

Diploma Thesis

**Experimental tests for determination  
of the vertical load carrying capacity increase  
of masonry due to bed joints  
with textile glass mesh reinforcement**

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

Diplomarbeit

**Experimentelle Untersuchung zur Bestimmung  
der Tragfähigkeitserhöhung von Mauerwerk  
durch Mörtelfugen mit Textilglasgitterverstärkung**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen  
von

**Andreas Trinko, BSc**

Matr.Nr.: 01029595

unter der Anleitung von

Privatdoz. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Christian Schranz, MSc**

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Anton Pech**

Institut für Hochbau, Baudynamik und Gebäudetechnik  
Forschungsbereich Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung  
Technische Universität Wien  
Karlsplatz 13/207-2, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Jänner 2019

---



# Kurzfassung

Es bedarf stets neuer Entwicklungen und Forschungen, die möglicherweise ungeahnte Erkenntnisse zu Tage bringen, um mit der Vielzahl der unterschiedlichen und teilweise hochentwickelten Bauweisen mithalten zu können. Speziell bei steigender Geschoßzahl im Hochbau kommt den statischen Kennwerten eine große Bedeutung zu.

Einer der wichtigsten Werkstoffkennwerte im Bereich des Hochbaus ist aus konstruktiver Sicht die vertikale Wanddruckfestigkeit. Beim Werkstoff Mauerwerk setzt sich diese aus der Stein- und Mörteldruckfestigkeit zusammen. Wesentlich für das Druckversagen von Mauerwerkswänden ist dabei vor allem das Zusammenwirken der Komponenten Mauerstein und Mauermörtel. Bei Betrachtung des Verformungsverhaltens der beiden Komponenten zeigt sich, dass unterschiedliche Querdehnungen in der Kontaktfläche zwischen Mauerstein und Mauermörtel den entscheidenden Ausschlag geben. In weiterer Folge entstehen seitliche Abplatzungen an den Mauersteinen, die zum Gesamtversagen des Mauerwerks führen. Ursache dafür sind entstehende Zugspannungen in den Mauersteinen. Besonders wärmedämmende Mörtel weisen ein erhöhtes Querdehnungsverhalten auf, welches die charakteristische Wanddruckfestigkeit senkt. Diese Arbeit strebt danach, eine Verbesserungsmethode zu finden, die den auftretenden Querdehnungen in der Mörtelfuge entgegenwirkt und damit den Widerstand von Mauerwerkswänden erhöht. Die Vision liegt in der Optimierung der Lagerfugen, wobei eingebaute Bewehrungsschichten in Form von Textilglasgitter die Zugspannungen aufnehmen und dadurch die seitlichen Abplatzungen verhindern.

Zur Feststellung eines Inkrafttretens dieser Wirkung und zur Auswahl des Bewehrungsmaterials kommen im Vorfeld drei Serien an Tastversuchen zur Anwendung. Im experimentellen Hauptprogramm werden Mauerwerkspfeiler mit acht Steinscharen übereinander hergestellt, die unterschiedliche Bewehrungsgrade aufweisen. Zur Ausführung kommen gänzlich unbewehrte Pfeiler sowie Prüfkörper mit einer bewehrten Lagerfuge in der Mitte, drei bewehrten Lagerfugen (jede zweite Mörtelschicht) und sieben bewehrten Lagerfugen (vollständig bewehrt). Jede Art wird in dreifacher Ausführung hergestellt, um eine repräsentative Mittelwertbildung zu ermöglichen. Von diesem Versuchsprogramm erfolgen zwei Serien, wobei die Pfeiler der ersten Serie aus Mauersteinen aus Vollmauerziegel bestehen und die Pfeiler der zweiten Serie aus Mauersteinen aus Porenbeton. Zur Untersuchung gelangen abschließend Prüfkörper mit unterschiedlichem Mörtelalter, um die Auswirkungen der Mörteldruckfestigkeiten festzustellen.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zeigen, dass sich die Tragfähigkeit der Pfeiler – unabhängig vom Material der Mauersteine – mit zunehmendem Bewehrungsgrad der Lagerfugen steigert. Vor allem aus dem Verhältnis der Höhe zwischen den Bewehrungslagen und der Wanddicke lässt sich herleiten, dass sich ein höherer Bewehrungsgrad positiv auf die Tragfähigkeit des Mauerwerks auswirkt. Auf dieser Grundlage wird eine Empfehlung für mögliche Festigkeitssteigerungen erarbeitet, bei der alle Versuchsergebnisse auf der sicheren Seite liegen.



# Abstract

New research and development are required all the time, which may bring unsuspected findings to light in order to keep up with the multitude of different and sometimes highly developed construction methods. Especially with an increasing number of storeys in building construction, the strength parameters are of great importance.

One of the most important material characteristics in the field of building construction from a constructive point of view is the vertical masonry compressive strength. In the case of masonry as a material, this is made up of the brick compressive strength and the mortar compressive strength. The interaction of the components brick and mortar is essential for the pressure failure of masonry. When considering the deformation behaviour of the two components, it can be seen that different transverse strains in the contact surface between the brick and the mortar are decisive. Subsequently, lateral spalling occurs on the bricks which leads to the overall failure of the masonry. This is caused by tensile stresses in the bricks. Particularly heat-insulating mortars exhibit increased transverse expansion behaviour which reduces the characteristic masonry compressive strength. The aim of this work is to counteract the transverse expansions that occur in the mortar joint and, thus, increase the resistance of masonry walls. The vision lies in the optimization of the bearing joints, whereby built-in reinforcement layers in the form of textile glass meshes absorb the tensile stresses and thus prevent lateral spalling.

Three series of tests are carried out beforehand. In the main experimental procedure, brickwork piers are constructed with eight stone layers on top of each other, which have different degrees of reinforcement. The construction consists of completely unreinforced piers as well as test specimens with a reinforced horizontal joint in the middle, three reinforced horizontal joints (every second mortar layer) and seven reinforced horizontal joints (completely reinforced). Each species is produced three times to allow representative averaging. Two series of this test program are carried out, the first series of piers with solid bricks and the second series of piers with cellular concrete bricks. Finally, test specimens with different mortar ages are tested to determine the effects of the mortar compressive strength.

The results of the experimental tests show that the load carrying capacity of the piers – independent of the material of the bricks – increases with the degree of reinforcement of the bearing joints. In particular, the relationship between the height of the reinforcement layers and the wall thickness indicates that a higher degree of reinforcement has a positive effect on the load carrying capacity of the masonry. On this basis, a recommendation for possible increases in strength is produced in which all test results are on the safe side.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>15</b>
2.1	Geschichte des Ziegelmauerwerks . . . . .	15
2.2	Mauerwerk als Verbundwerkstoff . . . . .	17
2.3	Materialparameter . . . . .	19
2.3.1	Druckfestigkeiten: Steindruckfestigkeit und Mörteldruckfestigkeit . . . . .	19
2.3.2	Zugfestigkeiten: Steinzugfestigkeit und Mörtelzugfestigkeit . . . . .	21
2.3.3	Dicke der Lagerfuge . . . . .	23
2.3.4	Verformungsverhalten – Arbeitslinien . . . . .	23
2.3.5	Spannungs-Dehnungs-Diagramm . . . . .	25
2.3.6	Elastizitätsmodul . . . . .	26
2.3.7	Querdehnung . . . . .	28
2.3.8	Schubmodul . . . . .	29
2.3.9	Querdehnungsbehinderung . . . . .	30
2.3.10	Belastungsrichtung . . . . .	31
2.3.11	Belastungsgeschwindigkeit und Lastzyklen . . . . .	32
2.4	Forschungsvorhaben F 1087 . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Methodik des experimentellen Programms</b>	<b>37</b>
3.1	Versuchsprogramm . . . . .	37
3.2	Versuchsmaterialien . . . . .	37
3.2.1	Vollmauerziegel . . . . .	38
3.2.2	Porenbetonsteine . . . . .	38
3.2.3	Flexkleber als Mörtel . . . . .	39
3.2.4	Gips als Mörtel bei Tastversuchen . . . . .	40
3.2.5	Textilglasgitter als querdehnungsbehindernde Komponente . . . . .	41
3.3	Tastversuche . . . . .	42
3.3.1	Tastversuche Serie 1 . . . . .	42
3.3.2	Tastversuche Serie 2 . . . . .	44
3.3.3	Reststücke der Tastversuche Serie 2 . . . . .	46
3.3.4	Tastversuche Serie 3 . . . . .	47
3.4	Methoden zur Bestimmung der Materialparameter . . . . .	50
3.4.1	Abmessungen und Rohdichte . . . . .	50
3.4.2	Ebenheit und Planparallelität der Lagerflächen . . . . .	50
3.4.3	Steindruckfestigkeit . . . . .	51
3.4.4	Mörteldruckfestigkeit . . . . .	51
3.4.5	Wanddruckfestigkeit . . . . .	52
3.4.6	Elastizitätsmodul von Stein, Mörtel und Pfeiler . . . . .	52

3.4.7	Querdehnungsmodul . . . . .	54
3.5	Prüfeinrichtungen und Prüfgeräte . . . . .	55
3.5.1	Druckprüfmaschine . . . . .	55
3.5.2	Digitale Wegaufnehmer . . . . .	57
3.5.3	Dehnungsaufnehmer . . . . .	58
3.6	Prüfkörperherstellung und -vorbereitung . . . . .	60
3.6.1	Ziegelabmessungen und Ziegelzuschnitt . . . . .	60
3.6.2	Herstellung der Pfeiler . . . . .	61
<b>4</b>	<b>Versuche zur Bestimmung der Materialparameter</b>	<b>63</b>
4.1	Druckversuche . . . . .	63
4.2	Ausgleichsrechnung . . . . .	64
4.3	Kartonzwischenlage . . . . .	65
4.4	Normierte Steindruckfestigkeit . . . . .	67
4.4.1	Versuchsdurchführung . . . . .	68
4.4.2	Vollmauerziegel . . . . .	68
4.4.3	Porenbetonsteine . . . . .	72
4.5	Normierte Mörteldruckfestigkeit . . . . .	74
4.5.1	Versuchsdurchführung . . . . .	74
4.5.2	Flexkleber . . . . .	75
4.6	Formänderungseigenschaften der Mauersteine und des Mauermörtels . . . . .	77
4.6.1	Vollmauersteine mittels Belastungstest . . . . .	77
4.6.2	Porenbetonsteine und Flexkleber mittels Ultraschalltest . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Auswertung der Pfeilerversuche</b>	<b>81</b>
5.1	Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung . . . . .	82
5.2	Ergebnisse des experimentellen Hauptprogramms . . . . .	83
5.2.1	Vertikale Wanddruckfestigkeit . . . . .	83
5.2.2	Modellfaktor . . . . .	87
5.2.3	Tragfähigkeitssteigerungen infolge Lagerfugenbewehrung . . . . .	88
5.2.4	Formänderungseigenschaften . . . . .	90
5.3	Bruchverhalten und Versagensformen . . . . .	93
<b>6</b>	<b>Interpretation der Ergebnisse</b>	<b>95</b>
6.1	Ergebniseinordnung im Vergleich zu bisherigen Forschungen . . . . .	95
6.2	Veränderungen der charakteristischen Wanddruckfestigkeiten . . . . .	96
6.3	Veränderungen des Elastizitätsmoduls . . . . .	96
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Forschungsausblick</b>	<b>99</b>
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	99
7.2	Forschungsausblick . . . . .	100
<b>Anhang</b>		
<b>A</b>	<b>V Versuchsergebnisse der Pfeileruntersuchungen</b>	<b>101</b>

## Abkürzungsverzeichnis

M	Mörtel
PB	Porenbeton
SSE	Residuenquadratsumme (Sum of Squares due to Error)
VZ	Vollmauerziegel

## Variablenverzeichnis

$A$	[mm <sup>2</sup> ]	belastete horizontale Bruttoquerschnittsfläche
$A_0$	[mm <sup>2</sup> ]	belastete horizontale Ausgangsquerschnittsfläche
$\alpha$	[-]	Exponent zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Mauerwerk
$\beta$	[-]	Exponent zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Mauerwerk
$b$	[mm]	Breite
$d$	[mm]	Durchmesser einer Probe
$d_0$	[mm]	Ausgangsdurchmesser einer Probe
$\delta$	[-]	Formfaktor, der für die Bestimmung der normierten mittleren Druckfestigkeit der Mauersteine verwendet wird
$\Delta d$	[-]	Durchmesseränderung einer Probe
$\Delta l$	[-]	Längenänderung einer Probe
$\Delta l_1$	[-]	untere Längsstauchung der Mauerwerkspfeiler zur Bestimmung des Kurzzeitelastizitätsmoduls
$\Delta l_2$	[-]	obere Längsstauchung der Mauerwerkspfeiler zur Bestimmung des Kurzzeitelastizitätsmoduls
$\Delta \sigma$	[-]	Differenz zwischen unterer und oberer Druckspannung zur Bestimmung des Kurzzeitelastizitätsmoduls
$d_f$	[mm]	Dicke der Lagerfuge
$\varnothing$	[mm]	Durchmesser eines zylindrischen Probekörpers
$E_b$	[N/mm <sup>2</sup> ]	statischer Elastizitätsmodul von Beton
$E_D$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Kurzzeitelastizitätsmodul
$E_{\text{long term}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Langzeitelastizitätsmodul
$E_M$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul von Mörtel
$\varepsilon$	[-]	Längsdehnung eines Prüfkörpers
$\varepsilon_a$	[-]	mittlere Dehnung unter der Oberspannung $\sigma_a$
$\varepsilon_b$	[-]	mittlere Dehnung unter der Vorlastspannung $\sigma_b$
$\varepsilon_{el}$	[-]	elastische Dehnung von Mauerwerk
$\varepsilon_{mu}$	[-]	Grenzstauchung von Mauerwerk

$\varepsilon_q$	[-]	Querdehnung eines Prüfkörpers
$E_{q,p}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Querdehnungsmodul von Vollmauersteinen
$f_b$	[N/mm <sup>2</sup> ]	normierte Druckfestigkeit eines Mauersteins
$f_{b,i}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	normierte Steindruckfestigkeit des Probekörpers $i$
$\bar{f}_{b,i}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Steindruckfestigkeit des Probekörpers $i$
$f_{bz}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	charakteristische Steinzugfestigkeit
$f_c$	[N/mm <sup>2</sup> ]	einaxiale Druckfestigkeit des Betons
$f_d$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Bemessungswert der Druckfestigkeit in Lastrichtung
$f_k$	[N/mm <sup>2</sup> ]	charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit
$f_{k,b}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	charakteristische Wanddruckfestigkeit eines vollständig bewehrten Pfeilers
$f_m$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit des Mauermörtels
$f_{m,4/4/16}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	normierte Mörteldruckfestigkeit bezogen auf die Abmessungen der normierten Prismenschalung
$f_{vk}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	charakteristische Schubfestigkeit von Mauerwerk
$F$	[N]	Kraft
$\Delta F$	[N]	Messabweichung der Kraft
$F_p$	[N]	Druckkraft
$F_{p,max,i}$	[N]	maximal aufnehmbare Druckkraft eines Probekörpers $i$
$G$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Schubmodul von Mauerwerk
$\gamma_M$		Teilsicherheitsbeiwert für das Material
$h_{ef}$	[m]	Knicklänge der Wand
$h$	[mm]	Höhe
$H$	[mm]	Höhe zwischen den Bewehrungslagen
$H_{Pf}$	[mm]	Höhe der Mauerwerkspfeiler
$h_u$	[mm]	Höhe des Mauersteins
$K$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Beiwert zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Mauerwerk
$l_0$	[mm]	Ausgangslänge eines Prüfkörpers
$l$	[mm]	Länge eines Prüfkörpers
$l_u$	[mm]	Länge des Mauersteins
$m$	[g]	Masse
$m_d$	[g]	Trockenmasse
$\nu$	[-]	Querdehnungszahl
$\nu_b$	[-]	Querdehnungszahl des Mauersteins
$\nu_m$	[-]	Querdehnungszahl des Mörtels
$\Phi_s$	[-]	Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung der Schlankheit und der Lastausmitte
$\Phi_\infty$	[-]	Endkriechwert von Mauerwerk
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Rohdichte

$\rho_d$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Trockenrohddichte
$s(\underline{x})$		Standardabweichung einer Wertereihe $\underline{x}$
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Normalspannung rechtwinklig zur Bezugsfläche eines Prüfkörpers
$\sigma_1$	[N/mm <sup>2</sup> ]	untere Druckspannung im Mauerwerkspfeiler zur Bestimmung des Kurzzeitelastizitätsmoduls
$\sigma_2$	[N/mm <sup>2</sup> ]	obere Druckspannung im Mauerwerkspfeiler zur Bestimmung des Kurzzeitelastizitätsmoduls
$\sigma_a$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Oberspannung, die einem Drittel der einaxialen Betondruckfestigkeit entspricht
$\sigma_b$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Vorlastspannung, die einem Zehntel der Oberspannung der einaxialen Betondruckfestigkeit entspricht
$\sigma_{x,m}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	lotrechte Druckbeanspruchung auf die Mörtelfuge
$\sigma_{y,b}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Querzugspannung im Mauerstein in Richtung y
$\sigma_{y,m}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannung in der Mörtelfuge in Richtung y
$\sigma_{z,b}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Querzugspannung im Mauerstein in Richtung z
$\sigma_{z,m}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannung in der Mörtelfuge in Richtung z
$t$	[s]	Zeit
$t_0$	[s]	Zeitpunkt der Lasteinbringung
$\tau$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Schubspannung parallel auf die Bezugsfläche eines Prüfkörpers
$t_{ef}$	[m]	effektive Wanddicke
$v$		vertikaler Abstand eines Messwertes zur Anpassungskurve
$w_u$	[mm]	Breite des Mauersteins



# Kapitel 1

## Einleitung

Mauersteine zählen in den verschiedensten Ausführungsvarianten sowohl in Hinblick auf das Material wie auch die Form zu den ältesten Baustoffen der Menschheit. Im Laufe der Jahrtausende entwickelte sich die Bauweise vom Trockenmauerwerk hin zum heute bekannten Verbundwerkstoff Mauerwerk, bestehend aus Mauersteinen und Mauermörtel. Dabei durchlief die Entwicklung immer wieder Höhen und Tiefen, wobei der Ziegel vor allem in der Römischen Republik als das Baumaterial schlechthin wurde. Nachdem der Werkstoff nach den Römern etwas in Vergessenheit geriet, gewann er in der Gründerzeit bishin zum Wiederaufbau nach dem Ersten und Zweiten Weltkrieg wieder an Popularität und war kaum noch wegzudenken. Hauptausführungsvariante war dabei die Verwendung von Vollmauersteinen, die mit nur einer Hand gefasst werden konnten. Erst mit dem Einsetzen der Industrialisierung ging die Produktion der Mauersteine in Richtung größerer Steinformate, um zügigeren Baufortschritt und geringeren Arbeitsaufwand zu erzielen. Die Entwicklung des Strangpressverfahrens ermöglichte die Herstellung von Lochkanälen in den Querschnitten der Ziegel. Damit konnte eine deutliche Reduzierung des Eigengewichts erzielt werden. Die immer bedeutsamer werdenden bauphysikalischen Eigenschaften der Bauteile ließen neben der einfacheren Handhabung auch die wärmedämmenden Aspekte näher in den Fokus rücken.

In den letzten Jahrzehnten hat sich vor allen Dingen der Stahlbeton als Verbundwerkstoff etabliert und setzt sich von der Infrastruktur bis hin zu den höchsten Gebäuden gekonnt in Szene. Um mit der Betonbauweise Schritt zu halten, wird die Weiterentwicklung des Mauerwerkbaus bis heute intensiv fortgesetzt und kann als mittlerweile hochentwickelter Baustoff mit zahlreichen Vorteilen punkten.

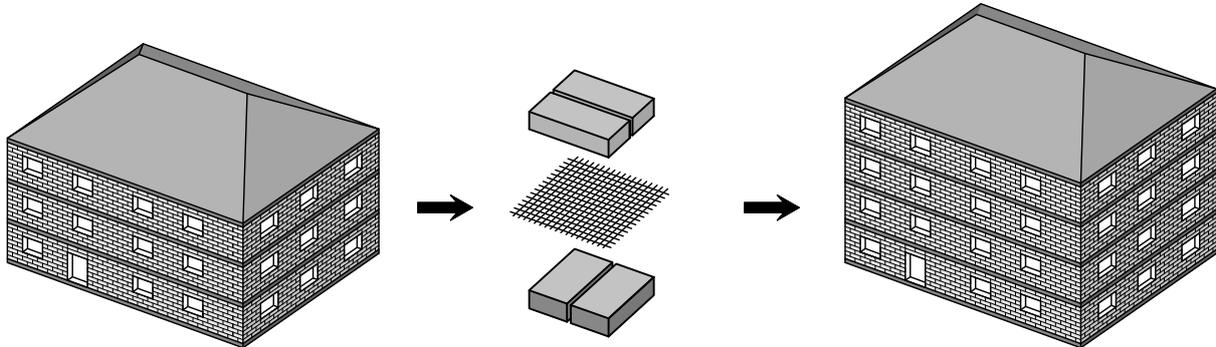
Trotz der Überlegenheit in Anbetracht der ökologischen und wärmedämmenden Eigenschaften stößt der Verbundwerkstoff Mauerwerk oftmals bei statischen Erfordernissen an seine Grenzen. In erster Linie spielt bei statischen Berechnungen der Nachweis der zulässigen Druckspannungen im Mauerwerk eine wesentliche Rolle. Entscheidend dafür sind die Druckfestigkeiten der Komponenten Mauerstein und Mauermörtel. Mit steigender Geschoßanzahl im Bereich des Hochbaus steigen auch die Anforderungen an die Festigkeitskennwerte. Damit es bei möglicher Nichterfüllung der Erfordernisse nicht vorab zu einem Ausschluss des Mauerwerks bei der Wahl der Bauweise kommt, wird in der vorliegenden Arbeit nach Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der charakteristischen Wanddruckfestigkeit gesucht. Die bereits sehr fortgeschrittene Mauerwerkstechnologie lässt die Komponenten als kaum veränderbar erscheinen, wodurch ausschließlich Verbesserungen im Bereich des Zusammenwirkens dieser Komponenten beleuchtet werden.

## Motivation und Ziel der Arbeit

Die Analysen von unterschiedlichsten Druckversuchen an verschiedenen Materialien zeigen im Versagenszustand ein Abplatzen der seitlichen Randbereiche. Dabei spiegelt sich das Verhalten der Formänderungen während der Druckbeanspruchung wieder. Bisherige Forschungen haben den Nachweis erbracht, dass beim Werkstoff Mauerwerk Mauersteine und Mauermörtel infolge Druckbelastung unterschiedliche Formänderungen erfahren. Der Mechanismus des Tragverhaltens ist in Abschnitt 2.2 detailliert beschrieben.

Das Ziel ist es durch Kenntnis des Tragmechanismus dem für den Bruch zuständigen Schwachpunkt des Mauerwerks entgegenzuwirken, indem die Lagerfugen aus statischer Sicht optimiert werden sollen. Die nicht veränderliche Komponente stellt für diese Arbeit der Mauerstein dar. Deshalb folgt bereits auch in Hinblick auf die Einfachheit der Ausführung eine bestmögliche Verbesserung der Lagerfugen durch Zugabe verschiedener Einlagen. An mehreren Tastversuchen erfolgen erste experimentelle Untersuchungen zur Feststellung der tatsächlichen Wirkung von querdehnungsbehindernden Lagerfugen. Im weiteren Sinn sollen damit höhere Bruchspannungen und somit höhere Druckfestigkeitswerte von Mauerwerkswänden erreicht werden. Die Idealvorstellung stellt eine mittels Festigkeitsverbesserung ermöglichte Geschoßerhöhung dar, obwohl die gleichen Mauersteine und der selbe Mörtel zur Anwendung kommen (siehe Abbildung 1.1).

Im Sinne der ÖNORM EN 1996-1-1 [30] ist eine Bewehrung der Lagerfugen grundsätzlich nur zur Verbesserung der Zugkraftaufnahme in Wandlängsrichtung gedacht, womit auch die horizontale Tragsicherheit erhöht wird. Die Lagerfugenbewehrung scheint demnach nicht nur in vertikaler Richtung positive Auswirkungen zu haben.



**Abb. 1.1:** Schematische Darstellung möglicher Geschoßzugewinne durch Erhöhung der Tragfähigkeit

Versuche im Sinn der heute in der Baupraxis bevorzugten Bauweise mit Hochlochziegeln können im Zuge der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt werden, da die für die Untersuchungen zur Verfügung stehenden Prüfeinrichtungen nicht die erforderlichen Dimensionen aufweisen. Es erfolgt eine Untersuchung an maßstäblichen Modellpfeilern, wofür allerdings keine maßstäblichen Hochlochziegel zur Verfügung stehen. Aus den Gründen der einfacheren Herstellung fällt die Wahl der Mauersteine auf Vollmauerziegel sowie auf Porenbetonsteine. Die Modellmauersteine aus Vollmauerziegel werden aus standardmäßigen Normalformat-Vollmauerziegeln geschnitten. Daraus können Pfeiler hergestellt werden, die den Dimensionen der vorhandenen Prüfeinrichtungen entsprechen. Mit Hilfe eines ermittelten Modellfaktors gemäß Abschnitt 5.2.2 ist eine Transformation der Ergebnisse in die Realität möglich.

# Kapitel 2

## Grundlagen

In diesem Kapitel ist zusammenfassend die Geschichte des Mauerwerks beschrieben und es behandelt die theoretischen Grundlagen des Werkstoffs Mauerwerk. Weiters kommt es zu einer vertiefenden Beschreibung der wesentlichsten Materialparameter, die zu einer bestmöglichen Analyse und Beurteilung der Versuchsergebnisse erforderlich sind. Eine detaillierte Beschreibung der bei den Versuchen verwendeten Materialien folgt im Abschnitt 3.2. In der vorliegenden Arbeit werden einige Begriffe häufig verwendet, die folgendes bedeuten. Die ÖNORM EN 771-1 [31] definiert einen *Mauerstein* als ein „*vorgeformtes Element zur Herstellung von Mauerwerk*“ und einen *Mauerziegel* als einen „*Mauerstein, der 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*“. Ein *Vollmauerziegel* ist nach ÖNORM B 3200 [26] ein „*Mauerstein, dessen Querschnitt durch vertikale Lochung normal zur Lagerfläche bis 25 % vermindert sein kann*“. In der ÖNORM EN 998-2 [36] ist *Mauermörtel* als „*Gemisch aus einem oder mehreren anorganischen Bindemitteln, Zuschlägen, Wasser und gegebenenfalls Zusatzstoffen und/oder Zusatzmitteln für Lager-, Stoß- und Längsfugen, Fugenglattstrich und nachträgliches Verfugen*“ beschrieben.

### 2.1 Geschichte des Ziegelmauerwerks

Die deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e.V. [3] sowie Pech et al [17] schreiben, dass bereits seit der Frühgeschichte der Menschheit Steine zum Bauen verwendet werden. Bauwerke aus bearbeiteten Natursteinen stammen aus einer Zeit von vor zum Teil mehr als 5000 Jahren und sind unterschiedlichen Zivilisationen zuzuordnen. Langsam wurde begonnen mit Hilfe von Formen künstliche Mauersteine aus Lehm herzustellen, die durch Stroh verfestigt wurden, um Schwindrisse zu minimieren. Für einen bedeutenden Entwicklungssprung sorgte das Brennen der Mauersteine, womit dauerhaftere, formstabilere und architektonisch vielfältigere Bauwerke möglich waren. Zur Zeit der Römischen Republik gewann der Ziegel immer mehr an Bedeutung. Durch den Niedergang der Römischen Republik geriet der Ziegel etwas in den Hintergrund und wurde erst wieder im zwölften Jahrhundert durch Mönche populär gemacht, wenn auch zumeist verputzt oder verblendet. Die Sichtziegelbauweise erlebte vor allem in Frankreich, Holland und England ab der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts ihre Wiederentdeckung.

Nach der Erfindung von formgebenden Aufbereitungshilfen und Formpressen konnten Mauerziegel industriell hergestellt werden, sodass die Produkte auch für private Bauherren zu erschwinglichen Preisen angeschafft werden konnten. Eine weitere Innovation stellte die Erfindung des Portlandzements wie auch die der hydraulischen Bindemittel dar. Damit war es erstmals möglich Mauersteine aus kalk- oder zementgebundenen Massen zu produzieren woraus Kalksandsteine,

Porenbetonsteine oder durch spezielle Zuschläge die heute bekannten Betonsteine entstanden sind. Erst seit den 1940er-Jahren sind die bauphysikalischen Eigenschaften der Ziegelprodukte von Interesse. Weitere Entwicklungen in Hinblick auf wärmedämmende, schallschützende und brandsichere Eigenschaften, die gleichzeitig ausreichende Standsicherheit und Langlebigkeit garantieren sollen, führten auf die modernen Mauerwerksbaustoffe mit ihren vielseitigen Eigenschaften wie wir sie heute kennen.

### Gegenwärtige Mauerziegel

Der in Tongruben oberflächennah abgebaute Ton ist der Ausgangsstoff für die Herstellung von Ziegelmauersteinen. Im sogenannten „*Kollergang*“ wird der abgebaute Ton durch schwere Walzen zerkleinert und homogenisiert. Durch Zugabe von Sand oder Kalkgranulat kann zu fetter Ton abgemagert werden. Zugabe von Natursteinmehl ermöglicht höhere Rohdichten für die Produktion einzelner Produkte. Die Produktion der Mauerziegel erfolgt nach abgeschlossener Aufbereitung des Tons in der Regel mittels Strangpressverfahren. Dabei wird der Ton durch ein formgebendes Mundstück zu einem Endlosstrang gepresst und die Mauerziegel werden mit einem Draht auf die gewünschte Länge geschnitten. Die Vakuumstrangpresse sorgt für zusätzliche Homogenisierung des Tons. Durch das geformte Mundstück können Lochkanäle angeordnet werden, die später über die gesamte Höhe des Mauersteins verlaufen. Daraus ergibt sich das entsprechende *Lochbild* des Ziegels. Die zurechtgeschnittenen Mauerziegel werden nach dem Strangpressen in einer Trockenkammer 8 bis 48 Stunden getrocknet und in etwa genauso langer Zeit bei Temperaturen zwischen 900 °C und ca. 1100 °C (Klinker) gebrannt.

Beim Brennvorgang wird das zuvor vorhandene Wasser im feuchten Mauerstein ausgetrieben und es bilden sich Poren, wodurch die ursprüngliche Kristallstruktur erhalten bleibt. Die hohen Brenntemperaturen, die zur Herstellung von Klinker erforderlich sind, überschreiten die sogenannte *Sintergrenze* und es kommt zu einer Änderung der Kristallstruktur. Durch das Aufschmelzen der einzelnen Phasen entsteht eine glasige Struktur. Nach Pech et al [17] besitzt Klinker eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen chemische Einflüsse und Frost und hält höheren Druckbeanspruchungen stand.

ÖNORM EN 1996-1-1 [30] teilt Mauersteine in vier Gruppen, worin Steine der Gruppe 1 Vollziegel und Steine der Gruppe 4 Langlochziegel darstellen. Die Gruppen 2 und 3 sind Hochlochziegel, wobei Mauersteine der Gruppe 2 einen geringeren Lochanteil und stärkere Stegdicken haben als Steine der Gruppe 3. Ausschlaggebend ist diese Einteilung für die Bestimmung des *K*-Wertes zur Ermittlung der charakteristischen Druckfestigkeit von Mauerwerk. Da die Druckfestigkeit von Mauerwerk stark von der Druckfestigkeit der Mauersteine abhängt, legt ÖNORM EN 771-1 [31] eine Grenze für die Schwankungsbreite der Steindruckfestigkeiten fest:

**Mauersteine der Kategorie I** ... Mauersteine mit einer deklarierten Druckfestigkeit, wobei die Wahrscheinlichkeit des Nichterreichens dieser Festigkeit 5 % nicht überschreiten darf

**Mauersteine der Kategorie II** ... Mauersteine, die das Vertrauensniveau für Mauersteine der Kategorie I nicht erreichen

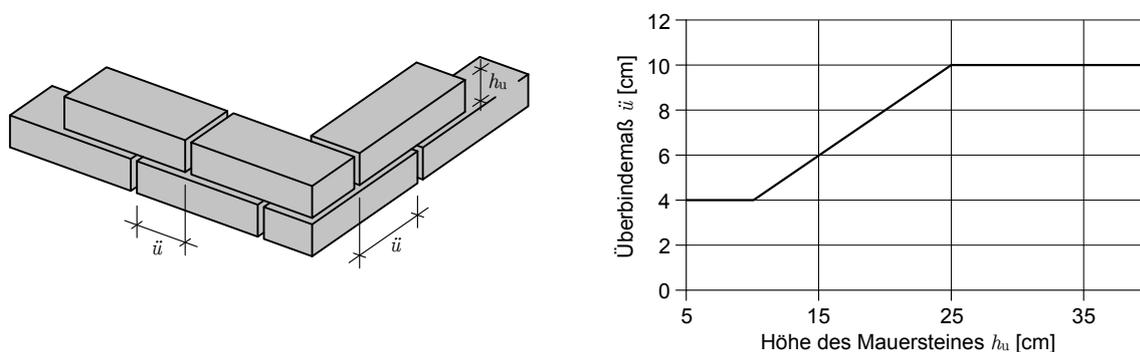
Die Kategorie der Mauersteine und die Art des Mauermörtels legt nach ÖNORM B 1996-3 [25] den Teilsicherheitsbeiwert für das Material  $\gamma_M$  gemäß Tabelle 2.1 fest. Bei Mauersteinen von bestehenden Bauwerken ist auf der sicheren Seite liegend grundsätzlich von Mauersteinen der Kategorie II auszugehen.

**Tab. 2.1:** Teilsicherheitsbeiwerte für das Material nach ÖNORM B 1996-3, Abschnitt 4.1 [25]

Material	$\gamma_M$
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

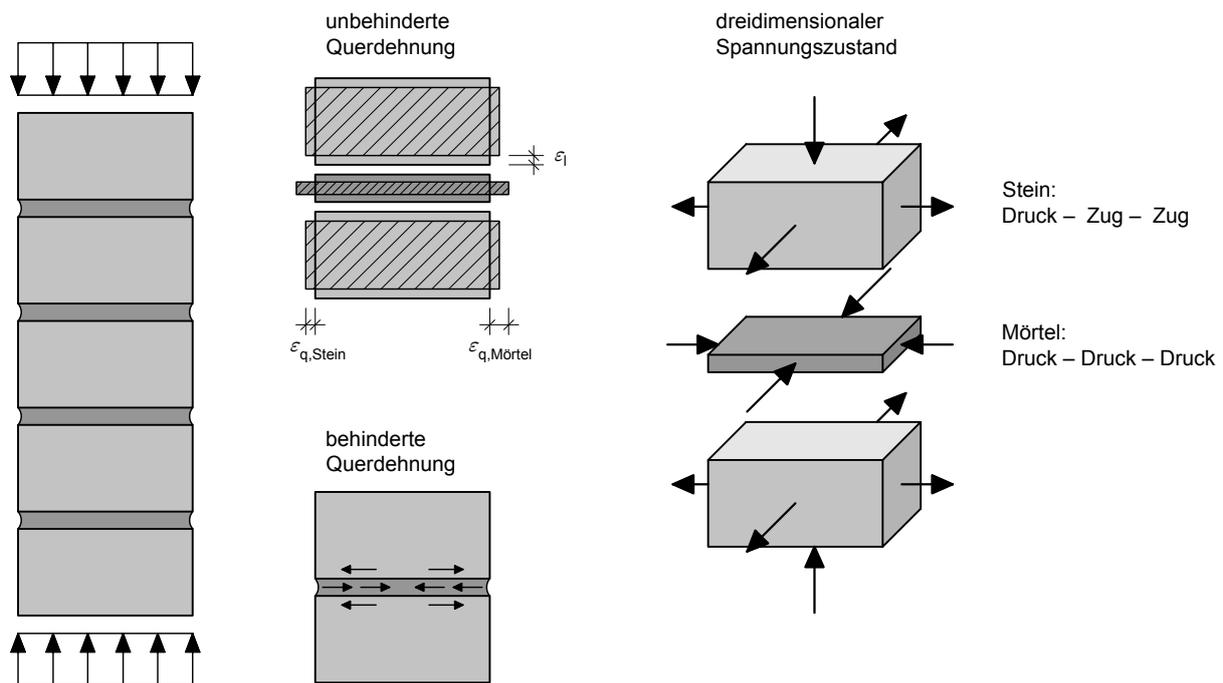
## 2.2 Mauerwerk als Verbundwerkstoff

Der Werkstoff Mauerwerk ist in all seinen unterschiedlichen Varianten im Gegensatz zu quasihomogenen und isotropen Baustoffen immer als Verbundwerkstoff zu verstehen und auch als solcher im Hinblick auf die Tragfähigkeit zu betrachten. Durch die Zusammensetzung der beiden unterschiedlichen Hauptkomponenten – Mauerstein und Mauermörtel – verhält sich das Tragverhalten in alle Richtungen anders. Der Mörtel in der Lagerfuge hat bei der Lastabtragung zum einen für den Formschluss zwischen den Mauersteinschichten zu sorgen, um einen uniformeren Druckspannungsverlauf zu gewähren, und zum anderen für eine kraftschlüssige Verbindung der Steinschichten. Für eine gleichmäßige Verteilung der Kräfte sind die Mauersteine schichtweise zu überbinden und nach bewährten Regeln im Verband zu vermauern. Das Diagramm in Abbildung 2.1 nach Pech et al [17] gibt Mindestangaben für das Überbindemaß  $\ddot{u}$  in Abhängigkeit von der Mauersteinhöhe an.

**Abb. 2.1:** Überbindemaß bei unbewehrtem Mauerwerk nach Pech et al [17]

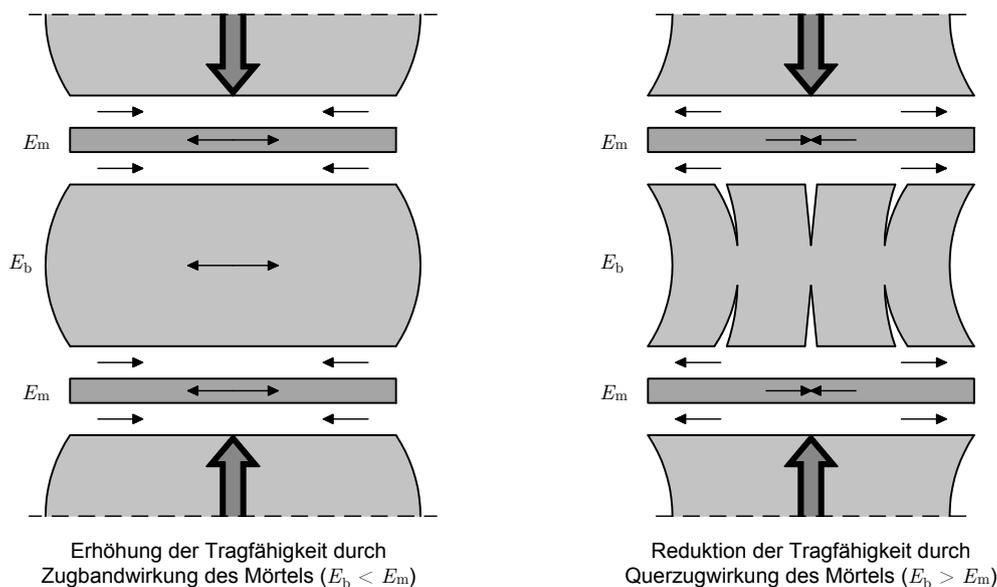
Der Werkstoff Mauerwerk weist aufgrund des Zusammenspiels von Mauersteinen und Mauermörtel wie auch durch die Eigenschaften von mineralischen Baustoffen eine wesentlich größere Druckfestigkeit als Zugfestigkeit auf. Aus diesem Grund werden Bauteile aus Mauerwerk in der Regel auf Druck beansprucht. Zugbeanspruchungen sind in der ÖNORM EN 1996-1-1 [30] nicht geregelt. Reine Zugbeanspruchungen dürfen demnach im Mauerwerk nicht auftreten bzw. ist es normativ nicht abgesichert, dass derartige Beanspruchungen von den Bauteilen abgetragen werden können. Die Druckbeanspruchbarkeit hängt grundsätzlich von den Druckfestigkeiten der Komponenten, jedoch auch stark von deren Zusammenspiel ab. Beim Zusammendrücken von Baustoffen kommt es zu Dehnung quer zur Belastungsrichtung. Da der Mauermörtel in der Regel weicher als der Mauerstein ist, gibt es im Mörtel größere Querdehnungen. An den Kontaktflächen zwischen Mauersteinen und Mörtel wird die Querdehnung des Mörtels durch den Stein behindert. Aufgrund dieser unterschiedlichen Querverformungseigenschaften der Komponenten entstehen

Querzugspannungen in den Mauersteinen und entsprechende Druckspannungen im Mörtel. Bei Überschreitung der Mauerwerksdruckfestigkeit kommt es in der Regel zu einem Druckversagen aufgrund des Erreichens der Steinquerzugfestigkeit. Die Tragfähigkeit des Mauerwerks unter Druckbeanspruchung wird also durch die Zugfestigkeit der Mauersteine bestimmt. Die Beanspruchung der Mörtelfuge erfolgt allerdings in alle Richtungen auf Druck und es kommt zu einer Umschnürungswirkung. Diese bewirkt, dass die Tragfähigkeit der Mörtelfuge über der Prismenfestigkeit des Mörtels liegt. Bei den meisten Kombinationen aus den Komponenten Mauerstein und Mauermörtel liegt die Druckfestigkeit des Mauerwerks über der Mörteldruckfestigkeit, aber unter der Steindruckfestigkeit. Abbildung 2.2 beschreibt die Spannungszustände in den Komponenten des Mauerwerks bei Druckbeanspruchung.



**Abb. 2.2:** Schematische Darstellung des Spannungszustandes im Mauerwerk bei Druckbeanspruchung (modifiziert aus Wendehorst und Neroth [20])

Bei „weicheren“ Mauersteinen mit verhältnismäßig großem Querdehnungsvermögen in Zusammenspiel mit querdehnungsstifem Mörtel entstehen in den Mauersteinen Zwängspannungen, die lokal im Stein Druck verursachen. Diese Kombination ist in Abbildung 2.3 auf der linken Seite dargestellt. Die zuvor beschriebene Kombination aus „steiferem“ Stein und „weicherem“ Mörtel (rechts in Abbildung 2.3) führt infolge der lokalen Zugspannungen im Mauerstein im Allgemeinen zu rascherem Versagen. Umso unterschiedlicher die Querdehnungsmoduln und vor allem die Querdehnungszahlen der Komponenten sind, desto geringere Werte erreicht die Druckfestigkeit des Mauerwerks. Auch die Dicke der Lagerfuge hat entscheidenden Einfluss auf die Tragfähigkeit des Mauerwerks. Die Erkenntnisse aus der Literatur zum Thema Lagerfugendicke sind in Abschnitt 2.3.3 beschrieben. Mauersteine und Mauermörtel sollten demnach gut aufeinander abgestimmt werden, um ideale Ergebnisse im Sinne der Tragfähigkeit zu erreichen.



**Abb. 2.3:** Tragverhalten von Mauerwerk in Abhängigkeit vom Querdehnungsverhalten nach Pech et al [17]

## 2.3 Materialparameter

Die tatsächliche Tragfähigkeit des Mauerwerks hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. Die größte Bedeutung kommt den Materialeigenschaften zu, die in der vorliegenden Arbeit ausführlich behandelt werden. Dabei sind Regelungen für die Ausführungsqualität und gleichmäßige Materialeigenschaften vorauszusetzen. Aufgrund der Vielzahl der Parameter ist die Komplexität einer mathematischen Erfassung zu erkennen. Dieser Abschnitt beschreibt die theoretischen Grundlagen der wesentlichsten Materialparameter zur Beschreibung und bestmöglichen Beurteilung und Analyse der Tragfähigkeit von Vollziegelmauerwerk.

### 2.3.1 Druckfestigkeiten: Steindruckfestigkeit und Mörteldruckfestigkeit

Infolge Belastung durch mechanische Kräfte reagiert ein Werkstoff zunächst mit Formänderung und bei Erreichen einer gewissen Grenzlaster mit Bruch. Ilchner und Singer [8] beschreiben den Begriff *Festigkeit* als „den Widerstand, den ein Werkstoff aufgrund seiner atomaren Struktur und seines Gefüges der Formänderung bzw. den Bruch entgegensetzt“. In der Spannungs-Dehnungs-Linie eines Prüfkörpers beschreibt die Festigkeit den Punkt, ab dem keine weitere Steigerung der Belastung möglich ist. Bei manchen Materialien tritt der Bruch des Prüfkörpers erst nach dem Erreichen der Festigkeit und nach starken Formänderungen ein. Die Bruchspannung ist demnach geringer als die Festigkeit. Die Art der Beanspruchung beeinflusst die Art der Festigkeit eines Körpers. In der Regel erfolgt die Druckbelastung in nur eine Richtung und das Ergebnis stellt die einaxiale Druckfestigkeit dar. Wird die Probe im Zuge der Prüfung von Druckkräften in mehrere Richtungen gleichzeitig belastet, ergibt sich die mehraxiale Druckfestigkeit. In den meisten Fällen erfolgt bei Druckprüfungen eine zügige, kontinuierliche Lastaufbringung, die bis zum Bruch der Probe gesteigert wird. Da die Prüfungsdurchführung meistens in wenigen Minuten beendet ist, spricht man von Kurzzeitfestigkeit. Durch die im Bauwerk dauernd auftretenden Lasten darf das Langzeitverhalten der Baustoffe nicht außer Acht gelassen werden.

### Steindruckfestigkeit

Die Bestimmung der Druckfestigkeit erfolgt bei einigen Materialien vorzugsweise an zylindrischen oder prismatischen Prüfkörpern. Die maximal ertragbare Kraft  $F_{p,\max,i}$  bezogen auf die Ausgangsquerschnittsfläche  $A_{0,i}$  ergibt die Druckfestigkeit eines Prüfkörpers,  $\bar{f}_{b,i}$ :

$$\bar{f}_{b,i} = \frac{F_{p,\max,i}}{A_{0,i}} \quad (2.1)$$

Bei der Druckprüfung stellt die Reibung zwischen den Stahlplatten der Druckprüfmaschine und dem Prüfkörper eine Querdehnungsbehinderung dar, welche in den Bereichen der Auflagerflächen zu dreiaxialen Spannungszuständen führt. Diese beeinflussten Bereiche sind in Abhängigkeit der Prüfkörperform im Abschnitt 2.3.9 beschrieben. Laut Wendehorst und Neroth [20] ist der Druckfestigkeitswert aber nicht nur gestalts-, sondern auch größenabhängig. Das bedeutet, dass sich mit steigender Probenkörpergröße (bei gleicher Schlankheit) die Messwerte für die Druckfestigkeit in der Regel verringern. Daher können die festgestellten Messwerte an den einzelnen Prüfkörpern,  $\bar{f}_{b,i}$ , nicht direkt miteinander verglichen werden, sondern müssen erst normiert werden, um die normierte Steindruckfestigkeit  $f_{b,i}$  zu erhalten. Es erfolgt zuerst eine Umrechnung der Festigkeit der Mauersteine in eine äquivalente Druckfestigkeit für den lufttrockenen Zustand, sofern diese Umrechnung erforderlich ist. Die Werte dazu liegen zwischen 0,8 und 1,2 und sind Anhang A der ÖNORM EN 772-1 [33] zu entnehmen. Der Druckfestigkeitswert der Mauersteine in lufttrockenem Zustand wird mit dem Formfaktor  $\delta_i$  multipliziert, um die geprüften Maße der Prüfkörper zu berücksichtigen (siehe Formel 2.2). Der Formfaktor  $\delta_i$  wird nach Anhang A, Tabelle A.1 der ÖNORM EN 772-1 [33] für die entsprechenden Höhen und Breiten von prismatischen Prüfkörpern ermittelt. Bei zylindrischen Prüfkörpern ist die Breite durch den Durchmesser der Probe zu ersetzen. Liegen die Werte der Abmessungen zwischen den tabellarisch angegebenen Werten, ist eine lineare Interpolation zulässig.

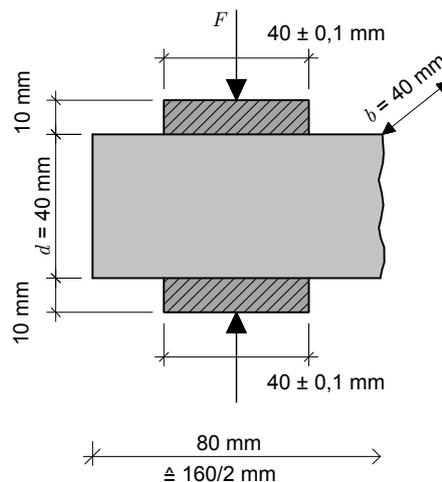
$$f_{b,i} = \bar{f}_{b,i} \cdot \delta_i \quad (2.2)$$

Damit ist es möglich, die Festigkeitswerte unabhängig von den Maßen der Prüfkörper miteinander zu vergleichen. Für die Bestimmung der mittleren normierten Steindruckfestigkeit  $f_b$  sind mindestens sechs Probekörper erforderlich.

### Mörteldruckfestigkeit

Der Mörtel hat in der Lagerfuge bei der Lastabtragung zwei wesentliche Aufgaben zu erfüllen: zum einen muss er für den Formschluss zwischen den Mauersteinschichten sorgen, um einen uniformeren Druckspannungsverlauf zu gewähren, und zum anderen sorgt er für eine kraftschlüssige Verbindung der Steinschichten. Die Druckfestigkeit spielt daher auch im Hinblick auf die Verformungseigenschaften eine bedeutende Rolle. Mörtelfugen mit höherer Druckfestigkeit weisen in der Regel weniger Verformungen auf als weniger feste Mörtelschichten wie z. B. hochwärmedämmende Mörtelfugen. Vor allem die Verformungen quer zur Belastungsrichtung sind bestmöglich mit den Verformungseigenschaften der Mauersteine abzustimmen, um ein verfrühtes Versagen des Mauerwerks zu verhindern.

Die Druckfestigkeit von Mauerarmörtel ist in der ÖNORM EN 1015-11 [28] geregelt. Sie wird an den Reststücken der Mörtelprismen, die nach der Prüfung der Biegezugfestigkeit übrig bleiben, gemäß Abbildung 2.4 untersucht.



**Abb. 2.4:** Prüfung der Druckfestigkeit von Mörtel (modifiziert aus ÖNORM EN 1015-11, Abschnitt 8.1 [28])

Der Hersteller darf die Druckfestigkeitsklasse des Mörtels nach Tabelle 2.2 oder Tabelle 1 der ÖNORM EN 998-2 [36] angeben. Die Druckfestigkeit ist mit einem „M“ gekennzeichnet und hat die Druckfestigkeitsklasse in  $\text{N/mm}^2$  angefügt, oberhalb derer die Druckfestigkeit liegt. Der Wert „d“ bedeutet, dass die Druckfestigkeit über  $25 \text{ N/mm}^2$  liegt und ist vom Hersteller anzugeben.

**Tab. 2.2:** Mörtelklassen nach ÖNORM EN 998-2, Tabelle 1 [36]

Klasse	M 1	M 2,5	M 5	M 10	M 15	M 20	M d
Druckfestigkeit [ $\text{N/mm}^2$ ]	1	2,5	5	10	15	20	d

### 2.3.2 Zugfestigkeiten: Steinzugfestigkeit und Mörtelzugfestigkeit

Unter dem Begriff *Zugfestigkeit* versteht man grundsätzlich die Festigkeit eines Prüfkörpers bei zentrischer Zugbeanspruchung. Zugspannungen treten jedoch in verschiedenen Bauteilen auch infolge von Biege- oder Spaltbeanspruchung auf. Von großer Bedeutung ist die Zugfestigkeit bei metallischen Werkstoffen, Holz und Kunststoffen. Bei Werkstoffen wie Mörtel oder Beton werden aufgrund von Problemen bei der Art der Einspannung der Probe und aufgrund von Schwierigkeiten bei der Sicherstellung der zentrischen Krafteinleitung häufig indirekte Verfahren herangezogen. Besonders bei Mauermörtel ist der Biegezugversuch besonders wichtig zur Analyse der Tragfähigkeit von Mauerwerk.

#### Steinzugfestigkeit

Die Mauerwerksdruckfestigkeit wird im Wesentlichen durch die Zugfestigkeit der Mauersteine bestimmt (siehe Abschnitt 2.2). In Steinlängsrichtung liegen die Werte der Steinzugfestigkeit  $f_{b,t}$  der Mauersteine in Bereichen von 5 bis 14 % der normierten Steindruckfestigkeit  $f_b$ . Die Spaltzugfestigkeit liegt bei ca. 2 bis 9 % von  $f_b$ . Bei auf Zug beanspruchten Mauerwerksteilen tritt Steinzugversagen nur dann ein, wenn die Tragfähigkeit der Mörtelfuge größer ist als die des

Mauersteins. Dabei wird der Mauerstein auseinandergerissen ohne dabei aus dem Mauerwerksverband gezogen zu werden. Die Tragfähigkeit der Mörtelfuge liegt jedoch in der Regel unter der des Mauersteins.

Bei Mauerwerk unter Schubkraftbeanspruchung wird nach drei verschiedenen Versagensformen unterschieden. Der zweite Fall dieser Versagensformen stellt die Überschreitung der Steinzugfestigkeit dar. Dabei treten in den Mauersteinen die bereits beschriebenen Querspannungen auf, die infolge von Druckbeanspruchung  $\sigma_d$  zum Aufreißen führen können. Pech et al [17] geben die Schubfestigkeit  $f_{vk}$  in Abhängigkeit der Steinzugfestigkeit  $f_{bz}$  nach Formel (2.3) an:

$$f_{vk} = 0,45 \cdot f_{bz} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_d}{f_{bz}}} \quad (2.3)$$

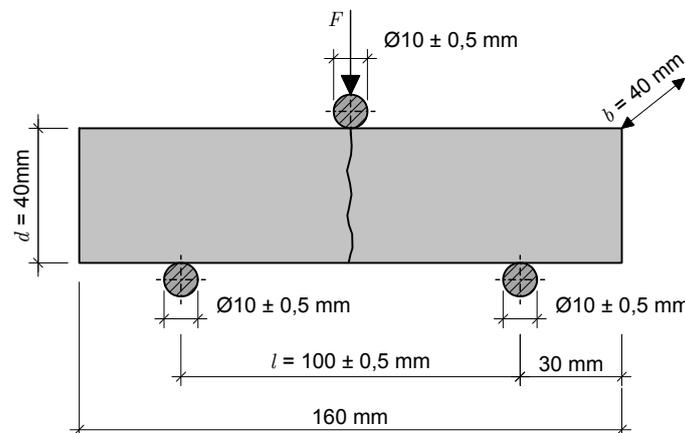
Da vorausgesetzt wird, dass in den Kontaktflächen zwischen Mauersteinen und Mörtelfuge vollständiger Verbund herrscht und somit gleiche Verformungen in Stein und Mörtel erzwungen werden, leitet Hilsdorf [6] einen elastizitätstheoretischen Wert der im Stein wirkenden Querspannungen  $\sigma_{y,b}$  und  $\sigma_{z,b}$  infolge Druckbeanspruchung  $\sigma_d$  ab:

$$\sigma_{y,b} = \sigma_{z,b} = -\sigma_d \cdot \frac{\frac{\nu_m}{E_m} - \frac{\nu_b}{E_b}}{\frac{1-\nu_m}{E_m} - \frac{1-\nu_b}{E_b}} \cdot \frac{d_f}{h_u} \quad (2.4)$$

Die Variablen  $\nu_b$  und  $\nu_m$  beschreiben die Querdehnungszahlen der Mauersteine und des Mörtels,  $E_b$  und  $E_m$  stellen die Elastizitätsmoduln der Komponenten dar. Die Lagerfugendicke  $d_f$  und die Mauersteinhöhe  $h_u$  sind geometrische Einflüsse des Mauerwerks.

### Mörtelzugfestigkeit

Gemäß ÖNORM EN 1015-11 [28] erfolgt die Prüfung der Biegezugfestigkeit für Mauermörtel mittels Dreipunkt-Biegeversuch. Die Mörtelprismen werden dabei auf zwei Auflagerrollen aus Stahl aufgelegt, die einen Abstand von 100 mm zueinander aufweisen. Die dritte Stahlrolle sitzt an der Oberseite mittig zwischen den unteren Auflagerrollen (siehe Abbildung 2.5). Die Belastung wird stoßfrei und mit konstanter Geschwindigkeit gesteigert bis der Bruch innerhalb von 30 bis 90 Sekunden eintritt. Die Biegezugfestigkeit ist nach Formel (2.5) zu berechnen.



**Abb. 2.5:** Prüfung der Biegezugfestigkeit von Mörtel (modifiziert aus ÖNORM EN 1015-11, Abschnitt 8.1 [28])

$$f_{bz} = 1,5 \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (2.5)$$

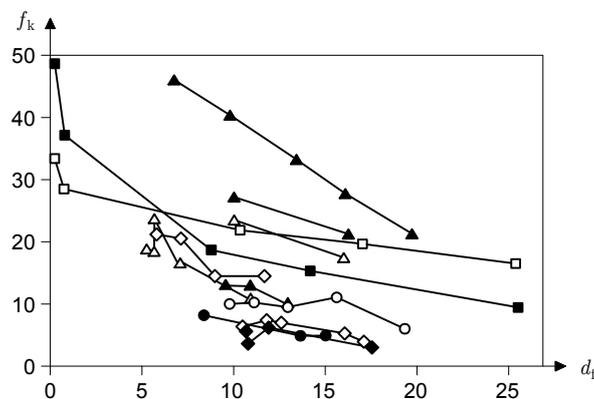
Berndt [1] baut auf das Modell der Querkzugspannungen im Mauerstein nach Formel (2.4) auf und formuliert den dreiachsigen Spannungszustand, der sich im Inneren der Lagerfuge einstellt und zur Außenfläche des Mauerwerks abnimmt, nach Formel (2.6):

$$\sigma_{y,m} \approx \sigma_{z,m} \approx \sigma_{x,m} \cdot \frac{\nu_m}{1 - \nu_m} \quad (2.6)$$

Durch das Ausbröckeln am Rand der Lagerfugen entsteht ein weiterer Zugspannungsanteil in Querrichtung im Mauerstein, der aufgrund der Umlenkung der Vertikalkräfte im Stein laut Berndt [1] als Spaltzugbeanspruchung bezeichnet wird.

### 2.3.3 Dicke der Lagerfuge

Um den Einfluss der Lagerfugendicke auf die Mauerwerksdruckfestigkeit zu analysieren, stellte Kirtschig [11] in einem Forschungsvorhaben an der Universität Hannover internationale Versuchsergebnisse nach Abbildung 2.6 zusammen. Es ist zu erkennen, dass die unterschiedlichen Versuchsreihen bei dünner werdender Lagerfugendicke steigende Werte der Mauerwerksdruckfestigkeit aufweisen. Ab einer Grenzfugendicke hat die Festigkeit des Mauermörtels keinen Einfluss mehr auf die Druckfestigkeit des Mauerwerks.



**Abb. 2.6:** Mauerwerksdruckfestigkeit  $f_k$  in Abhängigkeit von der Lagerfugendicke  $d_f$  nach Kirtschig [11]

Druckversuche von Hilsdorf [6] zeigten jedoch, dass nicht nur die Lagerfugendicke wesentlichen Einfluss auf die Mauerwerksdruckfestigkeit hat, sondern auch das Verhältnis zwischen Steinhöhe und Fugendicke. Dieses Verhältnis hat maßgebende Auswirkungen auf die zum Versagen führenden Querkzugspannungen im Mauerstein.

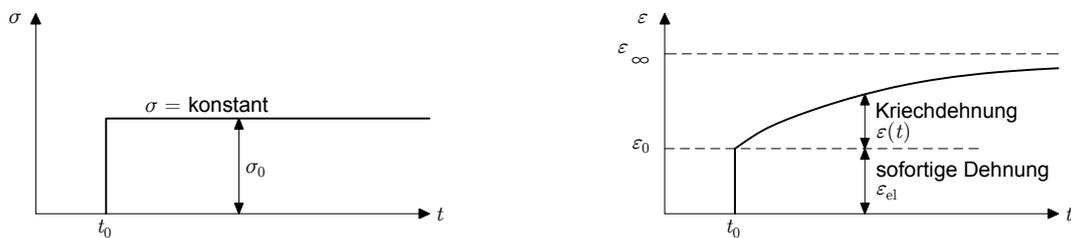
### 2.3.4 Verformungsverhalten – Arbeitslinien

Die Ursachen im Hinblick auf die Formänderungen von verschiedenen Bauteilen und Materialien können von äußeren Lasten, Temperaturänderungen, Änderungen des Wasserhaushalts bis hin zu chemischen Prozessen im Inneren reichen. Es wird zwischen reversiblen und irreversiblen wie auch

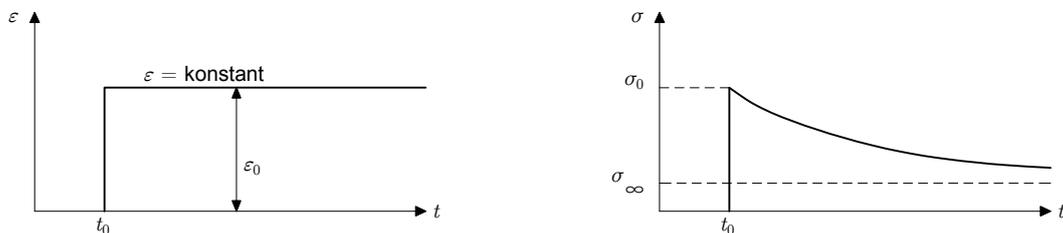
zwischen spannungsabhängigen und spannungsunabhängigen Formänderungen unterschieden. Tabelle 2.3 gibt einen Überblick über die Einteilung der Formänderungen. Die Abbildungen 2.7 und 2.8 beschreiben die Formänderungen schematisch.

**Tab. 2.3:** Einteilung der Formänderungen

	spannungsabhängig		spannungsunabhängig
	sofort auftretend	zeitabhängig	
reversibel	elastisch	verzögert elastisch	Wärmedehnung, Feuchtedehnung
irreversibel	plastisch	viskos	chemische Dehnung



**Abb. 2.7:** Schematische Darstellung des Kriechens



**Abb. 2.8:** Schematische Darstellung der Relaxation

Generell erfolgen Formänderungen nicht nur eindimensional, sondern räumlich. Für die vorliegende Arbeit ist es vor allem wesentlich, die Formänderungseigenschaften der Materialien in Belastungsrichtung und quer zur Belastungsrichtung zu bestimmen und zu kennen.

Eindimensionale Formänderungen von Werkstoffen werden häufig als Verformungen bezeichnet. Eine Verformung eines Körpers entsteht durch eine spontane Antwort auf eine äußere Zug- oder Druckbeanspruchung. Um eine relative Längenänderung bei Belastung eines Körpers zu erhalten, wird der Begriff *Dehnung* verwendet. Diese ergibt sich aus dem Quotient einer Längenänderung  $\Delta l$  eines Probekörpers und dessen Ausgangslänge  $l_0$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.7)$$

Aufgrund der Division zweier Längen ist die Dehnung eine dimensionslose Größe. Längenänderungen zufolge Zugbeanspruchungen sind positive Dehnungen und werden dadurch *Streckungen* genannt. Negative Dehnungen entstehen zufolge Druckbeanspruchungen, man spricht von sogenannten *Stauchungen*. Abbildung 2.9 symbolisiert resultierende Formänderungen infolge einaxialer Druckbeanspruchung.

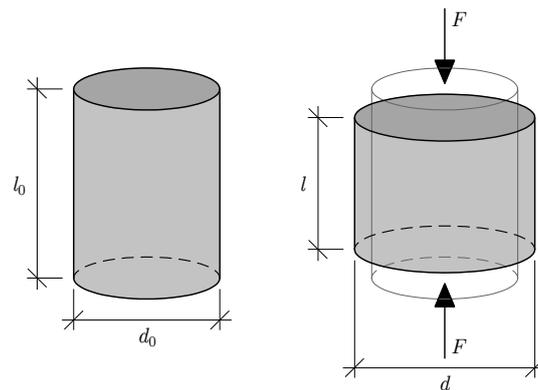


Abb. 2.9: Schematische Darstellung der Formänderungen eines Druckversuches

### 2.3.5 Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Werden Werkstoffe durch mechanische Belastungen beansprucht, entstehen entsprechende Verformungen des Prüfkörpers. Diese aufgebrachte Belastung bezogen auf die Fläche der Probe wird (mechanische) *Spannung* genannt. Sogenannte *Normalspannungen*  $\sigma$  treten auf, wenn die Kraft senkrecht (normal) auf die Bezugsfläche wirkt. Wirkt eine Kraft parallel (tangential) auf die Bezugsfläche, kommt es zu *Schubspannungen*  $\tau$ . An der schematischen Darstellung in Abbildung 2.9 ist zu erkennen, dass sich die Spannung  $\sigma$  aus dem Quotient aus einer Kraft  $F$  und einer Bezugsfläche  $A_0$  ergibt:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2.8)$$

Zufolge der dargestellten Druckbelastung wird der Prüfkörper zusammengedrückt, wobei sich gleichzeitig bei zunehmender Belastung die Ausgangsabmessungen ändern. Der Ausgangsdurchmesser  $d_0$  ändert sich zu  $d$  und somit vergrößert sich die Ausgangsquerschnittsfläche  $A_0$  zu  $A$ . Diese Zunahme des Ausgangsdurchmessers  $d_0$  wird *Querdehnung* genannt. Es besteht also ein Unterschied zwischen der Längsdehnung  $\varepsilon$  und der senkrecht dazu auftretenden Querdehnung  $\varepsilon_q$ . Diese Querdehnung  $\varepsilon_q$  ergibt sich bei einem Prüfkörper mit Durchmesser  $d$  und Durchmesseränderung  $\Delta d$  nach Formel (2.9):

$$\varepsilon_q = \frac{\Delta d}{d_0} \quad (2.9)$$

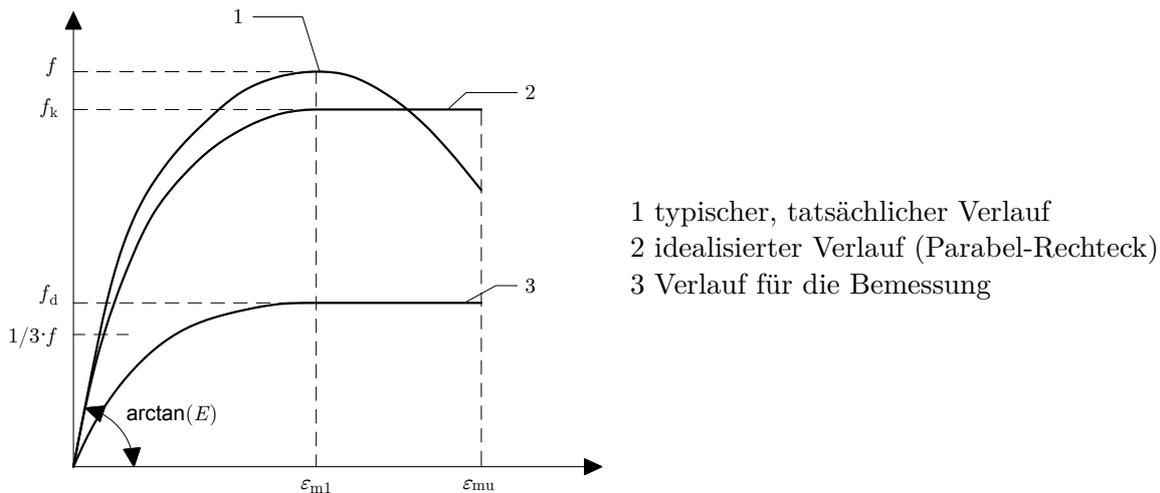
Die Beziehung zwischen Querdehnung und Längsdehnung wird durch die *Querdehnungszahl*  $\nu$ , auch Poissonzahl genannt, beschrieben:

$$\nu = \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon} = \frac{\frac{\Delta d}{d_0}}{\frac{\Delta l}{l_0}} = \frac{d-d_0}{d_0} \cdot \frac{l_0}{l-l_0} \quad (2.10)$$

Die infolge Belastung auftretende Querschnittsänderung müsste grundsätzlich bei der Berechnung der „wahren“ Spannung berücksichtigt werden. Da dies durch den großen Aufwand der Messungen nur in den seltensten Fällen durchgeführt wird, wird die aufgebrachte Kraft  $F$  auf die Ausgangsfläche  $A_0$  bezogen. Dabei spricht man von einer sogenannten „Nennspannung“.

Von großer Bedeutung für Formänderungseigenschaften von Werkstoffen ist deren Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie. Diese Verformungseigenschaften werden auch immer bedeutungs-

voller für die Entwicklung immer komplexer werdender Rechenmodelle für Mauerwerk. Die aus dem Formänderungsverhalten abgeleiteten Steifigkeitseigenschaften der Werkstoffe werden zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit benötigt. Die Arbeitslinien von Ziegel sind bei Druck- und bei Zugbelastung sehr unterschiedlich. Grundsätzlich wird in der Literatur festgehalten, dass Steine mit höherer Druckfestigkeit eine größere Steifigkeit und auch ein ausgeprägteres Sprödbuchverhalten aufweisen. Gemäß ÖNORM EN 1996-1-1 [30] ist die Spannungs-Dehnungs-Linie von Mauerwerk unter Druckbeanspruchung aufgrund der Mörtelfugen in der Regel nichtlinear. Es ist jedoch zulässig sie für die Bemessung als linear, parabelförmig, parabel-rechteckig (Abbildung 2.10) oder als Rechteck anzunehmen.



**Abb. 2.10:** Spannungs-Dehnungs-Linien für Mauerwerk bei Druckbeanspruchung gemäß ÖNORM EN 1996-1-1 [30]

### 2.3.6 Elastizitätsmodul

Infolge von Beanspruchungen treten bei Werkstoffen entsprechende Verformungen auf. Nimmt der Werkstoff nach Wegnahme der Belastung wieder seine ursprüngliche Form ein, spricht man von elastischen (reversiblen) Formänderungen. Bei linear-elastischen Werkstoffen sind die Spannungen und die auftretenden Dehnungen proportional zueinander oder können zumindest näherungsweise als proportional angenommen werden. Die Spannungs-Dehnungs-Linie verläuft linear. In diesem Fall lässt sich der Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung als Geradengleichung der Form  $y = k \cdot x + d$  beschreiben. Im linear-elastischen Bereich gilt das *Hook'sche Gesetz*. Der Elastizitätsmodul ergibt sich aus dem Proportionalitätsfaktor zwischen Normalspannung  $\sigma$  und Längsdehnung  $\varepsilon$ :

$$E_D = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.11)$$

Aufgrund der dimensionslosen Dehnung  $\varepsilon$  hat der Elastizitätsmodul die gleiche Einheit wie die Spannung. Vor allem spröde Materialien wie Glas und Keramik weisen bis zum Bruch linear-elastisches Verhalten auf. Wenn bei Baustoffen nicht nur elastische, sondern auch viskose Formänderungen auftreten, ist die Spannungs-Dehnungs-Linie von Beginn an gekrümmt. Allgemein gilt, dass der Elastizitätsmodul umso kleiner ist, desto flacher die Steigung der Hook'schen Gerade ist. Je kleiner der Elastizitätsmodul, desto größer sind die auftretenden elastischen

Verformungen. Dies gilt auch in umgekehrtem Sinn. Tabelle 2.4 enthält überblicksmäßig Elastizitätsmodul, Querdehnungsmodul und Querdehnungszahlen für ausgewählte Materialien.

**Tab. 2.4:** Elastizitätsmodul, Querdehnungsmodul und Querdehnungszahlen einiger Baustoffe [17], [20]

Baustoff	Elastizitätsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]	Querdehnungsmodul [N/mm <sup>2</sup> ]	Querdehnungszahl [-]
Vollmauerziegel	12 000 – 22 000	55 000 – 120 000	~ 0,20
Hochlochziegel	2500 – 10 000	~ 10 000	0,11 – 0,20
Normalmörtel	3500 – 11 000	5000 – 17 500	0,12 – 0,20
Kalkzementmörtel M5	~ 6500	~ 32 500	—
Leichtmörtel	1800 – 5000	~ 10 000	bis 0,25
Stahl	170 000 – 210 000	—	0,27 – 0,30
Normalbeton	15 000 – 50 000	—	0,10 – 0,35
Bauglas	70 000	—	0,25
Aluminium	60 000 – 70 000	—	0,33

Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls von Mörtel,  $E_M$ , kann auch in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit erfolgen. Beispielsweise kann der Elastizitätsmodul von Normalmörtel nach Formel (2.12) ermittelt werden:

$$E_M = 2100 \cdot f_m^{0,7} \quad (2.12)$$

Als Elastizitätsmodul von Mauerwerk wird der Sekantenmodul bei einem Drittel der Maximalbeanspruchung herangezogen und ist durch Versuche nach ÖNORM EN 1052-1 [29] zu ermitteln. Der Einfluss des Mörtels in der Lagerfuge nimmt mit kleiner werdender Fugendicke ab. Wenn keine Versuchsergebnisse vorliegen, darf nach ÖNORM EN 1996-1-1 [30] für die Verformungs- und Schnittkraftermittlung der Kurzzeitelastizitätsmodul  $E_D$  des Mauerwerks gemäß Formel 2.13 angenommen werden:

$$E_D = 1000 \cdot f_k \quad (2.13)$$

Zur Berücksichtigung von Kriecheinflüssen darf der Langzeitelastizitätsmodul  $E_{\text{long term}}$  zur Erstellung von Langzeitprognosen als abgeminderter Kurzzeitelastizitätsmodul angesetzt werden:

$$E_{\text{long term}} = \frac{E}{1 + \Phi_\infty} \quad (2.14)$$

Die Endkriechzahl  $\Phi_\infty$  ist nach ÖNORM EN 1996-1-1, Abschnitt 3.7.4 [30] mittels Versuche zu ermitteln, da zur Zeit kein europäisches Prüfverfahren zu deren Bestimmung existiert. Beispielsweise ist der Wertebereich der Endkriechzahl  $\Phi_\infty$  für Ziegel und für Porenbetonsteine von 0,5 bis 1,5. Der Ansatz nach Formel (2.13) berücksichtigt jedoch nicht, dass unterschiedliche Kombinationen von Mauerstein und Mörtel die gleichen Festigkeitswerte für  $f_k$  liefern können, aber unterschiedliche Formänderungseigenschaften aufweisen. Kombinierte Beanspruchungen aus vertikalen und horizontalen Belastungen (z. B. im Erdbebenfall) können zu Rissbildungsvorgängen führen, die eine deutliche Abnahme der Druckfestigkeit bewirken. Bei Schubwänden mit Horizontalkraftbeanspruchung kann der angesetzte Elastizitätsmodul auf 50 % reduziert werden. Wände mit großem Fugenteil und weichem Mörtel – wie in Altbauten mit Vollziegel

die Regel – haben schon im elastischen Bereich einen weit geringeren E-Modul. Aus einem breit angelegten Forschungsvorhaben [18] ergab sich als Wert ein E-Modul von  $300 \cdot f_k$  und demnach ergaben sich bei Erdbebenbeanspruchung noch weit geringere Steifigkeiten. Dies ist speziell bei der Kombination von Ziegelwänden mit Betonscheiben zu beachten. Der deutlich geringere Elastizitätsmodul kann durch die höhere Anzahl an den geringer festen Mörtelfugen erklärt werden. Ein Mauerwerk aus Hochlochziegel mit Steinhöhen von 25 cm besitzt 4 Mörtelfugen pro Höhenmeter, ein Vollziegelmauerwerk mit 7,5 cm Steinhöhe (+ Mörtelfuge) weist aber 13,3 (=  $100/7,5$ ) Fugen, d.h. 3,33 mal so viel auf. Dividiert man den Faktor 1000 des HLZ-Mauerwerks durch 3,33 ergibt sich ebenfalls der Faktor 300 für das Vollziegelmauerwerk [17]. Der Elastizitätsmodul für Vollziegelmauerwerk ergibt sich somit nach Formel (2.15).

$$E_D = 300 \cdot f_k \quad (2.15)$$

### 2.3.7 Querdehnung

Die Querdehnungszahl  $\nu$  stellt einen Bezug zu den Längsdehnungen in  $x$ -Richtung her. Damit können die Querdehnungen  $\varepsilon_q$  tangential auf die Bezugsfläche ermittelt werden.

$$\varepsilon_q = -\nu \cdot \varepsilon = -\frac{\nu}{E_D} \cdot \sigma_1 \quad (2.16)$$

Das negative Vorzeichen folgt aus der mit einer Längsstauchung verbundenen Querdehnung. Die Volumenänderung bezogen auf das unverformte Volumen ergibt sich mit Vernachlässigung der nichtlinearen Terme aufgrund der vorausgesetzten Kleinheit der Verzerrungen zu

$$\varepsilon^{vol} \approx \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = I_1^\varepsilon. \quad (2.17)$$

$I_1^\varepsilon$  bezeichnet einen Koeffizienten zur Bestimmung der Hauptverzerrungen eines Körpers und ist näherungsweise gleich der spezifischen Volumenänderung  $\varepsilon^{vol}$ . Die Hauptverzerrungen  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  und  $\varepsilon_3$  bezeichnen schubverzerrungsfreie Normalverzerrungen in allen Richtungen eines bestimmten Punktes in einem Körper. Nach Mang [14] bewirkt ein einaxialer Spannungszustand (z. B. der Spannungszustand  $\sigma_1 \neq 0$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ) infolge der Querdehnung einen räumlichen Verzerrungszustand (z. B. bei Zutreffen bestimmter einschränkender Voraussetzungen für das Werkstoffverhalten den Verzerrungszustand  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu\varepsilon_1$ ). Der kleinstmögliche Wert für  $\nu$  ergibt sich für den Fall, dass keine Querdehnung auftritt. Laut (2.16) ist dann  $\nu = 0$ . Den größtmöglichen Wert für  $\nu$  erhält man aus der Bedingung für das Verschwinden der Volumenänderung infolge einer einaxialen Beanspruchung. Einsetzen von  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu\varepsilon_1$  in Formel (2.17) führt auf

$$\varepsilon^{vol} = I_1^\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_1 (1 - 2\nu). \quad (2.18)$$

Nullsetzen der spezifischen Volumenänderung ergibt  $\nu = 1/2$  (siehe Mang [14]).

### Querdehnungsmodul

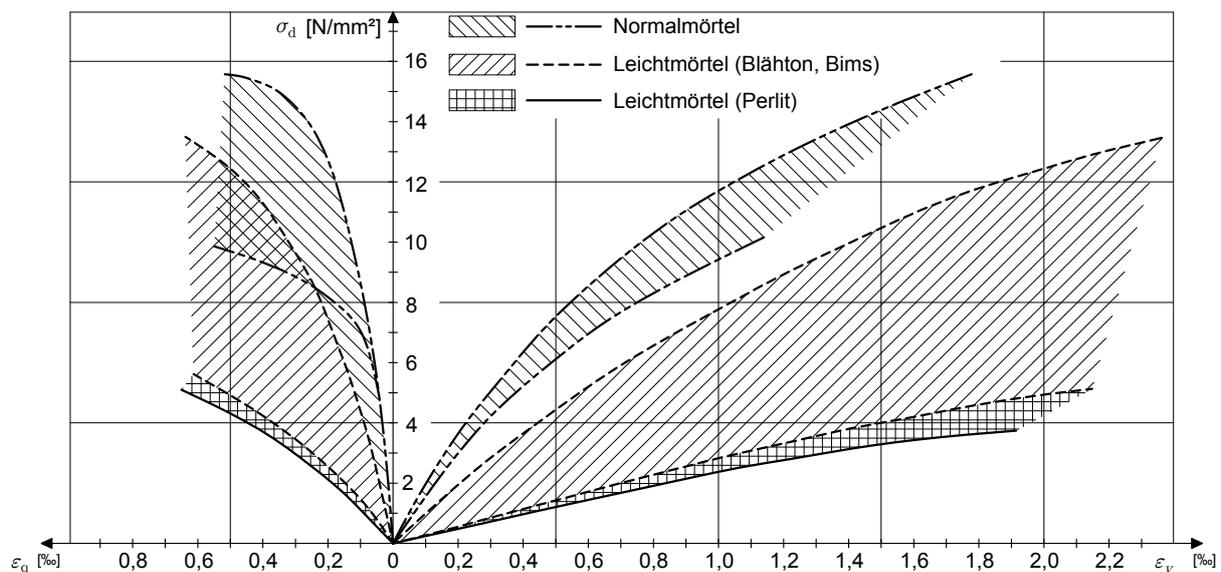
Gemäß Pech et al [17] wird der Querdehnungsmodul  $E_{q,p}$  analog zum Druck-E-Modul definiert, nur wird anstelle der Längsdehnung die im selben Querschnitt wirkende Querdehnung eingesetzt. Formel (2.19) gibt zur Ermittlung des Querdehnungsmoduls einen Ansatz in Abhängigkeit der Steindruckfestigkeit  $f_b$  an:

$$E_{q,p} = 2810 \cdot f_b^{0,93} \quad (2.19)$$

Die Druckfestigkeit des Mauerwerks hängt stark vom Querdehnungsverhalten der Lagerfuge ab. Unter Druckbeanspruchung entsteht eine Stauchung des Mauerwerksprüfkörpers bei gleichzeitig auftretender Querdehnung. Bei deutlich größerem Querdehnungsmodul des Mauersteines im Gegensatz zum Querdehnungsmodul des Mörtels kommt es zu Querkzug im Mauerstein. Dies führt zu früherem Versagen bei Druckbeanspruchung von Mauerwerkswänden. Aus den Werten der Tabelle 2.4 lässt sich ableiten, dass das Zusammenspiel von eher weichen, hoch wärmedämmenden Steinen und Dünnbettmörtel die Wandfestigkeiten günstig beeinflusst. Die Querdehnungsverhältnisse von Mauersteinen und Mauermörtel können qualitativ wie folgt eingestuft werden:

$$\begin{array}{r}
 \frac{\text{Vollziegel}}{\text{Kalkzementmörtel M10}} \approx \frac{1}{0,4} \\
 \frac{\text{hist. Vollziegel}}{\text{Kalkmörtel M2}} \approx \frac{1}{0,1 \text{ bis } 0,3} \\
 \frac{\text{Hochlochziegel}}{\text{Kalkzementmörtel M5}} \approx \frac{1}{1} \\
 \frac{\text{Hochlochziegel}}{\text{Wärmedämmmörtel M5}} \approx \frac{1}{0,3}
 \end{array} \quad (2.20)$$

Das Zusammenwirken von Mauersteinen und Mauermörtel ist in Abschnitt 2.2 detailliert beschrieben. Abbildung 2.11 zeigt die qualitativen Arbeitslinien von verschiedenen Mauermörtel.



**Abb. 2.11:** Qualitativer Verlauf der Arbeitslinien verschiedener Mörtel (modifiziert aus Zach [21])

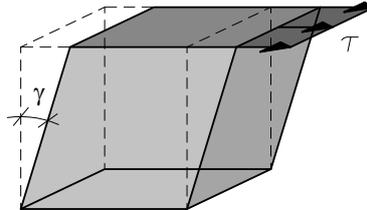
### 2.3.8 Schubmodul

Der Schubmodul  $G$  beschreibt den Zusammenhang zwischen einer elastischen Schubverformung zufolge einer Schubspannung  $\tau$ . Die Schubverformung wird in Form der Winkeländerung  $\gamma$  angegeben. Der Körper ändert infolge Schub seine Gestalt, das Volumen bleibt jedoch unverändert.

Genau genommen ist der Tangens des Schubwinkels  $\gamma$  maßgebend. Für kleine Winkel  $\gamma$  kann jedoch  $\tan \gamma \approx \gamma$  angenähert werden. Dadurch ist die Ermittlung der Schubverzerrung unter Schubbeanspruchung wie folgt möglich:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.21)$$

Abbildung 2.21 verdeutlicht wie die Schubverzerrungen infolge Schubbeanspruchung zu verstehen sind.



**Abb. 2.12:** Schematische Darstellung der Formänderung infolge Schubspannungen

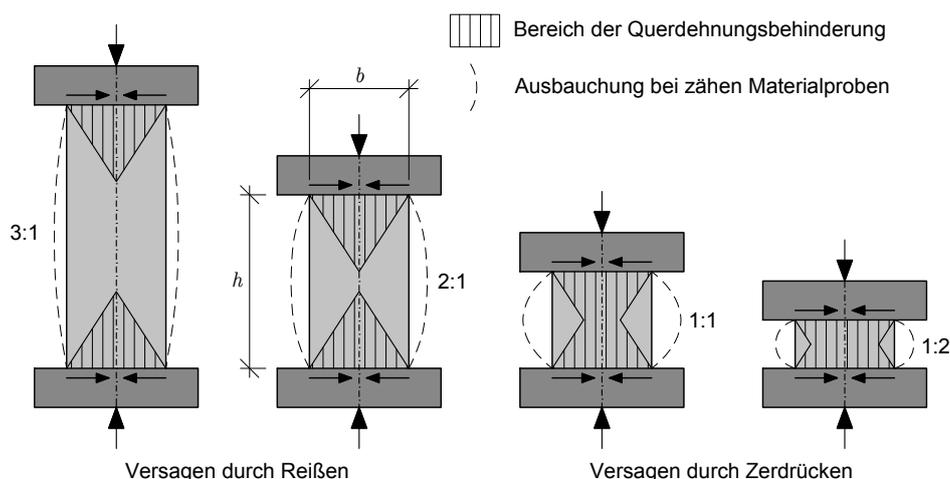
Mit Hilfe der Querdehnungszahl  $\nu$  kann ein Zusammenhang zwischen dem Schubmodul  $G$  und dem Elastizitätsmodul  $E_D$  nach Formel (2.22) hergestellt werden.

$$G = \frac{E_D}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (2.22)$$

Nach ÖNORM EN 1996-1-1 [30] darf der Schubmodul  $G$  mit 40 % des Elastizitätsmoduls  $E_D$  angenommen werden.

### 2.3.9 Querdehnungsbehinderung

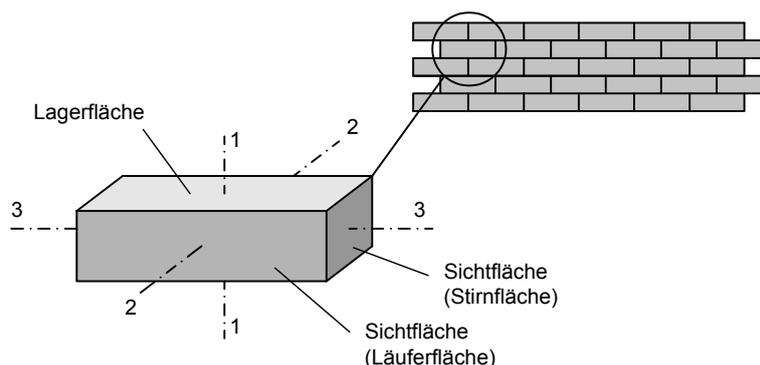
Die Prüfung von prismatischen oder zylindrischen Probekörper auf deren einaxiale Druckfestigkeit erfolgt in Druckprüfmaschinen zwischen zwei Stahlplatten, die die Druckbeanspruchung in die Probe übertragen. Aufgrund der Starrheit der Stahlplatten entstehen in den Kontaktflächen Reibungskräfte, die einen dreiaxialen Spannungszustand hervorrufen. Diese Reibungskräfte behindern in den Bereichen der Auflagerflächen die Querdehnung des Probekörpers wodurch dort größere Belastbarkeiten möglich sind. Die Schlankheit der Probekörper hat daher wesentlichen Einfluss auf die Druckfestigkeitswerte. In Abbildung 2.13 sind Probekörper mit unterschiedlichen Schlankheiten  $h/b$  unter Druckbeanspruchung dargestellt. Dabei sind die Bereiche schraffiert gekennzeichnet, die durch Querdehnungsbehinderung beeinflusst sind. Bei größer werdender Schlankheit der Proben nimmt die Wirkung der Querdehnungsbehinderung ab. Bei Proben mit geringer Schlankheit werden daher größere Werte der Druckfestigkeit erreicht. Erst ab einem Verhältnis  $h : b = 2 : 1$  kann von einem rein einaxialen Spannungszustand ausgegangen werden. Die Schlankheit beeinflusst auch das Bruchverhalten der Probekörper. Müller [15] beschreibt, dass bei Schlankheiten  $h/b \geq 2$  Versagen durch Reißen zu erwarten ist. Liegt das Schlankheitsverhältnis  $h/b < 1$ , so versagt die Probe durch Zerdrücken.



**Abb. 2.13:** Einfluss der Querdehnungsbehinderung bei verschiedenen Prüfkörperformen (modifiziert nach [20])

### 2.3.10 Belastungsrichtung

Bei den verwendeten Mauersteinen hat die Belastungsrichtung einen wesentlichen Einfluss auf die Größe der Druckfestigkeit. Die Belastungsrichtung ist normativ nach ÖNORM EN 771-1 [31] geregelt und zu berücksichtigen. Aus diversen wissenschaftlichen Arbeiten wie von Breit [2] oder dem Forschungsvorhaben F 1087 [13] geht hervor, dass aufgrund der Herstellung mittels Strangpressverfahren oder auch bei händischer Bearbeitung unterschiedliche Verhältniszahlen bei unterschiedlichen Belastungsrichtungen entstehen. Aber auch die Verhältniszahlen der unterschiedlichen Herstellungsverfahren unterscheiden sich. Das bedeutet, dass die Vollmauerziegel ein anisotropes Materialverhalten aufweisen. Die drei möglichen Belastungsrichtungen der Mauersteine sind in Abbildung 2.14 und Tabelle 2.5 dargestellt und beschrieben. Diese Bezeichnungen werden bei den Versuchen zur Bestimmung der Materialparameter stets beibehalten.



**Abb. 2.14:** Belastungsrichtungen und Oberflächenbezeichnungen der Mauersteine (modifiziert aus ÖNORM EN 771-1 [31])

Die größten Messwerte der Druckfestigkeit werden in Richtung 1–1 erwartet, da es sich um die übliche Beanspruchungsrichtung im Mauerwerksverband handelt. Im Zuge der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Vollmauerziegel, die im Strangpressverfahren hergestellt wurden, und herkömmliche Porenbetonsteine verwendet.

**Tab. 2.5:** Bezeichnungen der Belastungsrichtungen

Bezeichnung	Orientierung	Belastungsrichtung
1-1	orthogonal zur Lagerfläche	vertikal
2-2	orthogonal zur Läuferfläche	horizontal
3-3	orthogonal zur Stirnfläche	horizontal

Die Vollmauerziegel aller durchgeführten Versuche wurden dankenswerterweise von der Firma *Wienerberger Ziegelindustrie GmbH* zur Verfügung gestellt. Dabei ist auch garantiert, dass alle Vollmauerziegel aus der gleichen Serie stammen. Die Porenbetonsteine wurden im Baumarkt gekauft. Da die Vollmauerziegel aus einem Normalformatziegel geschnitten werden, erfolgt die Belastung bei den Pfeilerversuchen stets in Richtung 3-3. Für eine möglichst genaue Beurteilung der Ergebnisse werden im Vorfeld die tatsächlichen Messwerte der Druckfestigkeit mittels Druckversuche eruiert. Die daraus gewonnen Ergebnisse sind Abschnitt 4.4 zu entnehmen.

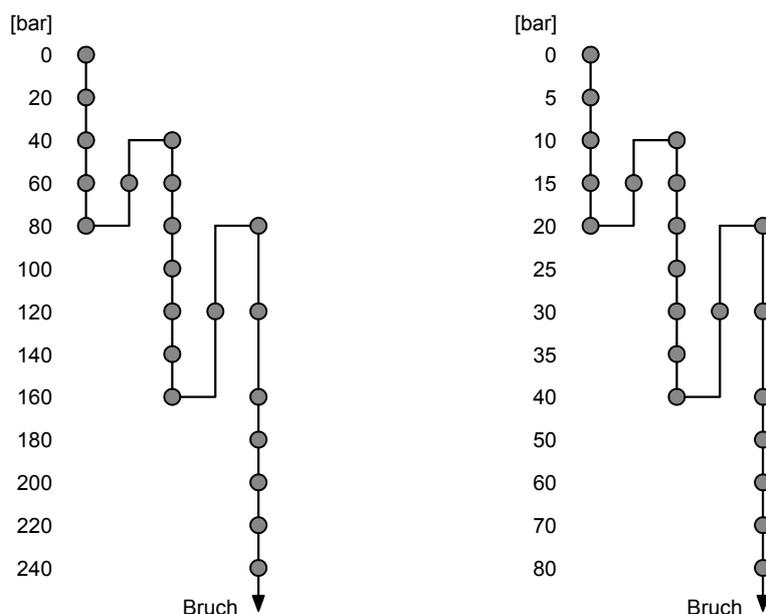
### 2.3.11 Belastungsgeschwindigkeit und Lastzyklen

Die ÖNORM EN 772-1, Abschnitt 8.2 [33] gibt an, dass zu Beginn der Versuchsdurchführung eine beliebige Belastungsgeschwindigkeit zu wählen ist. Nach Erreichen der Hälfte der erwartenden Höchstlast muss die Geschwindigkeit so eingestellt werden, dass die Höchstlast in einem weiteren Zeitraum von nicht weniger als 1 Minute erreicht wird. Weiters werden Anhaltswerte für die gewählte Belastungsgeschwindigkeit vorgeschlagen. Bei erwartenden Druckfestigkeiten der Pfeilerversuche von 11,0 bis 20,0 N/mm<sup>2</sup> wird eine Geschwindigkeit von 0,15 (N/mm<sup>2</sup>)/s empfohlen. Während der Versuchsdurchführung wird diese Empfehlung bestmöglich eingehalten. Bei zu schneller Belastung der Prüfkörper werden zu hohe Höchstlasten erreicht, die zu verfälschten Ergebnissen führen können.

Die Geschwindigkeit der Entlastung während der Lastzyklen hängt von der Größe der aktuellen Belastung ab. Bei höheren Werten der Last folgt ein schneller Lastabfall, bei geringen Werten der Last folgt ein weniger schneller Lastabfall. Bei den Druckversuchen wird zur Entlastung der Prüfkörper die Belastung gestoppt und so lange gewartet bis der Druck der Prüfpresse auf den gewünschten Wert abgefallen ist.

#### Lastzyklen bei den Pfeilerversuchen

Für die Pfeilerversuche werden im Vorfeld die Lastzyklen festgelegt, mit denen die Prüfkörper be- und entlastet werden. Bis zum Erreichen der Höchstlast gibt es zwei Entlastungsphasen, die durch gewisse Laststufen definiert sind. Im Zuge der Entlastungen werden die Proben jedoch nie zur Gänze entlastet. Aufgrund der unterschiedlichen Bruchlasten von Pfeilern mit Vollmauerziegeln und Pfeilern mit Ziegeln aus Porenbeton unterscheiden sich auch die Belastungswerte der Lastzyklen. Diese sind für die entsprechenden Materialien der Steine in Abbildung 2.15 dargestellt. Bei jeder dargestellten Belastungsstufe werden die zugehörigen Verformungen aufgezeichnet. Der Belastungsdruck entspricht dem Druck im verwendeten Zylinder der Druckprüfmaschine.



**Abb. 2.15:** Lastzyklen bei Pfeilern mit Vollmauerziegel (links) und bei Pfeilern mit Porenbetonsteinen (rechts)

## 2.4 Forschungsvorhaben F 1087

Die Magistratsabteilung 39, Versuchs- und Forschungsanstalt der Stadt Wien hat in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Wien, Institut für Hochbau und Industriebau das im Jahre 1985 vom Fachverband der Stein- und Keramischen Industrie Österreichs eingereichte *Forschungsvorhabens F 1087 – „Pfeilerversuche mit üblichen Baustoffen – neue statische Bemessung“* [13] in den Jahren 1987 bis 1989 durchgeführt. Die Genehmigung erfolgte im Jahr 1986 durch das Bundesministerium für Bauten und Technik. Das Ziel des Forschungsvorhabens war:

- Ausarbeitung einer abgesicherten Beziehung der Druckfestigkeit zwischen
  - Stein (Betonwürfel)
  - Kleinpfeiler (RILEM-Pfeiler)
  - Großpfeiler (Geschoßpfeiler)
- Erfassung des Einflusses der Schlankheit durch Versuche an überhohen Pfeilern
- Beurteilung der Auswirkungen der verschiedenen Mörtel
  - Kalkzementmörtel
  - Blähtonmörtel (wärmedämmender Leichtmörtel)
  - Perlitemörtel (hochwärmedämmender Leichtmörtel)

auf die Pfeilerdruckfestigkeit

- Beurteilung der Auswirkungen von exzentrischen Belastungen und der Knotenausbildung im Hinblick auf den Deckenendrehwinkel, die Rissanfälligkeit im Deckenanschluss und die Flächenpressung im Auflagerbereich

- Erfassung dieser Werte durch statistische Auswertung als Grundlage für ein neues statisches Bemessungskonzept

Die Versuche mit Mauerwerk und Mantelbeton wurden mit Materialien durchgeführt, die für den österreichischen Markt typisch waren. Verwendet wurden Hochlochziegel unterschiedlicher Festigkeitsklassen und Porosierungsgrade, Gasbetonsteine und Leichtbetonsteine, vermörtelt mit Kalk-Zementmörtel in drei Festigkeitsklassen, Blähton- und Leichtmauermörtel sowie Mantelbetonsteine mit Kerndicken von 12 bis 15 cm. Es wurden sowohl die Einzelkomponenten als auch ganze Mauerwerkskörper mit zentrischer und exzentrischer Lasteinleitung untersucht und sollten Ergebnisse zu den folgenden Problemstellungen liefern:

- Darstellung des Kraft-Verformungsverhaltens von Steinmauerwerk
- Ausarbeitung einer Beziehung zwischen der Druckfestigkeit von Klein- und Großpfeilern
- Erfassung der Druckfestigkeiten und statistische Bearbeitung als Grundlage der Normungsarbeit
- Beurteilung der Auswirkungen unterschiedlicher Mörtel auf die Tragfähigkeit der Wand
- Beurteilung der Auswirkung der Schlankheit bei üblichen Wandhöhen
- Beurteilung der Auswirkungen exzentrischer Lasteinleitung bei einer Exzentrizität von  $e = d/6$
- Aussagen über das Verformungsverhalten der Mauerwerksprüfkörper

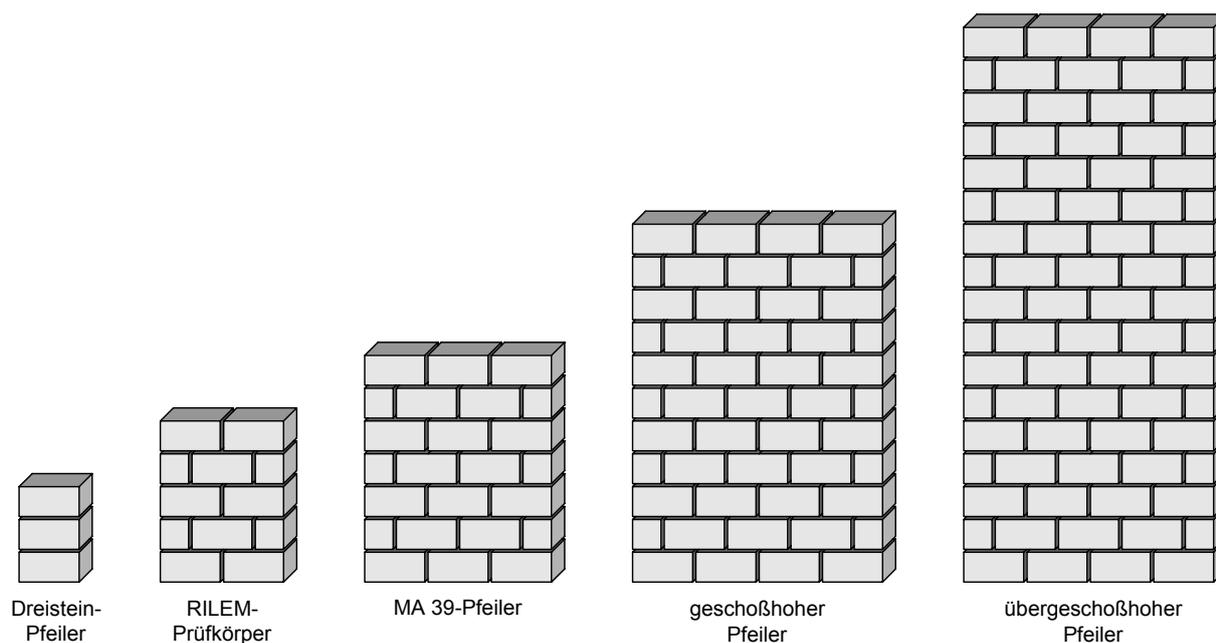
Als Pfeilerdimensionen wurden Kleinpfeiler, RILEM-Prüfkörper, Pfeiler nach Vorschlag der MA 39, geschoß- und übergeschoßhohe Pfeiler verwendet. Die Werte der Bruchfestigkeiten der Dreistein-Pfeiler konnten im Zuge der Auswertung nicht korreliert werden und wurden daher auch nicht weiter behandelt. Die ersten Versuche mit den übergeschoßhohen Pfeilern ergaben kein Versagen zufolge Stabilität. Aus finanziellen Gründen war keine weitere Ausweitung des Versuchsprogramms möglich. Daher musste der Versuchsumfang mit maximal drei unterschiedlichen Prüfkörperdimensionen begrenzt werden.

Bei Vergleich der Druckfestigkeiten zwischen RILEM-Prüfkörper, MA 39-Pfeiler und geschoßhohem Pfeiler ergibt sich ein Verhältnis von

$$f_{\text{RILEM}} : f_{\text{MA 39}} : f_{\text{geschoßhoch}} = 1,00 : 0,97 : 0,90$$

Damit bestmögliche Erkenntnisse aus den Versuchen gewonnen werden konnten, wurde im Zuge der Untersuchung der Prüfkörper der Elastizitätsmodul in und auch quer zur Belastungsrichtung gemessen. Auch die Querkzugfestigkeit und Verformungsmoduln der Mauersteine und der verschiedenen Mörtel wurden bestimmt. Nach deren Auswertung konnten im Wesentlichen die folgenden Erkenntnisse zusammenfassend gewonnen werden:

- Der verwendete Mörtel ist ausschlaggebend für die Druckspannungs-Stauchungslinie des Mauerwerkprüfkörpers. Steiferer Mörtel wie Kalkzementmörtel zeigten steilere Anstiege der Arbeitslinien im Vergleich zu weicheren Leichmörteln.
- Ab dem Bereich der Risslast tritt übermäßige Querdehnung auf und es kommt zu Spannungsumlagerungen, die eine plötzliche Änderung des Querdehnungsverhaltens in der Arbeitslinie verursachen.



**Abb. 2.16:** Prüfkörperformen bei den Mauerwerksprüfungen im Zuge des Forschungsvorhabens F 1087 [13]

- Bei den Kombinationen von Mauermörtel mit größerem Querdehnungsmodul als der des Mauersteins kommt es erst bei hohen Belastungen zu Querkzugspannungen in den Mauersteinen und somit zu höheren Tragfähigkeiten. Umgekehrt kommt es zu verhältnismäßig früherem Versagen, wenn sich der Mörtel stark verformt, der Mauerstein jedoch hohe Festigkeiten und geringe Verformungsfähigkeit aufweist.
- Der Bruch der Mauerwerksprüfkörper tritt bei Verwendung von Mauersteinen mit hohen Festigkeiten und Mauermörtel mit hohem Querdehnungsmodul plötzlich und schalgartig ein.

Die im Zuge der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuche werden ebenfalls detailliert untersucht und speziell im Hinblick auf das Kraft-Verformungsverhalten und der Auswirkungen auf die Tragfähigkeit der Wand analysiert.



# Kapitel 3

## Methodik des experimentellen Programms

Die Arbeit zielt darauf ab, die vertikale Tragfähigkeit von Mauerwerkswänden zu erhöhen. Diese Tragfähigkeitssteigerung soll dadurch erreicht werden, dass die vertikale Druckfestigkeit durch Einsatz von querdehnungsbehindernden Schichten verbessert wird. Durch die Versuche soll gezeigt werden, dass durch die Zugabe von „Bewehrungslagen“ in den Mörtelfugen die Bruchfestigkeit gesteigert werden kann. Es ist vorgesehen, dass der Widerstand von Mauerwerk durch optimierte Zwischenlagen erhöht wird. Die Idealvorstellung ist, dass Mauerwerkbauwerke, bei denen verstärkte Mörtelfugen zum Einsatz kommen, mit einem Geschoß mehr als mit herkömmlichem Ziegelmauerwerk errichtet werden können. Obwohl die Komponenten des Mauerwerks aus den gleichen Materialien hergestellt sind. Im Zuge dieser Arbeit kommt ausnahmslos Vollsteinmauerwerk zur Anwendung. Für die Verwendung an anderen Mauerwerksarten sind die Auswirkungen der „Bewehrungslagen“ noch ausreichend durch Versuche zu untersuchen. Bei den durchgeführten Versuchen ist ausschließlich die Steigerung der vertikalen Druckfestigkeit von Interesse. Die restlichen Materialparameter dürfen nicht außer Acht gelassen werden und sind entsprechend zu berücksichtigen.

### 3.1 Versuchsprogramm

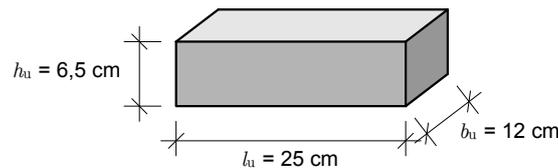
Die Tragfähigkeit von Mauerwerk hängt von zahlreichen Parametern ab, die beträchtlichen Einfluss auf diese haben. In diesem Kapitel werden die verwendeten Materialien aufgelistet und beschrieben. Im Vorfeld der Pfeilerversuche werden die wichtigsten Parameter der einzelnen Materialien untersucht und analysiert. Mit diesen Materialien erfolgen zu Beginn des experimentellen Programms Tastversuche für eine Überprüfung des Eintretens der gewünschten Wirkung. Für die Durchführung der Ermittlung der Materialparameter sind die normativ geregelten Bestimmungen und Vorgangsweisen beschrieben. Die zur Verfügung stehenden Prüfeinrichtungen sowie die Herstellung der Elemente für die Pfeilerversuche werden ebenfalls dargestellt.

### 3.2 Versuchsmaterialien

Die Tastversuche sowie auch die Pfeilerversuche werden mit unterschiedlichen Mauersteinen und Mörtelarten durchgeführt. Die Mauersteine für die ersten zwei Serien der Tastversuche sind Porenbetonsteine des Typs YTONG Planstein PP2 mit unterschiedlichen Materialien in den Mörtelfugen. Die Serie 3 der Tastversuche besteht bereits aus den Vollmauersteinen, die auch bei den Pfeilerversuchen verwendet werden. Die Pfeiler, die aus Porenbetonsteinen hergestellt werden, sind YTONG Plansteine PP4 gemäß Abschnitt 3.2.2.

### 3.2.1 Vollmauerziegel

Sämtliche Vollmauerziegel, die für das gesamte experimentelle Programm eingesetzt werden, stammen aus der gleichen Charge und wurden von der Firma *Wienerberger Ziegelindustrie GmbH* dankenswerter zur Verfügung gestellt. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, gelangt zur Herstellung von Ziegelmauersteinen das Vakuumstrangpressverfahren zur Anwendung. Der fertig aufbereitete Ton wird durch das formgebende Mundstück gepresst und auf die gewünschte Länge geschnitten. Anschließend gelangen die Mauerziegel in die Trockenkammer und werden gebrannt. Üblicherweise werden die Vollmauerziegel derart in den Verband eingebaut, dass diese in Richtung 1–1 belastet werden. Die Belastungsrichtungen sind in Abschnitt 2.3.10 definiert.



**Abb. 3.1:** Abmessungen der Vollmauerziegel aus der Charge der Firma *Wienerberger Ziegelindustrie GmbH*

Nach ÖNORM EN 771-1 [31] werden Mauerziegel in P- und U-Ziegel differenziert. Dabei steht „P“ für *protected* und „U“ für *unprotected*. P-Ziegel sind somit Mauerziegel in geschütztem Mauerwerk, wie Hochlochziegel, Langlochziegel oder Füllziegel. U-Ziegel sind alle Mauerziegel, die in ungeschütztem Mauerwerk zur Anwendung kommen, wie zum Beispiel Sichtziegel oder Klinker. Eine Unterscheidung nach der Brutto-Trockenrohddichte gibt es in den aktuell gültigen österreichischen Normen nicht mehr.

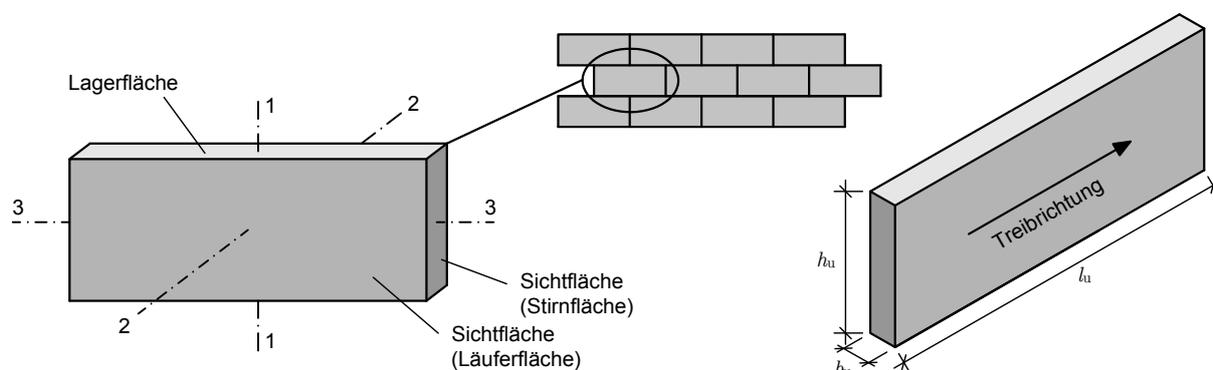
### 3.2.2 Porenbetonsteine

Nach Jäger und Marzahn [10] bestehen Porenbetonsteine aus feingemahlenem oder feinkörnigem Quarzsand, gegebenenfalls Flug- oder Hochofenschlacke, Zement und/oder Kalk als Bindemittel und Wasser sowie Treibmitteln wie Aluminiumpulver, Alaunpulver,  $\text{H}_2\text{O}_2$  oder  $\text{Ca}_2\text{C}$ . Die Zusammensetzung wird in einem Autoklaven unter Dampfdruck bei etwa 12 bar und einer Temperatur von ca. 180 °C gehärtet. Die gewünschten Eigenschaften der Porenbetonsteine sind von der genauen Zusammensetzung und vom Produktionsverfahren abhängig.

In entsprechende Gießformen wird die Zusammensetzung der Ausgangsstoffe gegossen und über mehrere Stunden warm gehalten. Das Treibmittel reagiert mit dem Kalziumhydroxid und setzt dabei Wasserstoff frei, welches den Mörtel auftreibt. Bei dieser Reaktion entstehen kugelige Poren in einer Größenordnung von 0,5 bis 2,0 mm. Noch während der Herstellung diffundiert der entstandene Wasserstoff aus den Poren aus, sodass die Poren in den erhärtenden Porenbetonsteinen nur noch mit Luft gefüllt sind. Vor dem Dampf härten in einem Autoklaven werden die Rohblöcke mit Hilfe von Drähten auf die gewünschte Größe geschnitten. Der anschließende Härtingsprozess dauert sechs bis zwölf Stunden. Der fertig hergestellte Porenbeton kommt aus chemischer Sicht dem natürlich vorkommenden Mineral Tobermorit gleich.

ÖNORM EN 771-4 [32] regelt die Festlegungen für Porenbetonsteine und definiert einen Porenbetonstein als „*Mauerstein, hergestellt aus hydraulischen Bindemitteln wie Zement und/oder Kalk und feinen, kieselsäurehaltigen Stoffen, porenbildenden Zusätzen und Wasser, und unter*

hohem Dampfdruck in Autoklaven gehärtet“. Abbildung 3.2 zeigt die Bezeichnung der Maße von verwendeten Porenbetonsteinen sowie die Belastungsrichtungen.



**Abb. 3.2:** Belastungsrichtungen, Oberflächenbezeichnungen und Maße der Porenbeton-Mauersteine (modifiziert aus ÖNORM EN 771-4 [32] für verwendete Plansteine)

Die Materialkennwerte der verwendeten Porenbetonsteine werden den diversen Produktdatenblättern der *Xella Porenbeton Österreich GmbH* entnommen und sind zusammengefasst in der Tabelle 3.1 aufgelistet. Die vom Hersteller angegebene charakteristische Wanddruckfestigkeit  $f_k$  kann aus den Produktdatenblättern nicht entnommen werden, da bei den Versuchen nicht der original vorgesehene Dünnbettmörtel verwendet wird.

**Tab. 3.1:** Ausgewählte Materialparameter der verwendeten Porenbetonsteine

Kennwert	Ytong PP 2	Ytong PP 4
Festigkeitsklasse	2	4
mittlere Steindruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	2,50	5,00
Rohdichteklasse [kg/dm <sup>3</sup> ]	0,50	0,60
mittlere Trockenrohddichte $\rho_d$ [kg/m <sup>3</sup> ]	500	500
Kennzeichnung	gelb	blau

### 3.2.3 Flexkleber als Mörtel

Schon zum Teil bei den Tastversuchen und vorwiegend bei den Pfeilerversuchen kommt *Botament M 21 Classic Flex-Leistungskleber* als Mörtel in den Lager- und Stoßfugen zum Einsatz. Die Ausgangsstoffe des Produkts basieren auf einer Zementkombination mit mineralischen Füllstoffen und Additiven. Dieser Flex-Leistungskleber ist flexibler Dünnbettmörtel und dient in der Regel zur Verlegung von Wand- und Bodenbelägen und kann auf diversen Untergründen wie Beton, Mauerwerk oder Porenbeton aufgetragen werden. Die Auswahl des Produktes basiert auf der einfachen und langen Verarbeitungszeit. Der Untergrund für die Anwendung ist trocken, sauber und frei von Fettstoffen oder Trennmitteln vorzubereiten. Tabelle 3.2 gibt Materialkennwerte gemäß Produktdatenblätter an. Weitere mittels Versuche ermittelte Parameter sind in Kapitel 4 angegeben. Abbildung 3.3 zeigt die die Masse des trockenen Flexklebers sowie die Gesamtmasse aus Flexkleber und Wasser.

**Tab. 3.2:** Ausgewählte Materialparameter von *Botament M 21 Classic Flex-Leistungskleber*

Kennwert	Botament M 21
Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	~ 1,60
Einlegezeit [h]	~ 0,50
Verarbeitungszeit [h]	~ 3,00
voll belastbar nach [d]	~ 7,00

### Anmischverhältnis

Nach einigen Probemischungen des Flexklebers zur Aufbringung als Mauermörtel auf die Vollmauerziegel stellt sich aus Gründen der Verarbeitung ein Anmischverhältnis von 1 Liter Wasser pro 2,43 kg Flexkleber in Masseteilen ein. Dieses Anmischverhältnis wird bei allen durchgeführten Versuchen gleich gehalten. Nach der Zusammenführung der Komponenten Wasser und Feststoff wird die Masse derart lange und gleichmäßig verrührt bis keine Klumpen oder sonstige Unregelmäßigkeiten mehr vorhanden sind. Trotz der ausreichend langen Verarbeitungszeit wird der frische Flexkleber schnellstmöglich eingebracht und verarbeitet.



(a) Masse des trockenen Flexklebers



(b) Masse von Flexkleber und Wasser

**Abb. 3.3:** Fotografien der Herstellung des Flexklebers

### 3.2.4 Gips als Mörtel bei Tastversuchen

Bei Baugipsen handelt es sich chemisch betrachtet um Calciumsulfat ( $\text{CaSO}_4$ ), das ursprünglich durch Verdunstung von Wasser entsteht. Durch den urzeitlichen Rückgang des Meeresspiegels blieben Ablagerungsschichten aus Gipsstein zurück. Der Gipsstein wird bis heute abgebaut, wobei heute auch künstlich gewonnener Gips zum Einsatz kommt. Der zerkleinerte und gemahlene Gips wird in Brennöfen getrocknet, wodurch ein trockenes, pulverförmiges Produkt entsteht, das vor der Verarbeitung wieder mit Wasser angerührt wird.

Im Zuge der Tastversuche Serie 1 werden unter anderem Probekörper aus Porenbetonsteinen mit Gips in der Mörtelfuge hergestellt. Beim verwendeten Gips handelt es sich um Bau- und

Elektrikergips der Firma *Knauf GmbH*. Aus den Produktdatenblättern können die in Tabelle 3.3 angeführten Kennwerte entnommen werden.

**Tab. 3.3:** Ausgewählte Materialparameter des verwendeten Bau- und Elektrikergips

Kennwert	Gips
Korngröße [mm]	bis 1,00
Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	> 6,00
Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	> 3,00
Abbindezeit [min]	ca. 5,00

### 3.2.5 Textilglasgitter als querdehnungsbehindernde Komponente

Von den Tastversuchen bis hin zu den endgültigen Pfeilerversuchen wird Textilglasgitter der Firma *Baumit GmbH* als Bewehrung in den Lagerfugen verwendet. Das alkalibeständige Textilglasgitter besteht aus kunststoffbeschichteten Glasfäden (Styrol-Butadien-Rubber). Tabelle 3.4 gibt die wesentlichen Materialkennwerte an. Abbildung 3.4 zeigt Fotografien des verwendeten handelsüblichen Textilglasgitters.

**Tab. 3.4:** Ausgewählte Materialparameter des verwendeten Textilglasgitters

Kennwert	Textilglasgitter
Maschenweite [mm]	ca. 4 x 4
flächenbezogene Masse [g/m <sup>2</sup> ]	≥ 145
Zugfestigkeit [N/50 mm]	≥ 2000
Zugfestigkeit nach Alterung [N/50 mm]	≥ 1000



(a) Gesamtansicht der Rolle



(b) Detailansicht

**Abb. 3.4:** Fotografien des Textilglasgitters der Firma *Baumit GmbH*

### 3.3 Tastversuche

Die Idee zur möglichen Festigkeitssteigerung von Mauerwerkswänden entstand durch die Tatsache, dass Baustoffe bei uniaxialer Belastung weniger Widerstand aufweisen wie die gleichen Baustoffe bei triaxialer Belastung, also bei behinderter Ausdehnung in Querrichtung zur Belastung. Daraus folgt die Überlegung, ob und wie man die Wirkung der behinderten Querdehnung möglichst einfach ins Spiel bringen kann. Aus den bekannten Bruchbildern der Baustoffe Ziegel, Beton oder Naturstein können regelmäßig seitliche Abplatzungen festgestellt werden, die durch die Ausdehnung in Querrichtung der Belastung verursacht werden. Diese Abplatzungen stellen sogleich den Bruchzustand des Baustoffes bei der aufgebrachten Druckbelastung dar. Zurück bleiben die Baustoffreste oft in Form des sogenannten „Apfelbutzens“ wie sie in Abschnitt 3.3.3 – Reststücke der Tastversuche Serie 2 – zu erkennen sind. Bei Belastungsversuchen in bautechnischen Laboren können verschiedenste Werkstoffe unter allen möglichen Spannungszuständen ohne großen Aufwand unter beinahe idealen Bedingungen geprüft werden. In der Praxis der Bautechnik kann eine Behinderung der Werkstoffausdehnung allerdings kaum gewährleistet werden.

Aus der Tatsache, dass Ziegelmauerwerk immer ein Verbundwerkstoff aus den Baustoffen Ziegelstein und Mauermörtel ist, entstand die Idee, die gleichförmigen „Unterbrechungen“ – nämlich die Mörtelfugen – zugunsten einer möglichen Querdehnungsbehinderung zu nutzen. Gemäß Abschnitt 2.3.5 ist bereits bekannt, dass die Werkstoffe im Mittelbereich der Prüfkörper durch die seitliche Ausdehnung auf Zug beansprucht werden. Um dem entgegenzuwirken, folgt, dass es möglich ist die Mörtelfugen bei Mauerwerkswänden mit einer zugfesten, dünnen Einlage – im Sinne einer Bewehrung – zu verstärken. Voraussetzung dafür ist auch eine ausreichende Druckfestigkeit der gewählten Einlage. Zugleich stand von Beginn an auch die Einfachheit in der Ausführung und die kostentechnische Sicht zur wirtschaftlichen Umsetzung im Vordergrund. Daraufhin werden in einigen Tastversuchen verschiedene Einlagen für die Mörtelfugen getestet und beobachtet, ob die gewünschte Festigkeitssteigerung überhaupt merkbar in Erscheinung treten kann.

#### 3.3.1 Tastversuche Serie 1

Für den allerersten Versuch zur Wirkung von möglichen querdehnungsbehindernden Schichten zwischen den Steinen werden jeweils zwei quaderförmige Porenbetonsteine mit den Abmessungen  $l_u/b_u/h_u = 100/100/50$  mm mit unterschiedlichen Mörtelmaterialien und unterschiedlichen Einlagen in der Mörtelfuge zusammengeklebt. Um eine erste Tendenz feststellen zu können, ob die Einlagen tatsächlich eine querdehnungsbehindernde Wirkung aufweisen, werden Porenbetonsteine mit besonders geringer Druckfestigkeit von mindestens  $2,5 \text{ N/mm}^2$  laut Hersteller herangezogen. Die verwendeten Steine eignen sich in der Praxis besonders zur Herstellung von massiven, leichten Trennwänden. Auch die einfache Bearbeitbarkeit zur Erzeugung der Probequader war entscheidend für die Verwendung der Porenbetonsteine. Es werden aus den beschriebenen Probequadern je drei Stück der gleichen Bauart mit den folgenden Mörtelschichten hergestellt:

- Mörtelfuge mit gewöhnlichem Elektrikergips
- Mörtelfuge mit Flexkleber
- Mörtelfuge mit Flexkleber und Textilglasgitter
- Mörtelfuge mit Flexkleber und Drahtgitter



Abb. 3.5: Probekörper der ersten Tastversuche Serie 1

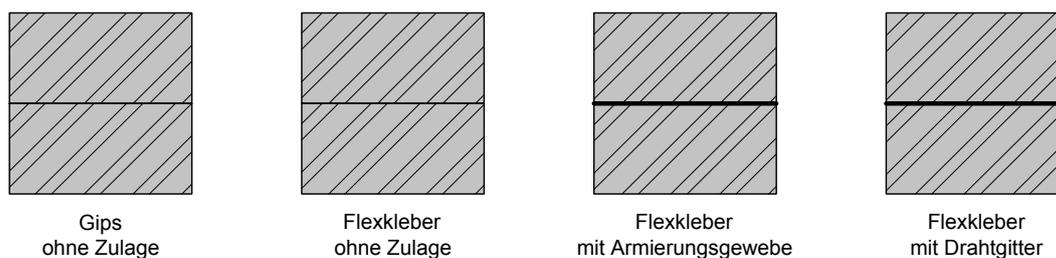


Abb. 3.6: Skizzenhafte Darstellung der Probekörper der Tastversuche Serie 1

Die Abbildungen 3.5 und 3.6 zeigen Fotografien der Prüfkörper und schematisch die verwendeten Materialien. Mit Hilfe der in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Druckprüfmaschine, die sich im bautechnischen Labor der *Dr. Pech Ziviltechniker GmbH* befindet, konnten die folgenden ersten Ergebnisse gemäß Tabelle 3.5 und Abbildung 3.7 festgestellt werden:

Tab. 3.5: Druckfestigkeiten  $f_k$  der Probekörper von Tastversuche Serie 1

Probekörper	Gips ohne Zulage [N/mm <sup>2</sup> ]	Flexkleber ohne Zulage [N/mm <sup>2</sup> ]	Flexkleber mit Textilglasgitter [N/mm <sup>2</sup> ]	Flexkleber mit Drahtgitter [N/mm <sup>2</sup> ]
1	3,32	2,75	2,76	2,21
2	2,88	2,63	3,07	3,00
3	2,98	3,04	3,18	3,08
<b>Mittelwert</b>	<b>3,06</b>	<b>2,81</b>	<b>3,01</b>	<b>2,76</b>

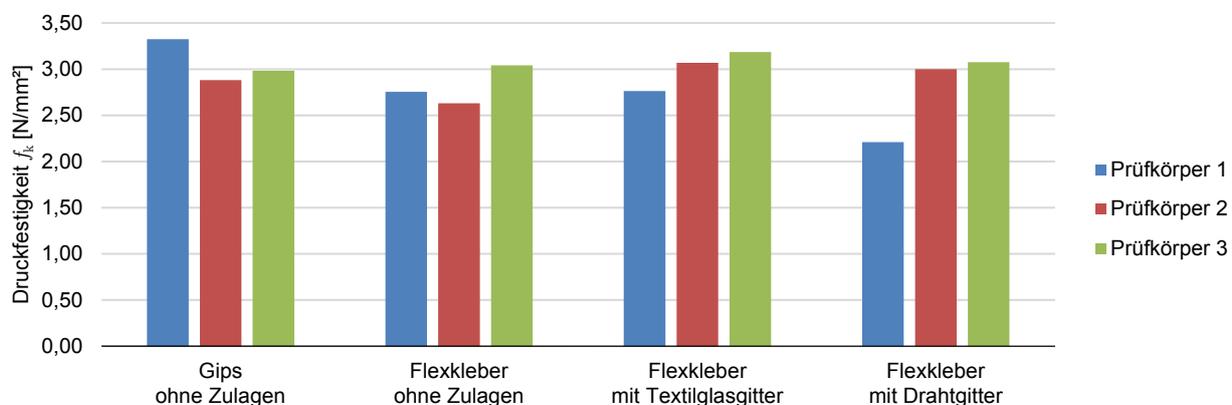


Abb. 3.7: Ergebnisse der Tastversuche Serie 1

Aus den Ergebnissen im Balkendiagramm in Abbildung 3.7 kann beobachtet werden, dass die getesteten Prüfkörper, die mit Flexkleber und eingelegtem Textilglasgitter hergestellt wurden, die gleichmäßigsten Resultate liefern. Nach der Eliminierung des Ausreißers nach oben in der Reihe der Prüfkörper mit gewöhnlicher Gipsfuge ergibt sich für die Reihe mit dem Textilglasgitter in der Fuge auch die höchste Druckfestigkeit. Zudem spricht der einfache Zuschnitt und die problemlose Verlegung für die Verwendung des Textilglasgitters.

Vor der Belastung durch die Hydraulikprüfmaschine wurde vermutet, dass die Probekörper mit Blitzzement und Drahtgitter die höchsten Druckfestigkeitswerte liefern sollten. Aus den Ergebnissen und den danach übrig gebliebenen Bruchbildern kann die Erkenntnis gewonnen werden, dass durch die geringe Festigkeit der Porenbetonsteine und die große Steifigkeit des Drahtgitters Kantenpressungen entstehen und zu einem früheren Versagen führen können. Die Kombination aus Vollziegelsteinen und eingelegtem Drahtgitter in der Mörtelfuge wird folglich im Zuge dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

### 3.3.2 Tastversuche Serie 2

Aufgrund der zuvor genannten Erkenntnisse der ersten Prüferserie kommt bei der zweiten Prüferserie nur noch das Textilglasgitter als querdehnungsbehindernde Einlage zur Anwendung. Es werden die gleichen Porenbetonsteine wie in der ersten Prüferserie mit einer Mindestdruckfestigkeit von  $2,5 \text{ N/mm}^2$  laut Hersteller verwendet sowie auch der gleiche Flexkleber mit identem Mischungsverhältnis (siehe Abschnitt 3.2.3). Diesmal sind jedoch alle Prüfkörper mit gleichem Mörtel und gleichem Textilglasgitter ausgeführt. Jeder der Prüfkörper hatte ursprünglich eine Höhe von 20 cm und eine Grundfläche mit 10 cm Länge und 10 cm Breite. Diese Quader aus Porenbeton werden mit folgender Anzahl an Fugen hergestellt:

- Keine Fuge im gesamten Prüfkörper
- 1 Fuge in der Mitte des ursprünglichen Quaders
- 2 Fugen in den Drittelpunkten des ursprünglichen Quaders
- 3 Fugen in den Viertelpunkten des ursprünglichen Quaders

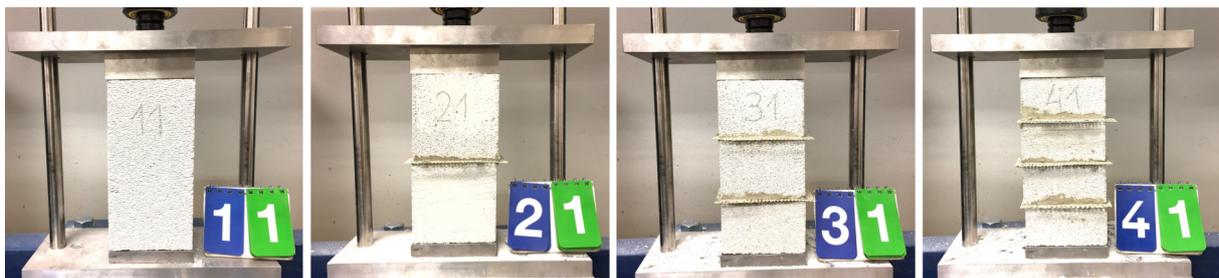
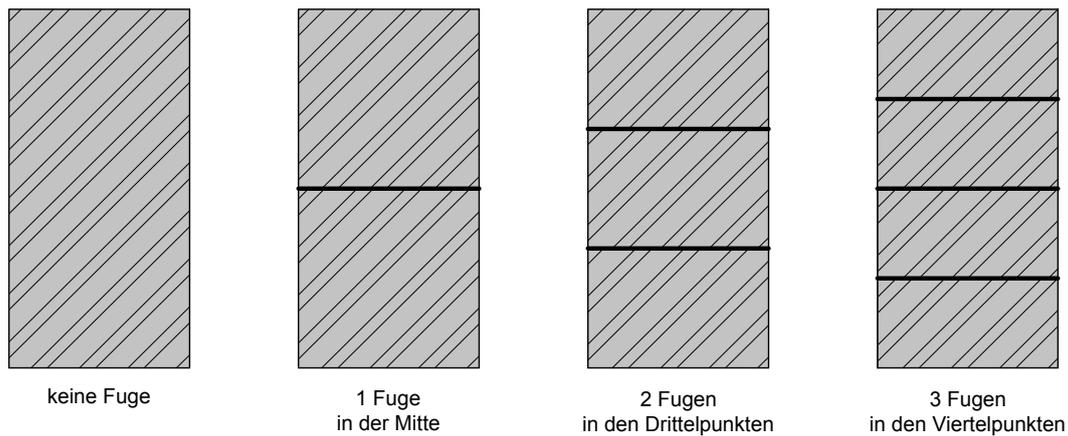


Abb. 3.8: Probekörper der Tastversuche Serie 2

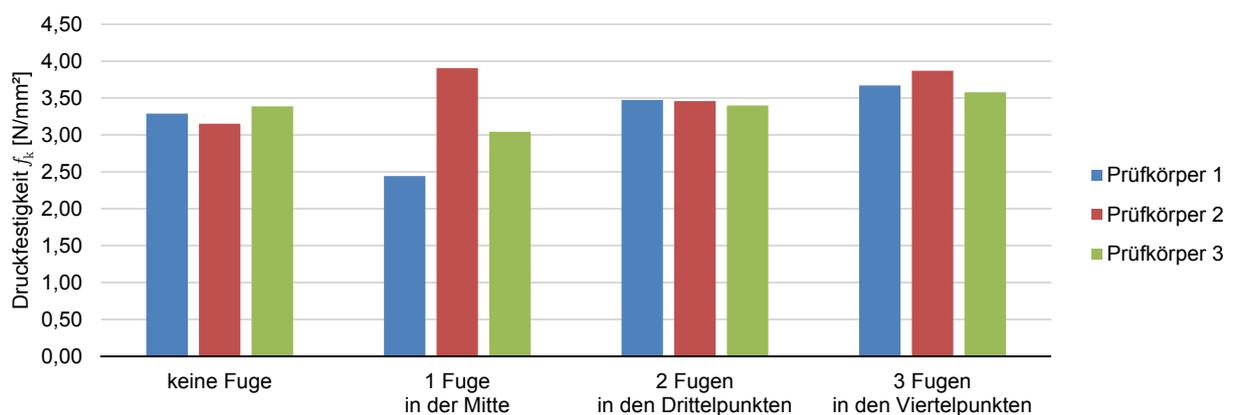


**Abb. 3.9:** Skizzenhafte Darstellung der Probekörper der Tastversuche Serie 2

Die Abbildungen 3.8 und 3.9 zeigen Fotografien der Prüfkörper und schematisch die Anzahlen der Mörtelfugen. Je drei Stück gleicher Bauart bilden die in Tabelle 3.6 aufgelisteten Mittelwerte. Vor der Belastung durch die Druckprüfmaschine wird erwartet, dass die Körper mit drei querdehnungsbehindernden Schichten die höchsten Druckfestigkeiten erreichen.

**Tab. 3.6:** Druckfestigkeiten  $f_k$  der Probekörper von Tastversuche Serie 2

Probekörper	keine Fuge [N/mm <sup>2</sup> ]	1 Fuge in der Mitte [N/mm <sup>2</sup> ]	2 Fugen in den Drittelpunkten [N/mm <sup>2</sup> ]	3 Fugen in den Viertelpunkten [N/mm <sup>2</sup> ]
1	3,29	2,44	3,47	3,67
2	3,15	3,90	3,46	3,87
3	3,39	3,04	3,40	3,58
<b>Mittelwert</b>	<b>3,28</b>	<b>3,13</b>	<b>3,44</b>	<b>3,71</b>



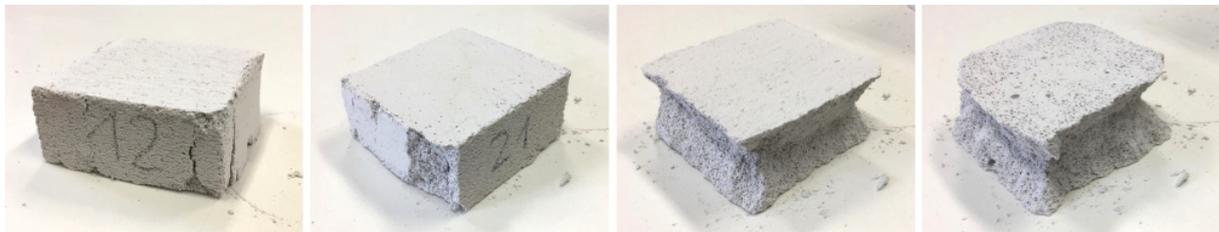
**Abb. 3.10:** Ergebnisse der Tastversuche Serie 2

Aus den Ergebnissen (siehe Tabelle 3.6) ist zu erkennen, dass die Probekörper mit nur einer Fuge sehr unterschiedliche Werte aufweisen. Diese Unregelmäßigkeiten können jedoch durch

geometrische Ungenauigkeiten bei der Herstellung hervorgerufen werden. Die restlichen 3er-Serien liefern sehr konstante Ergebnisse und zeigen mit zunehmender Fugenanzahl steigende Druckfestigkeitswerte. Bei der Reihe mit der stärksten Querdehnungsbehinderung setzt das Bruchversagen wie erhofft erst später ein als beim Rest der Prüfserie. Das Balkendiagramm in Abbildung 3.10 verdeutlicht die Erhöhung der Tragfähigkeit der Prüfkörper mit 3 Fugen im Vergleich zu den unbewehrten Prüfkörpern.

### 3.3.3 Reststücke der Tastversuche Serie 2

Da die originalen Porenbeton-Plansteine eine Höhe von 25 cm aufweisen, bleibt bei jedem Quader ein ca. 5 cm hohes Reststück übrig. Diese Stücke werden ebenfalls mit der Druckprüfmaschine abgedrückt und den Probekörpern der Tastversuche Serie 2 zugeordnet. Das Ziel dabei war herauszufinden, welche Werte der Steindruckfestigkeit erreicht werden, wenn an der Oberseite und der Unterseite des Steins volle Querdehnungsbehinderung durch die Kontaktflächen der anliegenden Stahlplatten der Hydraulikprüfmaschine wirkt.



**Abb. 3.11:** Reststücke der Tastversuche Serie 2 nach der Prüfung

An den untersuchten Bruchbildern der abgedrückten Reststücke ist sehr gut ersichtlich, dass es immer in der Mitte des Probestückes zu einem Abplatzen der Seitenflächen kommt (siehe Abbildung 3.11). Die Ober- und Unterseite bleibt jeweils durch die behinderte Querdehnung durch den Kontakt mit den Stahlplatten erhalten. Dies kann als Indiz der wirkenden Querdehnungsbehinderung verstanden werden. Beim Probekörper Nummer 33 wurde das Reststück bei der Herstellung zu stark beschädigt, um es noch mit der Prüfpresse belasten zu können. Tabelle 3.7 und Abbildung 3.12 stellen die Ergebnisse der untersuchten Reststücke dar.

**Tab. 3.7:** Druckfestigkeiten der Reststücke von Tastversuche Serie 2

Probekörper	keine Fuge [N/mm <sup>2</sup> ]	1 Fuge in der Mitte [N/mm <sup>2</sup> ]	2 Fugen in den Drittelpunkten [N/mm <sup>2</sup> ]	3 Fugen in den Viertelpunkten [N/mm <sup>2</sup> ]
1	3,41	3,28	3,92	3,30
2	3,66	4,01	3,37	3,47
3	3,46	4,14		4,06
<b>Mittelwert</b>	<b>3,51</b>	<b>3,81</b>	<b>3,65</b>	<b>3,61</b>

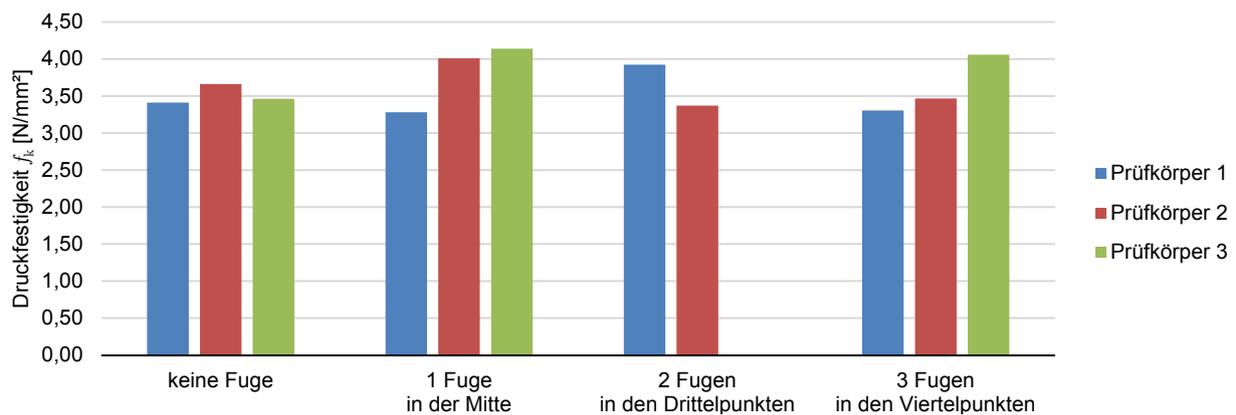


Abb. 3.12: Ergebnisse der Reststücke von Tastversuche Serie 2

### 3.3.4 Tastversuche Serie 3

In der dritten Prüferserie der Tastversuche werden bereits jene Ziegelabmessungen und auch jene Mischverhältnisse des Mörtels herangezogen, die später bei den Pfeilerversuchen zur Anwendung kommen. Die Abmessungen der zugeschnittenen Ziegel betragen  $l_u/b_u/h_u = 100/48/25$  mm. Durch den Vorgang des Zuschneites der Steine können minimale Abweichungen entstehen, die aber im Rahmen der normativ geregelten Grenzwerte bleiben. Bei der Herstellung der Prüfkörper sind diese Abweichungen durch die Mörtelfugen auszugleichen, um die Geometrie ausreichend genau einzuhalten. In jeder Lage liegen zwei Steine mit einer Stoßfuge von circa 4 mm nebeneinander. In der darüberliegenden Lage werden die Steine um 90 Grad gedreht daraufgesetzt. Die Lagerfuge weist eine Dicke von 2 bis 3 mm auf. Die Grundfläche der Prüfkörper ergibt sich durch die Länge der Steine immer zu  $100\text{ cm}^2$ . Bei der dritten Serie der Tastversuche kommen lediglich Vollmauersteine nach Abschnitt 3.2.1 zur Anwendung. Bei diesen abschließenden Tastversuchen soll ein letztes Mal getestet werden, ob die Querdehnungsbehinderung mit Hilfe von eingebautem Textilglasgitter in den Lagerfugen tatsächlich eine gewünschte Tragfähigkeitserhöhung erzielen kann. Deshalb werden fünf Lagen Vollmauersteine übereinander hergestellt. Der erste Probekörper ist komplett ohne Textilglasgitter hergestellt und der zweite mit je einer Lage des Gitters in jeder Lagerfuge (siehe Abbildung 3.13). Der zweite Probekörper ist demnach mit dem maximal möglichen „Bewehrungsgrad“ ausgestattet.



Abb. 3.13: Probekörper der Tastversuche Serie 3 mit den Messeinrichtungen (links unbewehrt, rechts bewehrt)

Bei der Festigkeitsprüfung der beiden Proben finden zur Bestimmung des Querdehnungsverhaltens Dehnungsaufnehmer gemäß Abschnitt 3.5.3 Anwendung, wobei Verformungen in Querrichtung über der Stoßfuge gemessen werden. Die Dehnungsaufnehmer sind stets am mittleren Stein

befestigt. Damit ist eine Feststellung der Dehnungen entlang der Lagerfugen möglich. Im Vorfeld der Versuchsdurchführung wird folgender Belastungszyklus festgelegt:

- Belastung auf 50 bar
- Entlastung auf 0 bar
- Belastung bis zum Bruch

Vor der Versuchsdurchführung wird die rechnerische charakteristische Wanddruckfestigkeit des unbewehrten Probekörpers mit Hilfe der allgemein gültigen Formel für die Mauerwerksdruckfestigkeit laut ÖNORM EN 1996-1-1 [30] ermittelt. Die Beschreibung der Beiwerte und Exponenten ist Abschnitt 3.4.5 zu entnehmen. Die charakteristischen Festigkeiten der verwendeten Materialien können den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.3 entnommen werden.

$$f_k = 0,8 \cdot K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta = 0,8 \cdot 0,60 \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25} \quad (3.1)$$

Nach Auswertung der durchgeführten Versuche ergeben sich die in Abbildung 3.14 dargestellten Arbeitslinien in Querrichtung zur Belastung. Für den Probekörper, der ohne Textilglasgitter hergestellt ist, kann nach der Belastung bis zum Bruch durch Auswertung der mit Hilfe eines Dehnungsaufnehmers gemessenen Querdehnung der Querdehnungsmodul berechnet werden. Die Berechnung ist beispielhaft in den folgenden Formeln durchgeführt:

$$\varepsilon_{q,\text{unbewehrt}} = L - L_0 = 50,005 - 50,000 = 0,005 \text{ mm} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{\text{unbewehrt}} = \frac{F_{\max}}{A_0} = \frac{23\,300}{9958,35} = 2,340 \text{ N/mm}^2 \quad (3.3)$$

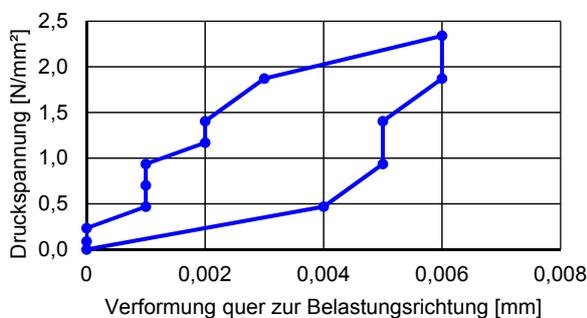
$$E_{q,p,\text{unbewehrt}} = \frac{\sigma_{\text{unbewehrt}}}{\varepsilon_{q,\text{unbewehrt}}} = \frac{2,340}{0,00010} = 23\,400,00 \text{ N/mm}^2 \quad (3.4)$$

Der Querdehnungsmodul des Probekörpers mit Textilglasgitter in allen Lagerfugen ergibt sich wie folgt:

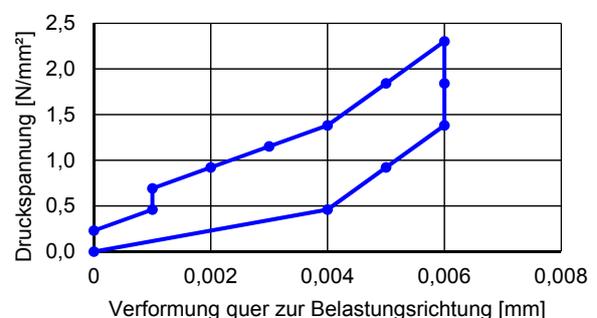
$$\varepsilon_{q,\text{bewehrt}} = 50,006 - 50,000 = 0,006 \text{ mm} \quad (3.5)$$

$$\sigma_{\text{bewehrt}} = \frac{23\,300}{10\,120,20} = 2,302 \text{ N/mm}^2 \quad (3.6)$$

$$E_{q,p,\text{bewehrt}} = \frac{2,302}{0,00012} = 19\,183,33 \text{ N/mm}^2 \quad (3.7)$$



(a) unbewehrter Probekörper



(b) vollständig bewehrter Probekörper

**Abb. 3.14:** Arbeitslinien quer zur Belastungsrichtung der Probekörper von Tastversuche Serie 3

Abbildung 3.15 zeigt Fotografien nach dem Bruch der beiden Probekörper.



(a) unbewehrter Probekörper

(b) vollständig bewehrter Probekörper

**Abb. 3.15:** Bruchbilder der beiden Probekörper von Tastversuche Serie 3

Bei der Belastung bis zum Bruch der Probekörper werden die in Tabelle 3.8 angegebenen Belastungen erreicht. Die Arbeitslinien quer zur Belastungsrichtung sind in Abbildung 3.14 dargestellt. Die genauen Abmessungen der beiden Probekörper sind der Tabelle 3.9 zu entnehmen.

**Tab. 3.8:** Bruchlasten der Probekörper von Tastversuche Serie 3

Probekörper	Stempeldruck [bar]	Kraft $F$ [kN]	Bruchspannung $\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Steigerung [-]
unbewehrt	207,40	96,65	9,71	<b>1,00</b>
bewehrt	245,00	114,17	11,28	<b>1,16</b>

**Tab. 3.9:** Abmessungen der Probekörper von Tastversuche Serie 3

Probekörper	Breite i. M. [mm]	Länge i.M. [mm]	Fläche [mm <sup>2</sup> ]	Höhe [mm]
unbewehrt	98,50	101,10	9958,35	130,30
bewehrt	101,00	100,20	10 120,20	131,40

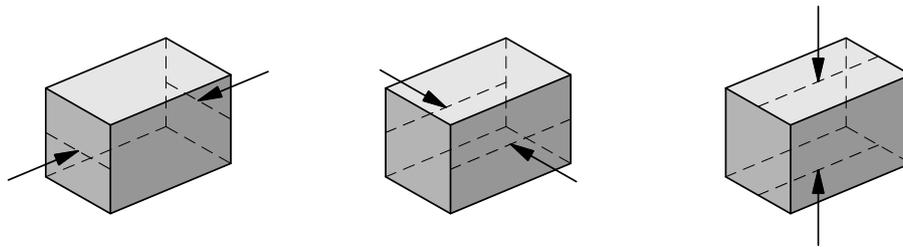
Aus diesen Ergebnissen kann wieder erkannt werden, dass sich die Wirkung der Lagerfugenbewehrung mittels Textilglasgitter positiv auf die Festigkeit von Mauerwerkswänden auswirken kann. Dieses Phänomen soll in der vorliegenden Arbeit durch eine große Reihe an durchgeführten Experimenten wissenschaftlich belegt werden.

### 3.4 Methoden zur Bestimmung der Materialparameter

Die folgenden Abschnitte beschreiben die normativen Vorgangsweisen zur Bestimmung der jeweiligen Parameter. Aufgelistet sind jene Kennwerte, die zur Auswertung der vorliegenden Arbeit von großer Bedeutung sind.

#### 3.4.1 Abmessungen und Rohdichte

Die Maße eines Mauerziegels werden in der Reihenfolge Länge, Breite und Höhe in mm angegeben. Gemäß ÖNORM EN 771-1, Abschnitt 5.3.1.1 [31] ist für die Abmessungen der Mauerziegel das Messverfahren b nach ÖNORM EN 772-16 [34] anzuwenden, da mehr als zwei Sollmaße der Ziegel nicht größer als 250 mm (Länge), 125 mm (Breite) und 100 mm (Höhe) sind. Für die Messungen wird ein digitaler Messschieber mit übergreifenden Schenkeln verwendet. Die Schenkel der Messschieber werden entlang der strichlierten Linie, wie in Abbildung 3.16 dargestellt, geführt. Die verwendete digitale Schublehre genügt mit einem maximalen Messfehler von 0,1 mm den Anforderungen der ÖNORM EN 772-16 [34].



**Abb. 3.16:** Messverfahren b zur Ermittlung der Maße eines Mauerziegels (sinngemäß nach ÖNORM EN 772-16 [34])

Zur Bestimmung der Masse  $m$  der Mauerziegel wird die Waage *Sartorius GP 3202-OCE* der *Dr. Pech Ziviltechniker GmbH* verwendet. Die Waage weist eine deklarierte Messgenauigkeit von 0,01 g auf. Durch das zuvor beschriebene Messverfahren kann das Volumen der Mauerziegel ermittelt werden, womit auf die Rohdichte  $\rho$  durch die Beziehung  $\rho = m/V$  geschlossen werden kann.

#### 3.4.2 Ebenheit und Planparallelität der Lagerflächen

Unreinheiten und überflüssige Materialien, die infolge des Herstellungsverfahrens am Stein haften oder über die planmäßigen Flächen des Mauersteines überstehen, müssen vor der Prüfung entfernt werden. Sämtliche Verunreinigungen oder Unregelmäßigkeiten führen zu ungleichmäßiger Krafteinleitung oder zu Kantenpressungen, die sich negativ auf den Messwert der Druckfestigkeit auswirken können. Die Ebenheit von Mauersteinen ist gemäß ÖNORM EN 772-20 [35] zu prüfen und zu gewährleisten.

Für die Gewährleistung einer gleichmäßigen Krafteinleitung, um tatsächlich einen einaxialen Spannungszustand zu erzielen, ist auf die Planparallelität der Lagerflächen zu achten. Schiefstellungen können ein zusätzliches Moment verursachen und die Ergebnisse der Messwerte stark beeinflussen. Es sind auch die Prüfkörper exakt unter der Last zu positionieren, sodass keine

Versatzmomente entstehen. Die Anforderungen an die Ebenheit und Planparallelität sind in ÖNORM EN 772-1, Abschnitt 7.2 [33] geregelt.

### 3.4.3 Steindruckfestigkeit

Die Bestimmung der Druckfestigkeit von Mauersteinen ist in ÖNORM EN 772-1 [33] geregelt. Jeder Prüfkörper wird bis zum Bruch ohne Entlastungsphase mit konstanter Geschwindigkeit belastet. Daher kann jeder Prüfkörper nur einmalig verwendet werden. Die erreichte Höchstlast wird registriert. Die Konditionierung der Prüfkörper vor der Prüfung erfolgt gemäß Abschnitt 7.3 der besagten Norm. Die Belastungsgeschwindigkeit bei der Versuchsdurchführung ist gemäß Abschnitt 8.2 der ÖNORM EN 772-1 [33] wie in Abschnitt 2.3.11 zu wählen. Der Bruttowert der belasteten Fläche wird durch Multiplizieren der Länge mit der Breite des Prüfkörpers bestimmt. Die Auflagerflächen werden vor der Prüfung gesäubert und von losem Staub befreit. Die Positionierung der Prüfkörper erfolgt zentrisch auf der Platte, um eine gleichmäßige Belastung zu erzielen. Aufgrund der unterschiedlichen Steindruckfestigkeiten von Porenbeton und Vollmauerziegel erfolgen die Druckversuche mit den Zylindern RC-306 bzw. RC-1010, da die Anzeige der Skala so zu wählen ist, dass die angezeigte Bruchlast des Prüfkörpers ein Fünftel des Endausschlags der Skala überschreitet. Die Festigkeit des Prüfkörpers errechnet sich durch Division der erreichten Höchstlast durch die belastete Fläche. Die Steindruckfestigkeit der Mauersteine ergibt sich aus dem Mittelwert der Festigkeit der einzelnen Prüfkörper. Der Variationskoeffizient wird ebenfalls ermittelt.

Zur Bestimmung der normierten Druckfestigkeit erfolgt zuerst eine Umrechnung der Festigkeit der Mauersteine in eine äquivalente Druckfestigkeit für den lufttrockenen Zustand. Die Druckfestigkeit der Mauersteine in lufttrockenem Zustand wird mit dem Formfaktor  $\delta$  multipliziert, um die geprüften Maße der Prüfkörper zu berücksichtigen. Die Faktoren zur Berücksichtigung der Konditionierung und die Formfaktoren  $\delta$  werden gemäß Anhang A, Tabelle A.1 der ÖNORM EN 772-1 [33] angewendet.

### 3.4.4 Mörteldruckfestigkeit

Die Bestimmungen zum Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk sind in der ÖNORM EN 1015-11 [28] festgelegt. Die Belastung der Prüfkörper erfolgt kontinuierlich bis zum Bruch. Nach zentrischer Positionierung der Probekörper an den gesäuberten Auflagerflächen der Druckprüfmaschine ist die Belastung mit dem Stempelzylinder möglich. Mittels Kreisflächenberechnung wird der Bruttowert der belasteten Fläche mit Hilfe des Mittelwerts aus Länge und Breite der Probekörper bestimmt. Länge sowie Breite entsprechen dem Durchmesser der Proben. Die Werte für die Festigkeit ergeben sich aus dem Quotient von erreichter Höchstlast und belasteter Fläche.

Zur Bestimmung der normierten Mörteldruckfestigkeit erfolgt zuerst eine Umrechnung mittels Formfaktor auf eine Festigkeit, die auf einen Würfel mit Seitenlängen von 100 mm bezogen ist. Aus dieser Festigkeit erfolgt eine neuerliche Umrechnung mittels Formfaktor auf die normierte Mörteldruckfestigkeit. Die normierte Mörteldruckfestigkeit ist – wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben – auf das Reststück der Mörtelprismen bezogen, die nach der Biegezugfestigkeitsprüfung übrig bleiben.

### 3.4.5 Wanddruckfestigkeit

Die ÖNORM B 1996-1-1 [24] gibt an, dass die Ermittlung der Mauerwerksdruckfestigkeit nach Vorgangsweise (i) der ÖNORM EN 1996-1-1, Abschnitt 3.6.1.2 (1) [30] erfolgt. Sofern keine projektspezifischen Versuche durchgeführt werden, ist die rechnerische Ermittlung der charakteristischen Druckfestigkeit des Mauerwerks in Abhängigkeit von der Mauersteingruppe und vom Mauermörtel nach Formel (3.8) durchzuführen.

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (3.8)$$

Der Beiwert  $K$  und die Exponenten  $\alpha$ ,  $\beta$  sind in Tabelle 2 der ÖNORM B 1996-1-1 [24] festgelegt. Des Weiteren ist festgehalten, dass bei Verwendung von Leichtmörtel keine Steindruckfestigkeit größer  $15 \text{ N/mm}^2$  in Rechnung gestellt werden darf. Werden Mauersteine mit Normalmörtel vermauert oder gibt es Mörtelfugen parallel zur Wandebene, dann ist der Wert von  $f_k$  um 20 % abzumindern. Für die Mörteldruckfestigkeit  $f_m$  darf maximal ein Wert von  $20 \text{ N/mm}^2$  oder  $2 \cdot f_b$  in Rechnung gestellt werden, wobei der kleinere Wert maßgebend ist.

Die ÖNORM EN 1052-1 [29] legt das Verfahren zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Mauerwerk fest. Darin sind Anleitungen zur Prüfkörperherstellung, zur Konditionierung, zur Prüfmaschine, zum Prüfverfahren, zum Berechnungsverfahren und zur Angabe des Prüfberichtes enthalten. Bei der Bestimmung sind mindestens drei Prüfkörper zu verwenden und zu untersuchen. Die Prüfkörper sind einmalig bis zum Bruch zu belasten, wobei die Belastung stetig zu steigern ist, sodass der Bruch 15 bis 30 Minuten nach Belastungsbeginn eintritt. Die erreichte Druckfestigkeit jedes einzelnen Prüfkörpers ist nach Formel (3.9) zu ermitteln.

$$f_i = \frac{F_{i,\max}}{A_i} \quad (3.9)$$

Zufolge ÖNORM EN 1996-3 [25] ist der Bemessungswert des vertikalen Tragwiderstands einer Mauerwerkswand nach Formel (3.10) zu ermitteln.

$$N_{\text{Rd}} = \Phi_s \cdot f_d \cdot A \quad (3.10)$$

Für Innenwände ergibt sich der Abminderungsbeiwert  $\Phi_s$  wie folgt:

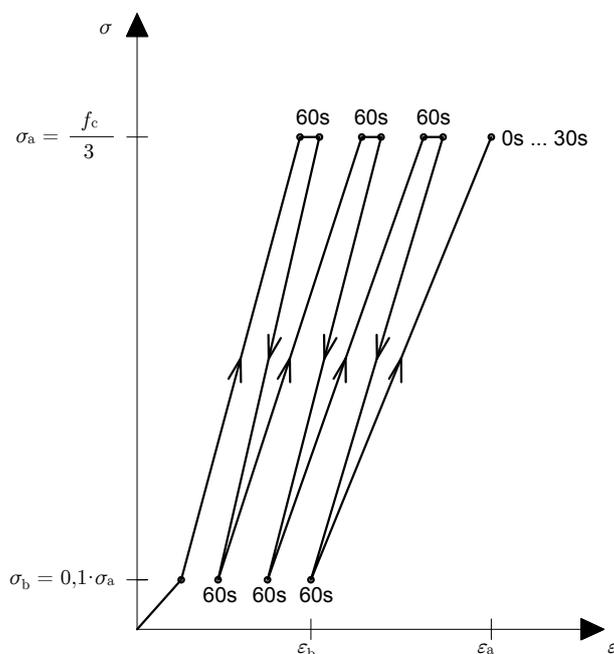
$$\Phi_s = 0,85 - 0,0011 \cdot \left( \frac{h_{\text{ef}}}{t_{\text{ef}}} \right)^2 \quad (3.11)$$

Für eine einschalige Wand entspricht die effektive Wanddicke  $t_{\text{ef}} = t$ .

### 3.4.6 Elastizitätsmodul von Stein, Mörtel und Pfeiler

Eine exakte Methode zur Bestimmung der Elastizitätsmoduln der Komponenten Mauerstein und Mauermörtel ist nicht normativ geregelt. Gemauerten Wänden wird für vereinfachte Berechnungen ein linear-elastisches Formänderungsverhalten unterstellt. Frühere Versuche sowie auch die Auswertung des Forschungsvorhabens F 1087 [13] zeigten jedoch ein elasto-plastisches Verhalten, ganz besonders bei Verwendung von Leichtmörtel.

Aufgrund dieser in Österreich nicht genormten Bestimmung der Elastizitätsmoduln der Komponenten Mauerstein und Mörtel, wird nach ähnlichen Verfahrensbestimmungen gesucht. Im Betonbau definiert die ÖNORM B 3303 [27] den statischen Elastizitätsmodul als Quotient der Spannungsdifferenz und der Dehnungsdifferenz zwischen einer Vorlast  $\sigma_b = 0,1 \cdot \sigma_a$  und einer Oberlast von  $\sigma_a$  entsprechend einem Drittel der voraussichtlichen Probendruckfestigkeit (siehe Abbildung 3.17).



**Abb. 3.17:** Belastungszyklus zur Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls nach ÖNORM B 3303 [27]

Der statische Elastizitätsmodul ist aus dem Mittelwert der im Messzyklus unter den Laststufen  $\sigma_a$  und  $\sigma_b$  ermittelten Dehnungen nach Formel (3.12) zu bestimmen.

$$E_b = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\epsilon_a - \epsilon_b} \quad (3.12)$$

Zur Bestimmung der Abmessungen werden digitale Messschieber mit übergreifenden Schenkeln verwendet. Für eine ausreichende Genauigkeit der Probenabmessungen wird das Messverfahren b nach ÖNORM EN 772-16 [34] angewendet. Die belastete Fläche errechnet sich bei Rechteckkörpern durch Multiplikation von Länge und Breite und bei Zylinderproben mittels bekannter Formel zur Kreisflächenberechnung  $A = (d^2 \cdot \pi) / 4$ . Die Druckspannung in der Probe ergibt sich aus dem Quotient der aufgebrauchten Kraft und der aus den Abmessungen ermittelten Ausgangsfläche. Die relative Stauchung des Probekörpers ergibt sich durch Division der Längenänderung durch die Ausgangslänge in Belastungsrichtung der Probe.

Die Methoden und Belastungszyklen, die zur Prüfung des Elastizitätsmoduls bei den Komponenten Mauerstein und Mauermörtel sowie bei den Mauerwerkspfeylern angewendet werden, sind in den Abschnitten 4.6 und 5.2.4 angegeben.

### Mauersteine

Gemäß Mauerwerk-Kalender 2015 [9] ist nach DIN 18554-1 [22] der Druck-Elastizitätsmodul von Mauersteinen als Sekantenmodul bei einem Drittel der Höchstspannung (Druckspannung senkrecht zu den Lagerfugen) und einmaliger Belastung nach Formel (3.13) definiert.

$$E_D = \frac{\max \sigma_D}{3 \cdot \varepsilon_1} \quad (3.13)$$

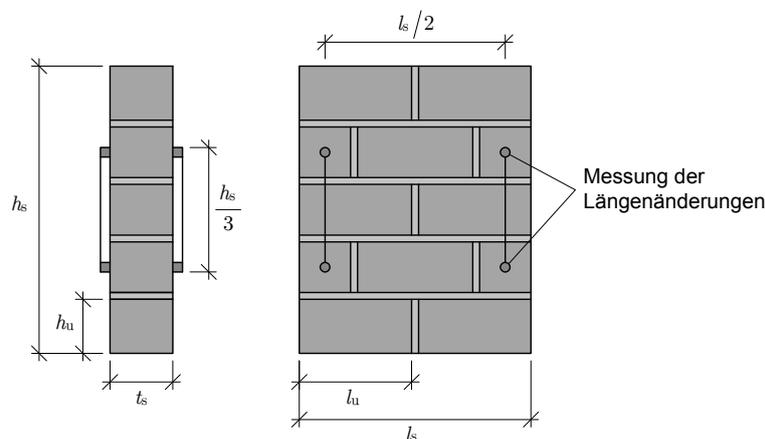
$\varepsilon_1$  entspricht der Längsdehnung bei einem Drittel von  $\max \sigma_D$ .

### Mauermörtel

Der Druckelastizitätsmodul für Mauermörtel wird gemäß Mauerwerks-Kalender 2015 [9] nach DIN 18555-4 [23] in der Regel zusammen mit dem Querdehnungsmodul ermittelt. Aus vorliegenden Versuchsergebnissen lässt sich für Normalmörtel die Beziehung zwischen Elastizitätsmodul und Mörteldruckfestigkeit nach Formel (2.12) angeben.

### Mauerwerk

Die ÖNORM EN 1052-1 [29] gibt eine Vorgangsweise für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Mauerwerksprüfkörpern an. Darin ist beschrieben, dass zur Messung der Längenänderung geeignete Messstrecken gemäß Abbildung 3.18 anzubringen sind. Die aufgebrachte Druckkraft muss in mindestens drei gleichen Stufen aufgebracht werden, bis die Hälfte der erwarteten Bruchlast erreicht ist. Bei Erreichen jeder der drei Stufen ist die Druckkraft für  $2 \pm 1$  Minuten konstant zu halten. Nach den Messungen der dritten Laststufe ist die Druckkraft bei einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit bis zum Bruch zu steigern, sodass die Höchstkraft nach 15 bis 30 Minuten erreicht ist.



**Abb. 3.18:** Messung der Längenänderungen von Mauerwerksprüfkörpern nach ÖNORM EN 1052-1 [29]

### 3.4.7 Querdehnungsmodul

Der Kennwert des Querdehnungsmoduls  $E_{q,p}$  bei Druckbeanspruchung hat wesentlichen Einfluss auf die vertikale Tragfähigkeit von Mauerwerk. Das Verhältnis der Querdehnungsmoduln von Mauerstein und Mauermörtel sollte aufeinander abgestimmt sein. Andernfalls kann es zu erhöhten

Querzugspannungen in den Mauersteinen kommen, was wiederum zu früherem Versagen führen kann. Da es normativ keine Regelungen zur Bestimmung des Querdehnungsmoduls weder von Mauerwerk noch von den Komponenten Mauerstein und Mauermörtel gibt, werden die Versuche wie nachfolgend beschrieben durchgeführt. Die Vorgangsweise ist dabei ähnlich zu der Bestimmung des Elastizitätsmoduls. Die Messung der Querdehnungen erfolgt an allen Prüfkörpern gleichzeitig mit der Bestimmung des Elastizitätsmoduls.

### Mauersteine

Der Querdehnungsmodul ist definiert als Sekantenmodul bei einem Drittel der erreichten Höchstspannung des geprüften Mauersteins bei einmaliger Belastung. Unterschieden wird nach der jeweiligen Belastungsrichtung des Mauersteins.

$$E_{q,p} = \frac{\max \sigma_D}{3 \cdot \varepsilon_q} \quad (3.14)$$

$\varepsilon_q$  entspricht der Querdehnung bei einem Drittel von  $\max \sigma_D$ .

### Mauermörtel

Aus der Herstellung der mit Flexkleber gefüllten Mörtelprismen zur Ermittlung des Verformungsverhaltens ergibt sich eine homogene Masse, die isotropes Verhalten aufweist. Es kommt daher zu keiner Unterscheidung der Belastungsrichtungen. Der Querdehnungsmodul ergibt sich wie bei den Mauersteinen gemäß Formel (3.14).

### Mauerwerk

Die Messung des Querdehnungsmoduls der Mauerwerks Pfeiler erfolgt stets in der mittleren Schar, wobei die Messstrecke über die Stoßfuge verläuft. Die Druckbeanspruchung wird ausschließlich senkrecht zur Lagerfuge aufgebracht, wodurch keine Unterscheidung der Belastungsrichtung erforderlich bzw. möglich ist. Die Ermittlung des Querdehnungsmoduls erfolgt wieder nach Formel (3.14).

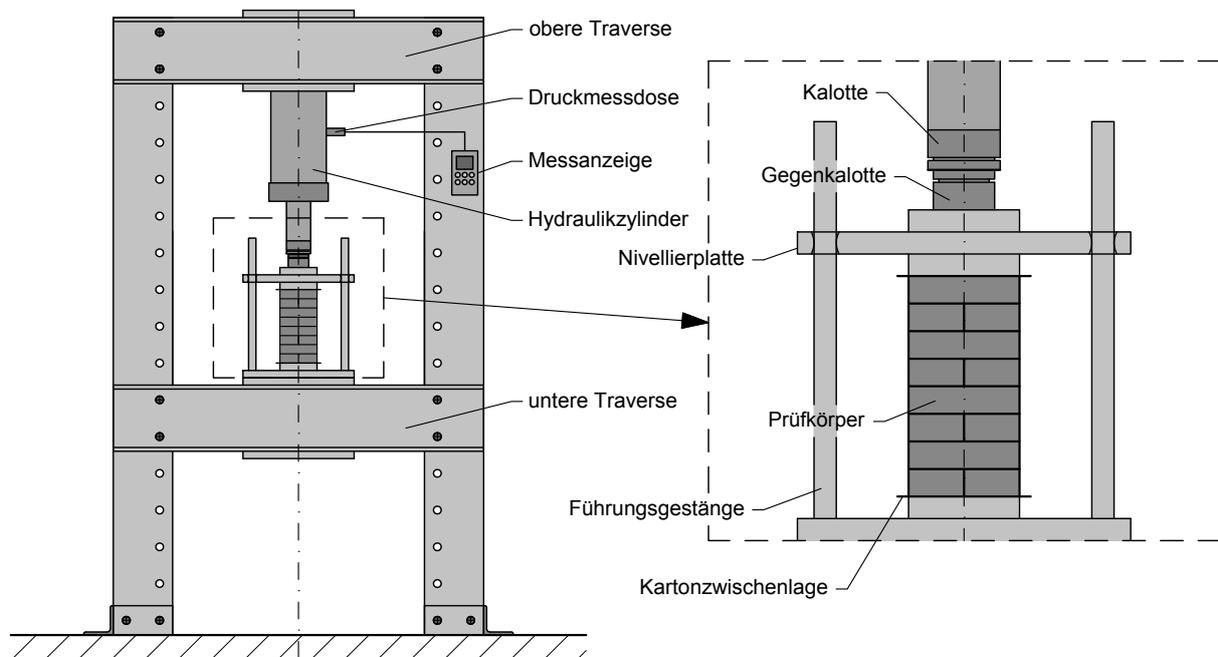
## 3.5 Prüfeinrichtungen und Prüfgeräte

Nachfolgend sind die wesentlichen Prüfeinrichtungen aufgelistet und beschrieben, die im Zuge der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit zur Anwendung kommen. Die größte Bedeutung kommt der Druckprüfmaschine und den Messeinrichtungen zur Aufnahme der Formänderungen zu.

### 3.5.1 Druckprüfmaschine

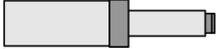
Im bautechnischen Labor der *Dr. Pech Ziviltechniker GmbH* befindet sich eine Stempeldruckpresse zur Durchführung der Druckversuche für die vorliegende Arbeit. Die Prüfeinrichtung ist vorschriftsmäßig gewartet und erfüllt die Anforderungen gemäß ÖNORM EN 772-1 [33]. Die Druckprüfmaschine ist aus herkömmlichen Stahlbauteilen mit Schraubenverbindungen aufgebaut. Die Konstruktion besteht aus zwei H-Profil-Stehern und zwei doppelten C-Profil-Traversen, die mit den Stehern kraftschlüssig verbunden sind. Die Profile der beiden Traversen sind jeweils an der Ober- und Unterseite mit Stahlblechen verbunden. Auf der Stahlplatte der unteren Traverse

ist eine weitere Stahlplatte aus Edelstahl befestigt, die als Auflagefläche für die Prüfkörper dient. An dieser Platte sind zwei Führungsstangen montiert, an denen eine Nivellierplatte vertikal auf und ab bewegt werden kann. An der Nivellierplatte befinden sich weitere Edelstahlplatten zur gleichmäßigen Verteilung der Druckkraft des Hydraulikzylinders an den Prüfkörper. Um mögliche Unebenheiten der Prüfkörper auszugleichen, kann die Nivellierplatte um bis zu 15 Grad in alle Richtungen geneigt werden. Eine Verschieblichkeit in horizontaler Richtung ist nicht möglich. An der unteren Stahlplatte der oberen Traverse sind einige Befestigungslöcher für die unterschiedlichen Zylindertypen vorbereitet. Der verwendete ENERPAC-Zylinder ist mittels Schraubenverbindung kopfüber mit der Stahlplatte verbunden. Der Kolben fährt demnach nach unten aus dem Hydraulikzylinder und gibt die Druckkraft mittels Kalotte an die Gegenkalotte der Nivellierplatte weiter. Dadurch können gegebenenfalls Schrägstellungen, die sich aus der Rahmenkonstruktion ergeben, ausgeglichen werden. Auch Unebenheiten oder Imperfektionen der Prüfkörper können ausnivelliert werden. Vor jeder Versuchsdurchführung wird der Kolben derart weit ausgefahren, dass sich die Kalotten gerade noch nicht berühren. Der Prüfkörper und der Hydraulikzylinder werden mittels Stellschrauben axial zueinander ausgerichtet. Mittels Handpumpe erfolgt die Belastung, die per Hydraulikschlauch an den Zylinder übertragen wird. Der aufgebrachte Druck im System wird mit dem Drucksensor WIKA CPT6200 gemessen. Die Genauigkeit des Drucksensors beträgt 0,2% FS (bei Raumtemperatur). FS steht für die Bezeichnung „Full Scale“ und gibt die maximal mögliche Amplitude der Messgröße an, die bei den vorhandenen Zylindern 700 bar beträgt. Für die tatsächlich auf den Prüfkörper wirkende Kraft muss erst der Messwert über die Kolbenfläche des verwendeten Zylinders mit Hilfe der Formel (3.15) umgerechnet werden. Der Messfehler der Belastung ist aus diesem Grund vom verwendeten Zylinder abhängig. In Tabelle 3.10 sind die Kolbenflächen, die maximal möglichen Kraftwerte  $F_{\max}$  und die maximalen Messabweichungen  $\max \Delta F$  angegeben. Bei Versuchsdurchführung wird durch die Messanzeige der maximal erreichte Wert des aufgebrachten Druckes gespeichert und angezeigt. Abbildung 3.19 zeigt schematisch den Aufbau der beschriebenen Prüfeinrichtung.



**Abb. 3.19:** Schematische Ansicht der ENERPAC-Druckprüfmaschine

**Tab. 3.10:** Verwendete Hydraulikzylinder der Firma ENERPAC

Skizzen	Zylinder	Kolbenfläche [cm <sup>2</sup> ]	$F_{\max}$ [kN]	$\max \Delta F$ [kN]
	RCH-306	46,6	326,2	±0,652
	RC-1010	14,5	101,5	±0,203
	RC-59	6,5	45,5	±0,091
				

$$F [N] = \text{Druck [bar]} \cdot A_{\text{Kolben}} [\text{cm}^2] \cdot 10 \quad (3.15)$$

Bevor der Kolben derart weit ausgefahren ist, dass sich die Kalotten berühren, liegt die Nivellierplatte auf dem Prüfkörper auf und stellt somit eine gewisse Vorbelastung dar. Tabelle 3.11 zeigt die Kräfte und Spannungen, die sich aus der Vorbelastung durch die Nivellierplatte ergeben. Die Spannung bezieht sich auf die mittlere Fläche der Prüfkörper.

**Tab. 3.11:** Zusätzliche Auflast der Nivellierplatte

Aufsatz	m	F	$\sigma$
	[kg]	[N]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Nivellierplatte	8,77	87,71	0,00877

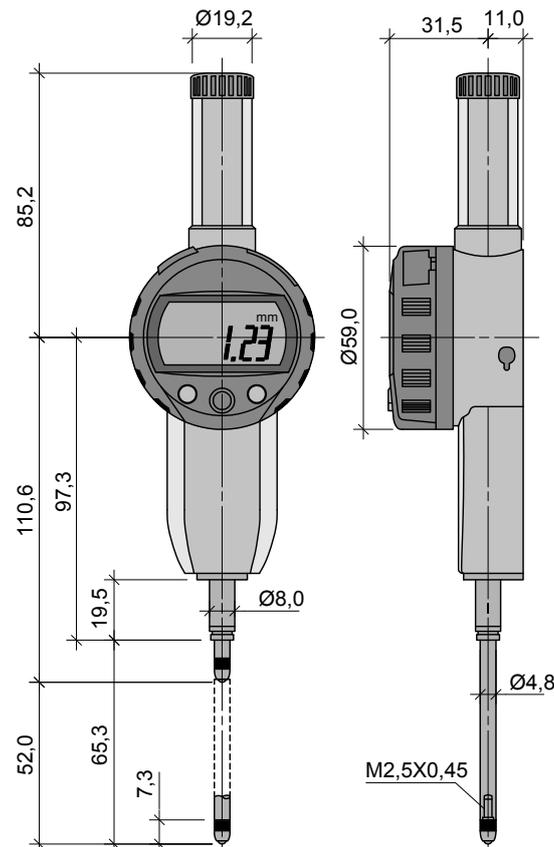
Um die daraus resultierenden Kräfte und Spannungen nicht zu vernachlässigen, werden sie bei der Versuchsauswertung berücksichtigt und zur Bruchlast hinzu addiert, obwohl sich zeigt, dass die Werte aus der Vorbelastung in einem vernachlässigbar kleinen Bereich liegen.

### 3.5.2 Digitale Wegaufnehmer

Für sämtliche Verformungsmessungen (insbesondere Stauchungen) an den fertigen Prüfkörpern oder den verwendeten Versuchsmaterialien werden zwei digitale Messuhren des Typs Mitutoyo Absolute Digimatic ID-C1050XB eingesetzt (siehe Abbildung 3.20). Diese Wegaufnehmer sind mit LCD-Displays ausgestattet, welche eine Genauigkeit der Messwerte auf hundertstel Millimeter anzeigen. An der Spitze der Messstange, die einen Durchmesser von 4,8 mm aufweist, befindet sich eine Hartmetallkugel, die mit einem Gewinde festgeschraubt ist. Der Messbereich ist auf maximal 50,8 mm beschränkt. Durch die unbegrenzte Verfahrgeschwindigkeit der Messuhren sind auch exakte Verformungsmessungen beim Bruch der Prüfkörper feststellbar.

Bei der Durchführung der Versuche sind die Wegaufnehmer in Stative mittels spezieller Befestigungshilfen eingespannt. Die Stative werden mithilfe von Elektromagneten an die Nivellierplatte der Druckprüfmaschine befestigt, wodurch die gesamte Messeinrichtung bei Verformungen während der Versuchsdurchführung mitgeschoben wird. Die Messstangen sind zentral an die beiden vertikalen Führungsstangen der Druckprüfmaschine angesetzt, da diese Führungsstangen eine unverschiebliche Verbindung mit der Prüfpresse besitzen. Die Positionierung der Elektromagnete,

an denen die Stative mit den Messuhren angebracht sind, erfolgt ebenfalls zentral an der Nivellierplatte positioniert, um bei eventuellen Verkippungen während der Messung keine fälschlichen Werte zu erhalten. Nach exakter Einrichtung ist bei jedem Versuch kurz vor Belastungsbeginn ein Nullabgleich der Messuhren erforderlich. In gewissen Abständen werden während der Belastung der Proben die Werte der Wegaufnehmer sowie der aktuelle Belastungsdruck notiert und festgehalten. Für die Dokumentation der exakten und tatsächlichen Werte der Verformungen und der Belastung kommen bis nach dem Versagen der Proben Videokameras zum Einsatz. Im Zuge der Auswertung können bei Verwendung des Zeitlupenmodus sogar die Verformungen während des Bruches verfolgt und dokumentiert werden.

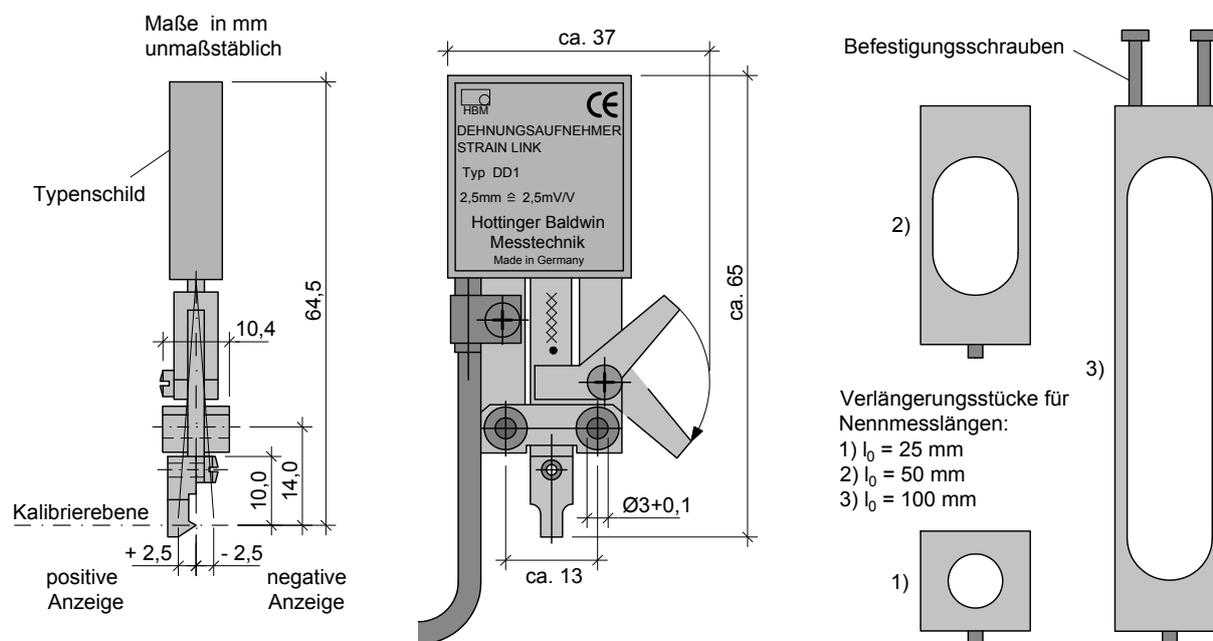


**Abb. 3.20:** Schematische Ansicht der digitalen Wegaufnehmer (Typ Mitutoyo Absolute Digimatic ID-C1050XB)

### 3.5.3 Dehnungsaufnehmer

Zur Feststellung der Querdehnungen der Prüfkörper während der Belastung durch die Stempelpresse kam ein Dehnungsaufnehmer mit einem Messsystem mit Dehnungsmessstreifen des Typs DD1 der Firma *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH* zum Einsatz (siehe Abbildung 3.21). Das Grundgerät ist ein Wegaufnehmer, der die Verschiebung der Spitze einer Tastzunge in ein elektrisches Signal umformt. Die Umformung erfolgt mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen, die in einer Vollbrückenschaltung auf der Messzunge innerhalb des Gerätes angeordnet sind. Die Tastspitze kann Verschiebungen  $s = \pm 2,5$  mm aufnehmen, beiderseitig angeordnete Anschläge

bewahren die Messanordnung vor mechanischer Überlastung. Innerhalb der angegebenen Messwege wird die zu messende Verschiebung in ein proportionales elektrisches Signal umgeformt, wobei die Kennlinienabweichung geringer als 0,05 % vom Endwert ist. Das Gerät ist mit dem zugehörigen Kabel so kalibriert, dass die Verschiebung von  $s = 1,0$  mm der Zungenspitze am Ausgang des Gerätes ein Signal von 1,0 mV/V Speisespannung erzeugt. Dabei ergeben Verschiebungen in Richtung der Typenschildseite des Gerätes positive, in entgegengesetzter Richtung negative Signale. Das am Grundgerät befindliche vieradrige abgeschirmte Kabel ist leicht und biegeweich, um Rückwirkungen auf den Aufnehmer zu vermeiden. Das Kabel ist 1,5 m lang und enthält an seinem freien Ende eine Kapsel mit Kalibrierwiderständen [7]. Für die Versuchsdurchführung wurde das Grundgerät mithilfe der Zubehörsätze DD1/ZA und DD1/ZV11 zum Anklemm-Dehnungsaufnehmer. Der Zubehörsatz DD1/ZV11 umfasst Verlängerungsstücke und Befestigungsschrauben, die zum Ausbau des DD1 als Anklemm-Dehnungsaufnehmer neben dem Zubehörsatz DD1/ZA erforderlich sind. Durch die Außenabmessungen der Mauerwerkspfeiler von rund 100 mm kamen für die benötigten Messungen der Querdehnung Verlängerungsstücke für Nennmesslängen von  $l_0 = 50$  mm zum Einsatz. Für die Querdehnungsmessung der Vollmauerziegel und Porenbetonsteine kamen aufgrund der Außenabmessungen Verlängerungsstücke für Nennmesslängen von  $l_0 = 50$  mm und  $l_0 = 25$  mm zum Einsatz.



**Abb. 3.21:** Schematische Ansicht des Dehnungsaufnehmers Typ DD1 und Zubehörsatz DD1/ZV11 (rechts) von *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH*

Mittig in vertikaler und horizontaler Richtung werden zwei Messpunkte mit Schnellklebstoff X60 an die Prüfkörper bzw. Rohmaterialien angeklebt. Bei den Versuchen der Mauerwerkspfeiler erfolgt die Querdehnungsmessung immer über eine Setzfuge des Ziegelverbandes, wodurch die Messpunkte an den benachbarten Ziegel geklebt sind. Vor Belastungsbeginn ist die Positionierung der Dehnungsaufnehmer mit deren Tastzunge auf einen der beiden Punkte erforderlich. Der fixierte Punkt am Verlängerungspunkt kommt an den anderen der beiden Punkte. Um für ausreichende Befestigung des Wegaufnehmers während des Versuchs zu sorgen, wird das Verlängerungsstück mittels Stativ, das an einen Elektromagneten befestigt ist, an den Prüfkörper

bzw. das zu untersuchende Material gedrückt. Der Elektromagnet ist an der starren Druckprüfmaschine befestigt. In der Aufzeichnung der aufgetretenen Dehnungen wird der Anzeigewert des Wegaufnehmers vor Belastungsbeginn als Ausgangswert festgelegt.

### 3.6 Prüfkörperherstellung und -vorbereitung

Zur Herstellung der geeigneten Pfeilerprüfkörper sind passende Mauersteine erforderlich, um die fertigen Pfeiler mit der Druckprüfmaschine nach Abschnitt 3.5.1 prüfen zu können. Bei den Pfeilern aus Vollmauerziegel werden die Mauersteine aus Abschnitt 3.2.1 verwendet und zugeschnitten. Für die Pfeiler aus Porenbetonsteinen kommen Mauersteine aus Abschnitt 3.2.2 zum Einsatz.

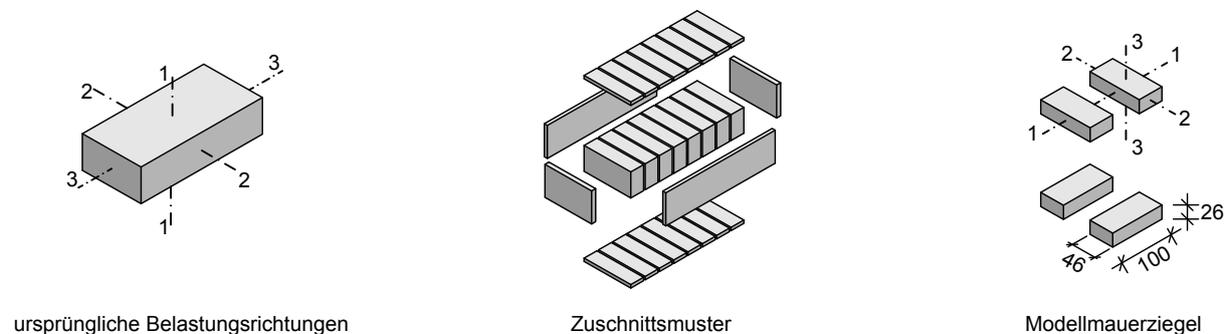
Der Mauermörtel besteht wie schon bei den Tastversuchen aus Flexkleber mit dem in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Anmischverhältnis. Der frische Flexkleber wird schnellstmöglich verarbeitet, um erste Aushärtungsbereiche zu verhindern.

#### 3.6.1 Ziegelabmessungen und Ziegelzuschnitt

Länge und Breite der Auflager-Stahlplatten der Druckprüfmaschine aus Abschnitt 3.5.1 betragen je 100 mm. Da die Grundflächen der Pfeiler nicht darüber hinausragen dürfen, ergibt sich eine Maximallänge der zugeschnittenen Mauersteine von ebenfalls  $l_u = 100$  mm. Aus der festgelegten Maximallänge  $l_u$  des Modellziegelsteins ergeben sich unter Beibehaltung der Maßverhältnisse eines Vollmauersteins im Normalformat auch die restlichen Abmessungen der Modellziegelsteine. In Abbildung 3.22 und Abbildung 3.23 sind die Maße der Mauersteine, die zur Pfeilerherstellung verwendet werden, angegeben.

#### Vollmauersteine

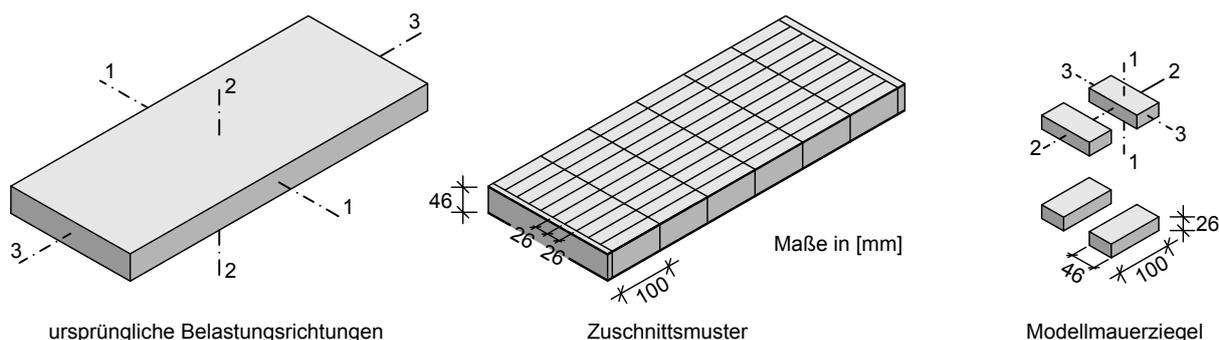
Durch die Verwendung von Vollmauerziegeln im Normalformat mit den Abmessungen laut Abschnitt 3.2.1, Abbildung 3.1 ist die einfachste Möglichkeit die erforderlichen Modellziegelsteine herzustellen in Abbildung 3.22 dargestellt. Dabei werden aus liegenden Vollmauersteinen die Seitenflächen weggeschnitten und anschließend „Scheiben“ mit einer Dicke von 26 mm hergestellt. Aus dem Herstellungsverfahren ergibt sich, dass die Belastungsrichtung der Modellziegelsteine in Richtung 3-3 des ursprünglichen Mauersteins erfolgt.



**Abb. 3.22:** Herstellung, Abmessungen und Belastungsrichtungen der Modellmauersteine aus Vollmauersteinen

### Porenbetonsteine

Aus den 5 cm dicken Porenbetonplansteinen mit den Abmessungen  $l_u/b_u/h_u = 625/50/250$  mm werden zuerst Streifen mit einer Breite von 100 mm zugeschnitten. Davon werden, gleich wie beim Vollmauerstein, „Scheiben“ mit einer Dicke von 26 mm hergestellt. Durch die vorgegebene Dicke der Plansteine müssen die Ränder noch um 4 mm gekürzt werden, um eine Breite der Modellziegelsteine von 46 mm zu erhalten. Die in den Pfeilern verbauten Porenbetonsteine werden bei den Pfeilerversuchen in Richtung 1–1 belastet.



**Abb. 3.23:** Herstellung, Abmessungen und Belastungsrichtungen der Modellmauersteine aus Porenbeton

### 3.6.2 Herstellung der Pfeiler

Der Aufbau der Pfeiler erfolgt auf einer Kunststoffplatte, die mit einem dünnen Ölfilm beschichtet wird, um diese nach Erhärtung des Mörtels wieder zerstörungsfrei entfernen zu können. Die Kunststoffplatte dient zum Abgleichen der Auflagerflächen und zum Herstellen der Planparallelität der Auflagerflächen. Auf den Ölfilm kommt die unterste Mörtelschicht, auf die die untersten Mauersteine aufgesetzt werden. Alle Mauersteine sind kurz vor dem Einbau in Wasser getränkt, um einen ordnungsgemäßen Verbund zwischen Stein und Mörtel zu erhalten. Bevor der zweite Stein der jeweiligen Schar vermauert werden kann, ist die Verfüllung der Stoßfuge erforderlich. Die darüberliegende Mauersteinschar ist jeweils um 90 Grad gedreht mit einer Lagerfuge dazwischen aufgemauert. Jeder Pfeiler besteht aus 8 Mauersteinscharen. Bei den mit Textilglasgitter bewehrten Lagerfugen kommt zuerst eine dünne Schicht Mörtel auf die Mauersteine in die das Gewebe gelegt wird. Anschließend folgt eine weitere dünne Schicht, um eine kraftschlüssige Verbindung herzustellen. Die Lagerfugendicke der bewehrten Fugen ist gleich den unbewehrten Lagerfugen. Auf die oberste Steinschar gelangt eine letzte Mörtelschicht, die wiederum mit einer Kunststoffplatte abgeglichen wird. Nach dem Abgleichen erfolgt eine Lagerung der fertigen Pfeiler in luftdichten Behältnissen, um ein zu schnelles Austrocknen des Frischmörtels zu verhindern. Nach ca. vier Tagen kommt es zur Öffnung der Behältnisse und die restliche Erhärtungsphase erfolgt bei Zimmertemperatur und -feuchtigkeit. Vor der Versuchsdurchführung ist eine Entfernung überstehender Mörtelteile erforderlich. Einzelne Schritte der Pfeilerherstellung sind in den Fotografien in Abbildung 3.24 zu erkennen.



(a) Modellmauersteine



(b) Angemischter Flexkleber



(c) Kunststoffplatte mit Ölfilm



(d) Unterste Mauersteinschar



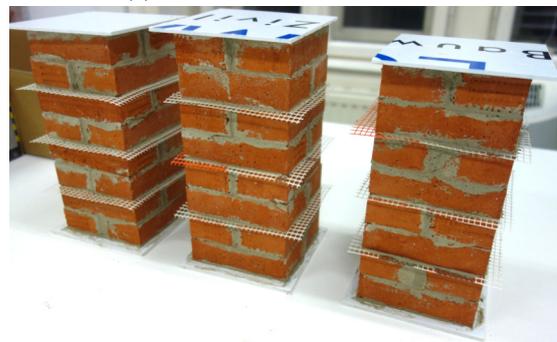
(e) Stoßfugenverfüllung vor dem zweiten Stein



(f) Zweite Mauersteinschar



(g) Lagerfugenmörtel über der zweiten Schar



(h) Fertige Pfeiler mit drei bewehrten Fugen

**Abb. 3.24:** Fotografien der Verfahrensschritte bei der Pfeilerherstellung

# Kapitel 4

## Versuche zur Bestimmung der Materialparameter

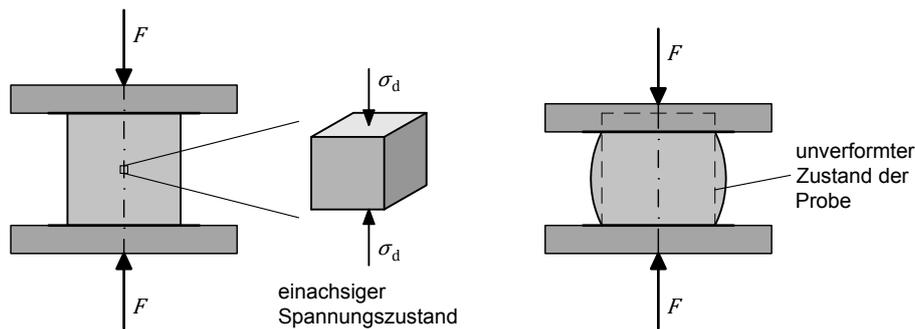
Für eine möglichst genaue Beurteilung der Ergebnisse der Pfeilerversuche werden im Vorfeld die dafür verwendeten Materialien unabhängig voneinander gemäß den entsprechenden Normen geprüft und ausgewertet. Von den Mauersteinen aus Vollmauerziegel und Porenbeton erfolgt eine Ermittlung der normierten vertikalen Steindruckfestigkeit. Da bei allen Pfeilerversuchen der gleiche Mörtel zur Anwendung kommt, wird auch nur diese maßgebliche Zusammensetzung aus der der Mörtel hergestellt wird, geprüft. Das Textilglasgitter, das in den Mörtelfugen für querdehnungsbehindernde Schichten sorgen soll, kann mit den zur Verfügung stehenden Prüfeinrichtungen nicht ausreichend genau geprüft werden. Deshalb stehen ausschließlich die vom Hersteller angegebenen Parameter für die Ergebnisbeurteilung zur Verfügung. Die Auswertung der Formänderungseigenschaften der Mauersteine aus Vollmauerziegel erfolgt durch einen statischen Druckversuch. Bei den Mauersteinen aus Porenbeton und beim Flexkleber kommen Ultraschalltests zur Anwendung. Daraus lassen sich Elastizitätsmodul und Querdehnungsmodul bestimmen. Die Auswertung der Elastizitätsmoduln und der Querdehnungsmoduln erfolgt jeweils getrennt für die verwendeten Mauersteine. In den folgenden Abschnitten sind die Ergebnisse der ermittelten Parameter ausgewertet. Durch die umfangreichen Datenmengen der Untersuchungen sind die Ergebnisse nur auszugsweise dargestellt.

### 4.1 Druckversuche

Die mittels der Druckprüfmaschine durchgeführten Druckversuche dienen dazu, das Verhalten der geprüften Materialien unter einachsiger Druckbeanspruchung, die über den gesamten Querschnitt gleichmäßig verteilt ist, zu ermitteln. Die normativen Vorgaben zur Prüfung der Materialparameter sind an die jeweiligen Materialien gebunden. Die Belastungsgeschwindigkeit wird gemäß ÖNORM EN 772-1, Abschnitt 8.2 [33] bzw. Abschnitt 2.3.11 der vorliegenden Arbeit gewählt. Werden die Prüfkörper bis zum Erreichen des ofentrockenen Zustandes konditioniert, müssen sie vor der Prüfung auf Umgebungstemperatur abgekühlt werden. Bei sämtlichen Druckversuchen werden zur Verringerung von Kantenpressungen die Kartonzwischenlagen gemäß Abschnitt 4.3 verwendet.

Die unter Belastung herrschende Druckspannung  $\sigma_d$  im Prüfkörper ist zu jedem Zeitpunkt des Druckversuchs der Quotient aus der Druckkraft  $F$  und der belasteten Querschnittsfläche  $A_0$ .

$$\sigma_d = \frac{F}{A_0} \quad (4.1)$$



**Abb. 4.1:** Darstellung der Prüfkörper in unverformtem (links) und verformtem Zustand (rechts)

Abbildung 4.1 zeigt den einachsigen Spannungszustand sowie den unverformten Ausgangszustand und den verformten Zustand der Probe während der Druckversuche. Der einachsige Spannungszustand stellt sich in der Mitte der Prüfkörper ein. Die Bereiche nahe der Druckplatten bleiben unverformte Zonen (siehe Abschnitt 2.3.9) aufgrund der querdehnungsbehindernden Wirkung der Druckplatten.

Bei allen durchgeführten Druckversuchen werden die Probekörper bis zum Bruch belastet und stehen daher für keine weiteren Versuche zur Verfügung. Bei den Versuchen zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls und des Querdehnungsmoduls kommt es zu einem zwischenzeitlichen Belastungsstopp, um die Messeinrichtungen demontieren zu können, damit sie beim Bruch der Proben nicht zerstört werden.

## 4.2 Ausgleichsrechnung

Nach Papula [16] hat eine Ausgleichsrechnung zum Ziel, dass mit Hilfe einer stetigen Funktion  $f(x)$  die bestimmte Menge von gegebenen Messwerten mit einem möglichst kleinen Fehler beschrieben wird. Die Funktionswerte werden dabei nicht exakt dargestellt, sondern mit einem gewissen Fehler. Deshalb ist keine exakte Darstellung der Datenpunkte möglich. Für die vorgegebenen Messwerte sorgt die Ausgleichsrechnung für eine optimale Annäherung durch Bestimmung der Parameter einer gewählten Funktion. Grundsätzlich sind möglichst einfache Funktionstypen wie lineare Funktionen oder Polynomfunktionen niedrigen Grades anzustreben.

Nach der Wahl der Funktion folgt die Berechnung der Residuenquadratsumme (Summe der Abstandquadrate, SSE), um anschließend die Parameter mit Hilfe des *Gaußschen Minimierungsprinzips* nach Formel (4.2), auch genannt die *Gaußsche Methode der kleinsten Quadrate*, zu bestimmen. Abbildung 4.2 dient zur graphischen Beschreibung dieser Methode. Dabei werden die Parameter derart angepasst, dass SSE so klein wie möglich wird. Ein Maß für die Güte der Näherung ist die *Korrelation*, die besagt, wie gut die Ausgleichsfunktion die Datenpunkte approximiert.

$$\text{SSE} = \sum_{i=1}^n v_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (4.2)$$

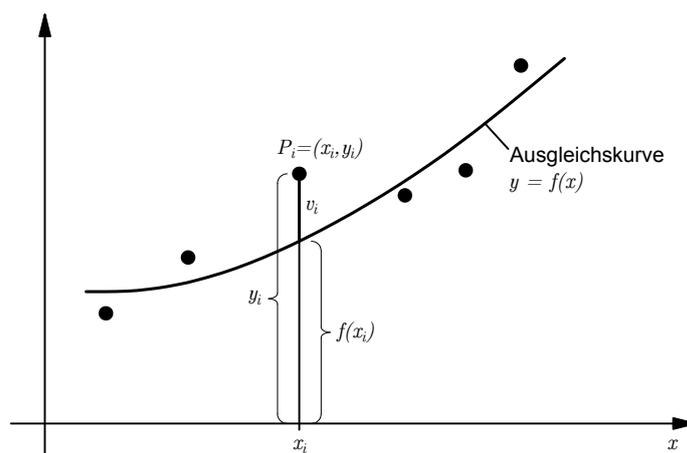


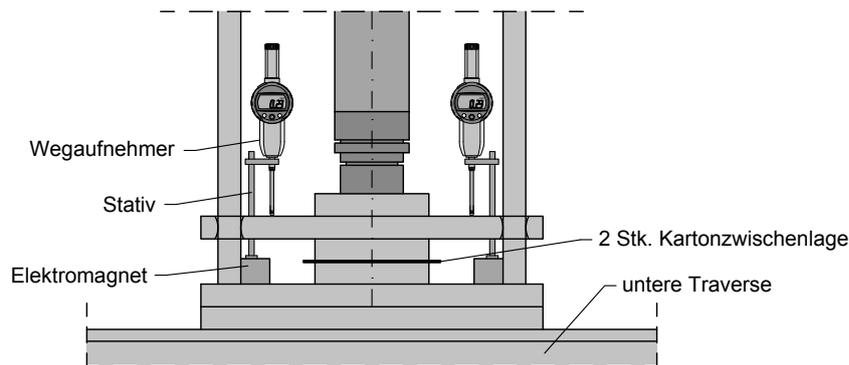
Abb. 4.2: Exemplarische Darstellung von Messpunkten  $P_i = (x_i, y_i)$  mit Ausgleichskurve [16]

### 4.3 Kartonzwischenlage

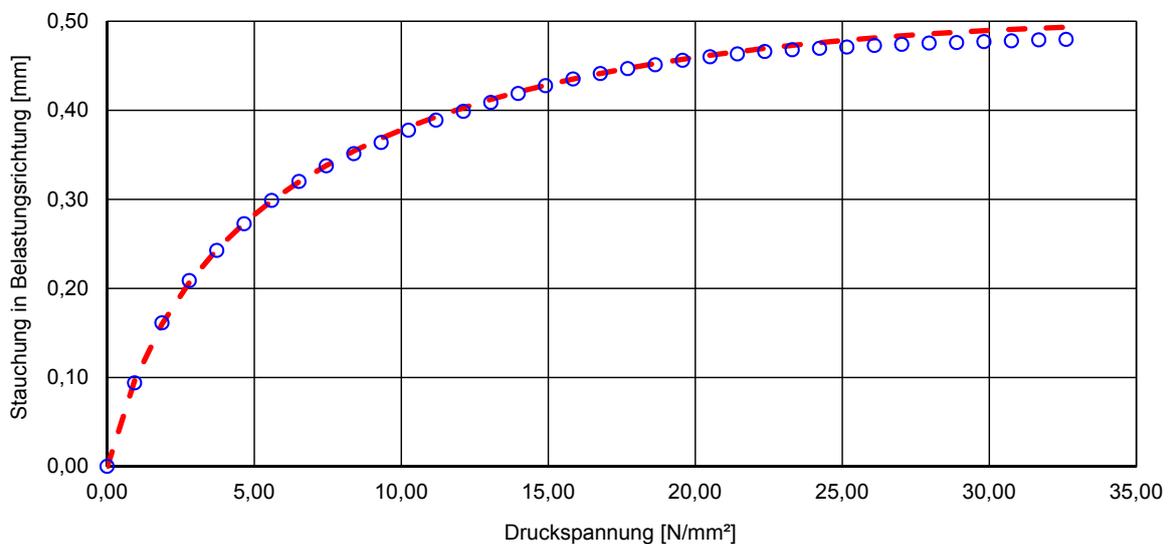
Bei allen durchgeführten Druckversuchen werden zwischen den Prüfkörpern und der Auflagefläche unten sowie der Nivellierplatte oben Zwischenlagen aus herkömmlichem Karton eingelegt. Trotz durchgeführter Entfernung von Verunreinigungen und Unregelmäßigkeiten dient diese Maßnahme zusätzlich zur Verhinderung bzw. Minderung von Kantenpressungen. Der verwendete Karton besitzt eine Stärke von rund 0,9 mm und eine Trockenrohichte von  $0,68 \text{ g/cm}^3$ . Der Einsatz der Zwischenlage ist nicht normativ geregelt, ist aber in mehreren Literaturquellen wie z. B. von Graf et al [4] empfohlen. Da die Kartonzwischenlagen bei jedem Versuch unterschiedlich zusammengedrückt und deformiert werden, kann jeder Karton nur einmal verwendet werden und ist nach dem Druckversuch zu entsorgen.

Für die Ermittlung der Verformungen der Prüfkörper, die zur Berechnung des Elastizitätsmoduls erforderlich sind, müssen die verwendeten Kartonzwischenlagen entsprechend berücksichtigt werden. Bei vier durchgeführten Druckversuchen liegen jeweils ausschließlich zwei Kartonlagen übereinander. Für die Versuche gelangt der Zylinder RC-306 gemäß Abschnitt 3.5.1 zur Anwendung. Die Druckplatten aus Edelstahl, die zur Lasteinbringung in den Karton dienen, weisen in der Länge und der Breite exakt 100 mm auf und besitzen damit eine Druckfläche von  $10\,000 \text{ mm}^2$ . Zur Auswertung ergeben sich für jeden Versuch Spannungs-Stauchungs-Diagramme, die für Formänderungseigenschaften herangezogen werden können. Die Steigerung der Belastung, die durch die Messanzeige der Druckprüfmaschine in der Einheit *bar* angezeigt wird, erfolgt kontinuierlich in 20er-Schritten bis zur Maximallast von 700 bar. Die Maximallast von 700 bar entspricht einer Kraft von 326,2 kN. Bei jeder Laststufe wird der Messwert der Stauchung aufgezeichnet. Aus den 4 Versuchen ergibt sich für jeden Messwert der Stauchung ein Mittelwert. Bei jedem der 4 Einzelversuche werden bereits zwei Messwerte der Stauchung aufgezeichnet, um mögliche Ungleichmäßigkeiten zu eliminieren. Die sich aus dem Mittelwert der 4 Versuche ergebende Spannungs-Stauchungs-Kurve ist in Abbildung 4.4 ersichtlich.

Allfällige Durchbiegungen der unteren Traverse der Druckprüfmaschine können vernachlässigt werden, da die digitalen Wegaufnehmer direkt auf dieser Traverse angebracht sind und sich somit bei auftretenden Verformungen mit der Edelstahlplatte mitbewegen. Auch ein mögliches Zusammendrücken der Edelstahlplatten wird bei der Auswertung vernachlässigt. Abbildung 4.3 zeigt den Versuchsaufbau und die Anbringung der Messeinrichtungen.



**Abb. 4.3:** Schematische Darstellung der Druckprüfung der Kartonzwischenlagen



**Abb. 4.4:** Gemittelte Spannungs-Stauchungs-Kurve der Kartonzwischenlage samt approximiertem Funktionsgraphen

Für die tatsächliche Berechnung des Elastizitätsmoduls der untersuchten Prüfkörper wird diese gemittelte Spannungs-Stauchungs-Kurve von den Messwerten der Verformung, die bei sämtlichen Versuchen festgestellt werden, rechnerisch abgezogen. Für eine exakte Ermittlung der Kartonstauchung bei beliebiger Druckspannung ist eine Funktion erforderlich, die die Gesamtheit der festgestellten Messwerte bestmöglich wiedergibt. Dies geschieht durch Anwendung einer Ausgleichsrechnung, die im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

#### Ausgleichsrechnung zur Beschreibung der Kartonstauchungen

Aufgrund der bei der Druckprüfung der Kartonzwischenlagen gewonnenen Datenpunkten kann keine ausreichende Annäherung mit linearen Funktionen oder Polynomfunktionen niedrigen Grades erlangt werden. Bei Betrachtung der Kurve, die durch die Messwerte entsteht, wird im gegebenen Fall eine Logarithmusfunktion gewählt. Für eine Minimierung des Fehlers in den Bereichen der höheren Werte der x-Achse wird eine lineare Funktion an die Logarithmusfunktion angefügt. Diese „drückt“ die Funktionswerte geringfügig nach unten und verbessert somit die

Annäherung. Aus dem Diagramm in Abbildung 4.4 kann entnommen werden, dass die Stauchung des Kartons den Wert 0,5 mm bei der aufgebrachten Belastung nicht überschreitet. Die Höchstlasten bei Druckprüfungen bei den Pfeilerversuchen erreichen derart hohe Spannungen ohnehin nicht.

Die ermittelte Funktion wird in Formel (4.3) angeschrieben.

$$f(x) = \min \{(a \cdot \ln(b \cdot x + k_f) - c \cdot x + d); 0,5\} \quad (4.3)$$

Bei mehrmaligem Anpassen der verwendeten Funktion werden die Parameter  $b$ ,  $c$  und  $d$  durch fixe Werte ersetzt und der Parameter  $a$  wird mit der Bedingung der kleinstmöglichen Summe des Fehlerquadrats und der Randbedingung  $f(0) = 0$  nach dem *Gaußschen Minimierungsprinzip* gelöst. Der Faktor  $k_f$  wird probabilistisch bestimmt und entspricht keinem rechnerisch ermittelten Wert. Die konkreten Werte für die Parameter ergeben sich wie folgt:

$$a = 0,21 \quad b = 0,00067 \quad c = 0,005 \quad d = 1,45 \quad k_f = 0,001$$

Entsprechendes Einsetzen dieser Werte in Formel (4.3) führt zu der in Formel (4.4) angeschriebenen Funktion.

$$f(x) = \min \{(0,21 \cdot \ln(0,00067 \cdot x + 0,001) - 0,005 \cdot x + 1,45); 0,5\} \quad (4.4)$$

## 4.4 Normierte Steindruckfestigkeit

Der Mauerstein stellt den wichtigsten Anteil in Bezug auf die Tragfähigkeit von Mauerwerkswänden dar. Bei der Belastung der Mauersteine gibt es grundsätzlich drei Belastungsrichtungen (siehe Abschnitt 2.3.10). Aufgrund der üblichen Beanspruchungsrichtung im Mauerwerksverband werden die größten Messwerte der Druckfestigkeit in Richtung 1–1 erreicht. Diese Tatsache ist unter anderem durch die Herstellung mittels Strangpressverfahren begründet. Um die Erfahrungswerte der unterschiedlichen Verhältniszahlen der verschiedenen Belastungsrichtungen zu bestätigen, werden im Zuge dieser Arbeit die verwendeten Mauersteine in alle drei Richtungen normgerecht auf deren Druckfestigkeit untersucht. Bei der Auswahl der Steine erfolgt eine visuelle Prüfung auf erkennbare Fehler, Einschlüsse oder sichtbare Risse, um vermeintliche Ausreißer bereits vor Prüfbeginn auszuschließen.

Köpf [12] beschreibt das Vorgehen bei der Bestimmung der normierten vertikalen Steindruckfestigkeiten: „Die gemessene Maximalkraft  $F_{p,max,i}$  wird durch die jeweilige Grundfläche des Prüfkörpers  $A_{0,i}$  dividiert und ergibt die Steindruckfestigkeit am Probekörper,  $\bar{f}_{b,i}$ . An jedem der vier entnommenen Bohrkern eines Vollmauerziegels erfolgt eine individuelle Bestimmung des Formfaktors  $\delta_i$  anhand der jeweiligen Abmessungen. Die nach Formel (2.2) erhaltenen normierten Steindruckfestigkeiten  $f_{b,i}$  werden anschließend innerhalb eines Steins gemittelt. Bei allen Vollmauerziegeln ergibt sich die mittlere normierte Steindruckfestigkeit  $f_b$  somit aus jeweils vier Werten.“

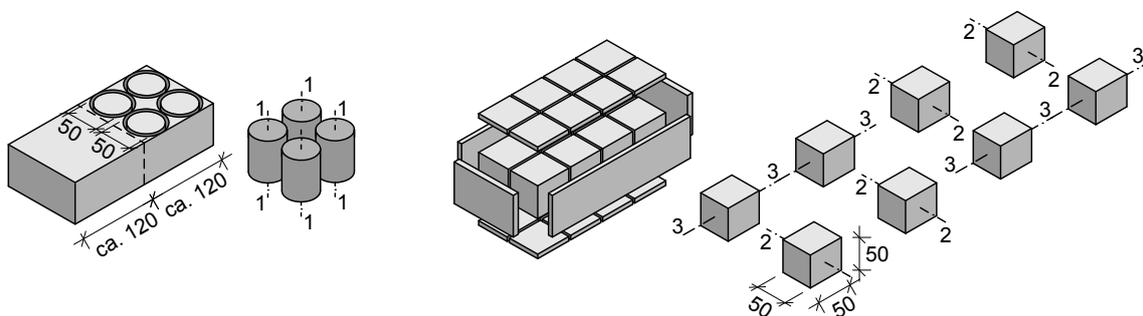
Zur Ermittlung der normierten Steindruckfestigkeit wird bei allen Versuchen sowohl bei Bohrkernproben wie auch bei Würfelproben gleichermaßen vorgegangen.

#### 4.4.1 Versuchsdurchführung

Die Prüfkörper zur Bestimmung der Steindruckfestigkeit werden mittels Steinkreissäge im Nassschneideverfahren aus den ursprünglichen Steinformaten geschnitten. Die Proben für die Hauptbelastungsrichtung 1–1, werden mittels Nass-Bohrkerngerät aus den Normalformat-Vollmauerziegeln gebohrt. Gemäß ÖNORM EN 772-1, Abschnitt 7.3.2 [33] ist vor Druckprüfung eine Konditionierung bis zum Erreichen des lufttrockenen Zustandes erforderlich. Die Trocknung erfolgt bei 105 °C im Trocknungsschrank im bautechnischen Labor der *Dr. Pech Ziviltechniker GmbH*. Die Untersuchung kann erst nach dem Erreichen der Massekonstanz durchgeführt werden. Diese gilt als erreicht, wenn der Unterschied zweier Masseermittlungen im Abstand von 24 Stunden weniger als 2% beträgt. Bei den Druckversuchen mit der ENERPAC-Druckprüfmaschine kommt der Zylinder RC-306 zur Anwendung. Die Auflagerflächen sind vor jedem Versuch von Verunreinigungen freizulegen und staubfrei zu säubern. An der Ober- und Unterseite der Prüfkörper gelangen die in Abschnitt 4.3 beschriebenen Kartonzwischenlagen zur Anwendung. Diese stehen mindestens 5 mm über die Seitenränder der Proben.

#### 4.4.2 Vollmauerziegel

Alle geprüften Vollmauerziegel stammen aus der gleichen Charge, die von der *Wienerberger Ziegelindustrie GmbH* zur Verfügung gestellt wurde. Die Messwerte der Druckfestigkeit in Richtung 1–1 wurden bereits im Vorfeld im Rahmen der Diplomarbeit „Bestimmung der Steindruckfestigkeit von Hochlochziegel im Bestandsmauerwerk anhand von Kleinprüfkörpern“ [12] an der Technischen Universität Wien von Andreas Köpf ermittelt. Dabei wurden jeweils vier Bohrkerne mit einem Durchmesser von 50 mm aus vier verschiedenen Normalformatziegeln gebohrt. Die Bohrkronen des Nass-Bohrkerngerätes zur Entnahme der Proben hat einen Innendurchmesser von 50 mm, da die ÖNORM EN 772-1 [33] einen Mindestdurchmesser von 50 mm vorsieht. Nach der Entnahme werden die Proben an der Oberseite und der Unterseite planparallel abgeschnitten, damit keine Schiefstellungen während des Druckversuchs zustande kommen. Die Bezeichnung der Steine beginnt erst bei Nummer 7, da die Mauersteine mit kleineren Probennummern nicht aus der Charge der Firma *Wienerberger Ziegelindustrie GmbH* stammen. Für die Auswertung kommen nur die Steine in Betracht, die mit der in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Druckprüfmaschine untersucht werden. Abbildung 4.5 zeigt die Entnahme der Proben aus den Normalformatsteinen für die unterschiedlichen Belastungsrichtungen zur Bestimmung der Steindruckfestigkeiten.



**Abb. 4.5:** Bohrkernproben (links) und Würfelproben (rechts) zur Bestimmung der Steindruckfestigkeit

**Tab. 4.1:** Normierte Steindruckfestigkeiten der Vollmauerziegel-Bohrkernproben in Belastungsrichtung 1-1

Stein-Nr.	Probenanzahl [-]	Belastungsrichtung [-]	$f_b$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$s(f_{b,i})$ [N/mm <sup>2</sup> ]
7	4	1-1	21,44	
8	4	1-1	22,06	
9	4	1-1	20,18	
10	4	1-1	21,77	
<b>Mittelwert</b>	<b>4</b>	<b>1-1</b>	<b>21,38</b>	<b>±2,79</b>

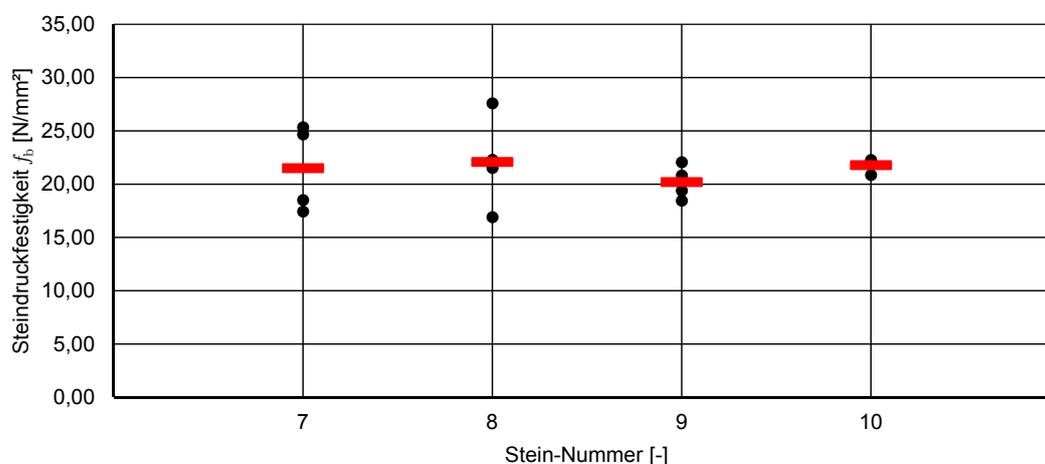
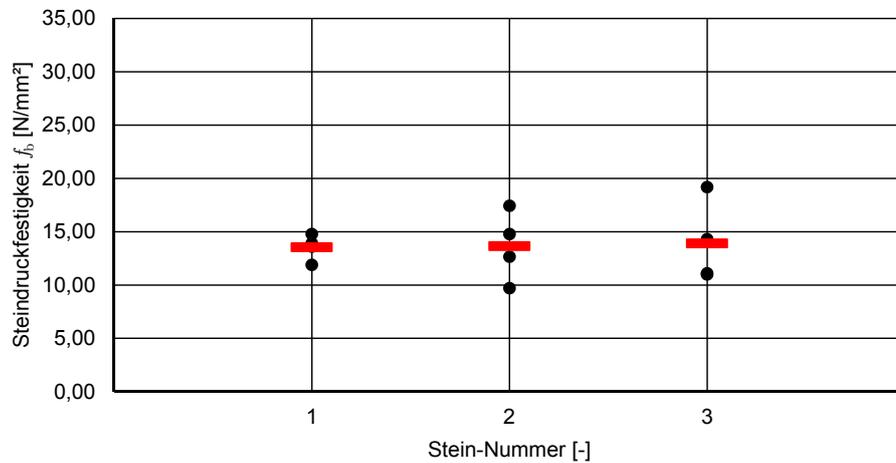
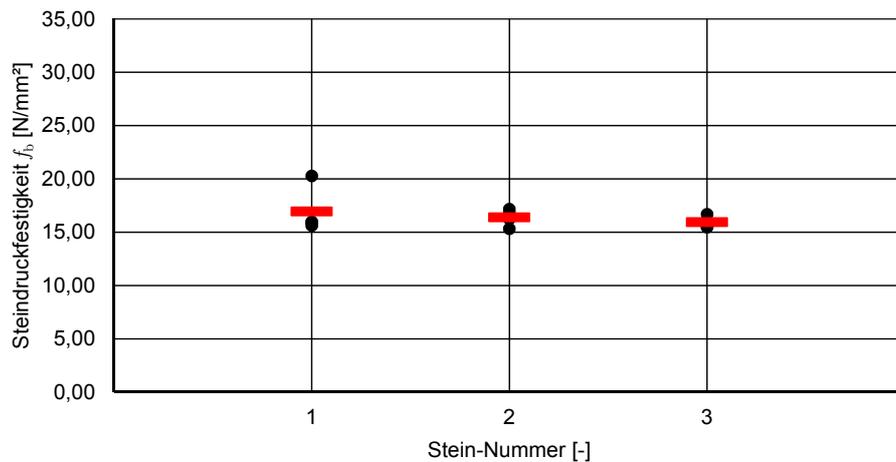
**Abb. 4.6:** Grafische Darstellung der normierten Steindruckfestigkeiten der Bohrkernproben in Belastungsrichtung 1-1

Tabelle 4.1 und Abbildung 4.6 zeigen die Ergebnisse der ermittelten Steindruckfestigkeiten in Belastungsrichtung 1-1. Darin sind die Festigkeitswerte der einzelnen Probekörper sowie auch der Mittelwert mit  $21,38 \text{ N/mm}^2$  und die Standardabweichung von  $\pm 2,79 \text{ N/mm}^2$  ersichtlich. Den Höchstwert der normierten Steindruckfestigkeit erreicht Stein 8 mit  $22,06 \text{ N/mm}^2$ , den Minimalwert weist Stein 9 mit  $20,18 \text{ N/mm}^2$  auf.

Die Untersuchung der beiden Belastungsrichtungen 2-2 und 3-3 erfolgt ebenfalls unter Einhaltung der ÖNORM EN 772-1 [33]. Aus drei unterschiedlichen Normalformat-Vollmauerziegeln können jeweils acht Würfel mit 50 mm Seitenlänge geschnitten werden. Es ergeben sich insgesamt 24 Probekörper wovon jeweils zwölf Würfel in Richtung 2-2 und zwölf Würfel in Richtung 3-3 untersucht werden. Für die Sicherstellung von glatten, ebenen Oberflächen, sind alle Seitenflächen der Probekörper mit der Steinkreissäge zuzuschneiden. Aus jedem der drei Normalformat-Vollmauerziegeln erfolgt die Untersuchung an vier von acht Proben in Richtung 2-2 und an den übrigen vier Proben in Richtung 3-3 (siehe Abbildung 4.5). Nach der Bestimmung der vier Festigkeitswerte für  $f_{b,i}$  folgt eine Mittelwertbildung innerhalb des Steins. Dieser Mittelwert stellt die mittlere normierte Steindruckfestigkeit  $f_b$  für jeden Stein separat dar. Die Steindruckfestigkeiten  $f_b$  in Richtung 2-2 und 3-3 ergeben sich wiederum jeweils aus dem Mittelwert der Festigkeitswerte der drei untersuchten Mauersteine. Erzielt wird damit die Bestimmung der Verhältniswerte der Steindruckfestigkeiten in die unterschiedlichen Richtungen.

**Tab. 4.2:** Normierte Steindruckfestigkeiten der Vollmauerziegel-Würfelproben in Belastungsrichtung 2–2 und 3–3

Stein-Nr.	Probenanzahl [-]	Belastungsrichtung [-]	$f_b$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$s(f_{b,i})$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	4	2–2	13,54	
2	4	2–2	13,64	
3	4	2–2	13,89	
<b>Mittelwert</b>	<b>4</b>	<b>2–2</b>	<b>13,69</b>	<b>±2,56</b>
1	4	3–3	16,94	
2	4	3–3	16,38	
3	4	3–3	15,93	
<b>Mittelwert</b>	<b>4</b>	<b>3–3</b>	<b>16,42</b>	<b>±1,62</b>

**Abb. 4.7:** Grafische Darstellung der normierten Steindruckfestigkeiten der Würfelproben in Belastungsrichtung 2–2**Abb. 4.8:** Grafische Darstellung der normierten Steindruckfestigkeiten der Würfelproben in Belastungsrichtung 3–3

Die Ergebnisse in Tabelle 4.2 sowie Abbildung 4.7 und 4.8 zeigen wie erwartet, dass die höchsten Messwerte der Steindruckfestigkeiten in Belastungsrichtung 1–1 auftreten. Der Maximalwert der einzelnen Proben liegt bei  $27,59 \text{ N/mm}^2$ , der Minimalwert bei  $16,91 \text{ N/mm}^2$ . Der gemittelte Messwert der Steindruckfestigkeit in Richtung 2–2 beträgt  $13,69 \text{ N/mm}^2$ , in Richtung 3–3  $16,42 \text{ N/mm}^2$ . Die Standardabweichungen sind in alle Belastungsrichtungen sehr ähnlich.

Für die Mittelwerte der Steindruckfestigkeiten können die Verhältniszahlen mit

$$\overline{1-1} : \overline{2-2} : \overline{3-3} = 1,00 : 0,64 : 0,77 \quad (4.5)$$

angegeben werden.

Durch die Geometrie der Normalformat-Vollmauerziegel und der Art der Modellziegelherstellung ergibt sich bei den Pfeilerversuchen eine Beanspruchung in Richtung 3–3. Damit weisen die Mauersteine eine normierte Steindruckfestigkeit von  $16,42 \text{ N/mm}^2$  auf. Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10 zeigen beispielhaft Fotografien der Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Steindruckfestigkeit an Bohrkernproben und Würfelproben.



(a) Probe vor Versuchsbeginn



(b) Probe nach dem Bruch

**Abb. 4.9:** Fotografien der Versuchsdurchführung an der Vollmauerziegel-Bohrkernprobe 94



(a) Probe vor Versuchsbeginn



(b) Probe nach dem Bruch

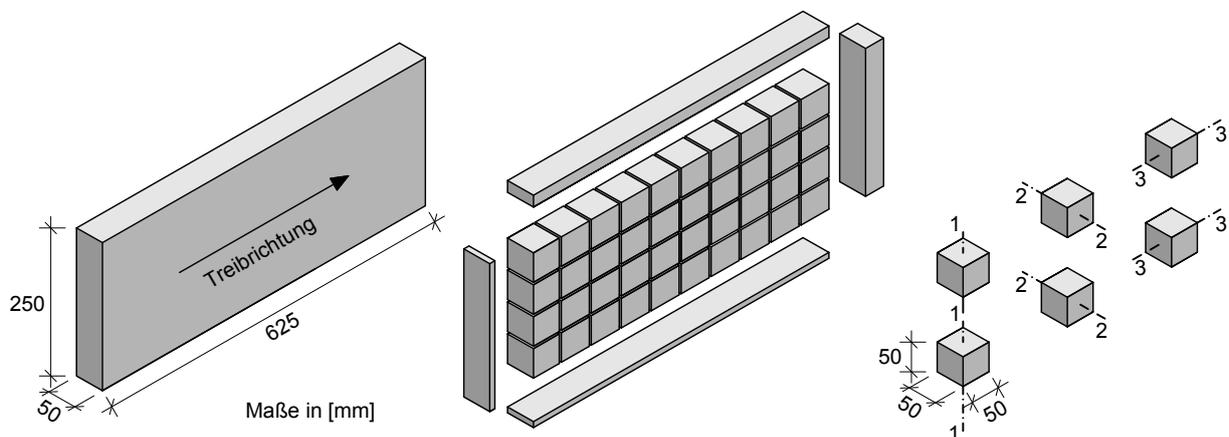
**Abb. 4.10:** Fotografien der Versuchsdurchführung an der Vollmauerziegel-Würfelprobe 24

### 4.4.3 Porenbetonsteine

Die Anforderungen an die Mauersteine sowie die daraus hergestellten Prüfkörper aus Porenbetonstein sind in der ÖNORM EN 771-4 [32] geregelt. Die Porenbetonsteine zur Herstellung der Mauerwerkspfeiler wurden gemeinsam mit den Mauersteinen zur Bestimmung der Steindruckfestigkeit im Baumarkt gekauft. Alle verwendeten und geprüften Porenbetonsteine stammen von der gleichen Palette, die vom Hersteller ausgeliefert wurde. Aus Gründen der einfachen Verfügbarkeit werden sogenannte YTONG Plansteine PP4 der *Xella Porenbeton Österreich GmbH* mit den Abmessungen  $l_u/b_u/h_u = 625/50/250$  mm verwendet. Die Ziffer 4 bezeichnet die Festigkeitsklasse 4. Diese gibt einen Mittelwert der Druckfestigkeit von  $5,0 \text{ N/mm}^2$  für einen Thermoblock mit einer Breite von 50 cm an. Da in dieser Arbeit ausschließlich Plansteine mit 5 cm Breite verwendet werden, erfolgt eine individuelle Bestimmung der Steindruckfestigkeit an den gekauften Mauersteinen.

Aus zwei unterschiedlichen Steinen lassen sich mit Hilfe der Steinkreissäge im Nassschneideverfahren Einzelprobekörper mit den Abmessungen  $l_u/b_u/h_u = 50/50/50$  mm bilden. Unmittelbar im Anschluss folgt die Nummerierung für die zu prüfende Richtung. Aus dem Stein Nummer 1 entstehen acht Probekörper zur Untersuchung in Richtung 1–1 und zwölf Probekörper zur Untersuchung in Richtung 3–3. Vor der Prüfung wird gleichartig wie bei den Vollmauerziegeln eine Konditionierung bis zum Erreichen des lufttrockenen Zustandes durchgeführt. Vor der Versuchsdurchführung sind die Probekörper an den Auflagerflächen zu schleifen, um glatte Oberflächen zu gewährleisten. Bei den verwendeten Plansteinen sind die Belastungsrichtungen wie in Abschnitt 2.3.10 oder in Abbildung 4.11 dargestellt zu berücksichtigen. Dabei ist zu beachten, dass bei den Plansteinen die Belastungsrichtung 1–1 nicht normal auf die schmalste Seite des Mauersteins steht.

Alle Messwerte für  $f_{b,i}$  eines Steins werden gemittelt und ergeben die mittlere normierte Steindruckfestigkeit  $f_b$  für die beiden Steine.

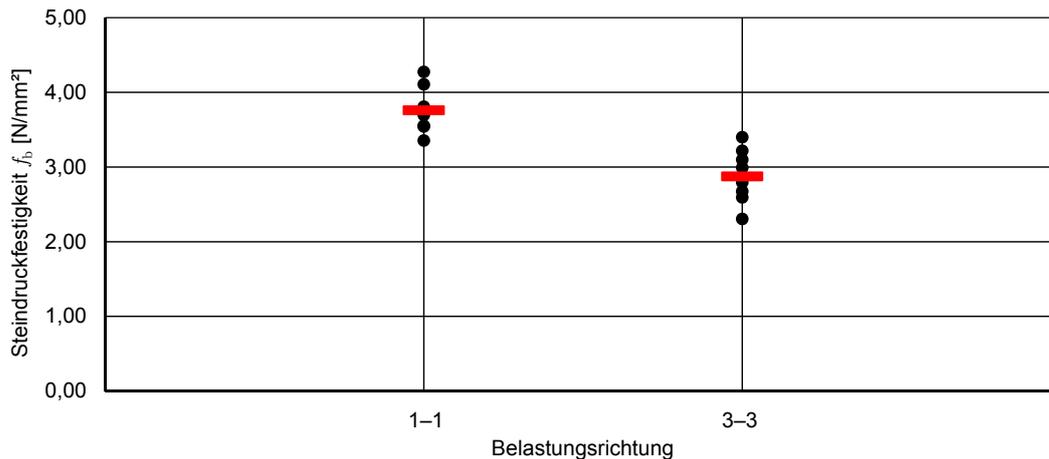


**Abb. 4.11:** Würfelpföben zur Bestimmung der Steindruckfestigkeit von Porenbeton

Aus den erzielten Ergebnissen ist in Tabelle 4.3 und Abbildung 4.12 zu erkennen, dass die Steindruckfestigkeiten unter dem angegebenen Wert der Druckfestigkeit von  $\text{N/mm}^2$  liegen. Der Maximalwert in Richtung 1–1 liegt bei  $f_{b,i} = 4,27 \text{ N/mm}^2$ , der Minimalwert bei  $f_{b,i} = 3,35 \text{ N/mm}^2$ . Der Maximalwert in Richtung 3–3 liegt bei  $f_{b,i} = 3,40 \text{ N/mm}^2$ , der Minimalwert bei  $f_{b,i} = 2,30 \text{ N/mm}^2$ . Die Standardabweichungen sind in alle Belastungsrichtungen sehr gering und liegen in einem Bereich von  $\pm 0,28$ .

**Tab. 4.3:** Normierte Steindruckfestigkeiten der Porenbeton-Würfelproben – Belastungsrichtungen 1-1 und 3-3

Stein-Nr.	Probenanzahl [-]	Belastungsrichtung [-]	$f_b$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$s(f_{b,i})$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	8	1-1	3,76	±0,28
1	12	3-3	2,87	±0,28

**Abb. 4.12:** Normierte Steindruckfestigkeiten der Porenbetonstein-Würfelproben in Belastungsrichtung 1-1

Für die Mittelwerte der geprüften Steindruckfestigkeiten können die Verhältniszahlen mit

$$\overline{1-1} : \overline{3-3} = 1,00 : 0,76 \quad (4.6)$$

angegeben werden.

Bei den Pfeilerversuchen werden die zugeschnittenen Mauersteine aus Porenbeton in Richtung 3-3 belastet und weisen damit eine normierte vertikale Steindruckfestigkeit von 2,87 N/mm<sup>2</sup> auf. Abbildung 4.13 zeigt beispielhaft Fotografien der Würfelproben aus Porenbeton während der Druckversuche.



(a) Probe vor Versuchsbeginn



(b) Probe nach dem Bruch

**Abb. 4.13:** Fotografien der Versuchsdurchführung an der Porenbetonstein-Würfelprobe 12

## 4.5 Normierte Mörteldruckfestigkeit

Der Mörtel bestimmt in Verbindung mit den Mauersteinen die vertikale Tragfähigkeit von Mauerwerkswänden. Daher ist die Kenntnis der Druckfestigkeit des Mauermörtels von großer Bedeutung und wird in dieser Arbeit ausführlich untersucht. Aufgrund der einaxialen Druckfestigkeitsprüfung der Mauerwerkspfeiler ist für die vorgesehene Verwendung des Mörtels die Kenntnis der Biegezugfestigkeit des verwendeten Mörtels nicht erforderlich. Die Bestimmungen zum Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk sind in ÖNORM EN 1015-11 [28] geregelt. Da für die Auswertung der Versuchsergebnisse der vorliegenden Arbeit die Bestimmung der Biegezugfestigkeit nicht erforderlich ist, kommt es bei der Bestimmung der Druckfestigkeit des Mörtels zu Abweichungen von der zutreffenden Norm.

Um eine Erhärtungskurve mit der Mörteldruckfestigkeit bei einem gewissen Alter der Proben zu erhalten, erfolgen Druckversuche in Abständen von wenigen Tagen an jeweils drei bis vier Einzelprobekörper. Mittels Division der dabei erzielten Höchstlasten  $F_{p,max,i}$  durch die belastete Fläche  $A_{0,i}$  ergibt sich die Mörteldruckfestigkeit am Probekörper  $\bar{f}_{m,i}$ . Für die jeweiligen Abmessungen der Einzelproben erfolgt eine separate Bestimmung des Formfaktors  $\delta_i$ . Mit Hilfe dieses Formfaktors kann eine Berechnung der Mörteldruckfestigkeit bezogen auf einen Würfel mit 100 mm Seitenlänge durchgeführt werden. Um die normierte Mörteldruckfestigkeit  $f_{m,i}$  eines Prismas mit 40 mm Breite und 40 mm Höhe zu erhalten, ist die Mörteldruckfestigkeit bezogen auf einen Würfel mit 100 mm Seitenlänge durch den Formfaktor  $\delta_i = 0,820$  zu dividieren. Mittelung dieser normierten Mörteldruckfestigkeiten  $f_{m,i}$  innerhalb aller Proben mit gleichem Alter ergibt die mittlere normierte Mörteldruckfestigkeit  $f_m$ .

Die Herstellung des Mauermörtels erfolgt immer im selben Prozedere, sowohl bei den Proben für die Mörteldruckfestigkeit wie auch bei den Mauerwerkspfeilern.

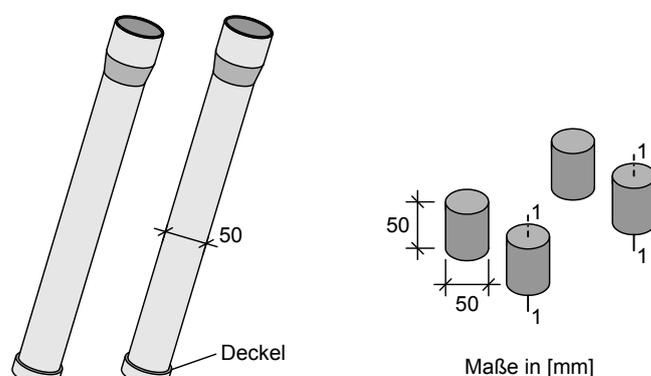
### 4.5.1 Versuchsdurchführung

Bei allen Versuchen gelangt der Flexkleber gemäß Abschnitt 3.2.3 mit identem Abmischverhältnis zur Anwendung. Lagenweise kommt der hergestellte Frischmörtel in standardmäßige Polokalrohre aus dem Baumarkt (siehe Abbildung 4.14) mit 50 mm Durchmesser, wobei jede Lage mit mindestens 25 vertikalen Stößen verdichtet wird. Anstreichen der Innenflächen der Polokalrohre mit einem dünnen Mineralölfilm vor der Befüllung verhindert ein Anhaften des Mörtels. An der Unterseite sind die Polokalrohre mit einem passenden Endstück dicht verschlossen, um ein Austreten des flüssigen Mörtels zu verhindern. Die Lagerung der mit frischem Mörtel befüllten Rohre erfolgt luftdicht und aufrecht positioniert in passenden Plastikübeln bei Raumtemperatur. Die ersten Proben werden 4 Tage nach der Herstellung des Mörtels geprüft. Dafür ist es notwendig die Polokalrohre von außen entlang des gesamten Rohres aufzuschneiden, wobei der Mörtel schadfrei zu halten ist. Aus den freigelegten Mörtelstangen ist mittels Steinkreissäge im Nassschneidverfahren die Herstellung von einzelnen Prüfkörpern mit 50 mm Höhe möglich. Die Druckversuche erfolgen an den entsprechenden Tagen mit unterschiedlichem Mörtelalter. Die restlichen Proben verbleiben außerhalb der Polokalrohre in den Plastikübeln luftdicht verschlossen. Bei der Versuchsdurchführung wird die Druckbelastung mit Hilfe der in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Druckprüfmaschine stoßfrei aufgebracht und kontinuierlich bis zum Bruch der Probe gesteigert. Für die erwarteten Mörteldruckfestigkeiten ist auf bestmögliche Einhaltung der Belastungsgeschwindigkeiten des Anhang B aus ÖNORM EN 1015-11 [28] zu achten. Die Prüfkörper werden zentrisch auf den Stahlplatten positioniert, sodass die Last über die gesamte

Breite der mit den Druckflächen in Kontakt stehenden Flächen aufgebracht wird. Für die Druckversuche kommt der Zylinder RC-306 von der ENERPAC-Druckprüfmaschine zur Anwendung. Vor jedem Versuch sind die Auflagerflächen von Verunreinigungen freizulegen und von Staub zu befreien. An der Ober- und Unterseite der Prüfkörper werden die in Abschnitt 4.3 beschriebenen Kartonzwischenlagen eingelegt. Diese stehen mindestens 5 mm über die Seitenränder der Proben.

## 4.5.2 Flexkleber

Vor der Versuchsdurchführung werden die Prüfkörper an den Schnittflächen zusätzlich abgeschliffen, um Kantenpressungen während der Belastung zu vermeiden. Alle Abmessungen der Proben sowie erreichte Höchstlasten werden notiert und bestimmen die Festigkeitswerte des Mörtels an den unterschiedlichen Tagen. Durch das isotrope Materialverhalten des Mauer Mörtels erfolgt die Prüfung der Festigkeit in nur eine Richtung.



**Abb. 4.14:** Polokalrohre zur Herstellung der zylindrischen Mörtelprobekörper

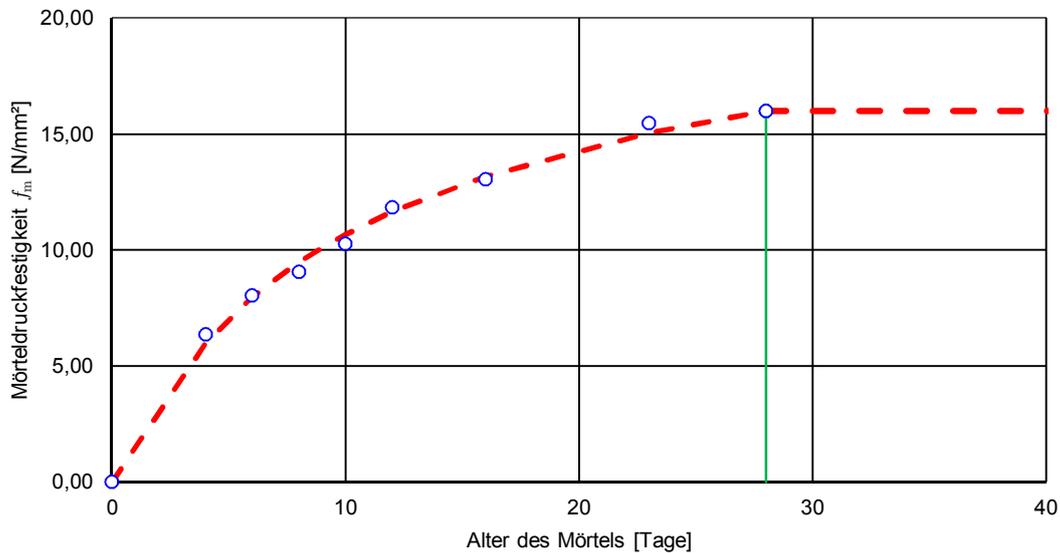
In Tabelle 4.4 sind die zusammengefassten Ergebnisse der Mörteldruckfestigkeiten nach Alter der Proben dargestellt. Aus den Festigkeitswerten und dem zugehörigen Alter kann die Erhärtungskurve des Flexklebers gemäß Abbildung 4.15 dargestellt werden. Die Festigkeitswerte  $f_{m,4/4/16}$  entsprechen den mittleren normierten Mörteldruckfestigkeiten  $f_m$  für die unterschiedlichen Alterungsstufen und werden in der Tabelle 4.4 angegeben.

Zur Bestimmung der rechnerischen Mörteldruckfestigkeit ist Formel (4.7) heranzuziehen. Für Mörtel, der eine Aushärtungszeit von 28 Tagen erreicht oder überschritten hat, ist der Wert  $\beta_{cc}(t) = 1,0$  zu setzen. Mörtel, der die Endfestigkeit noch nicht erreicht hat, ist ebenfalls nach Formel (4.7) zu ermitteln, wobei der Einfluss des Mörtelalters nach Formel (4.8) zu berücksichtigen ist. Die Tatsache, dass der Mörtel nach 28 Tagen Erhärtungszeit die endgültige Festigkeit erreicht hat, wird durch die Proben bestätigt, die mit einem Alter von 215 Tagen untersucht werden. Die dabei erreichte Festigkeit beträgt  $f_m = 16,7 \text{ N/mm}^2$ . Aufgrund der geringen Probenanzahl und der Schwankungsbreite der Ergebnisse ist davon auszugehen, dass der Mörtel mit 28 Tagen die Enddruckfestigkeit erreicht hat. Die Mörteldruckfestigkeit  $f_m$  kann nach abgeschlossener Aushärtungszeit demnach mit  $f_m = 16,0 \text{ N/mm}^2$  angegeben werden.

$$f_m(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_m \quad (4.7)$$

**Tab. 4.4:** Ergebnisse der Mörteldruckfestigkeit des Mauermörtels

Prüfung	Alter [Tage]	Probenanzahl [-]	$f_{m,10/10/10}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\delta$ [-]	$f_{m,4/4/16}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
01	4	4	5,21	0,82	6,36
02	6	3	6,60	0,82	8,05
03	8	4	7,43	0,82	9,07
04	10	3	8,41	0,82	10,26
05	12	3	9,71	0,82	11,85
06	16	3	10,69	0,82	13,04
07	23	3	12,57	0,82	15,33
08	30	3	13,08	0,82	15,95
09	40	3	13,14	0,82	16,02
10	215	4	13,70	0,82	16,70

**Abb. 4.15:** Erhärtungskurve des Flexklebers

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad \text{für } t < 28 \text{ Tage} \quad (4.8)$$

$$\beta_{cc}(t) = 1,0 \quad \text{für } t \geq 28 \text{ Tage} \quad (4.9)$$

Die Formel zur Berechnung des Beiwerts  $\beta_{cc}(t)$  wird in Anlehnung an die Erhärtungsfunktion gemäß Eurocode 2 modifiziert. Der Beiwert ist vom Alter des Mörtels abhängig, wobei  $t$  das Alter des Mörtels in Tagen ist. Der Beiwert  $s$  wird mittels Ausgleichsrechnung nach dem *Gaußschen Minimierungsprinzip* der Abstandskvadratrate gemäß Abschnitt 4.2 berechnet und kann für die festgestellten Versuchsergebnisse mit  $s = 0,6$  angegeben werden. Die Druckfestigkeitswerte der Probekörper zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls und des Querdehnungsmoduls sind in den Ergebnissen in Abbildung 4.15 nicht integriert.

## 4.6 Formänderungseigenschaften der Mauersteine und des Mauermörtels

Zur Analyse des Verformungsverhaltens von Mauerwerk ist die Kenntnis der Elastizitätsmoduln der Mauerwerkskomponenten erforderlich. Die DIN 18555-4 [23] regelt die Bestimmung des Längs- und Querdehnungsverhaltens von Festmörtel. Aufgrund der fehlenden Normen zur Bestimmung der Verformungskenngrößen von Mauersteinen wird auch bei diesen das Anwendungsverfahren der DIN 18555-4 [23] herangezogen. Die bereits in Abschnitt 2.2 beschriebene Bedeutung der Querdehnungsmoduln der Mauerwerkskomponenten Mauerstein und Mauermörtel hat wesentlichen Einfluss auf die vertikale Tragfähigkeit von Mauerwerksbauteilen. Nicht nur aufgrund der entstehenden Querspannungen in den Mauersteinen bei großen Unterschieden des Querdehnungsverhaltens, sondern auch in Hinblick auf die Effektivität einer Lagerfugenbewehrung, ist die Kenntnis der Querdehnungsmoduln relevant.

Die Mauersteine aus Porenbeton weisen derart geringe Steindruckfestigkeiten auf, sodass eine Untersuchung der Formänderungseigenschaften mittels statischem Druckversuch nicht sinnvoll möglich ist. Deshalb gelangt als Alternative eine Untersuchung mittels Ultraschalltest zur Anwendung. Diese Versuchsdurchführung erfolgt durch das *Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen* an der *Technischen Universität Wien* an den Porenbetonsteinen gemäß Abschnitt 3.2.2. Im Zuge der Untersuchung der Porenbetonsteine erfolgt auch die Bestimmung der Formänderungseigenschaften des in Abschnitt 3.2.3 definierten Flexklebers mittels Ultraschalltests.

In den Tabellen 4.5 und 4.6 sind die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung des Verformungsverhaltens der Mauersteine und des Flexklebers aufgelistet. Bei der Beschriftung der Prüfkörper steht die Abkürzung VZ für Vollmauerziegel, PB für Porenbeton und M für Mörtel.

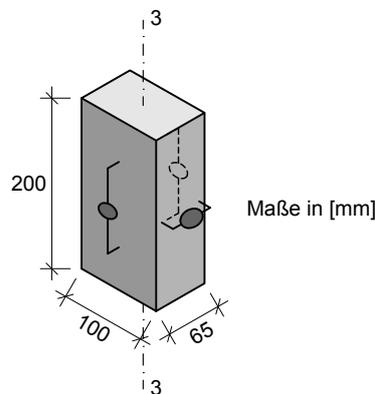
### 4.6.1 Vollmauersteine mittels Belastungstest

Die Probekörper befinden sich zentrisch auf den Auflagerflächen der Druckprüfmaschine, um Verkippungen und exzentrische Belastungen zu vermeiden. In Abbildung 4.16 ist die Anbringung der Messeinrichtungen an den Probekörpern dargestellt. Zur Aufnahme der Längsstauchung werden zwei Dehnungsaufnehmer in Belastungsrichtung auf gegenüberliegenden Seiten mittig auf den Proben angebracht. Die Messung der Querdehnungen erfolgt mittels Dehnungsaufnehmer an einer dritten Seitenfläche mittig ohne Einfluss der Querdehnungsbehinderung durch die Stahlplatten. Unter konstanter Laststeigerung werden die Probekörper bis zur Hälfte der erwartenden Bruchlast belastet. Die zu erwartende Bruchlast kann aus den Probenabmessungen und den in den Abschnitten 4.4 und 4.5 festgestellten Druckfestigkeiten vorab ermittelt werden. Diese Laststufe der halben Bruchlast ist aufgrund der verschiedenen Steindruckfestigkeiten in unterschiedliche Belastungsrichtungen bei allen Serien verschieden. Bei dieser Laststufe wird die aufgebrachte Kraft konstant gehalten, während die Messeinrichtungen abgebaut werden, um diese beim Bruch der Proben nicht zu zerstören. Nach erfolgter Demontage der Wegaufnehmer kommt es zur weiteren Laststeigerung bis zum Bruch der Probekörper. Die gemessenen Verformungen und die aufgebrachten Lasten sind aufgezeichnet und können in Spannungs-Dehnungs-Diagrammen dargestellt werden. Die Stauchungen, die an gegenüberliegenden Seiten der Proben gemessen werden, dürfen vom Mittelwert maximal  $\pm 20\%$  abweichen. Bei Überschreitung dieser Grenze ist der Probekörper neu auszurichten und der Versuch muss neu gestartet werden. Diese Vorgabe stammt aus der ÖNORM B 3303 [27].

Mögliche geometrische Unebenheiten ergeben zu Beginn der Belastung aufgrund der weggesteuerten Lastaufbringung geringe Druckkräfte. Zur Garantie, dass die Proben vollflächig belastet werden, erfolgt die Auswertung des Sekantenmoduls unter 20 % und 45 % der Bruchlast. Bei diesen Laststufen werden die Werte der Belastung und Verformung zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls herangezogen.

Durch die vorgegebene Geometrie der österreichischen Normalformatsteine ergeben sich die Abmessungen Probekörper zu 200/100/65 mm. Bei Belastung in Richtung 3–3 kommen zur Ermittlung der Verformungen Dehnungsaufnehmer mit Verlängerungsstücken für Nennmesslängen von  $l_0 = 100$  mm zum Einsatz. Während der stetig steigenden Druckbeanspruchung erfolgt die Messung der Querdehnungen der Mauersteine mittels Dehnungsaufnehmer mit Verlängerungsstücken für Nennmesslängen von  $l_0 = 50$  mm. Die Mittelwertbildung der aufgenommenen Messwerte der beiden Längsstauchungen ergibt die Gesamtstauchung. Die Ergebnisse der Längs- und Querverformungen sind gemeinsam in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt. Abbildung 4.17 zeigt beispielhaft die Verformungen der Vollmauersteinprobe VZ-3-3-A.

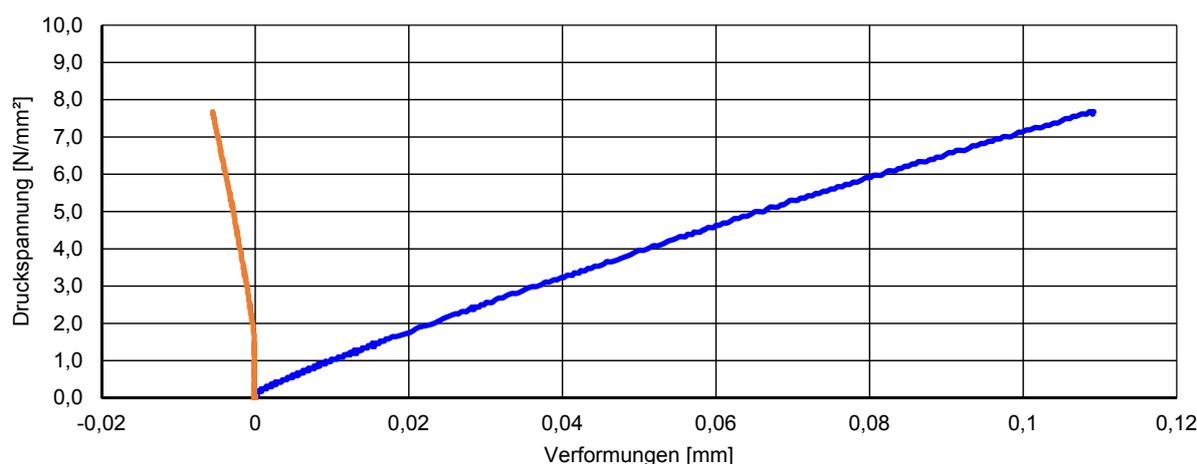
Da die Modellmauersteine bei den Pfeilerversuchen stets in Richtung 3–3 belastet werden, erfolgt die Untersuchung der Längsstauchungen und Querdehnungen ausschließlich unter Belastung in 3–3. Unter der gegebenen Belastungssituation geht man vereinfachend davon aus, dass sich die Querdehnungen quer zur Belastungsrichtung in Richtung 1–1 und Richtung 2–2 gleichermaßen verhalten. Auf eine separate Untersuchung des Formänderungsverhaltens bei Belastung in die verbleibenden Richtungen 1–1 und 2–2 wird verzichtet, da sie durch den vorgegebenen Einbau bei den Pfeilerversuchen nicht relevant sind.



**Abb. 4.16:** Geometrie der Vollmauersteinproben und Anbringung der Dehnungsaufnehmer

**Tab. 4.5:** Ergebnisse des Verformungsverhaltens der Mauerwerkskomponenten

Probekörper	Belastungsrichtung	Elastizitätsmodul $E_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Querdehnungsmodul $E_{q,p}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Querdehnungszahl $\nu$ [-]
VZ-3-3-A	3–3	6694	52 710	0,127
VZ-3-3-B	3–3	7885	115 955	0,068
VZ-3-3-C	3–3	8655	166 440	0,052
Mittelwert	3–3	7745	94 450	0,082



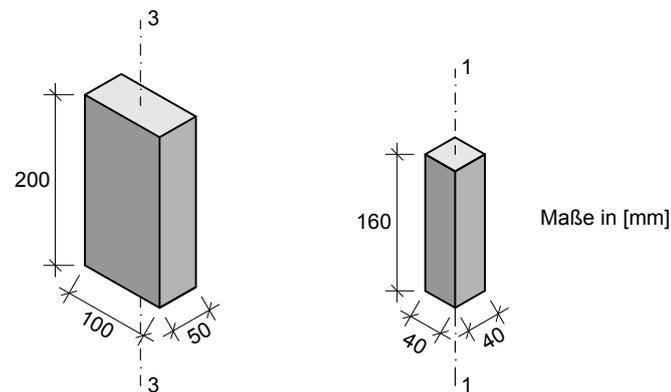
**Abb. 4.17:** Beispielhafte Darstellung der Längsstauchungen (blau) und Querdehnungen (orange) am Vollmauerstein VZ-3-3-A

#### 4.6.2 Porenbetonsteine und Flexkleber mittels Ultraschalltest

Dem Skriptum zur Vorlesung mit Übung aus Ingenieurmechanik [5] zufolge ist mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Longitudinal- bzw. Transversalwellen und Kenntnis der Massendichte der Probekörper eine Bestimmung von Elastizitätsmodul  $E_D$  und Querdehnungszahl  $\nu$  möglich. An der Ober- und Unterseite der Probe werden Pulsgeber und Pulsempfänger montiert. Die vom Pulsgeber abgesendeten Ultraschallsignale durchlaufen die Probe bis zum Pulsempfänger und können mittels Oszilloskop visualisiert werden. Es ist eine möglichst verlustfreie Überleitung der Signale anzustreben. Die Longitudinalwelle ist in der Regel doppelt so schnell im Vergleich zur Transversalwelle. Die Unterscheidung der beiden Wellenarten erfolgt deshalb anhand der Laufzeiten und der Signalstärken.

Die verwendeten YTONG-Plansteine der *Xella Porenbeton Österreich GmbH* besitzen die Abmessungen  $l_u/b_u/h_u = 625/50/250$  mm. Zur Bestimmung der Formänderungseigenschaften in Belastungsrichtung 3-3 werden Probekörper mit 200/100/50 mm gemäß Abbildung 4.18 hergestellt. Für die Ermittlung der Formänderungseigenschaften des bei den Pfeilerversuchen verwendeten Flexklebers erfolgt die Herstellung von drei Mörtelprismen mit Hilfe einer normgerechten Prismenschalung. Die angefertigten Proben weisen die Abmessungen 160/40/40 mm auf. Der Frischmörtel in der Schalung wird bei der Herstellung zur Sicherstellung der Verdichtung 25 mal angehoben und aus einer Höhe von drei Zentimeter fallen gelassen. Die Oberseite wird mittels Abgleichlineal abgezogen. Vier Tage nach der Herstellung werden die Probekörper ausgeschalt. Die weitere Aushärtung erfolgt bei Raumtemperatur. Nach 28 Tagen kann gemäß Abschnitt 4.5 von vollständiger Erhärtung ausgegangen werden. Die Prüfung der Formänderungseigenschaften erfolgt 41 Tage nach der Herstellung des Mörtels. Die mittlere Dichte der Porenbetonsteine beträgt  $\rho = 0,587 \text{ g/cm}^3$  und die des Flexklebers beträgt  $\rho = 1,445 \text{ g/cm}^3$ .

Die festgestellten Formänderungseigenschaften, die aus den Ultraschalltests von Raphael Suda im Rahmen seiner Diplomarbeit [19] am IMWS der *Technischen Universität Wien* gewonnen wurden, sind in Tabelle 4.6 aufgelistet. Für die Berechnung des Elastizitätsmoduls  $E_D$  von Porenbeton ist die Kenntnis der Querdehnungszahl  $\nu$  erforderlich. Aus unterschiedlichen Literaturangaben ist  $\nu = 0,2$  zu entnehmen und wird daher für die Auswertung als Annahme herangezogen. Der Querdehnungsmodul  $E_{q,p}$  kann aus den Werten für Elastizitätsmodul  $E_D$  und Querdehnungszahl  $\nu$  berechnet werden.



**Abb. 4.18:** Geometrie der Porenbetonsteine und der Mörtelproben sowie Anbringung der Dehnungsaufnehmer

Abbildung 4.18 stellt die Probekörper mit deren Abmessungen dar. Pulsgeber und Pulsempfänger sind bei den Proben aus Porenbetonstein während der Versuchsdurchführung an den Seitenflächen der Richtung 3–3 angebracht. Bei den Mörtelproben sind diese an den Seitenflächen der Richtung 1–1 montiert. Tabelle 4.6 listet die Ergebnisse der Ultraschalltests für die untersuchten Porenbetonsteine und Mörtelprismen auf.

**Tab. 4.6:** Ergebnisse des Verformungsverhaltens der Mauerwerkskomponenten aus den Ultraschalltests

Material	Belastungsrichtung	Elastizitätsmodul $E_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Querdehnungsmodul $E_{q,p}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Querdehnungszahl $\nu$ [-]
Porenbeton	3–3	2250	11 260	0,200
Flexkleber	1–1	8380	37 500	0,223

# Kapitel 5

## Auswertung der Pfeilerversuche

Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, fundierte Aussagen über mögliche Tragfähigkeitssteigerungen bei Mauerwerkswänden infolge Lagerfugenbewehrung mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen zu gewinnen. Durch die Untersuchung der verwendeten Materialien und der Auswertung deren Materialparameter ist vor der Durchführung der Pfeilerversuche eine erforderliche Basis des Werkstoffverhaltens geschaffen. Mit den zur Verfügung stehenden Prüfeinrichtungen ist eine Untersuchung von Mauerwerkswänden in tatsächlicher, baupraktischer Größe nicht möglich, wodurch ein Modellmaßstab gewählt wird. Auch die Untersuchung von wandartigen Modellkörpern kann nicht durchgeführt werden. Aus diesem Grund werden Pfeiler hergestellt, bei denen Mauersteine nach Abschnitt 3.6.1 im Verband aufgemauert werden. Die Mauersteine werden scharenweise um 90 Grad gedreht aufgemauert, wobei jede Schar aus zwei Steinen besteht (siehe Abbildung 5.1). Zwischen den beiden Steinen befindet sich je eine Stoßfuge. Die Pfeiler weisen quadratische Grundflächen auf und bestehen allesamt aus acht übereinanderliegenden Steinscharen. Zur Anwendung kommt je eine Pfeilerserie mit Mauersteinen aus Vollmauerziegel und eine Pfeilerserie mit Mauersteinen aus Porenbeton. Dabei werden unterschiedliche Bewehrungsgrade untersucht und gegenübergestellt. Alle Pfeiler sind mit Mauermörtel gemäß Abschnitt 3.2.3 und Textilglasgitter gemäß Abschnitt 3.2.5 – außer bei unbewehrten Pfeilern – hergestellt.

Die in Kapitel 4 ermittelten Materialparameter erlauben detaillierte Analysen der erzielten Ergebnisse der Pfeilerversuche und können Aufschluss über verschiedene Verhaltensweisen beim Bruch der Probekörper geben. Sie können zusätzlich zur Interpretation von erzielten Laststeigerungen herangezogen werden.

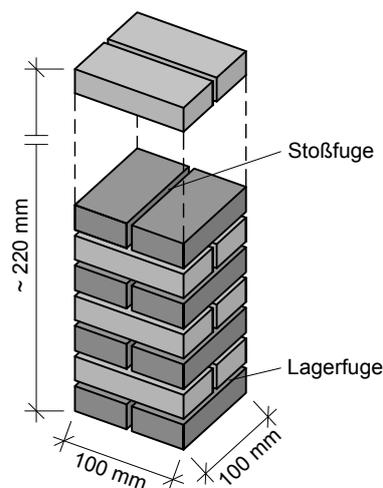


Abb. 5.1: Schematische Darstellung eines Pfeilerprüfkörpers

## 5.1 Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung

Der Aufbau eines Pfeilerprüfkörpers, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, ist bei allen Pfeilerversuchen gleich. Jede Pfeilerserie besteht aus zwölf Prüfkörpern, wobei jeweils drei Pfeiler gleichartig bewehrt sind. Zur Feststellung von möglichen Steigerungen der Tragfähigkeit werden in jeder Serie drei Prüfkörper gänzlich unbewehrt untersucht, drei Prüfkörper mit einer Bewehrungslage in Pfeilermitte, drei Prüfkörper mit drei Bewehrungslagen in den Viertelpunkten des Pfeilers und drei Prüfkörper mit insgesamt sieben Bewehrungslagen. Die unbewehrten Prüfkörper dienen als Grundlage, um eine Referenz für die Tragfähigkeitssteigerungen der bewehrten Pfeiler zu ermitteln. Die Prüfkörper mit sieben Bewehrungslagen stellen den maximal möglichen Bewehrungsgrad dar und werden in dieser Arbeit als *vollständig bewehrt* bezeichnet. Die Erwartung im Vorfeld der Versuchsdurchführung ist, dass diese vollständig bewehrten Prüfkörper die größte Tragfähigkeit aufweisen. Abbildung 5.2 zeigt schematisch die unterschiedlichen Bewehrungsgrade der Prüfkörper.

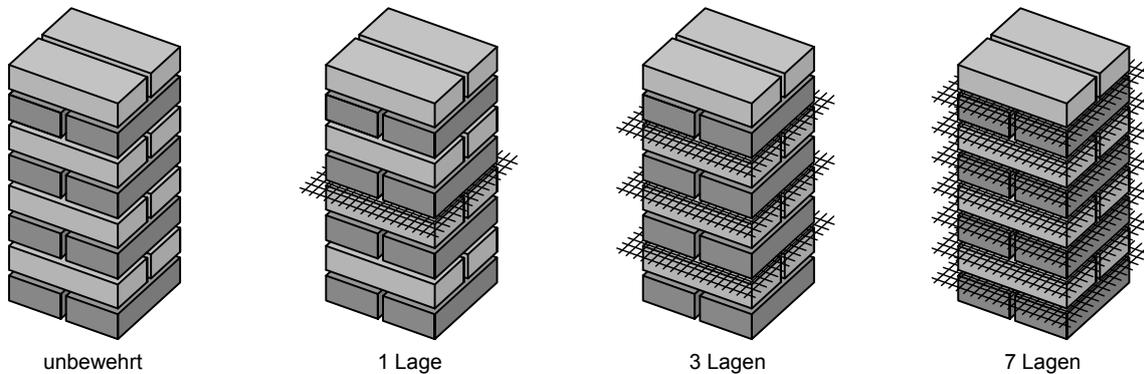


Abb. 5.2: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Bewehrungsgrade der Pfeiler

Der verwendete Flexkleber weist mit der Mörteldruckfestigkeit nach Abschnitt 4.5 eine verhältnismäßig hohe Druckfestigkeit auf. Für eine Beurteilung des Einflusses von unterschiedlichen Mörteldruckfestigkeiten kommt nach der Untersuchung der ersten beiden Hauptserien eine weitere Serie zur Anwendung, bei der ausschließlich Mauersteine aus Vollmauerziegel eingesetzt werden. Bei dieser Serie ist durch das Alter und dadurch durch unterschiedliche Erhärungszeiten des Flexklebers die Mörteldruckfestigkeit verschieden. Es stehen drei mal zwei Pfeiler zur Verfügung, wovon je einer unbewehrt und einer vollständig bewehrt ist. Im Abstand von 4 Tagen werden jeweils 2 Pfeiler einem Druckversuch unterzogen und bis zum Bruch belastet. Im Zuge der Pfeileruntersuchungen erfolgt an den entsprechenden Tagen vorab eine Untersuchung der Mörteldruckfestigkeit mittels Druckversuchen an zylindrischen Proben. Aus Tabelle 4.4 ist zu entnehmen, dass sich nach vier Tagen Erhärungszeit eine Mörteldruckfestigkeit  $f_{m,4/4/16}$  von  $6,36 \text{ N/mm}^2$ , nach acht Tagen von  $9,07 \text{ N/mm}^2$  und nach zwölf Tagen von  $11,85 \text{ N/mm}^2$  ergibt. Die Endfestigkeit des Flexklebers beträgt  $f_{m,4/4/16} = 16,0 \text{ N/mm}^2$ . Die Mauersteine werden sowohl als Vollmauerziegel wie auch als Porenbeton in Richtung 3-3 belastet. Dies bedeutet, dass die normierte vertikale Steindruckfestigkeit der Vollmauersteine  $f_b = 16,42 \text{ N/mm}^2$  und die der Porenbetonsteine  $f_b = 2,87 \text{ N/mm}^2$  beträgt. Zur Übersicht sind in Tabelle 5.1 die untersuchten Prüfkörper mit deren Materialien, Bewehrungsgraden und Prüfalfer zusammengefasst.

Bei der Versuchsdurchführung werden an der Ober- und Unterseite der Pfeiler Kartonzwischenlagen gemäß Abschnitt 4.3 eingelegt, um Kantenpressungen während des Druckversuchs zu verhindern.

**Tab. 5.1:** Übersicht über sämtliche Pfeilerversuche

Serie	Bezeichnung	Anzahl Pfeiler	Material Mauerstein	Bewehrung	Mörtelalter [Tage]
1	VZ-1	3	Vollmauerziegel	unbewehrt	> 28
	VZ-2	3	Vollmauerziegel	1 Lage	> 28
	VZ-3	3	Vollmauerziegel	3 Lagen	> 28
	VZ-4	3	Vollmauerziegel	7 Lagen	> 28
2	PB-1	3	Porenbeton	unbewehrt	> 28
	PB-2	3	Porenbeton	1 Lage	> 28
	PB-3	3	Porenbeton	3 Lagen	> 28
	PB-4	3	Porenbeton	7 Lagen	> 28
3	VZ-5	2	Vollmauerziegel	unbewehrt / 7 Lagen	4
	VZ-6	2	Vollmauerziegel	unbewehrt / 7 Lagen	8
	VZ-7	2	Vollmauerziegel	unbewehrt / 7 Lagen	12

## 5.2 Ergebnisse des experimentellen Hauptprogramms

Um möglichst aufschlussreiche Daten und Versuchsergebnisse durch die Pfeilerexperimente zu erhalten, werden die erreichten Höchstlasten sowie die Formänderungen in Belastungsrichtung und quer zur Belastungsrichtung aufgezeichnet. Die Belastung der Prüfkörper erfolgt mit den in Abbildung 2.15 angegebenen Belastungszyklent, wobei zwischen Pfeilern mit Mauersteinen aus Vollmauerziegel und Pfeilern mit Mauersteinen aus Porenbeton zu unterscheiden ist. Nachdem alle Prüfkörper bis zum Eintritt des Bruchzustandes belastet werden, stehen sie für keine weiteren Untersuchungen zur Verfügung. Die Analyse und die Dokumentation über das Bruchverhalten und die entstandenen Bruchbilder erfolgen erst nach der Versuchsdurchführung.

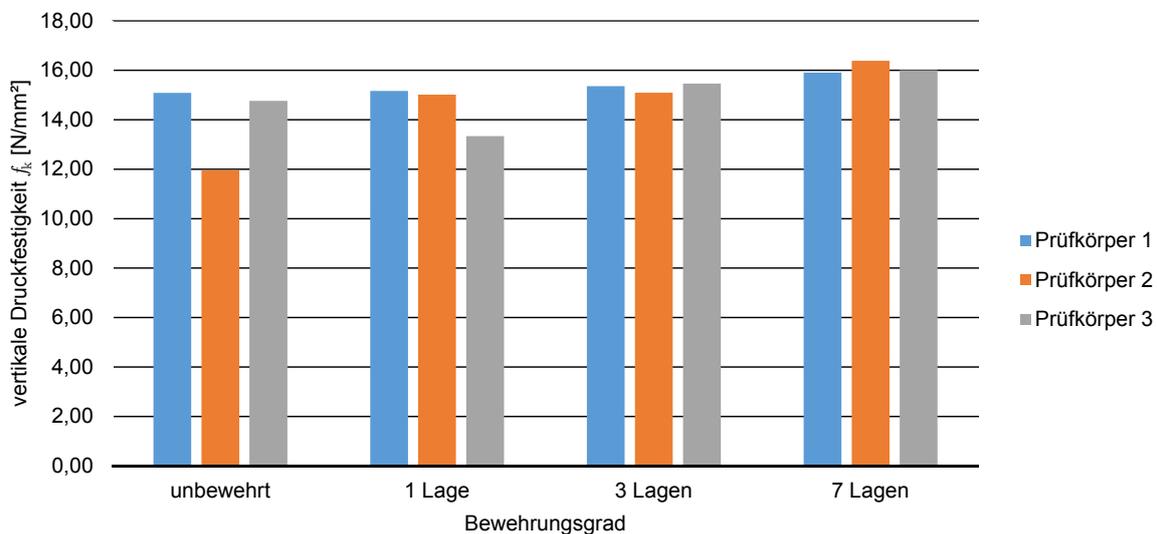
### 5.2.1 Vertikale Wanddruckfestigkeit

Den Beginn der Pfeilerversuche stellt die Untersuchung der unbewehrten Prüfkörper mit Mauersteinen aus Vollmauerziegeln dar. Folgend werden die Pfeiler mit nur einer Bewehrungslage geprüft, danach diejenigen mit 3 Lagen und abschließend die Pfeiler mit vollständigem Bewehrungsgrad. Nach Entfernung sämtlicher Verunreinigungen, Einbringung der Kartonzwischenlagen und Montage der Messeinrichtungen beginnt die Belastung der Pfeiler durch die Druckprüfmaschine nach Abschnitt 3.5.1 mit dem Zylinder RC-306, der eine Maximalkraft von 326,2 kN aufbringen kann. Die aufgebrachte Kraft bezogen auf die Bruttoquerschnittsfläche  $A_0$  ergibt die im Pfeiler herrschende Druckspannung. Durch das Auflegen der Nivellierplatte der Druckprüfmaschine werden die Prüfkörper bereits vor Belastungsbeginn mit einer Auflast von  $\sigma_d = 0,088 \text{ N/mm}^2$  belastet.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Pfeilerserien 1 – 3 angeführt. Zum Teil werden auch die Ergebnisse der Tastversuche in der Auswertung der Pfeilerversuche berücksichtigt. Vor allem der Aufbau der Prüfkörper aus der Tastversuche Serie 3 ist dem Aufbau der Pfeilerhauptversuche sehr ähnlich. Die festzustellenden Tragfähigkeitssteigerungen werden anschließend an die Ergebnisdarstellung ausgewertet.

### Serie 1 – Vollmauerziegel

Die unbewehrten Prüfkörper mit Mauersteinen aus Vollmauerziegel weisen eine mittlere vertikale Wanddruckfestigkeit von  $13,93 \text{ N/mm}^2$  auf und stellen den Referenzwert für die weiteren Versuche der Serie 1. Dieser Referenzwert wird mit 100 % Tragfähigkeit deklariert. Die mittlere Wanddruckfestigkeit der Pfeiler mit einer Bewehrungslage liegt bei  $14,50 \text{ N/mm}^2$ , die der Pfeiler mit drei Bewehrungslagen bei  $15,31 \text{ N/mm}^2$  und die der vollständig bewehrten Pfeiler bei  $16,10 \text{ N/mm}^2$ . Abbildung 5.3 zeigt grafisch die Ergebnisse der einzelnen Prüfkörper. Darin ist auch zu erkennen, dass bei den unbewehrten Pfeilern und den Pfeilern mit einer Bewehrungslage eher Ausreißer auftreten als bei den Prüfkörpern mit höheren Bewehrungsgraden. Da keine geometrischen Imperfektionen oder exzentrische Belastungen festgestellt werden können, sind diese Ausreißer nicht auszuschließen und werden in der Auswertung berücksichtigt. Die Tragfähigkeitssteigerungen in Relation auf die unbewehrten Proben sind in Abbildung 5.3 dargestellt und in Tabelle 5.2 aufgelistet.



**Abb. 5.3:** Ergebnisse der Pfeilerversuche Serie 1 mit Mauersteinen aus Vollmauerziegel

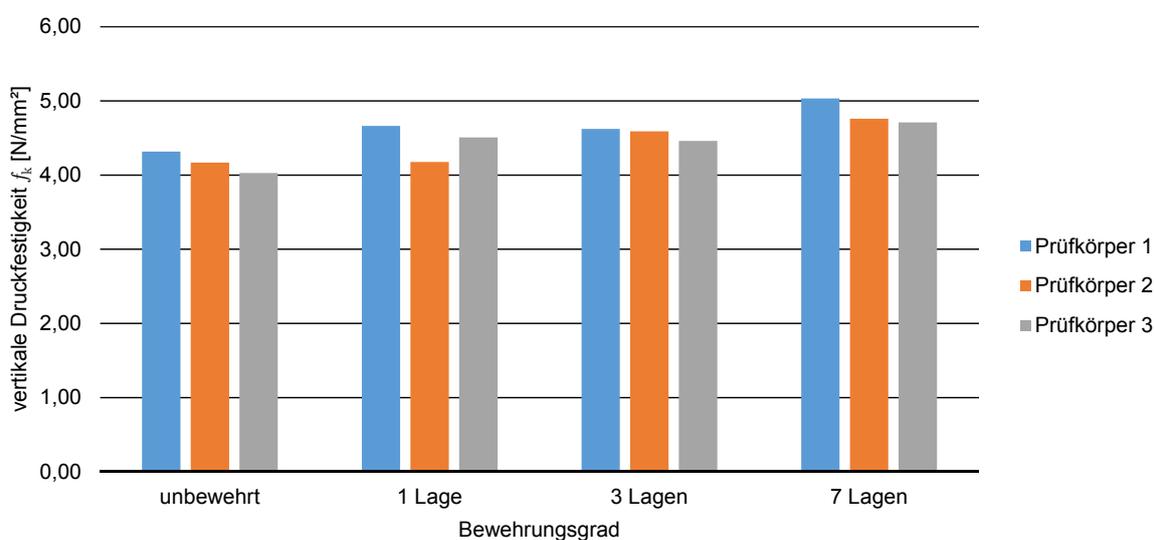
**Tab. 5.2:** Mittlere vertikale Wanddruckfestigkeiten  $f_k$  der Serie 1 und zugehörige Tragfähigkeitssteigerungen

	unbewehrt	1 Lage	3 Lagen	7 Lagen
Wanddruckfestigkeit $f_k$ [ $\text{N/mm}^2$ ]	13,93	14,50	15,31	16,10
Tragfähigkeitssteigerung [%]	100,0	104,1	109,8	115,5

Die Ergebnisse der ersten Pfeilerserie mit Mauersteinen aus Vollmauerziegel weisen mit steigendem Bewehrungsgrad eine kontinuierliche Steigerung der Tragfähigkeit auf. Der vollständig bewehrte Prüfkörper erreicht im Mittel eine um 15 % erhöhte Festigkeit gegenüber dem unbewehrten Prüfkörper.

### Serie 2 – Porenbeton

Die unbewehrten Prüfkörper mit Mauersteinen aus Porenbeton weisen eine mittlere vertikale Wanddruckfestigkeit von  $4,17 \text{ N/mm}^2$  auf und stellen den Referenzwert für die weiteren Versuche der Serie 1. Dieser Referenzwert wird mit 100 % Tragfähigkeit deklariert. Die mittlere Wanddruckfestigkeit der Pfeiler mit einer Bewehrungslage liegt bei  $4,45 \text{ N/mm}^2$ , die der Pfeiler mit drei Bewehrungslagen bei  $4,56 \text{ N/mm}^2$  und die der vollständig bewehrten Pfeiler bei  $4,83 \text{ N/mm}^2$ . Abbildung 5.4 zeigt grafisch die Ergebnisse der einzelnen Prüfkörper. Die Werte der Wanddruckfestigkeit  $f_k$  sind in dieser Serie sehr gleichmäßig und ohne deutliche Ausreißer verteilt. Die Gleichmäßigkeit der Ergebnisse bestätigt auch bei weichen Steinen eine effektive Wirkung der querdehnungsbehindernden Schichten. Die Tragfähigkeitssteigerungen in Relation auf die unbewehrten Proben sind in Abbildung 5.4 dargestellt und in Tabelle 5.3 aufgelistet.



**Abb. 5.4:** Ergebnisse der Pfeilerversuche Serie 2 mit Mauersteinen aus Porenbeton

**Tab. 5.3:** Mittlere vertikale Wanddruckfestigkeiten  $f_k$  der Serie 2 und zugehörige Tragfähigkeitssteigerungen

	unbewehrt	1 Lage	3 Lagen	7 Lagen
Wanddruckfestigkeit $f_k$ [ $\text{N/mm}^2$ ]	4,17	4,45	4,56	4,83
Tragfähigkeitssteigerung [%]	100	106,7	109,3	115,9

Die Ergebnisse der erreichten Tragfähigkeitssteigerungen sind in den ersten beiden Pfeilerserien trotz deutlich unterschiedlicher Steindruckfestigkeiten beinahe ident. Die absoluten Festigkeitswerte liegen wie erwartet aufgrund der geringeren Steindruckfestigkeit der Porenbetonsteine deutlich unter jenen der ersten Pfeilerserie. Die Steigerung der Festigkeit ist allerdings in gleichem Ausmaß wie bei der ersten Serie mit steigendem Bewehrungsgrad festzustellen. Die vollständig bewehrten Pfeiler erreichten Tragfähigkeitssteigerungen von rund 15 %.

### Serie 3 – Vollmauerziegel unbewehrt bzw. vollständig bewehrt

Nach vier Tagen Erhärtungszeit des Flexklebers erreicht der unbewehrte Pfeiler eine vertikale Wanddruckfestigkeit von  $12,44 \text{ N/mm}^2$  und der vollständig bewehrte Pfeiler  $14,26 \text{ N/mm}^2$ . Acht Tage nach der Prüfkörperherstellung versagt bei der Versuchsdurchführung der unbewehrte Pfeiler bei einer Spannung von  $12,73 \text{ N/mm}^2$  und der vollständig bewehrte bei  $14,78 \text{ N/mm}^2$ . Der unbewehrte Prüfkörper, der zwölf Tage nach der Herstellung untersucht wird, weist eine vertikale Wanddruckfestigkeit von  $10,82 \text{ N/mm}^2$  auf, wobei der vollständig bewehrte Pfeiler  $12,47 \text{ N/mm}^2$  erreicht. Die Festigkeitswerte der Prüfkörper mit längerer Erhärtungszeit liegen unter den Werten der Pfeiler mit frischerem Mörtel. Dies kann durch die geringe Anzahl an Probekörper verursacht werden. Die Tragfähigkeitssteigerung liegt jedoch in einem ähnlichem Bereich wie bei den restlichen Versuchen dieser Serie. Es wird davon ausgegangen, dass bei größerer Prüfkörperanzahl die Werte der vertikalen Wanddruckfestigkeit bei Pfeilern mit höherer Mörteldruckfestigkeit über den Werten der Pfeiler mit geringerer Mörteldruckfestigkeit liegen. Auf eine weitere Prüfkörperherstellung mit einer Untersuchung nach zwölf Tagen Erhärtungszeit wird aufgrund des zeitlichen Rahmens verzichtet. Die Ergebnisse der Serie 3 sind in Abbildung 5.5 dargestellt und in Tabelle 5.4 aufgelistet.

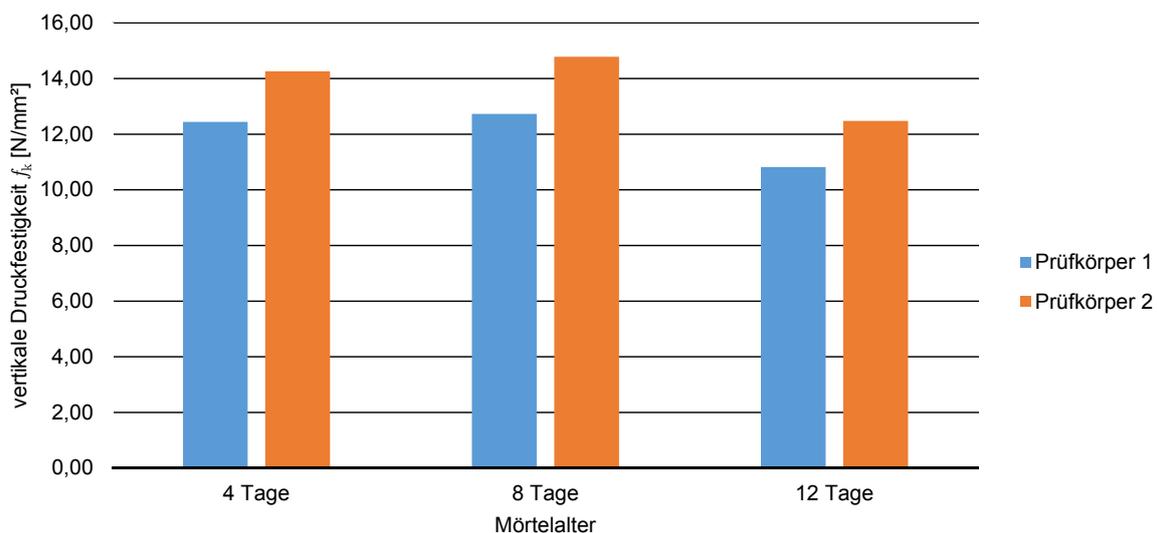


Abb. 5.5: Ergebnisse der Pfeilerversuche Serie 3 mit Mauersteinen aus Vollmauerziegel

Tab. 5.4: Vertikale Wanddruckfestigkeiten  $f_k$  der Serie 3 und zugehörige Tragfähigkeitssteigerungen in Abhängigkeit des Mörtelalters

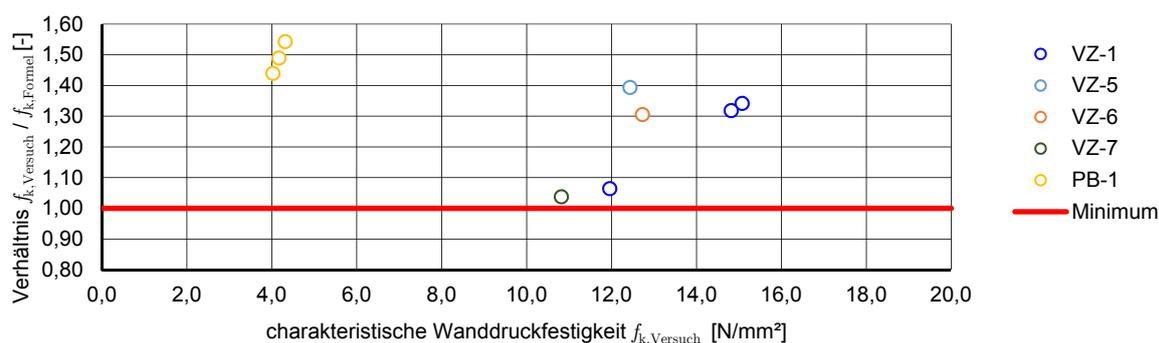
	Bewehrung	4 Tage	8 Tage	12 Tage
Wanddruckfestigkeit Prüfkörper 1 $f_k$ [N/mm <sup>2</sup> ]	unbewehrt	12,44	12,73	10,82
Wanddruckfestigkeit Prüfkörper 2 $f_k$ [N/mm <sup>2</sup> ]	7 Lagen	14,26	14,78	12,47
Tragfähigkeitssteigerung [%]		14,6	16,1	15,3

Es ist zu erkennen, dass alle Pfeiler, die mit vollständiger Bewehrung ausgestattet sind, eine Tragfähigkeitssteigerung von rund 15 % erreichen. Diese Werte liegen beinahe ident bei den Ergebnissen der ersten beiden Pfeilerserien. Bei den Tragfähigkeitssteigerungen treten kaum Ausreißer auf und die Standardabweichungen sind im Allgemeinen sehr gering.

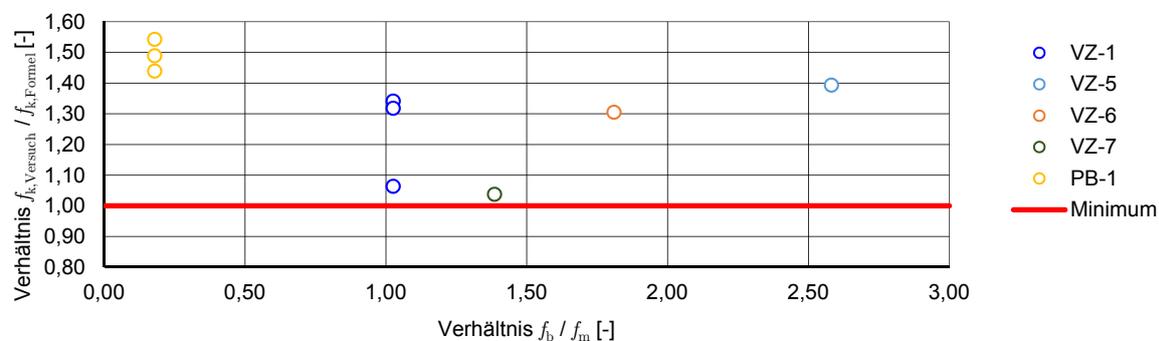
### 5.2.2 Modellfaktor

Für eine realitätsnahe Beurteilung der Auswirkungen auf die Tragfähigkeit, die sich durch die experimentelle Untersuchung an Modellpfeilern ergibt, wird ein Modellfaktor ermittelt. Mit den in den Abschnitten 4.4 und 4.5 festgestellten Druckfestigkeiten von Mauersteinen und Mauermörtel ist die Ermittlung der rechnerischen Tragfähigkeit der Pfeiler mit Hilfe von Formel (3.8) für die unterschiedlichen Varianten der Komponenten möglich. Aus den tatsächlich erreichten Druckfestigkeitswerten der Pfeiler können die Verhältnisse von Versuchswert  $f_{k,\text{Versuch}}$  zu rechnerischem Wert  $f_{k,\text{Formel}}$  bestimmt werden. Diese Verhältnisse von allen unbewehrten Prüfkörpern sind in Abbildung 5.6 eingetragen. Die Formel zur  $f_k$ -Berechnung von Mauerwerkswänden (3.8) ist ausschließlich für gänzlich unbewehrtes Mauerwerk gültig, weshalb zur Ermittlung des Modellfaktors nur unbewehrte Pfeilerprüfkörper herangezogen werden können. Damit alle Verhältnisse gerade noch über dem Minimalwert von 1,0 liegen, wird die rechnerische Wanddruckfestigkeit mit einem Modellfaktor von 1,90 multipliziert. Um einen Fraktilwert von mindestens 95 % einzuhalten, müssen aufgrund der geringen Probenanzahl alle Werte über dem geforderten Minimum liegen. Beim gewählten Modellfaktor liegt der Minimalwert bei 1,04. Somit wird sogar ein 100 %-Fraktilwert erreicht. Die rechnerische charakteristische Wanddruckfestigkeit  $f_{k,\text{Formel}}$  ist mittels Formel (5.1) zu ermitteln.

$$f_{k,\text{Formel}} = 1,90 \cdot K \cdot f_b^\alpha \cdot \min(f_m; 2 \cdot f_b)^\beta \quad (5.1)$$



**Abb. 5.6:** Verhältnisse der erreichten Festigkeiten der Versuche  $f_{k,\text{Versuch}}$  zu den rechnerischen Festigkeitswerten  $f_{k,\text{Formel}}$  aller unbewehrter Pfeiler

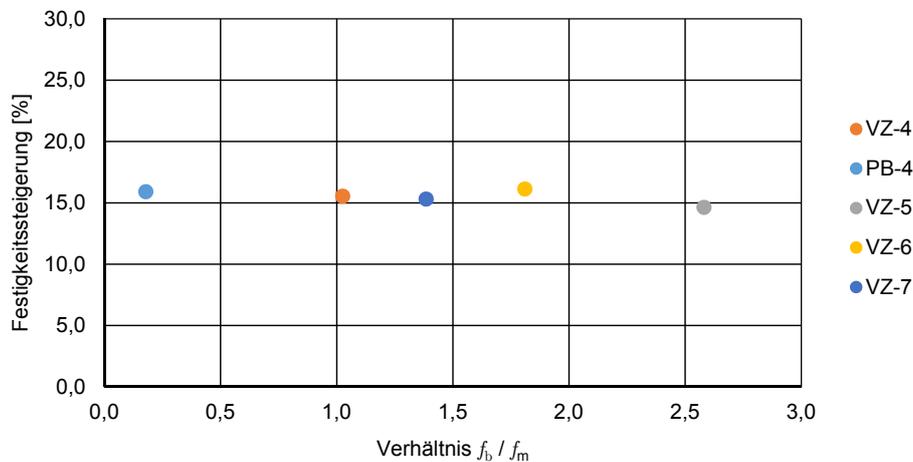


**Abb. 5.7:** Verhältnis  $f_{k,\text{Versuch}}/f_{k,\text{Formel}}$  bezogen auf das Verhältnis  $f_b/f_m$  aller unbewehrter Pfeiler

Abbildung 5.7 zeigt das Verhältnis von Versuchswert  $f_{k,\text{Versuch}}$  zu rechnerischem Wert  $f_{k,\text{Formel}}$  in Bezug auf das Verhältnis  $f_b/f_m$ . Sowohl bei niedrigem  $f_b/f_m$ -Verhältnis wie auch bei höherem  $f_b/f_m$ -Verhältnis treten ähnliche Ausreißer auf und hat somit keinen wesentlichen Einfluss.

### 5.2.3 Tragfähigkeitssteigerungen infolge Lagerfugenbewehrung

Zur Beurteilung des Einflusses von Unterschieden der Druckfestigkeiten der Komponenten Mauerstein und Mauermörtel werden die Festigkeitssteigerungen in Bezug auf das Verhältnis von Steindruckfestigkeit zu Mörteldruckfestigkeit in einem Diagramm dargestellt. Die verschiedenen Verhältniszahlen ergeben sich hauptsächlich durch die Untersuchung von Pfeilern mit unterschiedlichem Alter und somit unterschiedlichen Erhärtungsstufen des Flexklebers. Die in Abbildung 5.8 dargestellten Werte der Festigkeitssteigerung stellen immer die vollständig bewehrten Pfeiler mit sieben Bewehrungslagen bezogen auf deren unbewehrte Referenzprüfkörper dar.



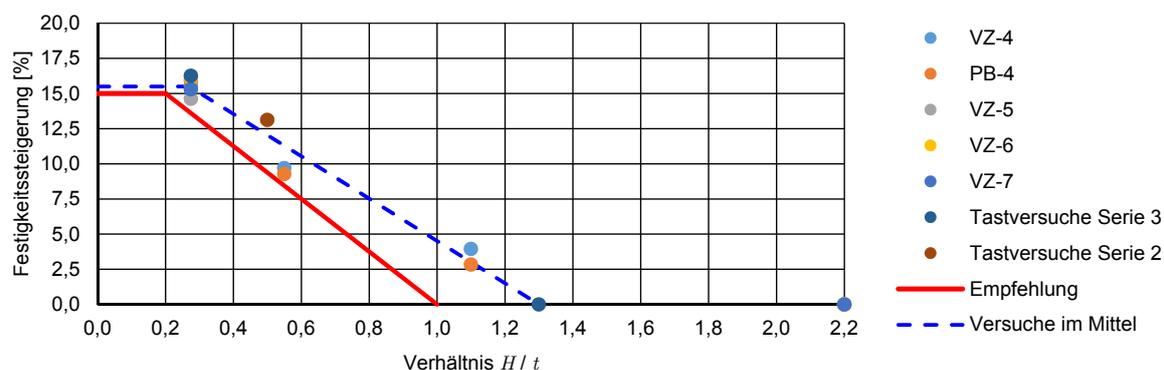
**Abb. 5.8:** Festigkeitssteigerungen in Bezug auf das Verhältnis von  $f_b/f_m$

**Tab. 5.5:** Tabellarische Darstellung der Festigkeitssteigerungen in Abhängigkeit vom Verhältnis Steindruckfestigkeit  $f_b$  zu Mörteldruckfestigkeit  $f_m$

Bezeichnung	Mörtelalter [Tage]	$f_b$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_b/f_m$ [-]	Steigerung [%]
VZ-4	> 28	16,42	16,00	1,03	15,53
PB-4	> 28	2,87	16,00	0,18	15,90
VZ-5	4	16,42	6,36	2,58	14,62
VZ-6	8	16,42	9,07	1,81	16,11
VZ-7	12	16,42	11,85	1,39	15,30

Wird davon ausgegangen, dass die bewehrten Lagerfugen als vollständig querdehnungsbehindernde Schichten wirken, kann der Effekt der Höhe zwischen diesen Schichten analysiert werden. Durch die Abmessungen der Mauersteine ergeben sich unter Miteinbeziehung der Stoßfugen Seitenlängen der Pfeiler von rund 100 mm. Die Steinhöhe beträgt ca. 26 mm, die Dicke der Lagerfugen rund 2 mm. Beim Aufbau der Pfeiler ergibt sich durch die Anordnung von acht Ziegelscharen übereinander unter Berücksichtigung der Lagerfugendicke eine Pfeilerhöhe von ca. 220 mm. Die gesamte Pfeilerhöhe – ohne querdehnungsbehindernde Schicht – bezogen auf die Länge eines

Mauersteins  $l_u$  ergibt daher ein Verhältnis von 2,20 und stellt einen unbewehrten Pfeiler dar. In der Baupraxis wäre die Länge eines Mauersteins durch die Dicke der Wand  $t$  zu ersetzen. Aus diesem Grund wird die Höhe  $H$  im Weiteren ausschließlich auf die Wandstärke  $t$  bezogen. Umso mehr bewehrte Lagerfugen ein Prüfkörper aufweist, desto kleiner wird das Verhältnis von der Höhe zwischen den Bewehrungslagen  $H$  und der Wandstärke  $t$ . In Abbildung 5.9 sind die erreichten Festigkeitssteigerungen infolge des Abstandes zwischen den Bewehrungslagen unabhängig von den Materialien dargestellt.



**Abb. 5.9:** Festigkeitssteigerungen in Bezug auf das Verhältnis von der Höhe zwischen den Bewehrungslagen  $H$  zur Wandstärke  $t$

Abbildung 5.9 lässt erkennen, dass dieser Abstand zwischen den querdehnungsbehindernden Schichten großen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Pfeiler hat. Umso mehr Lagerfugen mit eingebettetem Textilglasgitter ausgestattet sind, desto höher ist die vertikale Wanddruckfestigkeit  $f_k$  des Prüfkörpers. Bei größer werdendem Verhältnis  $H/t$  nimmt der Einfluss der Querdehnungsbehinderung ab. Bei einem RILEM-Pfeiler mit einer Schlankheit von 1,30, der in der Tastversuche Serie 3 nachgebildet wird, geht man davon aus, dass keine Einflüsse einer wirkenden Querdehnungsbehinderung vorliegen. Ein unbewehrter RILEM-Pfeiler weist somit eine Festigkeitssteigerung von null Prozent auf. Die Ergebnisse der Pfeilerversuche bestätigen diese Tatsache, da bei einem Verhältnis von  $H/t > 1,30$  keine Festigkeitssteigerungen festgestellt werden. Die kleinsten Schlankheitswerte ergeben sich bei vollständig bewehrten Pfeilern mit einem Verhältnis  $H/t$  zu 0,28, wobei eine Tragfähigkeitssteigerung von rund 15 % erreicht wird. Da dieses Verhältnis aus geometrischen Gründen nicht unterschritten werden kann, wird davon ausgegangen, dass die maximale Tragfähigkeitssteigerung damit erreicht ist. Mehr als 15 % Steigerung werden daher auch bei einem Verhältnis  $H/t$  von 0,00 bis 0,28 nicht erreicht. Die blaue, strichlierte Linie stellt die Ausgleichsgerade der Versuchsergebnisse dar. Für eine Bemessung der vertikalen Tragfähigkeit wird eine Empfehlung (rote Linie) angegeben, bei der alle Versuchswerte auf der sicheren Seite liegen. Das kleinste  $H/t$ -Verhältnis wird dabei der Einfachheit halber mit 0,20 angegeben. Die Formeln (5.2) bis (5.4) beschreiben die nachgewiesenen Tragfähigkeitssteigerungen mathematisch. Der Festigkeitswert  $f_{k,b}$  beschreibt die charakteristische Wanddruckfestigkeit eines vollständig bewehrten Pfeilers, während  $f_k$  die charakteristische Wanddruckfestigkeit eines unbewehrten Mauerwerkspfeilers ist.

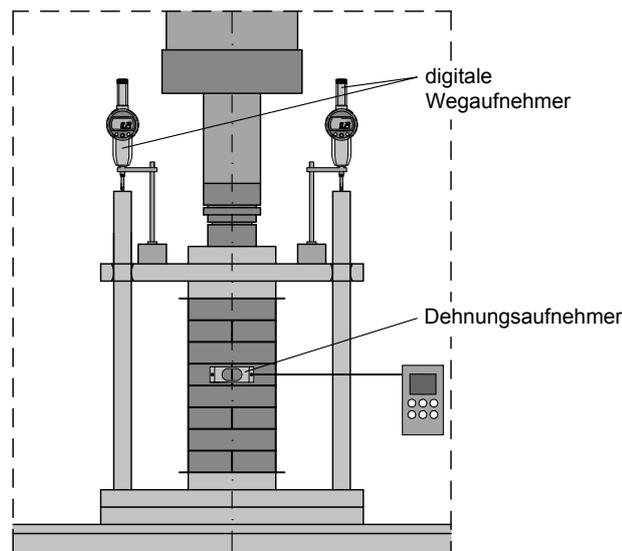
$$f_{k,b} = 1,15 \cdot f_k \quad \text{für } H/t < 0,20 \quad (5.2)$$

$$f_{k,b} = A \cdot f_k = \left( 1 + \frac{(-18,75 \cdot \left(\frac{H}{t}\right) + 18,75)}{100} \right) \cdot f_k \quad \text{für } 0,20 < H/t < 1,30 \quad (5.3)$$

$$f_{k,b} = 1,00 \cdot f_k \quad \text{für } H/t \geq 1,30 \quad (5.4)$$

### 5.2.4 Formänderungseigenschaften

Vor Beginn der Versuchsdurchführung erfolgt eine exakte Montage und Einrichtung der Messapparaturen zur Feststellung der Stauchungen in Belastungsrichtung und Dehnungen quer zur Belastungsrichtung. Die Nivellierplatte der Druckprüfmaschine wird vor der Montage bereits auf den Pfeilerprüfkörper aufgelegt. Für die Messung der Längsstauchungen kommen zwei digitale Wegaufnehmer nach Abschnitt 3.5.2 zum Einsatz. Diese Wegaufnehmer werden symmetrisch an der Oberseite der Nivellierplatte angebracht, um eine stetige Kontrolle zur Verhinderung von Verkippungen zu erhalten. Die Hartmetallkugel an der Spitze der Messstange des Wegaufnehmers setzt an der Oberseite der beiden Führungsstangen der Druckprüfmaschine auf. An der Nivellierplatte sind die Wegaufnehmer mit Elektromagnete befestigt. Aus den Bewegungen der Nivellierplatte können die Stauchungen der Prüfkörper an den fixierten Führungsstangen festgestellt werden. Die Messung der Querdehnungen erfolgt mittels Dehnungsaufnehmer nach Abschnitt 3.5.3. An der fünften Ziegelschar von unten wird über die Stoßfuge verlaufend der Dehnungsaufnehmer mit einem Verlängerungsstück für Nennmesslängen von  $l_0 = 50$  mm angebracht. Der Aufnehmer wird mit einem mittels Elektromagnet montierten Metallgestänge fixiert, um Verschiebungen während der Versuchsdurchführung zu verhindern. Kurz vor dem Kontakt der Kalotten erfolgt ein Nullabgleich der Messuhren und der Druckversuch beginnt. Abbildung 5.10 zeigt schematisch die Anbringung der Messeinrichtungen.



**Abb. 5.10:** Messeinrichtungen und deren Anbringung an die Pfeiler zur Feststellung der Formänderungen

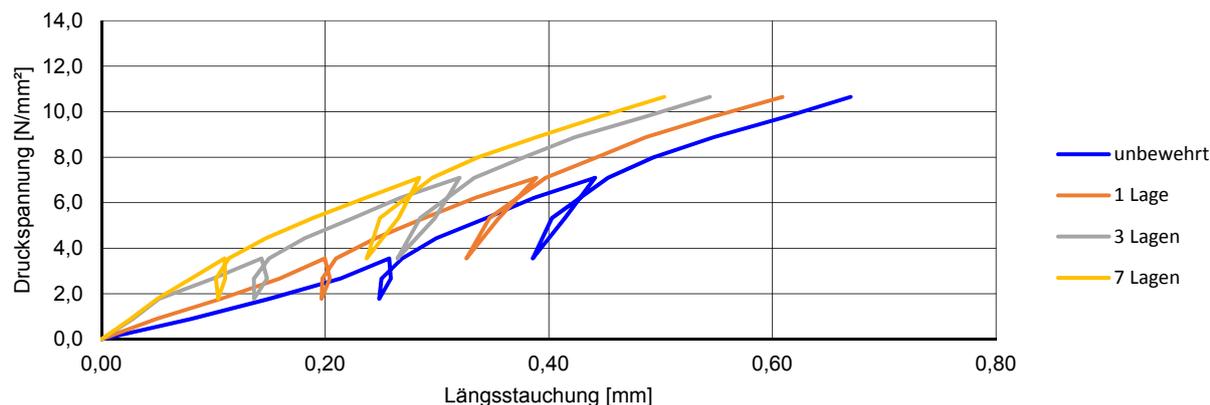
Die Ergebnisauswertung der Formänderungseigenschaften ist Tabelle 5.6 auf Seite 93 zu entnehmen.

### Elastizitätsmodul

Die gemessenen Längsstauchungen der Pfeiler während der Druckversuche werden kontinuierlich aufgezeichnet und dokumentiert. Die Zusammendrückung der Kartonzwischenlagen an der Ober- und Unterseite wird automatisiert mit Formel (4.4) bei entsprechender Spannung abgezogen. Daraus ergibt sich die tatsächliche Stauchung des Pfeilers über die gesamte Prüfkörperhöhe. Bei Belastungsbeginn treten verhältnismäßig große Verformungen auf, die für eine Bestimmung des Elastizitätsmoduls nicht heranzuziehen sind. Für eine plausible Ermittlung erfolgt die Auswertung

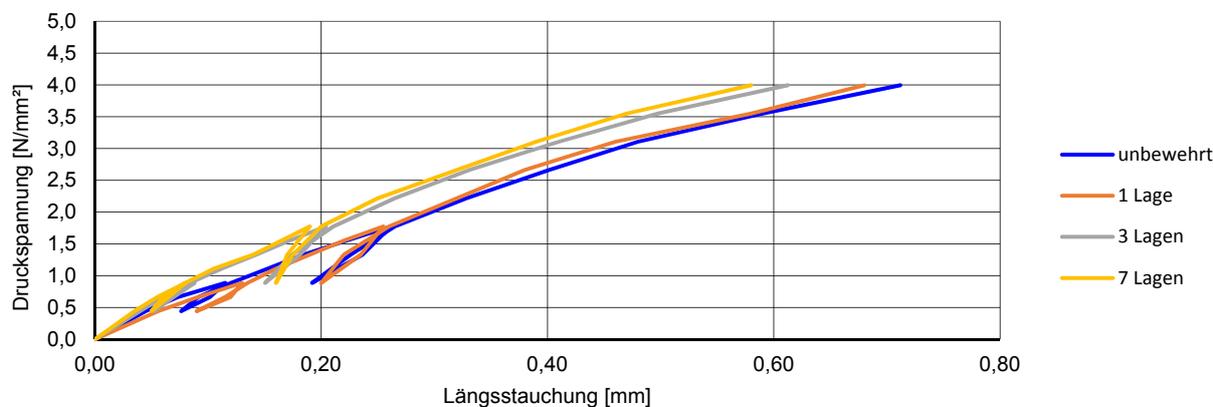
des Sekantenmoduls für die Pfeiler mit Mauersteinen aus Vollmauerziegel bei den Belastungsstufen von 40 bar und 160 bar. Für die Pfeiler mit Mauersteinen aus Porenbeton werden die Laststufen von 20 bar und 80 bar ausgewertet. Der Elastizitätsmodul  $E_D$  ergibt sich aus dem Quotient von Spannungsdifferenz  $\Delta\sigma$  zu Längsstauchungsdifferenz  $\Delta\varepsilon_1$  im betrachteten Bereich:

$$E_D = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_1} \quad (5.5)$$



**Abb. 5.11:** Gemittelte Spannungs-Stauchungs-Linien der Pfeilerversuche Serie 1 mit unterschiedlichen Bewehrungsgraden (Mauersteine aus Vollmauerziegel)

Abbildung 5.11 stellt die gemittelten Spannungs-Stauchungs-Linien der Pfeiler mit Mauersteinen aus Vollmauerziegel dar. Vor dem Bruch der Proben erfolgt die Demontage der Messeinrichtungen, um Beschädigungen zu verhindern. Für einen Vergleich der Verformungen werden die Kurven bis zu einem Druck von 240 bar im Zylinder der Druckprüfmaschine aufgezeichnet, was einer Druckspannung von rund  $10,70 \text{ N/mm}^2$  entspricht. Es ist ersichtlich, dass die Längsstauchungen mit zunehmendem Bewehrungsgrad abnehmen und der Elastizitätsmodul somit ansteigt. Bei den Pfeilerversuchen mit Mauersteinen aus Porenbeton erfolgt die Auswertung der Längsstauchungen bis zu einem Druck von 90 bar im Zylinder der Druckprüfmaschine, was einer Druckspannung von rund  $4,00 \text{ N/mm}^2$  entspricht.



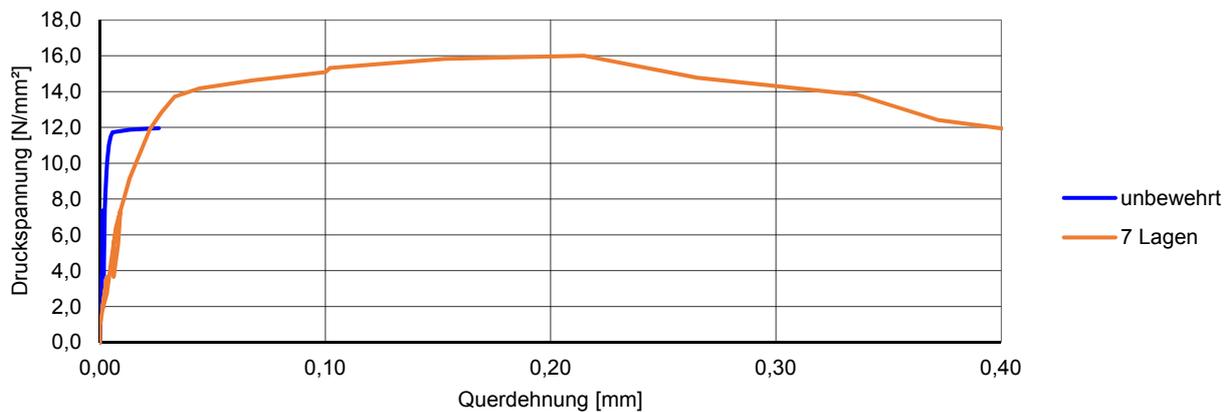
**Abb. 5.12:** Gemittelte Spannungs-Stauchungs-Linien der Pfeilerversuche Serie 2 mit unterschiedlichen Bewehrungsgraden (Mauersteine aus Porenbeton)

Abbildung 5.11 und 5.12 zeigen, dass die Längsstauchungen der Pfeiler bei steigendem Bewehrungsgrad abnehmen, wobei die Auswirkung bei Pfeilern mit Mauersteinen aus Vollmauerziegel deutlicher ausfällt als bei Pfeilern mit Mauersteinen aus Porenbeton. Als Ursache kann die allgemein geringere Steifigkeit der Porenbetonsteine gesehen werden, wodurch sich der steigende Bewehrungsgrad nicht derart deutlich auf die Formänderung der Pfeiler auswirkt.

### Querdehnungsmodul

Bei den mittels Dehnungsaufnehmer gemessenen Querdehnungen hat die Komponente der Kartonzwischenlagen keinen Einfluss und wird daher auch nicht berücksichtigt. Die Sekantenmoduln werden bei den gleichen Laststufen ausgewertet, die zur Ermittlung des Elastizitätsmodul herangezogen werden. Der Querdehnungsmodul  $E_{q,p}$  ergibt sich aus dem Quotient von Spannungsdifferenz  $\Delta\sigma$  zu Querdehnungsdifferenz  $\Delta\varepsilon_q$  im betrachteten Bereich:

$$E_{q,p} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_q} \quad (5.6)$$



**Abb. 5.13:** Querdehnungs-Spannungs-Linien bei unbewehrten und vollständig bewehrten Pfeilern mit Mauersteinen aus Vollmauerziegel

Abbildung 5.13 zeigt beispielhaft die Querdehnung eines unbewehrten und eines vollständig bewehrten Pfeilers. Bei diesen Versuchen blieben die Messeinrichtungen bis zum Eintritt des Versagens an den Proben montiert, um auszugsweise Erfahrungswerte zu erhalten. Es ist zu erkennen, dass der unbewehrte Prüfkörper im Bereich geringer Druckspannung kaum Querdehnungen in der Mitte der Probe erfährt, sich im Bruchzustand jedoch sprungartig in Querrichtung ausdehnt. Diese Tatsache ist dem sehr spröden Bruchverhalten geschuldet. Der vollständig bewehrte Pfeiler weist bereits bei geringeren Druckspannungen größere Querdehnungen auf, verhält sich im Versagenszustand aber deutlich zäher. Der Prüfkörper legt verhältnismäßig große Verformungen zurück, während die aufgebrachte Druckspannung bereits zurück geht. Mit Hilfe der Druckprüfmaschine werden die Längsstauchungen am vollständig bewehrten Prüfkörper immer weiter gesteigert, um das Querdehnungsverhalten analysieren zu können. Die Druckspannung kann ab einem bestimmten Punkt jedoch nicht mehr erhöht werden, da der Körper bereits versagt hat.

Tabelle 5.6 fasst die Ergebnisse der Formänderungseigenschaften der untersuchten Pfeiler übersichtlich zusammen.

**Tab. 5.6:** Auflistung der Formänderungseigenschaften über die Pfeilerversuche

Serie	Bezeichnung	Bewehrung	Elastizitätsmodul $E_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	VZ-1	unbewehrt	4004
	VZ-2	1 Lage	4171
	VZ-3	3 Lagen	4681
	VZ-4	7 Lagen	4744
2	PB-1	unbewehrt	1241
	PB-2	1 Lage	1322
	PB-3	3 Lagen	1499
	PB-4	7 Lagen	1545
3	VZ-5.1	unbewehrt	3422
	VZ-5.4	7 Lagen	3083
	VZ-6.1	unbewehrt	3686
	VZ-6.4	7 Lagen	3962
	VZ-7.1	unbewehrt	2382
	VZ-7.4	7 Lagen	2880

### 5.3 Bruchverhalten und Versagensformen

Bei den unbewehrten Pfeilern ist ausschließlich sprödes, teils explosionsartiges Druckversagen bei Erreichen der Höchstlast festzustellen. Es kommt zu einem plötzlichen Abplatzen der Eckbereiche, wobei der Kern in der Regel übrig bleibt. Vereinzelt entstehen Risse quer durch den gesamten Pfeiler. Ursache für das spröde Bruchverhalten ist möglicherweise die Kombination aus verhältnismäßig festem Mörtel zur vorhandenen Steindruckfestigkeit. Bei Prüfkörpern mit einer bewehrten Lagerfuge in der Mitte des Körpers ist ebenfalls sehr sprödes Verhalten im Versagensfall festzustellen, wobei zum Teil das Textilglasgitter gänzlich durchgerissen wird. Bei Pfeilern mit drei bewehrten Lagerfugen versagen die Prüfkörper bereits tendenziell zwischen den Bewehrungslagen. Es treten vereinzelt auch Risse durch den gesamten Pfeiler auf, die Bewehrungslagen halten die Materialien jedoch auch nach dem Versagen zusammen. Die vollständig bewehrten Pfeiler weisen das deutlich zähste Verhalten im Bruchzustand auf. Es kommt zu einem Versagen der Mauersteine zwischen den Bewehrungslagen. Auch bei Erreichen der Maximallast können die Verformungen noch weiter gesteigert werden, da der Körper durch den hohen Bewehrungsgrad zusammengehalten wird.

Die Versagensformen treten unabhängig vom Material der Mauersteine relativ identisch auf, wobei bei Pfeilern mit Mauersteinen aus Porenbeton die unbewehrten Prüfkörper etwas weniger spröde brechen aufgrund der allgemein geringeren Steifigkeit der Mauersteine.

Bei unbewehrten Pfeilern, die vier Tage nach der Herstellung – also mit Mörtel mit geringerer Druckfestigkeit – untersucht werden, ist weniger sprödes Bruchverhalten festzustellen als bei vollständig erhärteten Pfeilern.

Abbildung 5.14 zeigt beispielsweise Fotografien von den Versagensformen der untersuchten Pfeiler zur Verdeutlichung der beschriebenen Unterschiede bei verschiedenen Bewehrungsgraden.



(a) unbewehrter Pfeiler



(b) Pfeiler mit 1 Bewehrungslage



(c) Pfeiler mit 3 Bewehrungslagen



(d) Pfeiler mit 7 Bewehrungslagen

**Abb. 5.14:** Fotografien der Bruchformen der Pfeiler mit Mauersteinen aus Vollmauerziegel

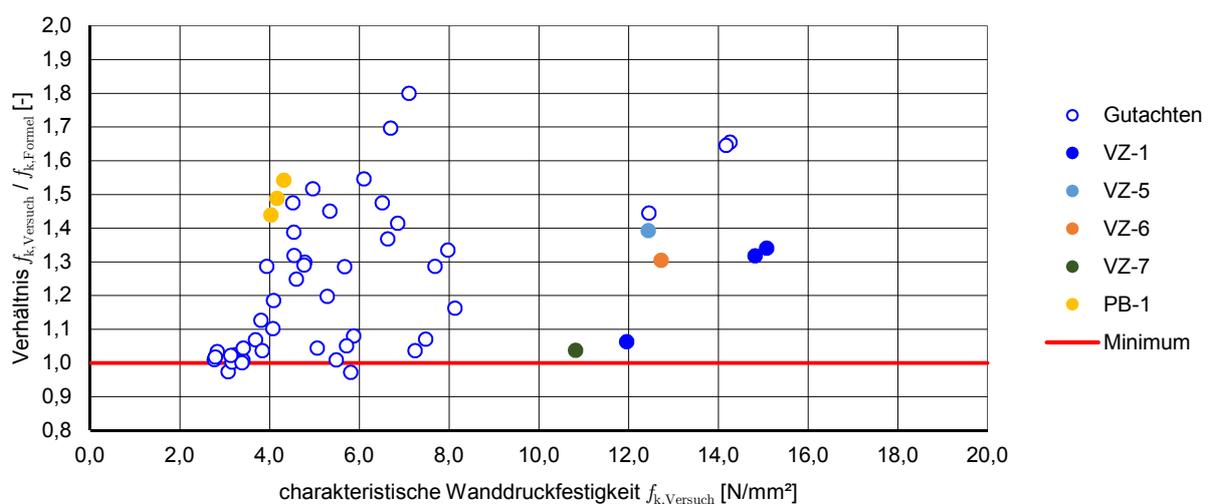
# Kapitel 6

## Interpretation der Ergebnisse

Aus den bisher gewonnenen Ergebnissen und Erkenntnissen ist es möglich, eine große Bandbreite neuer Informationen zu interpretieren und zu beschreiben. Durch das Vorliegen eines Forschungsprogrammes [18], an welchem die *Dr. Pech Ziviltechniker GmbH* und die Magistratsabteilung 39 der Stadt Wien im Jahr 2009 beteiligt waren, ist die Einordnung der Ergebnisse sowie deren Vergleich dazu möglich. Dabei kommt es zu einer Gegenüberstellung in Hinblick auf gewonnene Tragfähigkeitssteigerungen sowie auch auf feststellbare Formänderungseigenschaften.

### 6.1 Ergebniseinordnung im Vergleich zu bisherigen Forschungen

Im „Forschungsprogramm zur Verifizierung der konstruktiven Kennwerte von altem Vollziegelmauerwerk nach EC 6“ [18] wurden insgesamt 45 RILEM-Pfeiler (alte Mauerwerkspfeiler) mit unterschiedlichen Kombinationen von Mauersteinen und Mauermörtel nachgebaut. Dabei kamen die Originalziegel und Originalrezepturen zur Mörtelherstellung zur Anwendung. Aus den bekannten Druckfestigkeitskennwerten  $f_b$  und  $f_m$  ist die Berechnung der charakteristischen Wanddruckfestigkeit  $f_k$  möglich. Die im Zuge der Versuche erreichten Festigkeiten  $f_{k, \text{Versuch}}$  wurden dem rechnerischen Kennwert der Wanddruckfestigkeit  $f_{k, \text{Formel}}$  gegenübergestellt. Dabei konnte festgestellt werden, dass von den 45 Pfeilern nur zwei (entspricht 4,4 %) unter dem Ergebnis der Rechenansätze lagen. Die Vorgabe des 5 %-Fraktilwerts wurde somit eingehalten.



**Abb. 6.1:** Vergleich der Ergebnisse der unbewehrten Pfeiler mit den Ergebnissen aus dem Forschungsprogramm [18] der *Dr. Pech Ziviltechniker GmbH*

Im Diagramm aus Abbildung 6.1 werden die im Zuge dieser Arbeit gewonnenen Werte (siehe Abbildung 5.6, Seite 87) in die Ergebnisse aus dem Forschungsprogramm eingefügt, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. In den eingefügten Werten ist bereits der ermittelte Modellfaktor von 1,90 berücksichtigt, wodurch die Ergebnisse gemäß Abbildung 6.1 einzuordnen sind und mit den Ergebnissen des Forschungsberichtes vergleichbar sind. Daraus folgt die Tatsache, dass auch die Modellversuche die Realität sehr gut darstellen.

## 6.2 Veränderungen der charakteristischen Wanddruckfestigkeiten

Die Auswertung der erreichten Laststeigerungen gemäß Abschnitt 5.2.3 ergibt, dass die Bruchspannung der Pfeiler in eindeutigen Zusammenhang mit dem Verhältnis von Höhe zwischen den Bewehrungslagen,  $H$ , zur Wandstärke  $t$  steht. Der nachgebaute unbewehrte RILEM-Prüfkörper aus Tastversuche Serie 3 weist im Fall dieser Arbeit ein  $H/t$ -Verhältnis von 1,3 auf und stellt damit einen Pfeiler dar, der frei von Einflüssen aus querdehnungsbehindernden Effekten ist. Bei diesem Versuch kommt es zu keinen Tragfähigkeitssteigerungen.

Durch den Einbau von querdehnungsbehindernden Schichten in Form von Textilglasgitter, welches eine Zugfestigkeit von  $\geq 2000 \text{ N}/50 \text{ mm}$  aufweist, kommt es zu einer Abnahme des  $H/t$ -Verhältnisses. Auf der sicheren Seite liegend wird eine Empfehlung der möglichen Laststeigerung gemäß Abbildung 6.2 abgegeben, die durch die Formeln (5.2) bis (5.4) mathematisch beschrieben ist. Aus geometrischen Gründen ist bei den verwendeten Materialien eine Festigkeitssteigerung von maximal 15 % möglich.

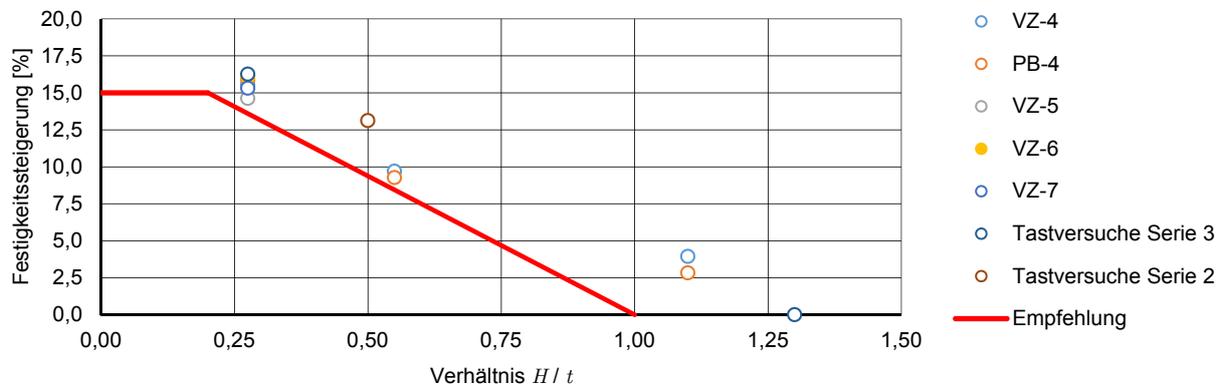
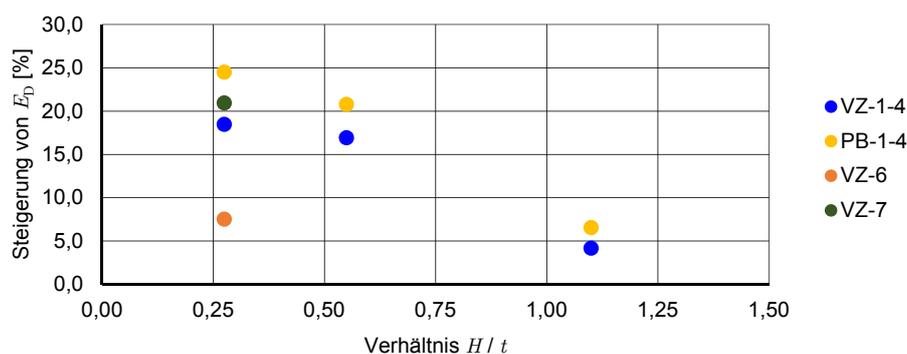


Abb. 6.2: Festigkeitssteigerungen der Pfeiler in Abhängigkeit vom Verhältnis  $H/t$

## 6.3 Veränderungen des Elastizitätsmoduls

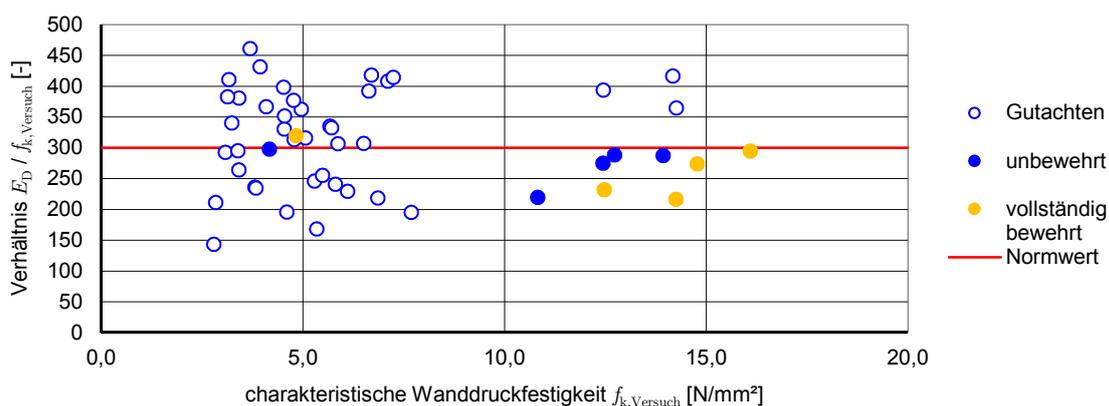
Tabelle 5.6 listet die Elastizitätsmoduln der geprüften Pfeiler auf. Bei einem direkten Vergleich der unbewehrten und vollständig bewehrten Pfeiler kann, mit Ausnahme von VZ-5, eine Zunahme des Elastizitätsmoduls festgestellt werden. Diese Zunahme ist jedoch nicht in gleichem Ausmaß festzustellen wie die Zunahme der vertikalen Wanddruckfestigkeit. Ursache kann eventuell das verwendete Textilglasgitter sein, das die Gesamtstruktur etwas aufweicht und somit für weniger Steifigkeit sorgt. Die Bewehrungslagen werden während der Druckversuche mitkomprimiert, wobei die Steifigkeiten des Textilglasgitters in vertikaler Richtung unbekannt sind.

Abbildung 6.3 stellt die Steigerungen der Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit vom  $H/t$ -Verhältnis dar. Es ist ersichtlich, dass die Steigerungsrate bei vollständig bewehrten Pfeilern mit Mauersteinen aus Vollmauerziegel zwar schwankend auftritt, aber dennoch mit steigendem Bewehrungsgrad stärker zum Vorschein kommt. Vollständig bewehrte Pfeiler mit Mauersteinen aus Porenbeton weisen im Vergleich zu deren unbewehrten Pendanten wiederum eine Steigerung des Elastizitätsmoduls von rund 25 % auf. Dies kann möglicherweise in der geringen Grundsteifigkeit der Porenbetonsteine begründet sein.



**Abb. 6.3:** Steigerungen der Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit vom Verhältnis  $H/t$

Pech et al [17] geben den Elastizitätsmodul  $E_D$  in Abhängigkeit von der charakteristischen Wanddruckfestigkeit  $f_k$  für den Altbau mit rund  $300 \cdot f_k$ , für Hochlochziegel jedoch mit  $1000 \cdot f_k$  an. Ursache dafür ist bei Vollmauerziegel die deutlich höhere Anzahl an weniger steifen Lagerfugen aufgrund der geringeren Höhe der Mauersteine. Hochlochziegel weisen in der Regel eine Höhe von rund 25 cm auf, wogegen Vollmauerziegel nur etwa 6,5 cm Höhe besitzen. Im „Forschungsprogramm zur Verifizierung der konstruktiven Kennwerte von altem Vollziegelmauerwerk nach EC 6“ [18] wurden neben den erreichten Höchstlasten auch die Elastizitätsmoduln  $E_D$  bestimmt und als Vielfache von  $f_k$  für die jeweiligen Wanddruckfestigkeiten aufgetragen (siehe Abbildung 6.4).



**Abb. 6.4:** Einordnung der Verhältnisse  $E_D/f_k$  in das Forschungsprogramm [18]

Darin ist zu erkennen, dass bei vollständig bewehrten Pfeilern die Steifigkeit im Verhältnis zur Wanddruckfestigkeit  $f_k$  grundsätzlich etwas geringer ist als bei deren unbewehrten Pendanten.



# Kapitel 7

## Zusammenfassung und Forschungsausblick

Die gewonnenen Erkenntnisse der festgestellten Steigerungsraten betreffend Tragfähigkeit und Steifigkeit von Mauerwerkswänden ermöglichen neue Sichtweisen, die großes Potential in Hinblick auf höhere Bauteilwiderstände mit sich bringen. Für die Umsetzung dieser Feststellungen in die Baupraxis wird in diesem Kapitel ein Ausblick für weitere Forschungen angegeben. Die in dieser Arbeit gemessenen Versuchswerte dienten Suda in seiner Diplomarbeit [19] zur Validierung eines FEM-Rechenmodells.

Nicht betrachtet, jedoch normativ geregelt ist die erhöhte Zugkraftaufnahme von Mauerwerkswänden bei horizontalen Einwirkungen.

### 7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Druckwiderstand von Mauerwerkswänden durch Optimierung der Struktur – speziell durch Verbesserung der Lagerfugen – zu erhöhen. Aufgrund der Kenntnis des Spannungszustandes im Mauerwerk infolge Druckbeanspruchung sollte den entstehenden Querkzugspannungen in den Mauersteinen entgegengewirkt werden. Dafür wurden insgesamt drei Serien Tastversuche und 30 Modellpfeiler des experimentellen Hauptprogramms durchgeführt. Die Vorbereitung der Mauersteine und des Mauermörtels (inklusive deren Prüfung) sowie die Herstellung der Pfeiler selbst stützen sich auf die Anforderungen der normativen Vorgehensweisen zu den jeweiligen Bestimmungen.

Für die durchgeführten Untersuchungen an Modellproben wurde ein passender Modellfaktor bestimmt, um die Ergebnisse in die Realität transferieren zu können. Zur Einordnung aller Ergebnisse kommt ein Vergleich der Höchstlasten der unbewehrten Pfeilerprüfkörper mit einer Vielzahl an Prüfergebnissen eines Forschungsprogramms zur Anwendung. Daraus ist erkennbar, dass die Ergebnisse der Modellpfeiler die Realität gut widerspiegeln. Im Zuge des experimentellen Hauptprogramms wurden Pfeiler mit sukzessive steigendem Bewehrungsgrad hergestellt. Bei Voraussetzung vollständiger Querdehnungsbehinderung der bewehrten Lagerfugen nimmt das  $H/t$ -Verhältnis mit steigender Anzahl an Bewehrungslagen ab. Die Abnahme des  $H/t$ -Verhältnisses hat eine deutlich erkennbare Steigerung der Tragfähigkeit der Pfeiler zur Folge. Dazu wurde eine auf der sicheren Seite liegende Empfehlung zur Festigkeitssteigerung ausgearbeitet, wofür zusätzlich eine mathematische Beschreibung folgte.

Bei Bewehrung jeder Lagerfuge und Verwendung von Vollmauerziegeln im maßstäblichen Normalformat konnten maximale Tragfähigkeitssteigerungen von rund 15 % erzielt werden. Die vollständig bewehrten Pfeiler weisen dabei ein  $H/t$ -Verhältnis von 0,28 auf. Wird dieses Verhältnis  $\geq 1,0$ , ist die Wirkung der querdehnungsbehindernden Lagerfugen nicht mehr nachweislich vorhanden. Durch die Mauersteinhöhe von 25 cm der gängigen Hochlochziegel kann erst bei Wandstärken

$\geq 25$  cm mit einer Wirkung der Querdehnungsbehinderung ausgegangen werden. Aufgrund der marktüblichen Steinformate sind jedoch keine geringeren Werte des  $H/t$ -Verhältnisses als 0,5 möglich – dies entspricht einem Mauerstein für 50 cm Wandstärke mit 25 cm Steinhöhe. Die dabei zu erwartende Tragfähigkeitssteigerung wäre nach Abbildung 5.9 mit rund 10 % gegeben.

## 7.2 Forschungsausblick

Die Erkenntnisse der wirkenden Querdehnungsbehinderung mittels bewehrter Lagerfugen eröffnen neue Forschungsfragen, die durch Erhöhung des Bauteilwiderstandes den Verbundwerkstoff Mauerwerk im Hochbau noch attraktiver gestalten könnten.

Für fundierte Bemessungsansätze ist ein aussagekräftiges Forschungsprogramm erforderlich, in dem realitätsgetreue Versuche unter anderem auch an geschoßhohen Pfeilern durchzuführen sind. Von Interesse wären dabei die erreichbaren Auswirkungen durch die Variation von unterschiedlichen Mauersteinformen und Mörtelfugen. Besonders die Untersuchung unter Verwendung von Hochlochziegeln ist im Bereich des Neubaus relevant, wobei auch geklebte Lagerfugen spezielle Beachtung finden sollten. Nicht außer Acht gelassen werden dürfen die Anforderungen und Aspekte, die aus bauphysikalischer Sicht einzuhalten sind.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit konnte analysiert werden, dass die beste Wirkung der Querdehnungsbehinderung bei Mauersteinen für 50 cm Wandstärke mit 25 cm Steinhöhe erzielt wird. Jedoch ergibt sich selbst bei Verwendung dieser Mauersteine keine festigkeitssteigernde Wirkung mehr, wenn nur jede zweite Lagerfuge bewehrt wird, da hier das  $H/t$ -Verhältnis wieder bei 1,0 liegen würde. Der positive Aspekt der höher aufnehmbaren Längszugkraft durch die Bewehrung geht dabei nicht verloren, die Steigerung der Tragfähigkeit durch die Querdehnungsbehinderung ist jedoch nicht mehr gegeben. Auswirkungen infolge Bewehrung jeder zweiten Lagerfuge wären vor allem in Hinsicht auf den wirtschaftlichen Aspekt von großem Interesse. Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit sollten anhand von „echten“ RILEM-Pfeilern überprüft und bestätigt werden.

Weitere Möglichkeiten für zukünftige Versuchsprogramme sind Untersuchungen an Mauerwerks Pfeilern mit Bewehrungsarten mit deutlich größeren Zugfestigkeiten, um eine verbesserte Wirkung der Querdehnungsbehinderung festzustellen. Anhand numerischer Simulationsrechnungen können unterschiedlichste Materialkombinationen mit verschiedenen Bewehrungseinlagen untersucht werden, von denen im Anschluss die aussichtsreichsten Varianten anhand weniger Laborversuche kalibriert werden können, um die Güte der Ergebnisse zu eruieren. Damit ist es möglich, in der Forschung eine Vielzahl an Probekörpern einzusparen.

# Anhang A

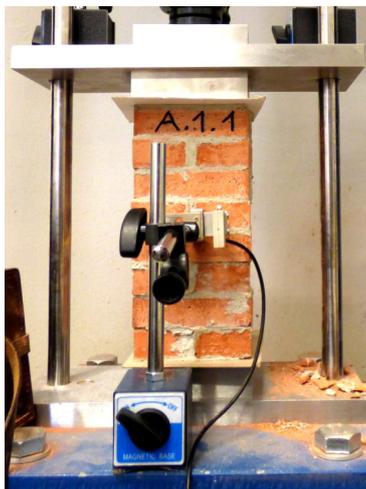
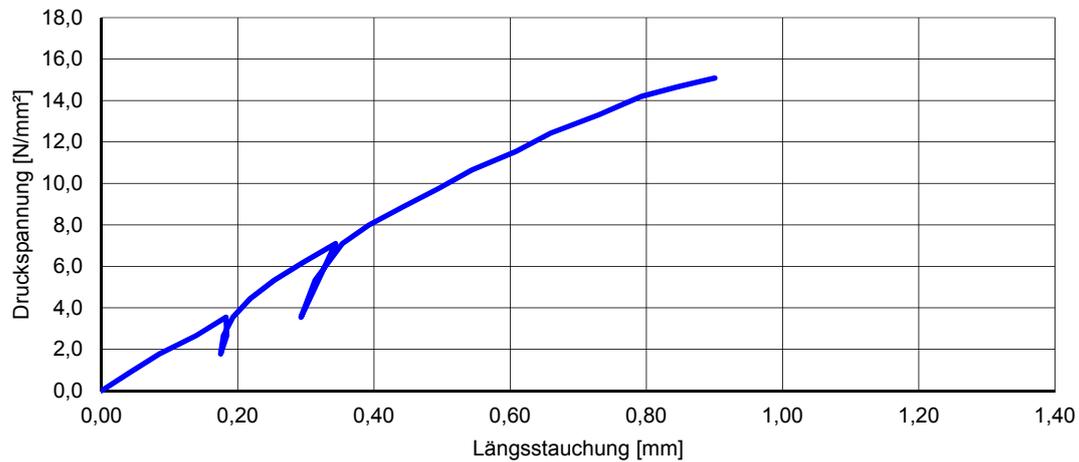
## Versuchsergebnisse der Pfeileruntersuchungen

Tab. A.1: Übersicht über sämtliche Pfeilerversuche

Pfeiler	Material Mauerstein	Bewehrung	Druckfestigkeit $f_k$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul $E_D$ [N/mm <sup>2</sup> ]
VZ-1.1	Vollmauerziegel	unbewehrt	15,08	4458
VZ-1.2	Vollmauerziegel	unbewehrt	11,96	3374
VZ-1.3	Vollmauerziegel	unbewehrt	14,76	4181
VZ-2.1	Vollmauerziegel	1 Lage	15,16	4356
VZ-2.2	Vollmauerziegel	1 Lage	15,01	4488
VZ-2.3	Vollmauerziegel	1 Lage	13,33	3669
VZ-3.1	Vollmauerziegel	3 Lagen	15,36	4423
VZ-3.2	Vollmauerziegel	3 Lagen	15,09	4644
VZ-3.3	Vollmauerziegel	3 Lagen	15,46	4977
VZ-4.1	Vollmauerziegel	7 Lagen	15,91	4498
VZ-4.2	Vollmauerziegel	7 Lagen	16,39	4733
VZ-4.3	Vollmauerziegel	7 Lagen	16,00	4999
VZ-5.1	Vollmauerziegel	unbewehrt	12,45	3422
VZ-5.4	Vollmauerziegel	7 Lagen	14,26	3083
VZ-6.1	Vollmauerziegel	unbewehrt	12,78	3686
VZ-6.4	Vollmauerziegel	7 Lagen	14,46	3962
VZ-7.1	Vollmauerziegel	unbewehrt	10,85	2382
VZ-7.4	Vollmauerziegel	7 Lagen	12,41	2880
PB-1.1	Porenbeton	unbewehrt	4,32	1231
PB-1.2	Porenbeton	unbewehrt	4,17	1314
PB-1.3	Porenbeton	unbewehrt	4,03	1179
PB-2.1	Porenbeton	1 Lage	4,66	1211
PB-2.2	Porenbeton	1 Lage	4,18	1346
PB-2.3	Porenbeton	1 Lage	4,51	1410
PB-3.1	Porenbeton	3 Lagen	4,62	1554
PB-3.2	Porenbeton	3 Lagen	4,59	1591
PB-3.3	Porenbeton	3 Lagen	4,46	1352
PB-4.1	Porenbeton	7 Lagen	5,03	1578
PB-4.2	Porenbeton	7 Lagen	4,76	1531
PB-4.3	Porenbeton	7 Lagen	4,71	1526

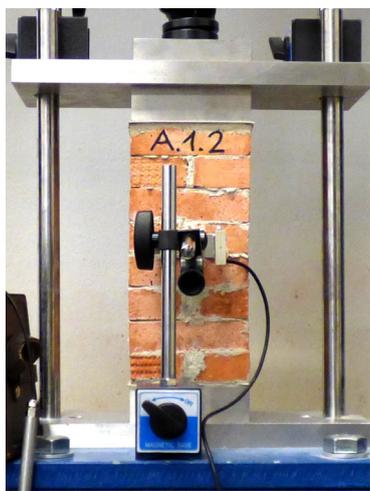
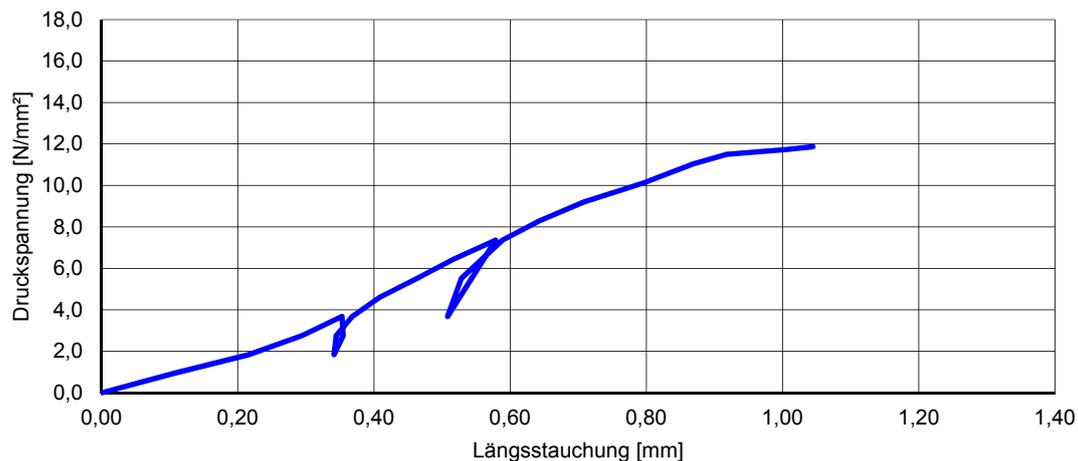
**Pfeiler VZ-1.1**

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		unbewehrt
Belastungsfläche	$A_0$	10 501 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	216,50 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	339,90 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	15,08 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,78 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,10 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,33 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,085 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,344 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,259 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00119
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	4458 N/mm <sup>2</sup>



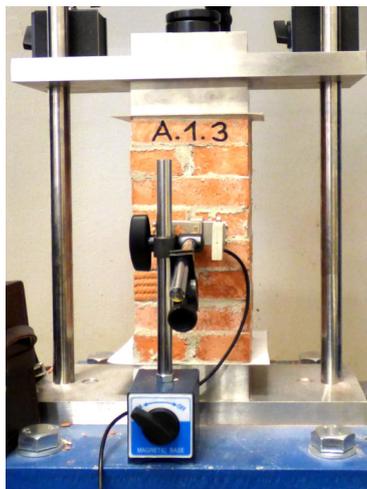
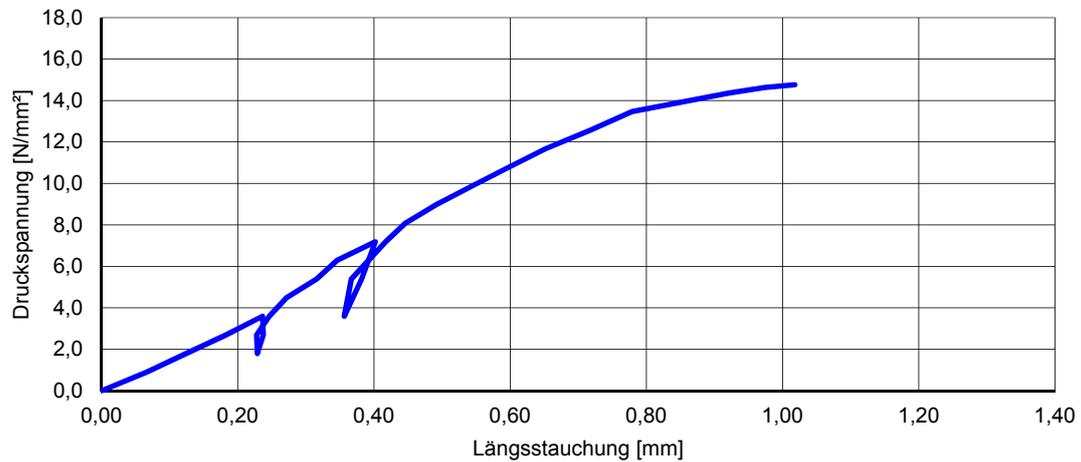
## Pfeiler VZ-1.2

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		unbewehrt
Belastungsfläche	$A_0$	10 130 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	221,50 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	259,90 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	11,96 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,84 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,36 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,52 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,216 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,579 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,362 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00164
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	3374 N/mm <sup>2</sup>



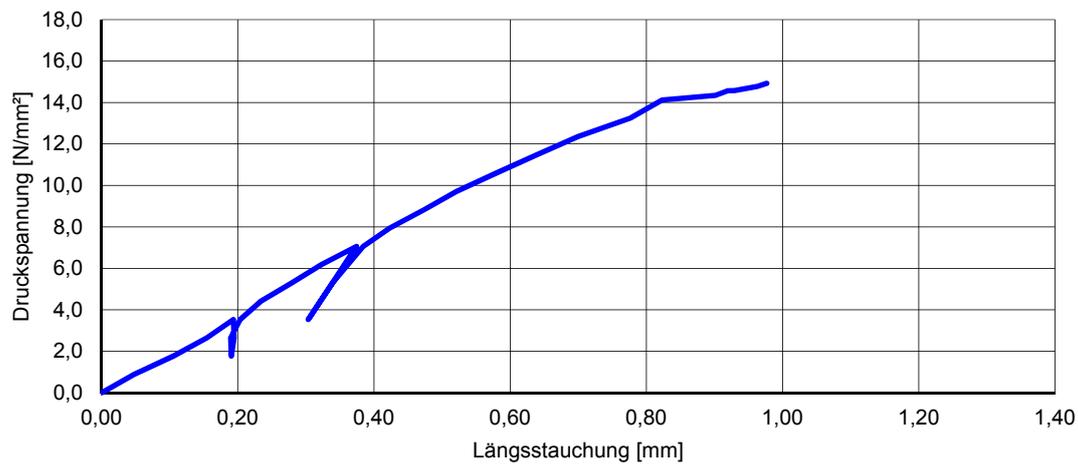
**Pfeiler VZ-1.3**

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		unbewehrt
Belastungsfläche	$A_0$	10 384 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	216,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	328,90 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	14,76 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,80 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,18 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,39 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,124 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,402 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,278 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00129
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	4181 N/mm <sup>2</sup>



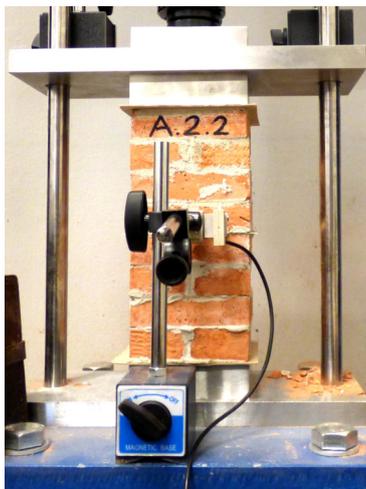
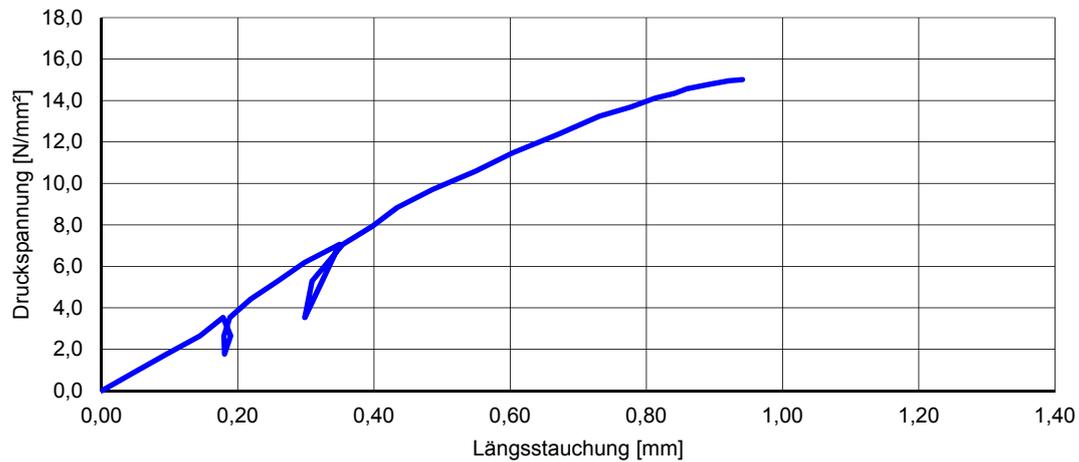
### Pfeiler VZ-2.1

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		1 Lage in Pfeilermitte
Belastungsfläche	$A_0$	10 557 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	221,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	343,50 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	15,16 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,77 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,06 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,30 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,106 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,374 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,269 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00122
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	4356 N/mm <sup>2</sup>



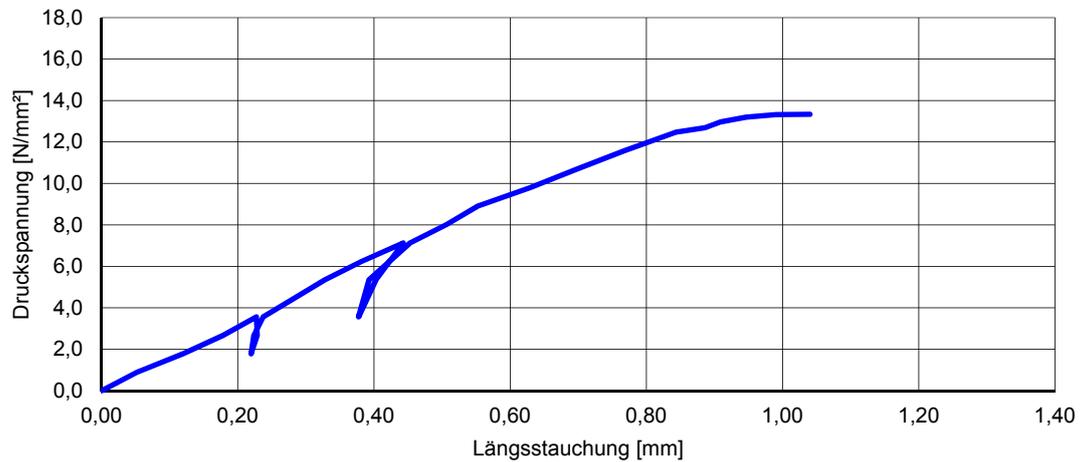
## Pfeiler VZ-2.2

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		1 Lage in Pfeilermitte
Belastungsfläche	$A_0$	10 558 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	215,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	340,10 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	15,01 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,77 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,06 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,30 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,096 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,349 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,254 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00118
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	4488 N/mm <sup>2</sup>



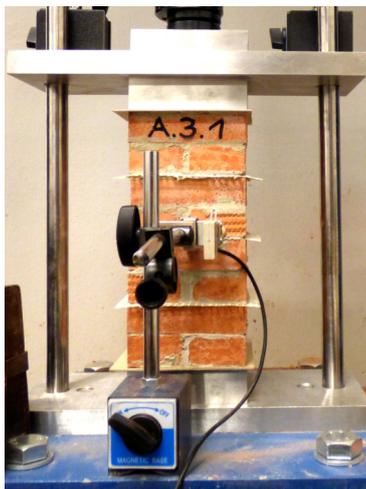
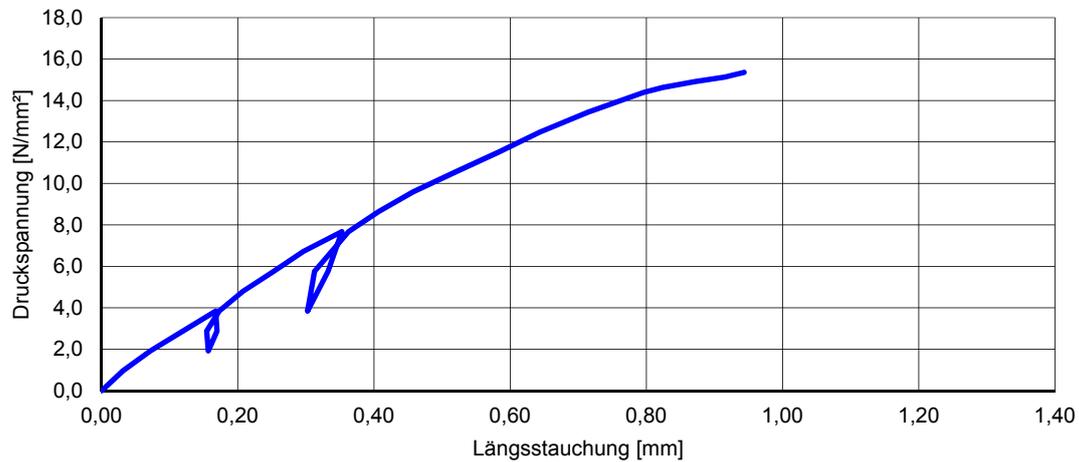
### Pfeiler VZ-2.3

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		1 Lage in Pfeilermitte
Belastungsfläche	$A_0$	10 460 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	222,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	299,30 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	13,33 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,78 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,13 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,35 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,120 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,443 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,323 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00146
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	3669 N/mm <sup>2</sup>



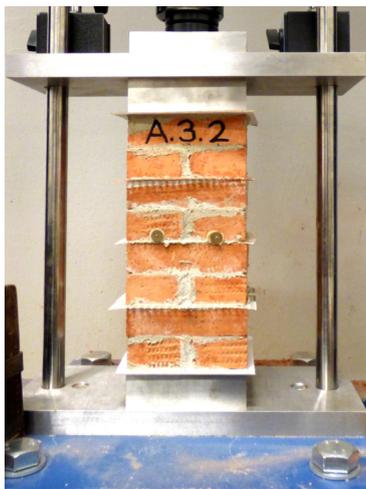
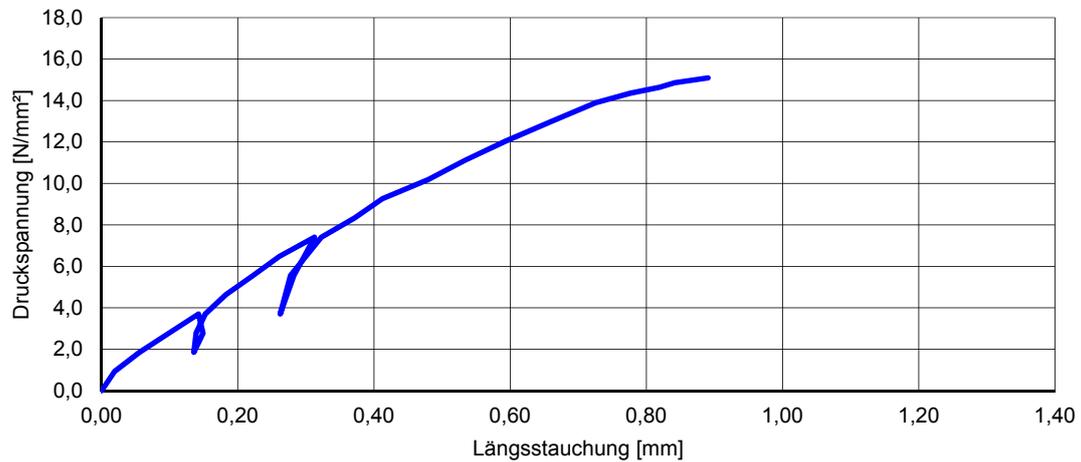
**Pfeiler VZ-3.1**

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		3 Lagen (jede zweite Lagerfuge)
Belastungsfläche	$A_0$	9712 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	216,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	320,10 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	15,36 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,92 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,68 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,76 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,072 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,353 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,281 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00130
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	4423 N/mm <sup>2</sup>



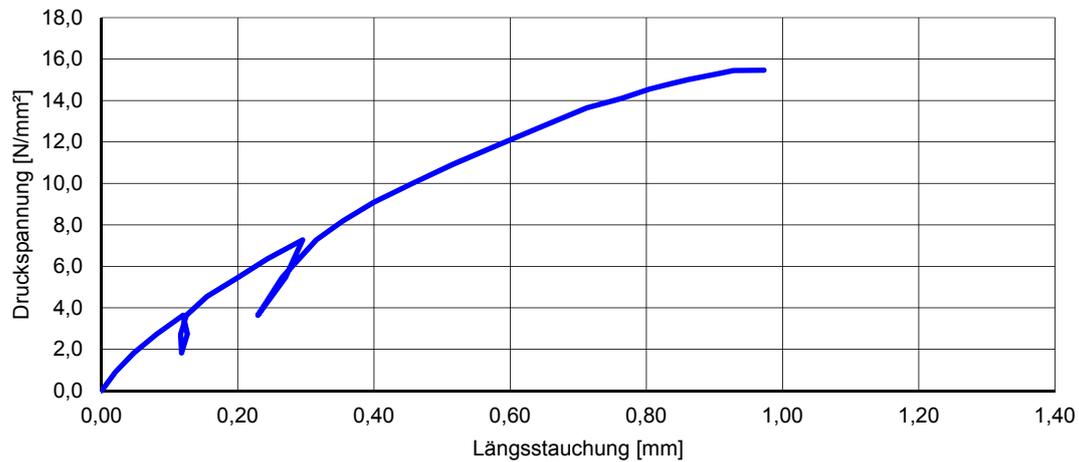
### Pfeiler VZ-3.2

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		3 Lagen (jede zweite Lagerfuge)
Belastungsfläche	$A_0$	10 065 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	215,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	326,00 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	15,09 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,85 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,41 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,56 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,055 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,313 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,257 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00120
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	4644 N/mm <sup>2</sup>



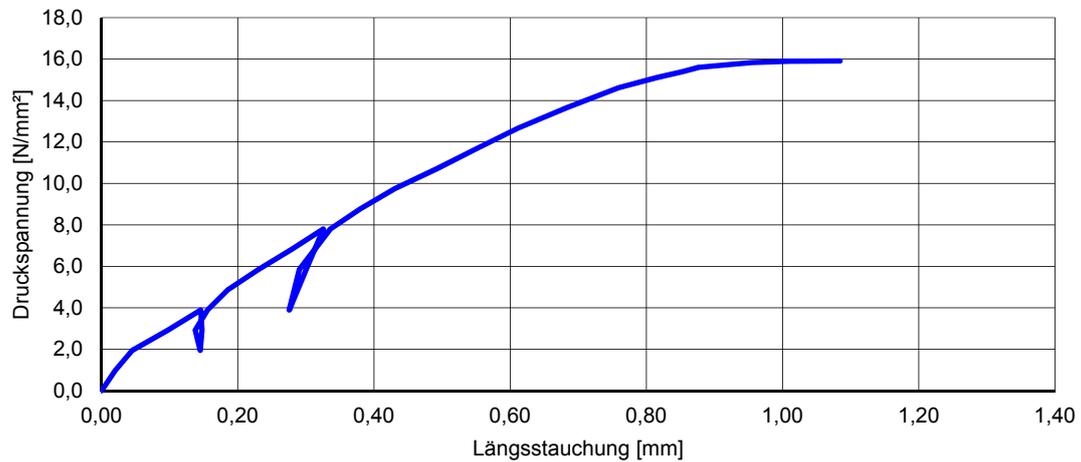
**Pfeiler VZ-3.3**

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		3 Lagen (jede zweite Lagerfuge)
Belastungsfläche	$A_0$	10 246 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	226,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	340,00 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	15,46 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,82 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,28 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,46 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,047 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,295 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,248 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00110
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	4977 N/mm <sup>2</sup>



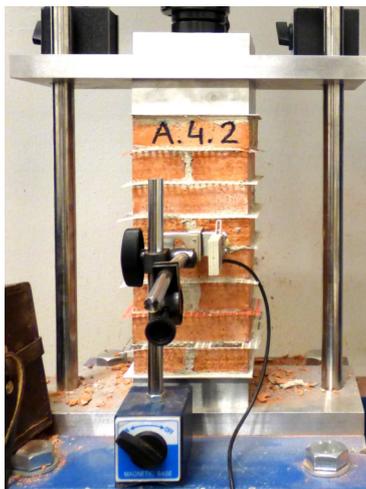
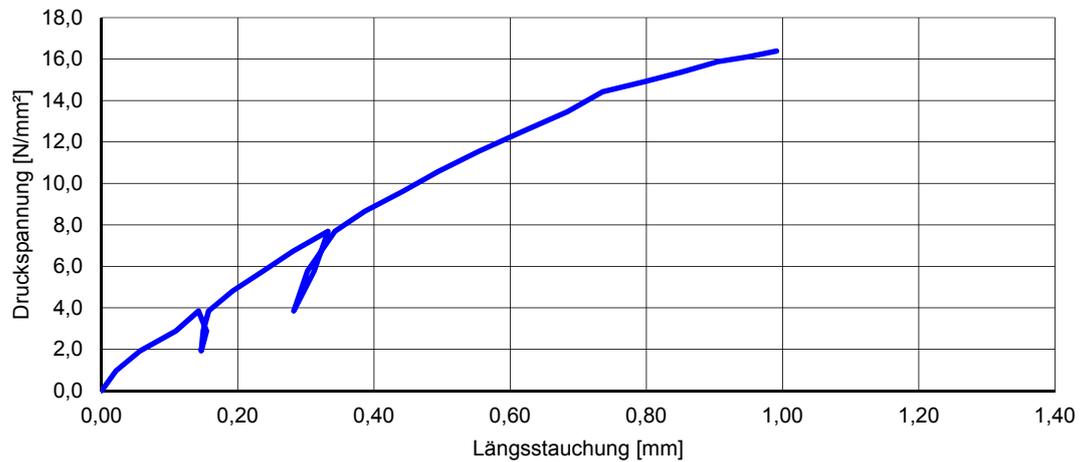
### Pfeiler VZ-4.1

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		7 Lagen (vollständig bewehrt)
Belastungsfläche	$A_0$	9565 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	216,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	326,50 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	15,91 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,95 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,80 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,85 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,045 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,326 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,281 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00130
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	4498 N/mm <sup>2</sup>



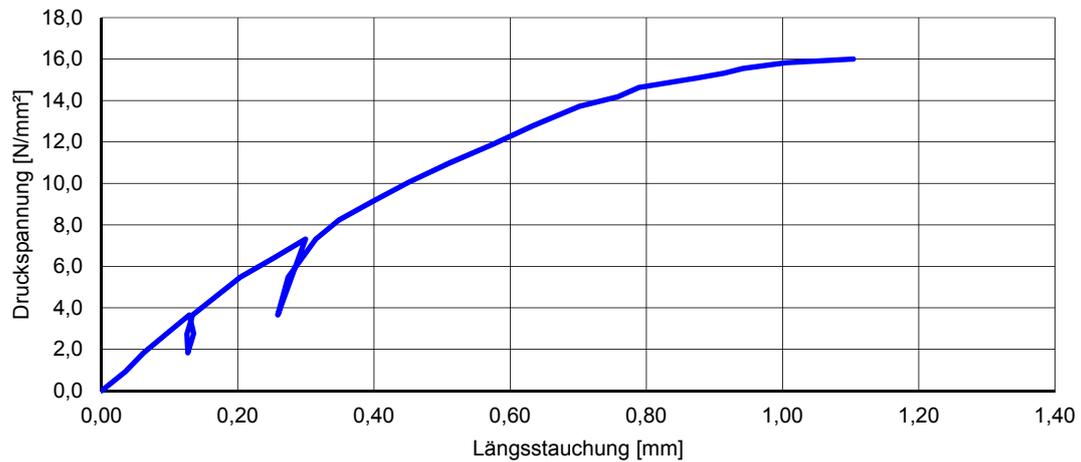
## Pfeiler VZ-4.2

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		7 Lagen (vollständig bewehrt)
Belastungsfläche	$A_0$	9692 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	226,50 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	340,80 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	16,39 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,92 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,69 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,77 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,056 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,332 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,276 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00122
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	4733 N/mm <sup>2</sup>



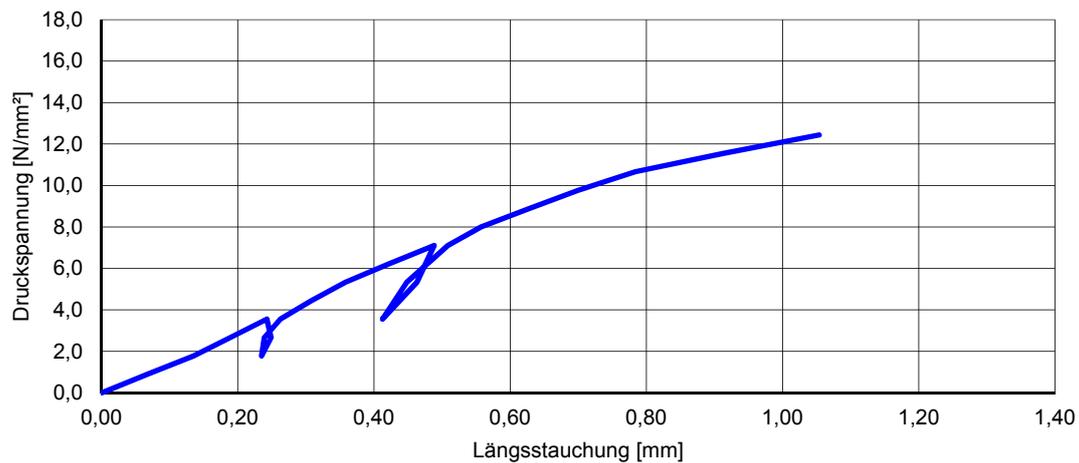
### Pfeiler VZ-4.3

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		7 Lagen (vollständig bewehrt)
Belastungsfläche	$A_0$	10 191 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	216,50 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	349,90 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	16,00 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,83 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,32 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,49 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,062 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,299 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,238 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00110
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	4999 N/mm <sup>2</sup>



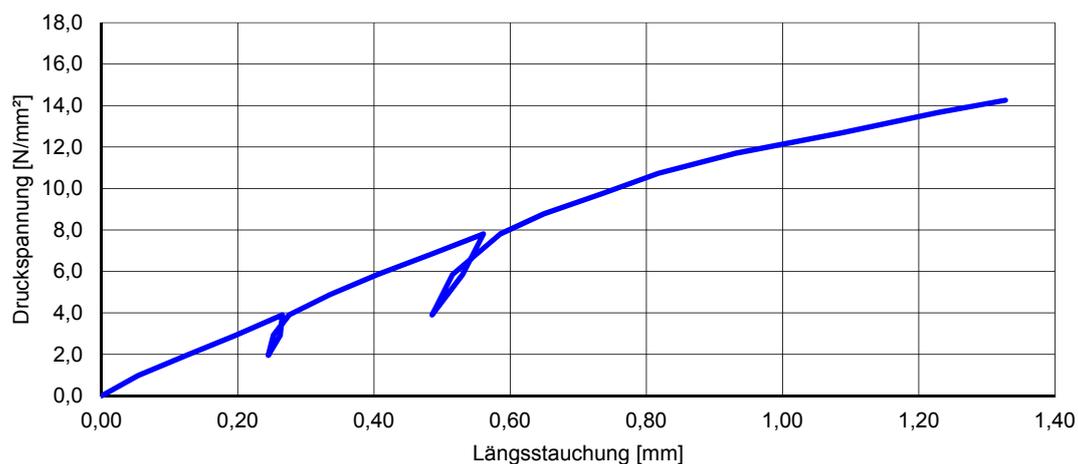
## Pfeiler VZ-5.1

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		unbewehrt
Mörtelalter		4 Tage
Belastungsfläche	$A_0$	10 491 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	227,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	280,20 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	12,45 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,78 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,11 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,33 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,135 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,488 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,354 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00156
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	3422 N/mm <sup>2</sup>



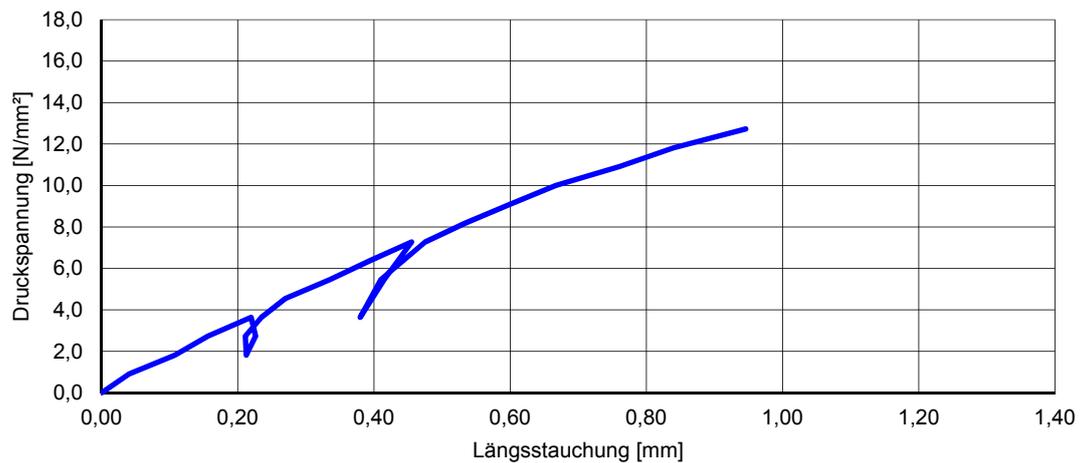
### Pfeiler VZ-5.4

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		7 Lagen (vollständig bewehrt)
Mörtelalter		4 Tage
Belastungsfläche	$A_0$	9555 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	229,50 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	292,30 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	14,26 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,95 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,80 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,85 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,125 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,561 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,436 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00190
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	3083 N/mm <sup>2</sup>



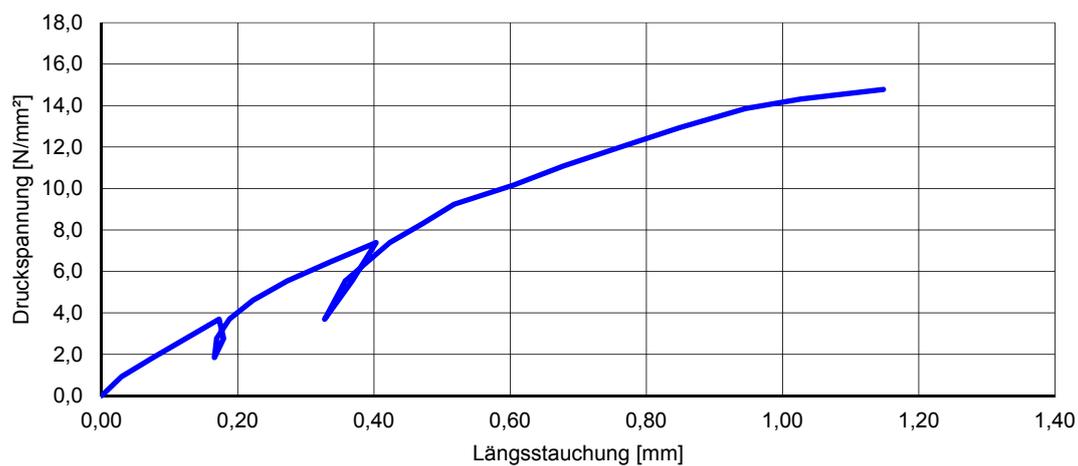
## Pfeiler VZ-6.1

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		unbewehrt
Mörtelalter		8 Tage
Belastungsfläche	$A_0$	10 252 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	235,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	281,20 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	12,78 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,82 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,27 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,45 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,107 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,455 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,348 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00148
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	3686 N/mm <sup>2</sup>



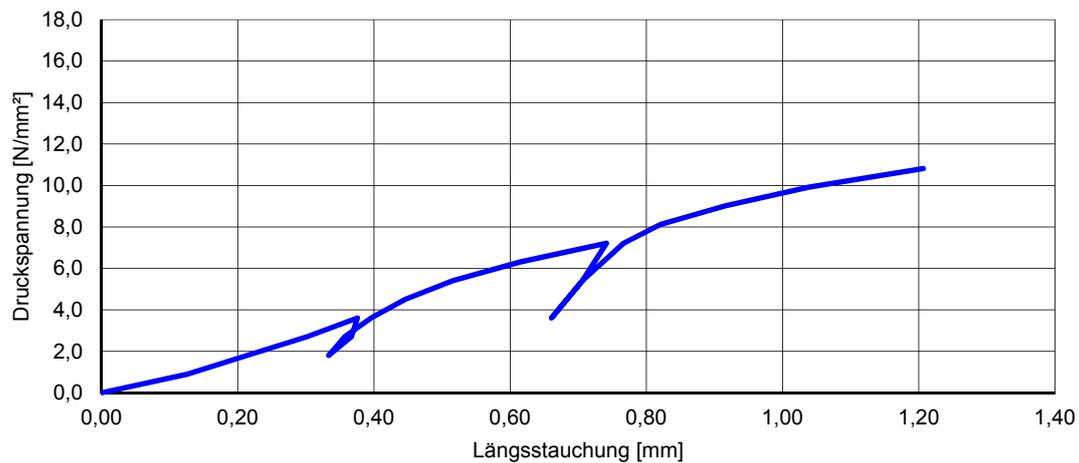
### Pfeiler VZ-6.4

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		7 Lagen (vollständig bewehrt)
Mörtelalter		8 Tage
Belastungsfläche	$A_0$	10 090 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	234,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	292,30 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	14,46 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,85 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,39 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,54 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,076 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,403 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,327 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00140
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	3962 N/mm <sup>2</sup>



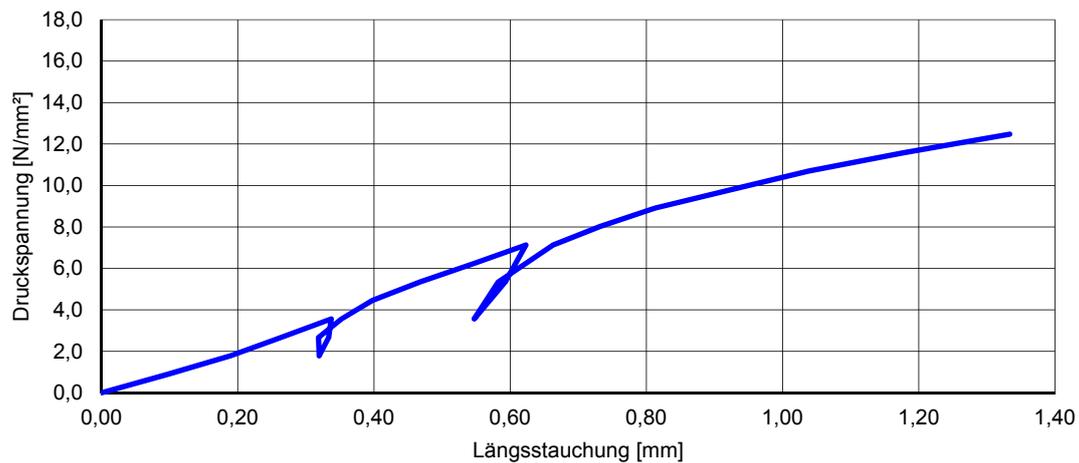
**Pfeiler VZ-7.1**

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		unbewehrt
Mörtelalter		12 Tage
Belastungsfläche	$A_0$	10 338 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	232,50 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	240,80 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	10,85 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,80 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,21 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,41 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,213 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,741 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,528 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00227
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	2382 N/mm <sup>2</sup>



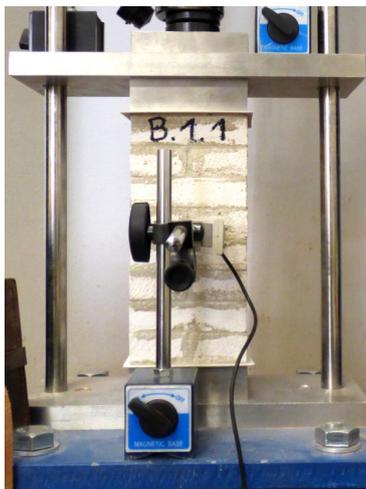
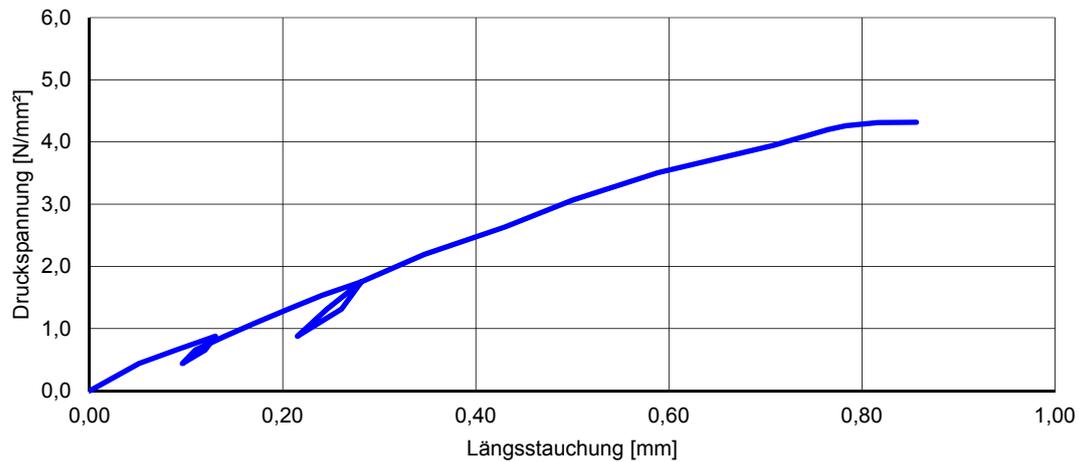
### Pfeiler VZ-7.4

Material der Mauersteine		Vollmauerziegel
Bewehrung		7 Lagen (vollständig bewehrt)
Mörtelalter		12 Tage
Belastungsfläche	$A_0$	10 460 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	233,50 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	278,50 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	12,41 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 40 bar	$\sigma_1$	1,78 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 160 bar	$\sigma_2$	7,13 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	5,35 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 40 bar	$\Delta l_1$	0,190 mm
Längsstauchung bei 160 bar	$\Delta l_2$	0,623 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,433 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00186
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	2880 N/mm <sup>2</sup>



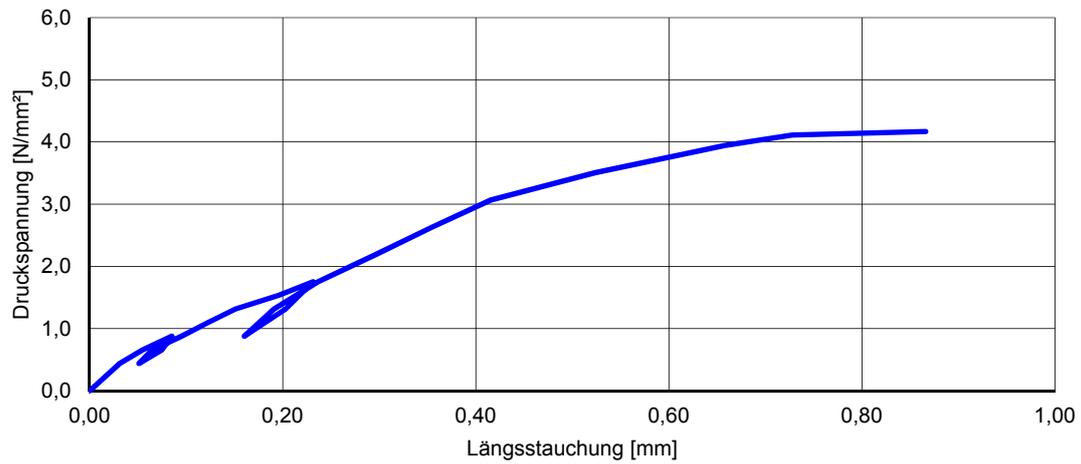
**Pfeiler PB-1.1**

Material der Mauersteine		Porenbeton
Bewehrung		unbewehrt
Belastungsfläche	$A_0$	10 635 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	214,50 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	98,50 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	4,32 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 20 bar	$\sigma_1$	0,88 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 80 bar	$\sigma_2$	3,51 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	2,63 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 20 bar	$\Delta l_1$	0,130 mm
Längsstauchung bei 80 bar	$\Delta l_2$	0,588 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,458 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00214
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	1231 N/mm <sup>2</sup>



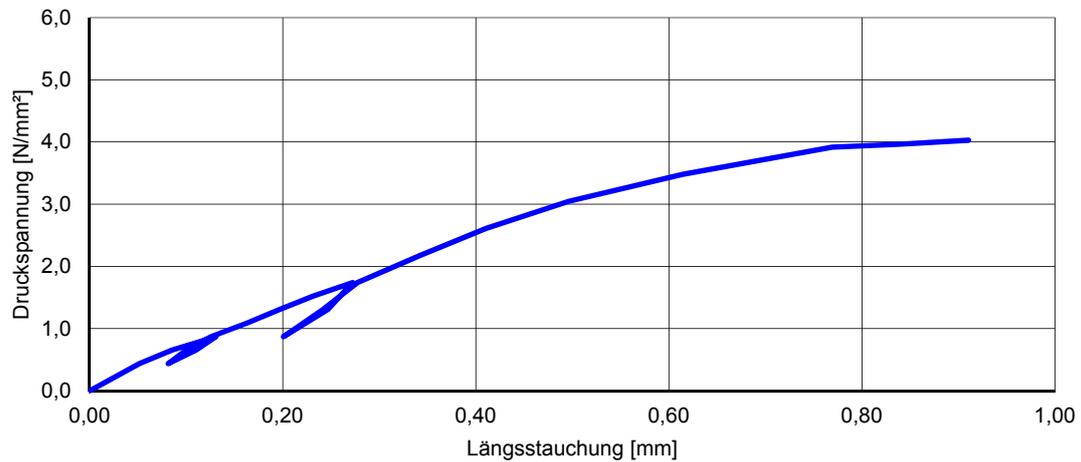
## Pfeiler PB-1.2

Material der Mauersteine		Porenbeton
Bewehrung		unbewehrt
Belastungsfläche	$A_0$	10 635 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	219,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	95,10 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	4,17 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 20 bar	$\sigma_1$	0,88 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 80 bar	$\sigma_2$	3,51 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	2,63 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 20 bar	$\Delta l_1$	0,085 mm
Längsstauchung bei 80 bar	$\Delta l_2$	0,523 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,438 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00200
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	1314 N/mm <sup>2</sup>



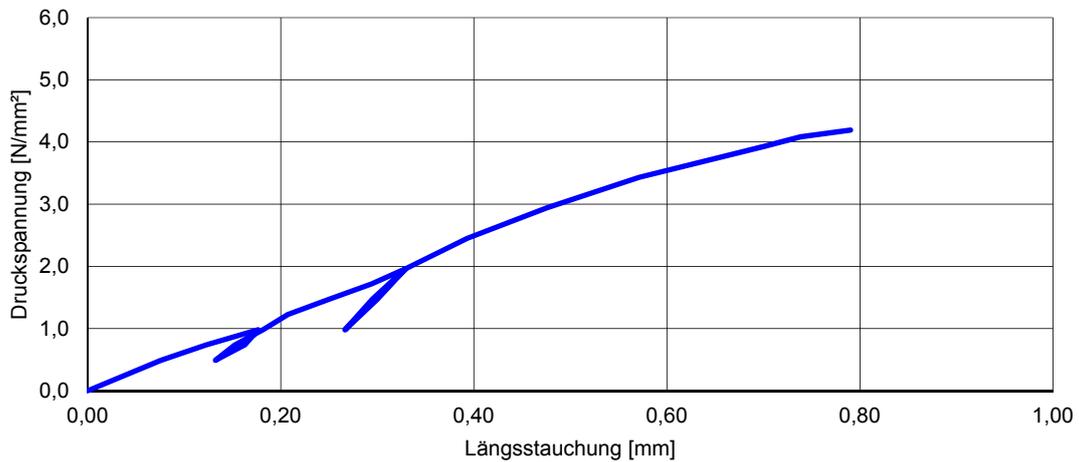
**Pfeiler PB-1.3**

Material der Mauersteine		Porenbeton
Bewehrung		unbewehrt
Belastungsfläche	$A_0$	10 712 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	218,50 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	92,60 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	4,03 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 20 bar	$\sigma_1$	0,87 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 80 bar	$\sigma_2$	3,48 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	2,61 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 20 bar	$\Delta l_1$	0,131 mm
Längsstauchung bei 80 bar	$\Delta l_2$	0,614 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,484 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00221
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	1179 N/mm <sup>2</sup>



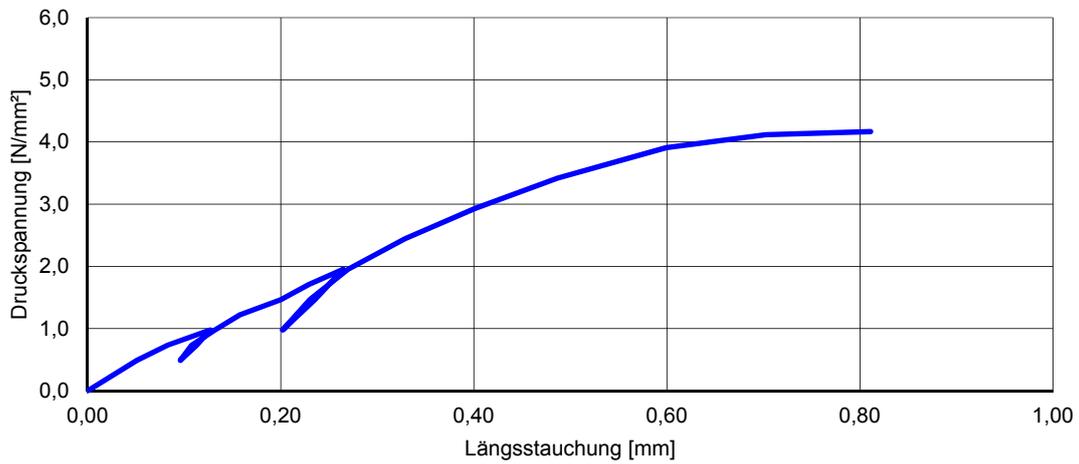
### Pfeiler PB-2.1

Material der Mauersteine		Porenbeton
Bewehrung		1 Lage in Pfeilermitte
Belastungsfläche	$A_0$	9506 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	215,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder erreichte Druckfestigkeit	$\sigma$ $f_k$	85,50 bar 4,19 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 20 bar	$\sigma_1$	0,98 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 80 bar	$\sigma_2$	3,92 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	2,94 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 20 bar	$\Delta l_1$	0,177 mm
Längsstauchung bei 80 bar	$\Delta l_2$	0,699 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,522 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00243
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	1211 N/mm <sup>2</sup>



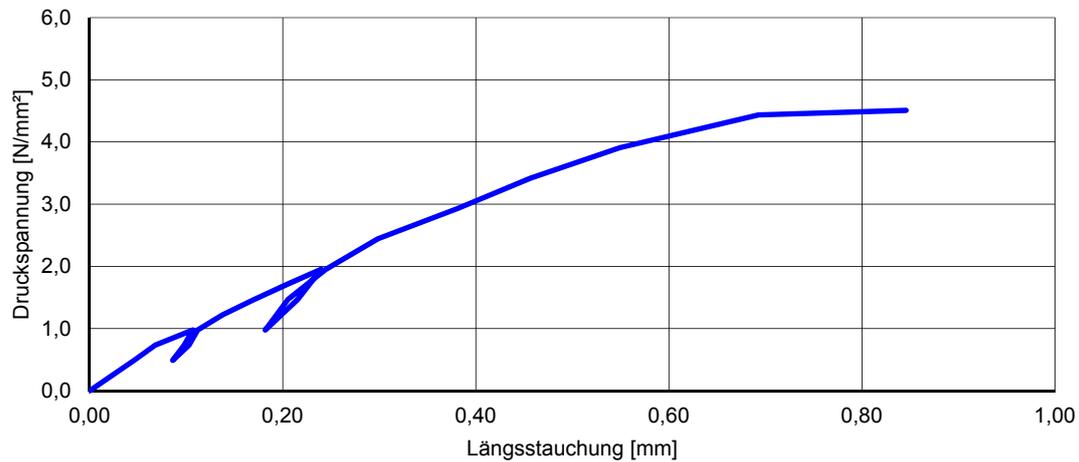
**Pfeiler PB-2.2**

Material der Mauersteine		Porenbeton
Bewehrung		1 Lage in Pfeilermitte
Belastungsfläche	$A_0$	9540 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	217,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder erreichte Druckfestigkeit	$\sigma$ $f_k$	85,30 bar 4,17 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 20 bar	$\sigma_1$	0,98 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 80 bar	$\sigma_2$	3,91 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	2,93 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 20 bar	$\Delta l_1$	0,127 mm
Längsstauchung bei 80 bar	$\Delta l_2$	0,599 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,473 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00218
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	1346 N/mm <sup>2</sup>



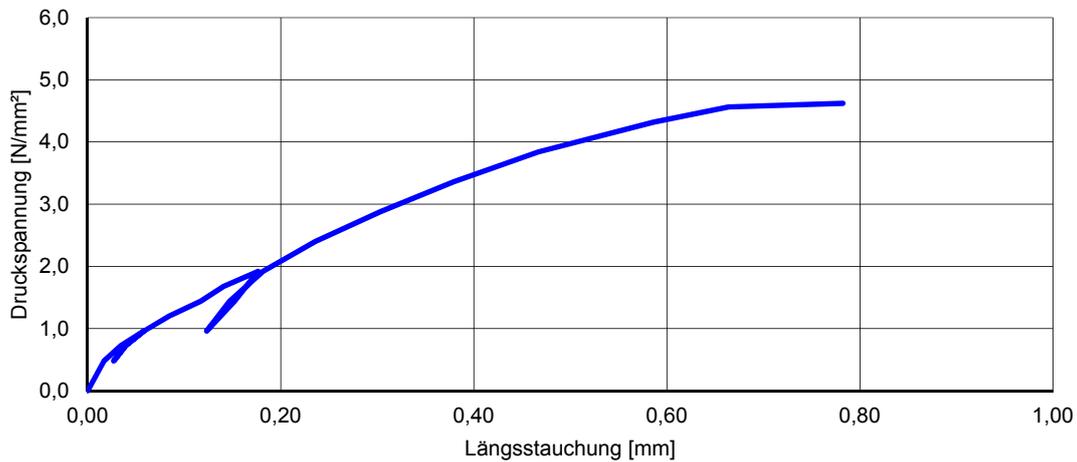
### Pfeiler PB-2.3

Material der Mauersteine		Porenbeton
Bewehrung		1 Lage in Pfeilermitte
Belastungsfläche	$A_0$	9540 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	213,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	92,30 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	4,51 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 20 bar	$\sigma_1$	0,98 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 80 bar	$\sigma_2$	3,91 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	2,93 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 20 bar	$\Delta l_1$	0,107 mm
Längsstauchung bei 80 bar	$\Delta l_2$	0,549 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,443 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00208
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	1410 N/mm <sup>2</sup>



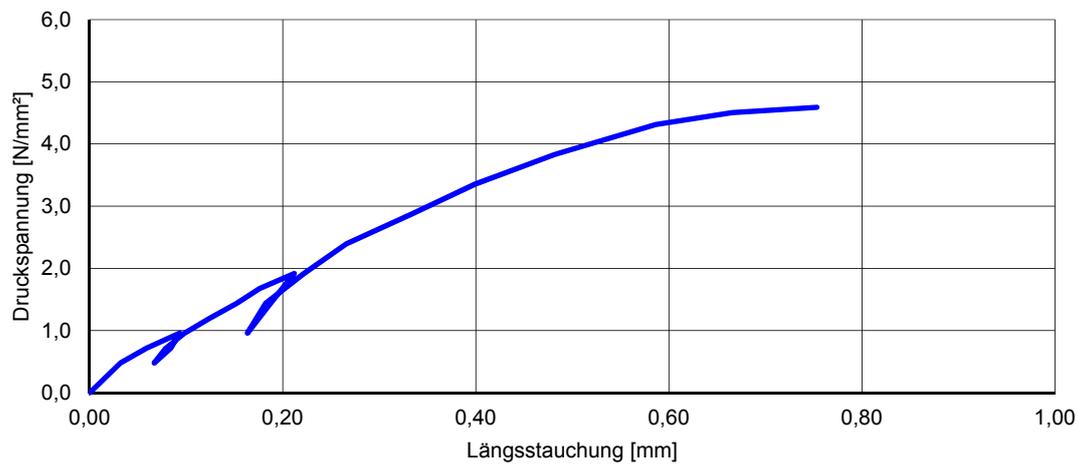
**Pfeiler PB-3.1**

Material der Mauersteine		Porenbeton
Bewehrung		3 Lagen (jede zweite Lagerfuge)
Belastungsfläche	$A_0$	9712 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	220,50 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	96,30 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	4,62 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 20 bar	$\sigma_1$	0,96 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 80 bar	$\sigma_2$	3,84 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	2,88 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 20 bar	$\Delta l_1$	0,058 mm
Längsstauchung bei 80 bar	$\Delta l_2$	0,467 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,408 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00185
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	1554 N/mm <sup>2</sup>



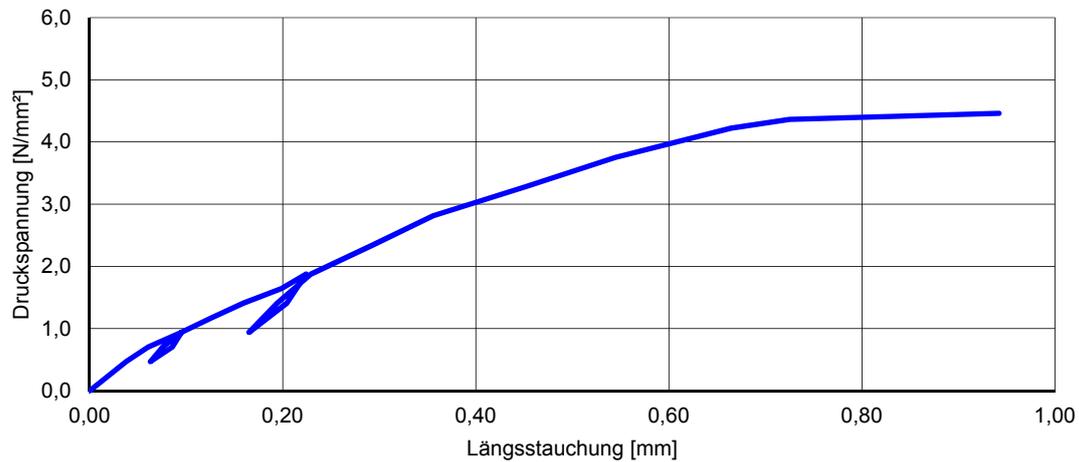
### Pfeiler PB-3.2

Material der Mauersteine		Porenbeton
Bewehrung		3 Lagen (jede zweite Lagerfuge)
Belastungsfläche	$A_0$	9727 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	215,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	95,80 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	4,59 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 20 bar	$\sigma_1$	0,96 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 80 bar	$\sigma_2$	3,83 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	2,87 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 20 bar	$\Delta l_1$	0,091 mm
Längsstauchung bei 80 bar	$\Delta l_2$	0,482 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,389 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00181
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	1591 N/mm <sup>2</sup>



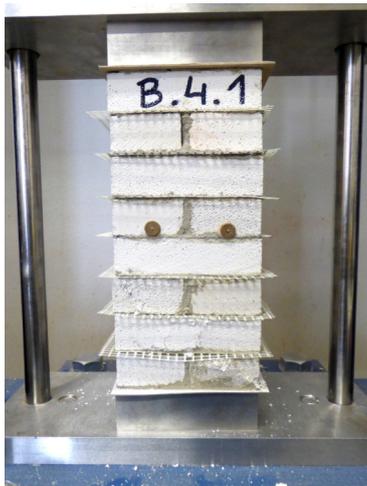
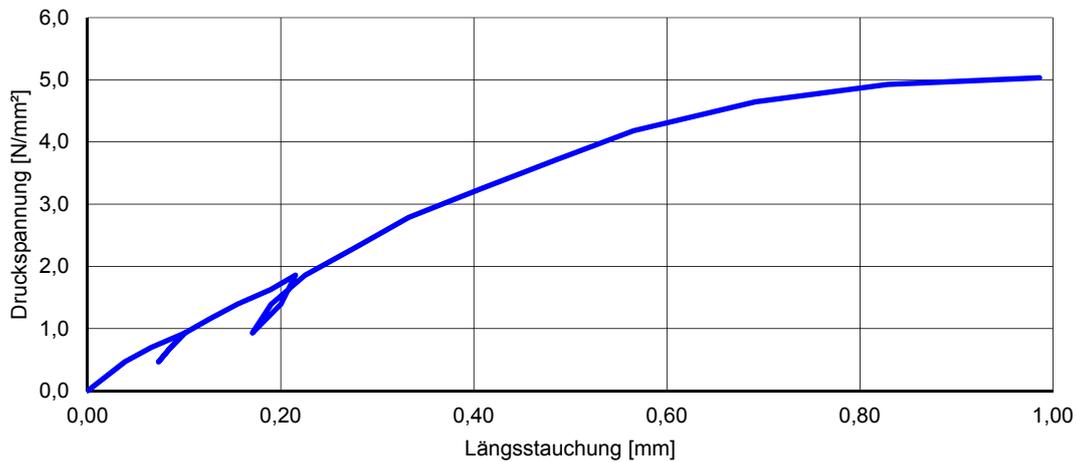
**Pfeiler PB-3.3**

Material der Mauersteine		Porenbeton
Bewehrung		3 Lagen (jede zweite Lagerfuge)
Belastungsfläche	$A_0$	9935 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	216,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	95,10 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	4,46 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 20 bar	$\sigma_1$	0,94 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 80 bar	$\sigma_2$	3,75 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	2,81 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 20 bar	$\Delta l_1$	0,095 mm
Längsstauchung bei 80 bar	$\Delta l_2$	0,545 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,450 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00208
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	1352 N/mm <sup>2</sup>



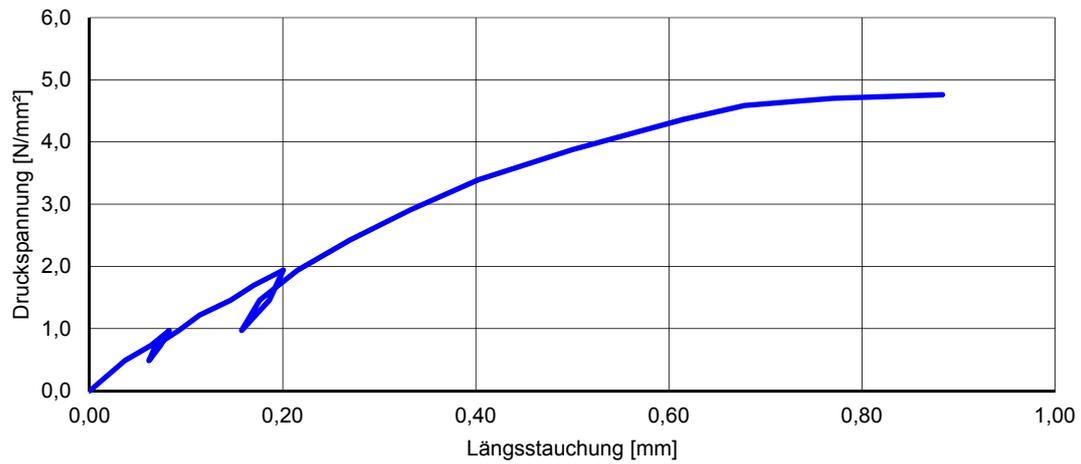
### Pfeiler PB-4.1

Material der Mauersteine		Porenbeton
Bewehrung		7 Lagen (vollständig bewehrt)
Belastungsfläche	$A_0$	10 030 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	218,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	108,30 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	5,03 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 20 bar	$\sigma_1$	0,93 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 80 bar	$\sigma_2$	3,72 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	2,79 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 20 bar	$\Delta l_1$	0,101 mm
Längsstauchung bei 80 bar	$\Delta l_2$	0,486 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,385 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00177
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	1578 N/mm <sup>2</sup>



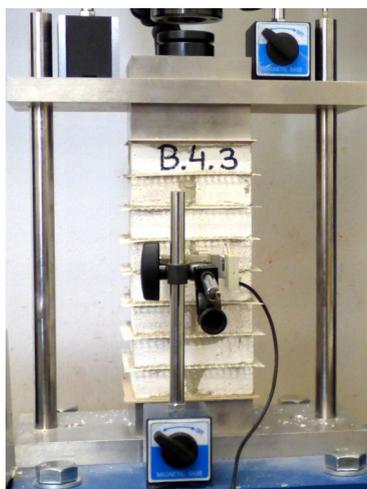
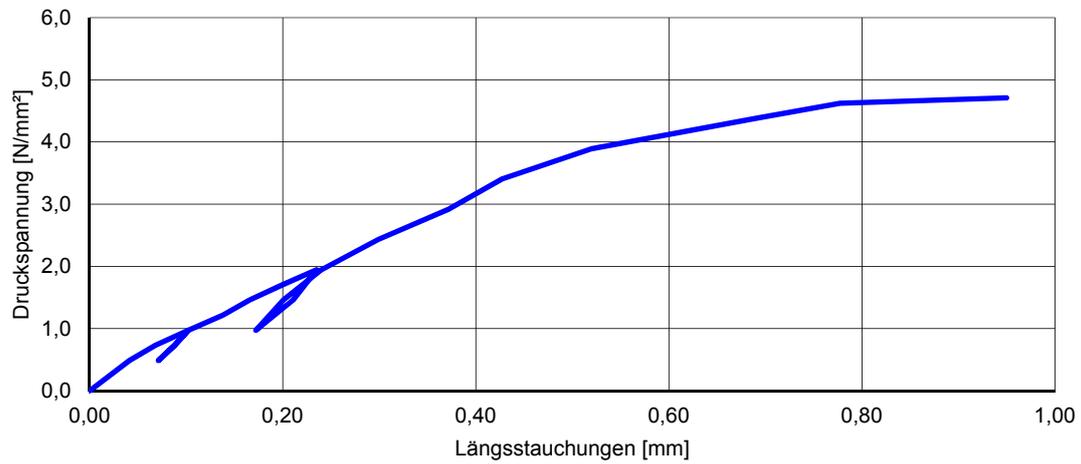
**Pfeiler PB-4.2**

Material der Mauersteine		Porenbeton
Bewehrung		7 Lagen (vollständig bewehrt)
Belastungsfläche	$A_0$	9614 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	220,00 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	98,20 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	4,76 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 20 bar	$\sigma_1$	0,97 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 80 bar	$\sigma_2$	3,88 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	2,91 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 20 bar	$\Delta l_1$	0,082 mm
Längsstauchung bei 80 bar	$\Delta l_2$	0,500 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,418 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00190
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	1531 N/mm <sup>2</sup>



### Pfeiler PB-4.3

Material der Mauersteine		Porenbeton
Bewehrung		7 Lagen (vollständig bewehrt)
Belastungsfläche	$A_0$	9579 N/mm <sup>2</sup>
Pfeilerhöhe	$H_{Pf}$	218,50 mm
Maximaler Druck im Zylinder	$\sigma$	96,80 bar
erreichte Druckfestigkeit	$f_k$	4,71 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 20 bar	$\sigma_1$	0,97 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung bei 80 bar	$\sigma_2$	3,89 N/mm <sup>2</sup>
Druckspannungsdifferenz	$\Delta\sigma$	2,92 N/mm <sup>2</sup>
Längsstauchung bei 20 bar	$\Delta l_1$	0,102 mm
Längsstauchung bei 80 bar	$\Delta l_2$	0,520 mm
Längsstauchungsdifferenz	$\Delta l$	0,418 mm
relative Stauchung bezogen auf $H_{Pf}$		0,00191
Kurzzeitelastizitätsmodul	$E_D$	1526 N/mm <sup>2</sup>





# Bibliografie

## Literaturverzeichnis

- [1] E. Berndt. „Zur Druck- und Schubfestigkeit von Mauerwerk – experimentell nachgewiesen an Strukturen aus Elbesandstein“. In: *Bautechnik* 73 Heft 4 (1996), S. 222–234.
- [2] K. Breit. „Einflüsse auf die Druckfestigkeit des Ziegelscherbens – Belastungsrichtung – Größe – Schlankheit“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 1989.
- [3] Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau e.V. *Geschichte des Mauerwerksbau – Aufgaben, Eigenschaften und Vorteile*. URL: <https://www.dgfm.de/technik-normung/geschichte.html> (Zugriff am 30. 10. 2018).
- [4] O. Graf, K. Alberti und E. Siebel. *Handbuch der Werkstoffprüfung: Die Prüfung nichtmetallischer Baustoffe*. 2., verb. Aufl./bearb. von: K. Alberti et al.: Berlin Göttingen Heidelberg: Springer, 1957.
- [5] C. Hellmich. *Skriptum zur Vorlesung mit Übung aus Ingenieurmechanik: Teil A – Vorlesungsteil*. Institut für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen, Technische Universität Wien, 2018.
- [6] H. Hilsdorf. *Untersuchungen über die Grundlagen der Mauerwerksfestigkeit*. Bericht Nr. 40. Materialprüfamt für das Bauwesen TH München, 1965.
- [7] Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. *Montageanleitung für den Dehnungsaufnehmer DD1*. URL: <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/a0781.pdf> (Zugriff am 20. 09. 2018).
- [8] B. Ilshner und R. F. Singer. *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik – Eigenschaften, Vorgänge, Technologien*. Berlin Heidelberg: Springer, 2010.
- [9] W. Jäger. *Mauerwerk-Kalender 2015 – Bemessung, Bauen im Bestand*. 40. Jahrgang. Berlin: Ernst + Sohn, 2015.
- [10] W. Jäger und G. Marzahn. *Mauerwerk – Bemessung nach DIN 1053-100*. 5., neu bearbeitete Auflage. Berlin: Ernst + Sohn, 2010.
- [11] K. Kirtschig. „Baukostendämpfung durch Ermittlung des Einflusses der Güte der Ausführung auf die Druckfestigkeit von Mauerwerk“. In: *Forschungsbericht F2141* (1989).
- [12] A. Köpf. „Bestimmung der Steindruckfestigkeit von Hochlochziegel im Bestandsmauerwerk anhand von Kleinprüfkörpern“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2018.
- [13] MA 39 der Stadt Wien und TU Wien. *Forschungsvorhaben F 1087 – Pfeilerversuche mit üblichen Baustoffen – Neue statische Bemessung*. Wien, 1990.
- [14] H. Mang und G. Hofstetter. *Festigkeitslehre*. 3., aktualisierte Auflage. WienNewYork: Springer, 2008.
- [15] R. Müller. „Size Effect im Betonbau“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2001.

- [16] L. Papula. *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Band 3 – Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung*. 7., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2016.
- [17] A. Pech, H. Gangoly, P. Holzer und P. Maydl. *Ziegel im Hochbau – Theorie und Praxis*. 2. Auflage. Basel: Birkhäuser, 2018.
- [18] A. Pech und G. Pommer. *Gutachten – Forschungsprogramm zur Verifizierung der konstruktiven Kennwerte von altem Vollziegelmauerwerk nach EC 6*. ZT-Pech, Wien, 2010.
- [19] R. Suda. „Finite-Elemente-basierte Bestimmung der Tragfähigkeitserhöhung von Ziegelmauerwerk durch faserverstärkte Mörtelfugen“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2019.
- [20] R. Wendehorst und G. Neroth. *Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz; mit 363 Tabellen*. 27., vollst. überarb. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [21] F. Zach. „Neue Entwicklungen im Mauerwerksbau und ihr Einfluss auf die Erstellung der ÖNORM B 3350 – Tragende Wände“. Dissertation. Technische Universität Wien, 1990.

## Normenverzeichnis

- [22] DIN 18554-1:1985-12. *Prüfung von Mauerwerk; Ermittlung der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls*. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Berlin.
- [23] DIN 18555-4:2018-05. – *Entwurf: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln – Festmörtel – Teil 4: Bestimmung der Längs- und Querdehnung sowie von Verformungskenngrößen von Mauermörteln im statischen Druckversuch*. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). Berlin.
- [24] ÖNORM B 1996-1-1:2016-07. *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk*. Österreichisches Normungsinstitut (ON). Wien.
- [25] ÖNORM B 1996-3:2016-07. *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten – Nationale Festlegungen und Ergänzungen zur ÖNORM EN 1996-3*. Österreichisches Normungsinstitut (ON). Wien.
- [26] ÖNORM B 3200:2016-04. *Mauerziegel – Anforderungen, Prüfungen, Klassifizierung und Kennzeichnung*. Österreichisches Normungsinstitut (ON). Wien.
- [27] ÖNORM B 3303:2002-09. *Betonprüfung*. Österreichisches Normungsinstitut (ON). Wien.
- [28] ÖNORM EN 1015-11:2007-03. *Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel*. Österreichisches Normungsinstitut (ON). Wien.
- [29] ÖNORM EN 1052-1:1999-01. *Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit*. Österreichisches Normungsinstitut (ON). Wien.
- [30] ÖNORM EN 1996-1-1:2013-01. *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk*. Österreichisches Normungsinstitut (ON). Wien.
- [31] ÖNORM EN 771-1:2015-12. *Festlegungen für Mauersteine – Teil 1: Mauerziegel*. Österreichisches Normungsinstitut (ON). Wien.

- [32] ÖNORM EN 771-4:2016-01. *Festlegungen für Mauersteine – Teil 4: Porenbetonsteine*. Österreichisches Normungsinstitut (ON). Wien.
- [33] ÖNORM EN 772-1:2015-12. *Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit*. Österreichisches Normungsinstitut (ON). Wien.
- [34] ÖNORM EN 772-16:2011-06. *Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 16: Bestimmung der Maße*. Österreichisches Normungsinstitut (ON). Wien.
- [35] ÖNORM EN 772-20:2005-05. *Prüfverfahren für Mauersteine – Teil 20: Bestimmung der Ebenheit von Mauersteinen*. Österreichisches Normungsinstitut (ON). Wien.
- [36] ÖNORM EN 998-2:2015-11. *Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau – Teil 2: Mauer-  
mörtel*. Österreichisches Normungsinstitut (ON). Wien.