischen d_{1-10} und der Mörtelfestigkeit in der Fuge [16].....	17
Abb. 13 Abhängigkeit der Mörtelfestigkeit in der Fuge von Feuchtigkeitsgehalt ([14] Abbildung 6)	17
Abb. 14 Ausgestemte vom Mauerwerk Mörtelblättchen (DA SW 2018).....	18
Abb. 15 Abgleichen mit dem Gips.....	18
Abb. 16 Druckfläche (DA SW 2018).....	18
Abb. 17 Belastung der Stempelprobe (DA SW 2018).....	18
Abb. 18 Zusammenhang zwischen Mörteldicke und dem Verhältnis von Stempel- und Prismenfestigkeit (Abb. 4 [8])	19
Abb. 19 Zusammenhang zwischen Mörteldicke und Stempeldruckfestigkeit (Abb. 3 [8])	19
Abb. 20 Regressionskurve für Kalkmörtel* (DA Helmut Undesch Abb. 48 [12]).....	20
Abb. 21 Regressionskurve für Kalkzementmörtel* (DA Helmut Undesch Abb. 49 [12]).....	20
Abb. 22 Abmessungen und Oberflächen Bild 1 EN 771-1.....	21
Abb. 23 Abgleichen der Lagerflächen mit dem Zementmörtel DA S.Wallner 2018.....	23
Abb. 24 Druckfestigkeitsprüfung an der Ziegel (TU Labor DA S.Wallner 2018).....	24
Abb. 25 Versagensbild der Ziegel (TU Labor DA S.Wallner 2018).....	24
Abb. 26 Prüfung eines belasteten Pfeilers mit dem Rückprallhammer (S.Wallner 2018).....	26
Abb. 27 Spannungs-Dehnungs-Linie für Mauerwerk bei Druckbeanspruchung (Bild 3.2 ÖNORM EN 1996-1-1).....	30
Abb. 28 Probevolumen.....	33
Abb. 29 Mörtelfestigkeitsprüfung an Prismen.....	35
Abb. 30 Prüfung der Druckfestigkeit an erstelltem Stempel.....	37
Abb. 31 Probenumfang für die Stempeldruckversuche	37
Abb. 32 Abgleichen der Mörtelplättchen mit dem Gipsmörtel.....	37
Abb. 33 Schmiedhammer mit der modifizierten Schneide.....	39
Abb. 34 Abgleichen der Ziegeln mit dem Zementmörtel 16.5.2018.....	46
Abb. 35 Druckfestigkeitsmessung an den Ziegeln 25.6.2018.....	46
Abb. 36 Rückprallhärteprüfung an Pfeiler 3.1 unter der Belastung von 300kN.....	49
Abb. 37 Mauerpfeiler K 1.1, 1.2, 1.3 und 1.4, hergestellte am 27.11.2017	52
Abb. 38 Mauerpfeiler K 2.1, 2.2, 2.3 und 2.4, hergestellte am 19.12.2017	52
Abb. 39 Mauerpfeiler K 3.1, 3.2, 3.3 und 3.4, hergestellte am 13.3.2018.....	52
Abb. 40 Druckfestigkeitsprüfung an Pfeiler K1.1 (31.1.2018)	53
Abb. 41 regelmäßige Harr-Rissbildung an Pfeiler 2.2 (Belastung ca. 500kN)	53
Abb. 42 Erreichen der max. Bruchlast an Pfeiler K1.1 links, K2.1 Mitte, K3.2 rechts.....	54

Formel 1 Formel für die Biegezugfestigkeit (Kapitel 8.3 der ONORM EN1015-11)	13
Formel 2 Druckfestigkeit.....	14
Formel 3 Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren.....	15
Formel 4 Mauerwerkdruckfestigkeit für Vollziegelmauerwerk ermittelt anhand Mörtelwerten nach Eindringverfahren ÖNORM B 3350.....	16
Formel 5 Mauerwerkdruckfestigkeit für Hohlziegelmauerwerk ermittelt anhand Mörtelwerten nach Eindringverfahren ÖNORM B 3350.....	16
Formel 6 Umrechnung der Mörtelfestigkeit nach Eindringverfahren auf die normierte Mörteldruckfestigkeit	16
Formel 7 $f_m = (4,0d_1 - 10)0,60$	16
Formel 8 $f_{m, Ein} = 9d_1 - 10$	16
Formel 9 Ausscheidung der Abweichungen.....	16
Formel 10 Formel für die Druckfestigkeit für die Mauersteine (Angaben dafür enthält Kapitel 9 EN 772-1	24
Formel 11 Formel für die normierte Druckfestigkeit	25
Formel 12 charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk (Formel 3.1 EN1996-1-1).....	28
Formel 13 charakteristische Druckfestigkeit vom Mauerwerk mit Normal- und Leichtmörtel (Formel 3.2 EN 1996-1-1)	28
Formel 14 charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk mit Dünnbettmörtel mit Lagerfugenstärke 0,5-3mm und Mauerziegeln der Gruppen 1 und 4, Kalksandsteinen, Betonsteinen, Porenbetonsteinen (Formel 3.3 EN 1996-1-1).....	28
Formel 15 charakteristische Druckfestigkeit vom Mauerwerk mit Dünnbettmörtel mit Lagerfugenstärke 0,5-3mm und Mauerziegeln der Gruppen 2 und 3 (Formel 3.4 EN 1996-1-1)	28
Formel 16 charakteristische Schubfestigkeit eines Mauerwerkes mit Normalmörtel (Formel 3.5 EN 1996-1-1).....	29
Formel 17 Schubtragfähigkeit einer Wand (6.13 EN 1996-1-1).....	29
Formel 18 Charakteristische Mauerwerkdruckfestigkeit (gleich wie Formel 12).....	31

Diagramm 1 Rückpralldiagramm	26
Diagramm 2 Abhängigkeit der Druckfestigkeit und Rohdichte bei Primen aus Mörtel K1	36
Diagramm 3 Abhängigkeit der Druckfestigkeit und Rohdichte bei Primen aus Mörtel K2	36
Diagramm 4 Abhängigkeit der Druckfestigkeit und Rohdichte bei Primen aus Mörtel K3	36
Diagramm 5 Zusammenhang der Stempeldruckfestigkeit und der Mörtelstärke für Mörtel K1, K2 und K3	38
Diagramm 6 Einzelergebnisse der Stempeldruckfestigkeit bei Mörtel K1	43
Diagramm 7 Einzelergebnisse der Stempeldruckfestigkeit bei Mörtel K2	43
Diagramm 8 Einzelergebnisse der Stempeldruckfestigkeit bei Mörtel K3	43
Diagramm 9 Einfluss der Mörtelstärke der Stämpelplättchen K1 auf dem Parameter α	44
Diagramm 10 Einfluss der Mörtelstärke der Stämpelplättchen K2 auf dem Parameter α	44
Diagramm 11 Einfluss der Mörtelstärke der Stämpelplättchen K3 auf dem Parameter α	44
Diagramm 12 Normierte Mörteldruckfestigkeit ermittelt anhand der Prüfverfahren von den Kapiteln 4.2.1.1 bis 4.2.1.3	45
Diagramm 13 Verlauf der normierte Druckfestigkeit f_b an Einzelproben	48
Diagramm 14 Druckfestigkeiten der Ziegel, ermittelten wie im Kapitel 4.3.1 und 4.3.1 der DA.	51
Diagramm 15 Druckkraftverlauf an drei Pfeiler mit dem Mörtel K1 bis max. Bruchlast. Prüfalter 65 Tage	54
Diagramm 16 Spannung-Dehnungs-Linie Pfeilern mit Mörtel K1, Prüfalter 65 Tage	55
Diagramm 17 Druckkraftverlauf an drei Pfeilern mit dem Mörtel K2 bis max. Bruchlast. Prüfalter 65 Tage	55
Diagramm 18 Spannung-Dehnungs-Linie Pfeiler mit Mörtel K2. Prüfalter 65 Tage	56
Diagramm 19 Druckkraftverlauf an drei Pfeilern mit dem Mörtel K3 bis max. Bruchlast. Prüfalter 50 Tage	56
Diagramm 20 Spannung-Dehnungs-Linie Pfeiler mit Mörtel K3 Prüfalter 50 Tage	57
Diagramm 21 Vergleich der charakteristischen Mauerwerkdruckfestigkeiten f_k ermittelten anhand der Komponentenprüfung (grau, grün und blau, Werte aus Tabelle 32) und von Druckversuchen an ganzen Pfeilern (rot, Werte aus Tabelle 32)	58

