

Diploma Thesis

Verification Format for Injected Masonry

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

DIPLOMARBEIT

Nachweisformat für injiziertes Mauerwerk

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

von

Andreas Schöffmann

Matr.Nr.: 01426412

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Andreas Kolbitsch**

Institut für Hochbau, Baudynamik und Gebäudetechnik
Forschungsbereich Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/208-02, A-1040 Wien

Wien, im Oktober 2020

Danksagung

Das Studium sowie die Erstellung dieser Arbeit stellten für mich einen (mauer)steinigen Weg dar, weshalb ich ein Dankeschön an jene Menschen aussprechen möchte, die mich beim Bestreiten dieses Weges begleitet und unterstützt haben.

Besonderen Dank möchte ich meinen Eltern Gabriele und Franz aussprechen, die es mir ermöglichten, eine unbeschwerte Studienzeit zu erleben und mir immer volles Vertrauen in meinen Vorhaben entgegengebracht haben.

Vielen Dank auch an Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Kolbitsch, der mir das Verfassen meiner Diplomarbeit am Institut für Hochbau, Baudynamik und Gebäudetechnik ermöglichte und mich auch in Zeiten einer Pandemie stets engagiert betreut hat.

Meine Studienfreunde Davide und Moritz möchte ich hierbei keinesfalls aussparen. Gegenseitige Motivation und Unterstützung haben uns durch das Studium geholfen. Der dadurch aufgebaute Zusammenhalt und die entstandene Freundschaft werden unser weiteres Leben bereichern.

Kurzfassung

Verstärkungen von ein- oder mehrschaligen Ziegel- oder Natursteinmauerwerken durch Injektionen nehmen in der Sanierung und Adaptierung von gründerzeitlichen Gebäuden (1840 – 1918) einen großen Stellenwert ein. Grund für solche Eingriffe kann die Anpassung an moderne Anforderungen wie Nutzungsänderungen, Aufstockungen oder Dachgeschoßausbauten sein. Vor der Durchführung besagter Baumaßnahmen ist abzuklären, ob und in welchem Ausmaß diese durchführbar sind.

Zu Beginn dieser Arbeit wird auf die Grundlagen von Injektionsmaßnahmen sowie auf die Richtlinie Injektionstechnik für Mauerwerk eingegangen, was durch einen geschichtlichen Rückblick sowie einen Einblick auf Injektionsmittel ergänzt wird. Einen weiteren Teil dieser Arbeit bildet das Aufzeigen von Möglichkeiten zur Tragfähigkeitsbewertung unverfestigter Mauerwerke. Hierbei wird einerseits in etablierte Methoden nach dem Stand der Technik unter besonderer Berücksichtigung der ÖNORM EN 4008-1 sowie der ÖNORM EN 1052 unterteilt und zusätzlich auf den notwendigen Prüfungsumfang vor Ort zur Erbringung der Kenntnisstände (Knowledge-Level) eingegangen. Andererseits erfolgt die Unterteilung der Tragfähigkeitsbewertung nach jenen Verfahren, welche den Stand der Wissenschaft widerspiegeln, wobei zwischen direkten und indirekten Bewertungsmethoden unterschieden wird.

Nach der erfolgten Verfestigung von Mauerwerken ist die Überprüfung des vorgegebenen Injektionsziels durchzuführen, wobei die vorliegende Arbeit auch in diesem Punkt als Handbuch dafür gesehen werden kann. Weiters erfolgt ein Einblick in die Bemessung von injiziertem Mauerwerk, wie sie in Österreich aber auch international durchgeführt wird, um die Druckfestigkeit des Mauerwerks mittels organischer oder mineralischer Injektionsmittel analytisch zu prognostizieren, soweit dies möglich ist. Hierbei erfolgt eine Unterteilung in einschalige Ziegelmauerwerke verfestigt mittels organischer Injektionsgüter, und mehrschalige Natursteinmauerwerke verfestigt durch mineralische Injektionsgüter. Parallelen zwischen mittels organischer Injektionsgüter verfestigtem Mauerwerk und unbewehrten Betonwänden bzw. geklebten Mauerwerken werden abschließend aufgezeigt.

Abstract

Refurbishment by injections of one-leaf masonry or multi-leaf masonry, bricked up out of solid brick or natural stone, is a significant method to enlarge the load bearing strength of masonry used in buildings constructed during the founding period (1840 – 1918). Reasons for such interventions could be changes of use, e.g. adaptation of floors or the modification of a not used attic into a penthouse-like flat. Before the beginning of such constructions it is necessary to clarify, if and in which extent they are executable.

The first part of this thesis explains the basics of injections as well as some aspects out of the *Richtlinie Injektionstechnik für Mauerwerk* (Guidelines for Injected Masonry), expanded by a short historical review of these measures and an overview of injectables/grouts. A further part of this elaboration highlights possible evaluation methods of non-strengthened masonry. Whereby, on one hand established methods that go in line with the ÖNORM EN 4008-1 and the ÖNORM EN 1052 (European Standards) are discussed and additionally, the necessary scope of evaluation in-situ for obtaining the Knowledge-Levels is mentioned. On the other hand, the evaluation of load bearing strength is separated into methods reflecting the current state of scientific knowledge. Hereby the paper distinguishes between direct and indirect methods of evaluation.

Once the masonry is strengthened by injections, it must be verified if the set aim of enlarging the load bearing strength has been accomplished. Regarding this process, the present thesis can also be considered as a handbook. Further, an insight of rating injected masonry analytically in order to predict the compressive strength is given in the way, which is used not only in Austria but also internationally. In this context, organic grouts as well as mineral grouts are applied. Herein there is a classification into single-leaf brick masonry, strengthened with organic grouts, conducted as well as a separation into multi-leaf stone masonry, strengthened by mineral grouts. Similarities between masonries strengthened by organic injectables and (i) unreinforced concrete walls and (ii) glued masonry are shown.

Inhalt – Nachweisformat für injiziertes Mauerwerk

Danksagung	iii
Kurzfassung.....	v
Abstract	vi
Inhalt – Nachweisformat für injiziertes Mauerwerk	viii
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit	1
1.2 Methodik.....	1
2 Grundlagen	2
2.1 Protagonisten der Mauerwerksverfestigung.....	2
2.1.1 Betrachtete Mauerwerksarten	2
2.1.1.1 Mehrschaliges Mauerwerk	2
2.1.1.2 Einschaliges Mauerwerk	2
2.1.2 Verfestigungsmaßnahmen – Ohne Geschichte keine Zukunft.....	3
2.1.2.1 Was war.....	3
2.1.2.2 Was ist	5
2.1.3 Die Injektion	6
2.1.3.1 Leistungsverzeichnis.....	6
2.1.3.2 Füllstoffe	7
2.1.3.3 Mineralische Injektionsmittel	7
2.1.3.4 Organische Injektionsmittel	9
2.1.3.5 Kombiniertes Einsatz	10
2.1.3.6 Bohrlochraster.....	11
2.1.3.7 Bohrloch.....	12
2.1.3.8 Injektionsverfahren.....	12
2.1.3.9 Dauerhaftigkeit.....	13
2.2 Betrachtete Beanspruchungen.....	13
2.2.1 Allgemein	13
2.2.2 Druckbeanspruchung – einaxial	14
2.2.3 Schubbeanspruchung	15
2.2.3.1 Plattenschub	15
2.2.3.2 Scheibenschub	16
3 Unverfestigtes Mauerwerk – Tragfähigkeitsbewertung	20
3.1 Vorbereitende Maßnahmen	20
3.1.1 Durchzuführende Untersuchungen.....	20
3.1.1.1 Anamnese.....	20
3.1.1.2 Voruntersuchung.....	20
3.1.1.3 Verfeinerte Untersuchung	20
3.1.2 Dokumentation.....	20
3.2 Stand der Technik.....	21

3.2.1	Allgemein	21
3.2.2	Prüfungsumfang vor Ort	24
3.2.2.1	Prüfserien.....	24
3.2.2.2	Prüfstellen	24
3.2.3	Abgrenzung indirekte Prüfung zu direkter Prüfung	24
3.2.4	Indirekte Prüfung.....	25
3.2.4.1	Allgemein	25
3.2.4.2	Zerstörende Prüfung (DT)	25
3.2.4.3	Zerstörungsarme Prüfung (MDT)	27
3.2.4.4	Berechnung der Druckfestigkeit von Mauerwerken	27
3.2.4.5	Berechnung der Schubfestigkeit von Mauerwerken.....	29
3.2.5	Direkte Prüfung (DT)	30
3.2.5.1	Allgemein	30
3.2.5.2	Kleinprüfkörper – Ansätze Fugenbohrkern	30
3.2.5.3	Großprüfkörper – Normenreihe ÖNORM EN 1052 (Auswahl)	31
3.2.5.4	Flat-Jack-Test	34
3.3	Stand der Wissenschaft	35
3.3.1	Allgemein	35
3.3.2	Direkte Prüfungsmethoden.....	35
3.3.2.1	Versuchsgrenzlast für direkte Verfahren	35
3.3.2.2	Verfahren mittels Klemmbalken.....	38
3.3.2.3	Verfahren mittels Druckschläuchen	39
3.3.2.4	Diagonaler Kompressionsversuch	40
3.3.2.5	Scher-Kompressionsversuch.....	41
3.3.2.6	Bohrwiderstandsmessung	42
3.3.2.7	Endoskopie	42
3.3.3	Indirekte Prüfungsmethoden	43
3.3.3.1	Ultraschall und Mikroseismik	43
3.3.3.2	Radar	45
3.3.3.3	Widerstandselektrik.....	48
3.3.4	Zusammenfassung.....	49
4	Verfestigtes Mauerwerk – Tragfähigkeitsbewertung.....	50
4.1	Baubegleitende Überwachung	50
4.1.1	Dokumentation der Ausführung.....	50
4.1.2	Auswirkung der Verfestigung auf die Zuverlässigkeits-Klasse	51
4.1.3	Güte der Baustoffe	51
4.2	Durchführbare Untersuchungen – Stand der Technik	51
4.2.1	Grundlagen	51
4.2.2	Direkte Prüfung	52
4.2.2.1	Mauerwerksprüfkörper	52
4.2.2.2	Fugenbohrkern mit Einzelprüfkörper	52
4.2.3	Indirekte Prüfung.....	53

4.2.3.1	Allgemein	53
4.2.3.2	Organische Injektionen.....	53
4.2.3.3	Mineralische Injektionen.....	53
4.3	Durchführbare Untersuchungen – Stand der Wissenschaft.....	54
5	Verfestigtes Mauerwerk – Analytische Tragfähigkeitsprognose.....	55
5.1	Mehrschaliges Mauerwerk.....	55
5.1.1	Wirkung der Injektion.....	55
5.1.2	Prognose der Druckfestigkeit	55
5.1.2.1	Unverfestigtes Mauerwerk.....	55
5.1.2.2	Verfestigtes Mauerwerk.....	56
5.1.3	Druckfestigkeit Injektionsmörtel kontra Druckfestigkeit Mauerwerk.....	58
5.1.4	Prognose der Schubfestigkeit.....	61
5.1.4.1	Bindung zwischen Injektionsmörtel und in-situ Materialien	61
5.1.4.2	Versuchsergebnisse und Interpretation	61
5.2	Einschaliges Mauerwerk.....	62
5.2.1	Wirkung der Injektion.....	62
5.2.2	Mörtelbedarf neues Ziegelmauerwerk	62
5.2.3	Prognose der Druckfestigkeit – mineralische Injektionsmörtel	63
5.2.4	Prognose der Druckfestigkeit – organische Injektionsmittel	66
5.2.4.1	Ausgangsparameter.....	66
5.2.4.2	Versuchsergebnisse und Interpretation	67
5.2.4.3	Empfehlungen.....	70
5.2.5	Prognose der Schubfestigkeit.....	71
5.2.5.1	Unverfestigtes Mauerwerk.....	71
5.2.5.2	Verfestigtes Mauerwerk.....	72
5.2.6	Organische Injektionsmittel: Bemessung als unbewehrte Betonwand	72
5.2.6.1	Voraussetzungen	72
5.2.6.2	Durchführung	73
5.2.7	Geklebtes Mauerwerk	74
5.3	Zusammenfassung	75
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	76
7	Anhang.....	78
	Literaturverzeichnis.....	85
	Abbildungsverzeichnis	89
	Tabellenverzeichnis	90

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit

Ausgearbeitet werden soll ein Vorschlag für die Durchführung von Mauerwerksverfestigungen durch mineralische oder organische Injektionsgüter. Die Basis bildet die Grundlagenermittlung der zu ertüchtigenden Bestandsbauteile. Darunter fallen die Feststellung von Tragfähigkeit sowie die Beschaffenheit der betrachteten Tragstrukturen, wobei es sich hierbei um ein- oder mehrschalige Mauerwerke, hergestellt aus Natursteinen oder keramischen Mauersteinen, handelt. Weiters wird auch der Umfang der durchzuführenden Untersuchungen beleuchtet. Zusätzlich sollen Methoden vorgestellt werden, welche die Qualität und den Erfolg der durchgeführten Verfestigungsmaßnahme überprüfen. Der Fokus liegt hierbei auf direkten (mechanischen) und indirekten (physikalischen) Überprüfungsverfahren. Auch sind Vorschläge für die analytische Prognose der Tragfähigkeit hinsichtlich Druck- und Schubbelastung durch eine geplante Verfestigung anzuführen bzw. zu vergleichen.

1.2 Methodik

Im Zuge der Verfestigung eines Bestandsmauerwerks durch Injektionen stellt sich eine Homogenisierung der Stoß- und Lagerfugen ein, weshalb die Tragsicherheitsnachweise des Eurocode 6 hier nicht direkt anwendbar sind. Seit geraumer Zeit wird international und insbesondere in Mitteleuropa auf wissenschaftlicher Basis an der Injektion von Bestandsmauerwerk gearbeitet. Die Analyse sowie der Vergleich und die Bewertung einer Auswahl wissenschaftlichen Arbeiten werden durchgeführt. Die Ansätze und Ergebnisse dieser Arbeiten wurden herangezogen, um daraus eventuell Ähnlichkeiten zu Normen abzuleiten. Dies auch, um in der Praxis schnelle und begründete Entscheidungen für den Tragsicherheitsnachweis hinsichtlich Druck- und Schubbeanspruchung von zu injizierendem Mauerwerk treffen zu können.

2 Grundlagen

2.1 Protagonisten der Mauerwerksverfestigung

2.1.1 Betrachtete Mauerwerksarten

2.1.1.1 Mehrschaliges Mauerwerk

Mehrschaliges, insbesondere dreischaliges Mauerwerk, hergestellt aus Naturstein oder Ziegeln, stellt eines der anfälligsten Mauerwerkstypen dar. Eine Trennung der beiden äußeren Schalen von der Zwischenschicht (Füllmaterial mit schlechter Qualität und Druckfestigkeiten $< 0,5$ MPa) im Inneren – aufgetreten durch Alterung und/oder durch andere Einflüsse wie Einwirkungen in oder aus der Mauerwerksebene – führt zu einer Separation der drei anfänglich verbundenen Schalen. Diese wiederum führt dazu, dass die Tragfähigkeit, sowohl in der Ebene als auch aus der Ebene, massiv reduziert wird und sich das Mauerwerk nicht mehr als Ganzes im Verbund verhält. [1, p. 2265] Sprödes Versagen wurde sehr oft bei zwei- oder dreischaligen Mauerwerken beobachtet, wenn diese nicht mittels Verbindungen (Bindersteine quer durch das Mauerwerk – von Schale zu Schale) ausgeführt wurden. Demzufolge ist das Mauerwerk nicht nur durch die Eigenschaften seiner einzelnen Bestandteile charakterisiert, sondern auch durch seine geometrischen und monolithischen Merkmale. [2, p. 28]

Durch die Inkompatibilität der Verformung äußerer Schalen zur Innenschale wird die Bindung zwischen den Schalen geschwächt. Zusätzlich wirkt auf die äußeren Schalen eine horizontale, aus der Mauerwerksebene wirkende, Verformung, welche durch eine höhere Dilatanz¹ des Füllmaterials infolge Belastung induziert wird. Im Bruchzustand, hervorgerufen von einachsialer Druckbelastung, beträgt laut Egermann das Verhältnis der Lastabtragung 1 zu 5 von Zwischenschicht zu den äußeren Schalen. [3, p. 174] [4, p. 189]

Im mitteleuropäischen Raum und besonders in Österreich wurde jedoch meist die einschalige Bauweise angewandt. Die Errichtung von mehrschaligem Mauerwerk aus Natursteinen beschränkt sich mehr auf den mediterranen Raum. Dies kann gut nachvollzogen werden, wenn Einsicht in die in Kapitel 5.1 zitierte Literatur genommen wird, welche sich mit der Sanierung mehrschaligen Mauerwerks befasst. Auch in Deutschland sind vermehrt mehrschalige Bauwerke aus früheren Jahrhunderten sanierungsbedürftig, wie Wenzel et al. [5, p. 212] darstellen.

2.1.1.2 Einschaliges Mauerwerk

Einschaliges-, sowie durchgemauertes Mauerwerk weist im Vergleich zu mehrschaligem Mauerwerk weniger Hohlräume auf. Ein weiteres Merkmal ist der höhere Steinanteil und eine in

¹ Volumenvergrößerung durch Aufreiten der Körner infolge Scherbelastung.

der Regel gute Vermörtelung. [6, p. 235] Bei der Verwendung von Kalkmörteln in historischen Bauten kann jedoch aufgrund fortschreitenden Schwindverhaltens davon ausgegangen werden, dass die Stoßfugen als unvermörtelt betrachtet werden und zudem keine Zugspannungen übertragen werden können. Hinsichtlich der verwendeten Mörtel kann gesagt werden, dass diese der Festigkeitsklasse M1 oder auch geringen Klassen entsprechen. [7, p. 22] Das oftmalige Vorhandensein einer Mischbauweise (Mischmauerwerk) kann auf Reparaturen oder ähnliches zurückgeführt werden [8, p. 16].

Einschalige Mauerwerke aus keramischen Mauersteinen sind oft im urbanen Bereich anzutreffen. Dies ist nicht zuletzt der Tatsache geschuldet, dass sich Ziegeleien in Städten angesiedelt haben und der Transport der Baustoffe über weite Strecken hinweg zu teuer gewesen wäre. Einen weiteren Aspekt stellen Bauordnungen dar, da diese in Städten zuerst Einklang fanden und die Kontrolle der Einhaltung von Vorschriften in ländlichen Gegenden wohl zu aufwändig gewesen wäre. Aus diesen ausgewählten Beispielen kann abgeleitet werden, dass einschaliges Mauerwerk aus unterschiedlich gut bearbeiteten Natursteinen großteils auf ländlichen Gebieten errichtet wurden.

2.1.2 Verfestigungsmaßnahmen – Ohne Geschichte keine Zukunft

2.1.2.1 Was war

Beim Eindringen von Feuchtigkeit in die Mörtelfugen alter Mauerwerksbauten wird und wurde das Bindemittel – meist Kalk – durch das eindringende Wasser ausgewaschen² wodurch eine Instabilität verursacht wird. Nicht nur bei aufgehendem Mauerwerk, sondern auch bei in Grundwasser stehenden oder am Hafen errichteten Bauwerken stellt dieser Mechanismus ein Problem dar. Die erste vermerkte Injektion wurde im Jahr 1802 von Charles Berigny im Hafen von Dieppe durchgeführt und erfolgte mittels einer Suspension aus Ton und Kalk. Weitere darauf folgende abdichtende Injektionen erfolgten bis zur Jahrhundertwende weitestgehend im Tiefbau sowie im Tunnelbau. Diese dienten zur Abdichtung gegen Feuchtigkeit, wobei hier immer mehr die Verwendung von Zementsuspensionen in den Vordergrund rückte. Der Berliner Ingenieur August Wolfsholz befasste sich im Jahr 1910 als erster mit der Sanierung einer gefährdeten Eisenbahnbrücke, welche als Ziegelmauerwerk ausgeführt wurde und bereits in einem bedrohlichen Zustand gewesen war. Nach vorausgegangener Erkundung über die Bohrung von Sichtlöchern erfolgte die Injektion von purem Zement mit Wasser vermischt in einem Raster von etwa einem Meter, wobei die Verfüllung der festgestellten und vorgehängten Hohlräume das Ziel war. Erste Zweifel einer erfolgreichen Injektion ließen vor Wolfsholz´ erfolgreichem Eingriff lange auf sich warten, bis schließlich im Jahr 1903 ein Artikel erschien, der darauf hinwies, dass Injektionsverfahren nicht für jeden beliebigen Fall der Bauwerks- oder

² Infolge Auswaschung ist eine Vernachlässigung der Kohäsion in den Lagerfugen erforderlich [13, p. 189].

Untergrundinstandsetzung anzuwenden seien. Oftmals war nach der Injektion keine Verbesserung bemerkbar, worauf Bauwerke (z. B. Pfeiler der Moselbrücke bei Longeville) abgetragen werden mussten. Bei Nachuntersuchungen konnte begutachtet werden, dass sich die Injektion in das umliegende Erdmaterial nicht in genügendem Maße ausgebreitet hatte und diese Injektionsmaßnahme somit vergebens war. Bis dahin wurden zudem nur unregelmäßig Kontrollen über den Injektionserfolg durchgeführt, was sich darauffolgend änderte. Schmidt berichtete im Jahr 1913 über die Injizierbarkeit von lehmhaltigen Kies- und feinen Sandschichten mit einem durchschnittlichem Hohlraumgehalt von etwa 20 %. Dieses angeführte Beispiel soll verdeutlichen, dass eine große Anzahl von Berichten aus der Feder von Grundbauingenieuren stammt und somit wurden errungene Fortschritte dieser Sparte oft auf die Instandsetzungen von ein- und mehrschaligen Mauerwerken übertragen. Letztendlich erkannte man bereits (oder aber auch erst – Anm. d. Verf.) Anfang des 20. Jahrhunderts, dass die Arbeitskräfte ihres Handwerkes sicher sein sollten, weshalb auf eine wirksame Einschulung durch Ingenieure und in weiterer Folge Vorarbeiter immer mehr Wert gelegt wurde. [9, p. 101 ff.]

Spätestens ab den 1960er Jahren wurden Injektionen mit Zementen an historisch wertvollen Bauwerken vergangener Jahrhunderte zur Erhöhung der Tragfähigkeit durchgeführt und vor allem auch wissenschaftlich untersucht. Eine Kombination aus Vernadeln oder Vorspannen des Mauerwerks ging meist mit dieser Verfestigungsmaßnahme einher. Zu geringe Überdeckung der Stahleinlagen begünstigten die Korrosion und führten unweigerlich zu Treiberscheinungen. [5, p. 210] Auch das Bewusstsein der Unverträglichkeit des Zementmörtels zu gipshaltigen Mörteln im Bestand und der daraus resultierenden Bildung von Treibmineralen war zu jener Zeit weniger ausgeprägt als heute. Weiters ging man davon aus, mit höheren Injektionsdrücken eine bessere Eindringung des Zementmörtels in den Bestand erreichen zu können. So waren sich die Planer damals noch nicht im Klaren, dass ein hoher Zementanteil ein Verstopfen der engen Risse und Spalten des Bestandsmörtels verursacht. Doch trotz dieser Nachteile war man sich aufgrund der erst beginnenden Forschungsarbeit zu dieser Thematik schon damals bewusst, dass diese Sanierungstechnik großes Potenzial in sich birgt, was auch mit der Kostenersparnis dieser Sanierungsmaßnahme im Vergleich zu anderen Instandsetzungsmethoden begründet ist. [5, p. 211 ff.]

Im weiteren Verlauf wurden Zemente zur Injektion entwickelt, welche hoch sulfatbeständig (HS-Zement) sind und sich daher weniger auf das Vorhandensein von gipshaltigen Mörteln im Bestand auswirken. Auch wurde erkannt, dass sich Salze im Bestand befinden können, welche eventuell Ausblühungen infolge der Reaktion mit dem im Injektionsmaterial befindlichen Wasser hervorrufen. Negativ wirkt sich diese Auskristallisierung auf Farbanstiche und Putzoberflächen aus, es kann aber auch ein Absanden an Sandsteinen die Folge sein. [10, p. 53 f.]

2.1.2.2 Was ist

Unter anderen Injektionsverfahren, auf welche in der vorliegenden Arbeit nicht näher eingegangen wird (z. B. Rissanierung, Bauwerksabdichtung), stellt jene zur Verfestigung eines in Mitleidenschaft gezogenen oder alten Mauerwerks eine immer wichtigere Instandsetzungsmaßnahme dar. Vorausgesetzt bzw. untersucht werden muss, ob vorhandene Risse und Hohlstellen miteinander in genügendem Ausmaß verbunden sind (Kapitel 3.3.3), sodass sich das Injektionsgut bestmöglich im zu ertüchtigenden Mauerwerk verteilen kann. Auch ist zu erheben, in welchem Ausmaß Hohlstellen auftreten; weiters ist das Volumen dieser und eventuelle Ablagerungen darin zu ermitteln. Besonders an jenen Stellen, wo konzentrierte Lasten eingeleitet werden sollen, empfiehlt sich eine sorgfältige Erhebung, da ausgehend von dieser eventuell der Bohrlochrastrer verändert werden muss [6, p. 235]. Durch die anschließende Injektion entsteht homogenisiertes Material, wobei dessen Kohäsion sowie die Belastbarkeit erhöht werden. Dadurch sollen die ursprünglichen Eigenschaften des Bestandes wieder erreicht oder im besten Fall sogar übertroffen werden.

Injektionen sollen eine Verbesserung der Mörteldruckfestigkeit und damit einhergehend eine Erhöhung der Schub- bzw. Drucktragfähigkeit bewirken. Eine Verfestigung der Mauersteine kann durch eine durchgeführte Injektion nicht erfolgen; die Steigerung der Gesamtfestigkeit wird demzufolge nur über die Mörtelfugen erreicht [11, p. 6 f.]. „Bei Injektionen mit nicht mineralisch gebundenen Materialien ist die zu erreichende Festigkeit als charakteristische Mauerwerksfestigkeit, durch etwa 80 % der Steinfestigkeit begrenzt“ [11, p. 7]. In Tab. 2.1 ist angeführt, welches Injektionsziel³ für die jeweilige Mauerwerksart durch eine Konsolidierung i.d.R. verfolgt wird.

Mauerwerksart	Injektionsziel	Kommentar
Natursteinmauerwerk (Bruchsteinmauerwerk)	Verfüllung von Hohlräumen, z. B. nach Bindemittelauswaschung	Es werden die Zwischenräume zwischen den natürlichen Mauersteinen mit mechanisch bestandskonformem Mörtel verfüllt
Mehrschaliges Mauerwerk	Verfüllung des Kernbereiches z. B. nach Bindemittelauswaschung, etc.	Die Außenschalen bleiben weitgehend unbehandelt
Normalformat-Mauerwerk mit Hohlstellen	Verfüllung von Hohlräumen, die z. B. durch bauliche Eingriffe oder Ausbrüche von Teilflächen entstanden sind	Sonderfall: Verfüllen von nicht mehr benötigten Rauchzügen

Tab. 2.1 – Kategorisierung von zu konsolidierendem Mauerwerk [11, p. 6]

Die Sanierungsmethode der Injektion stellt einen irreversiblen Eingriff dar, weshalb vorab die Verträglichkeit zwischen Bestandsmaterial und Injektionsgut sorgfältig untersucht werden

³ Als Injektionsziel wird die zu erreichende charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit bezeichnet.

muss, damit keine bleibenden Schäden am Tragwerk „initiiert“ werden. Um das richtige Injektionsgut auswählen zu können, sind insbesondere Informationen über das zu behandelnde Mauerwerk wie dessen Materialien, die Größe (und Verteilung) der zu verfüllenden Hohlräume und das Vorhandensein von eventuell löslichen Salzen zu ermitteln. Einen weiteren wichtigen Aspekt stellt das verlangte Tragverhalten (Injektionsziel) nach der Instandsetzung dar.

Wie Luso et al. [12, p. 217] darlegen, sollen mineralische Injektionsmittel unter anderem folgende wichtige Eigenschaften aufweisen:

- Gute Bindung zwischen Materialien wie Natursteinen oder Ziegel (Adhäsion)
- Niedriges oder gar kein Schwindverhalten, um zusätzliche Spannung innerhalb des Mauerwerks sowie eine Verminderung der Adhäsion zu bewirken
- Niedriges Blutverhalten⁴ (Bleeding)
- Eine Separation in die Bestandteile oder die Ausscheidung von Mineralstoffen soll vermieden werden, um das Volumen und die Konsistenz aufrecht erhalten zu können
- Eine niedrige Viskosität und demzufolge eine hohe Injizierbarkeit soll garantiert sein, um das Eindringen sowohl in große als auch kleine Hohlräume bei niedrigem Injektionsdruck gewährleisten zu können
- Großer Widerstand gegen lösliche Salze, welche eventuell im Mauerwerk vorhanden sind
- Eine hohe Anfangsfrühfestigkeit kann erforderlich sein
- Eine beschränkte Korngrößenverteilung
- Vorgegebene Festigkeitseigenschaften und Elastizitätsmodule

2.1.3 Die Injektion

2.1.3.1 Leistungsverzeichnis

Bevor eine Injektion durchgeführt werden kann, ist eine Ausschreibung zu tätigen, wobei hinsichtlich Injektionsumfang und der daraus resultierenden Kosten die in Abb. 2.1 angeführten Werte als ungefähre Richtwert herangezogen werden können. Gemäß Richtlinie Injektionstechnik Teil 2 [11, p. 14] hat der Planer nachfolgende Punkte in das Leistungsverzeichnis aufzunehmen, wobei das Leistungsverzeichnis aus leistungsorientierten Ansätzen aufgebaut werden soll:

- | | |
|-----------------------------|----------------------------------|
| ▪ Injektionsziel | ▪ Injektionsumfang |
| ▪ Art des Füllstoffes | ▪ Qualitätssicherungsmaßnahmen |
| ▪ Maximaler Injektionsdruck | ▪ Qualifikation der Ausführenden |
| ▪ Dokumentation | |

⁴ Wasserabsonderung des Mörtels während der Verarbeitung bis zum Beginn der Erstarrung.

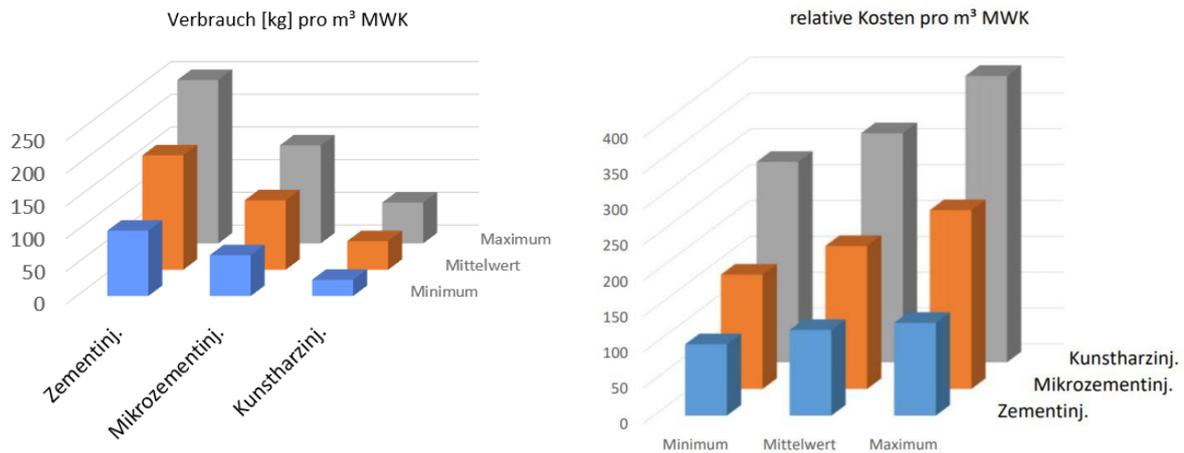


Abb. 2.1 – Gegenüberstellung Injektionsmittelverbrauch zu relativen Kosten [13, p. 204] [14]

2.1.3.2 Füllstoffe

Quellfähige Füllstoffe, die unter Feuchtigkeitseinwirkung eine Volumenvergrößerung hervorrufen und zur Abdichtung verwendet werden, stellen einen Anwendungsbereich dar. Der diese Arbeit betreffende Anwendungsbereich von Füllstoffen richtet sich an jene, die kraftschlüssiges Füllen von Rissen, Hohlräumen und Fehlstellen bewirken. Ein Verbund zur Rissflanke wird hergestellt, um über diese Flanke Kräfte zu übertragen. Generell gilt jedoch, dass nur solche Füllstoffe verwendet werden dürfen, welche anhand der ÖN EN 1504-5 (Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken) zertifiziert wurden. [11, p. 3 f.] Exemplarisch angeführte Füllstoffe werden in den Kapiteln 2.1.3.3 und 2.1.3.4 zur Übersicht beschrieben; ausführliche Erläuterungen können der Richtlinie für Injektionstechnik Teil 2 [11, p. 15] entnommen werden.

2.1.3.3 Mineralische Injektionsmittel

Die ersten Anwendungen als Injektionsgut für Mauerwerke werden rein zementhaltigen Mörteln zugeschrieben. Dennoch wurde bewiesen, dass sich ihre Injizierbarkeit als unzureichend für die in ihrer Öffnungsweite nur sehr gering ausgebildeten Hohlräume und Schlitze im Bestandsmörtel darstellt, da oft Verstopfungen in den nur wenige zehntel Millimeter starken Schlitzen auftreten. Darauf folgend wurden binäre⁵ Injektionsmörtel (Zusammensetzung aus Zement *oder* hydraulischem Kalk, natürlichen oder künstlichen Puzzolanen oder Silikastaub, etc.) und ternäre⁶ Mörtel (Zement, hydraulischer Kalk und natürliche oder künstliche Puzzolane) entwickelt. Der Zementanteil liegt bei diesen Mörteln zwischen 50 % und 75 %, was sich zunächst als ausreichend erwies. Weiters zeigte sich die Verwendung von Injektionsmörteln mit geringem Zementanteil oder kalkhaltigen Ausgangsstoffen als vorteilhaft, wenn es sich um

⁵ Bestehend aus zwei Komponenten.

⁶ Bestehend aus drei Komponenten.

zu verfestigende Mauerwerke mit Mosaiken, Fresken oder anderen dekorativen Elementen der Denkmalpflege handelt. Trotzdem wurde verbesserte Dauerhaftigkeit gefordert, was zur Weiterentwicklung von ternären Mörteln mit einem noch geringerem Zementanteil von 30 % bis 50 % geführt hat. [1, p. 2265 f.] Als eines der wichtigsten Injektionsgüter hat sich mittlerweile die Verwendung von Kalk-Puzzolan⁷-Zement-Gemischen herausgestellt, wobei diese Mörtel eine Druckfestigkeit von etwa 10 MPa und eine Zugfestigkeit von etwa 3 MPa bei einem Zementanteil von 30 % aufweisen [15, p. o. S.] [3, p. 173]. Diese Zusammensetzung wird ebenfalls als ternär beschrieben. Hinsichtlich der Produkteigenschaften unterschiedlicher auf dem Markt erhältlicher mineralischer Injektionsmörtel geben Luso et al. [12, p. 225] an, dass erhebliche Unterschiede bezüglich der mechanischen, rheologischen und Bindungseigenschaften sowie Eigenschaften der Verarbeitbarkeit bestehen.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Bestandsmörtel mit hohen Bindemittelgehalten nicht nur eine gute Tragfähigkeit aufweisen, sondern dem Injektionsmörtel auch weniger Wasser entziehen, wodurch dieser längere Fließwege zurücklegt und dadurch weiter in das Mauerwerk eindringen kann. Ist hingegen ein geringer Bindemittelgehalt im Bestandsmörtel vorhanden, so wirkt dieser wie ein Filter, der dem Injektionsgut Wasser entzieht. Dadurch kann es zu einem „Verdursten“ des Injektionsmörtels kommen, wodurch ein weiteres Eindringen in Hohlräume und Risse eingeschränkt wird. [6, p. 238] Im Zuge der Voruntersuchung sollte daher auch der Feuchtegehalt des zu sanierenden Mauerwerks ermittelt werden, da sich dieser sowohl positiv als auch negativ auf den Eingriff der Verfestigung auswirken kann. Weiters soll, wenn möglich, auch die Ursache eines eventuell vorhandenen hohen Feuchtigkeitsgrades untersucht und beseitigt werden. Der W/B Wert sollte immer größer als 0,36 sein, liegt in der Praxis zwischen 0,6 und 1,0, kann bei stark feuchtigkeitssaugendem Mauerwerk bis auf 2,0 ansteigen und zeigt eine negative exponentielle Abhängigkeit zum Hohlraumvolumen des Mauerwerks [16, p. 124 f.].

Falls im Zuge der Mauerwerksverfestigung mineralische Mörtel verwendet werden, so wird empfohlen, neben Versuchen zur Bestimmung der Druckfestigkeit des Bestandsmörtels auch eine chemische Mörtelanalyse durchzuführen. Daraus ergeben sich die Bestandteile dieses Mörtels und darauffolgend kann der geeignete Injektionsmörtel ausgesucht und angewendet werden, ohne Treiberscheinungen auszulösen. Dieser sollte sowohl einen minimalen Gehalt an Tricalciumaluminat C_3A aufweisen als auch mittels reaktionsfähiger Puzzolane die bei der Hydratation von hydraulischen Bindemitteln entstehenden freien Kalke binden [17, p. 241].

⁷ Gesteine aus (u. a.) Kalkstein oder Tonerde, welche unter Hitzeeinwirkung hergestellt wurden.

Wenzel [16, p. 121 f.] führt unter anderem folgende Bindemittel für mineralische Injektionsmörtel an:

- Hochhydraulische Kalke (hoch sulfatbeständig, häufig Trasskalk)
- Portlandzement (nur in sulfatfreiem Mauerwerk)
- Hochofenzement
- Portlandölschieferzement (geringe Saugfähigkeit für feuchte Bauteile)
- Zemente mit hohem Sulfatwiderstand – HS Zemente (für gipshaltige Mörtel oder Mauersteine [16, p. 121])
- Zemente mit niedrigem Alkali-Anteil – NA – Zemente
- Mikro- oder Feinstzemente (hohes Wasserrückhaltevermögen [16, p. 121])

Bei der Verpressung von großen Hohlräumen (besonders bei mehrschaligen Mauerwerken) empfiehlt sich die Beimengung von Zuschlägen (Feinstsand mit 0/1 mm), um die Wasser-Bindemittel-Suspensionen damit abzumagern und dadurch der Gefahr des Schwindens entgegenzuwirken [16, p. 123 ff.].

Aus wissenschaftlicher Sicht gibt es bereits Ansätze, hydraulisch gebundene Injektionsmörtel durch diverse Additive (Zusatzmittel) zu verbessern. Nachstehend seien einige davon angeführt:

- Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch Zugabe von
 - * „Carbon nanotubes“ [18]
 - * Metakaolin [19]
- Zugabe von Flugasche zur Änderung der Plastizität und zur besseren Verarbeitbarkeit [20]

Wenzel et al. [16, p. 123] stellen fest, dass die in ihrer chemischen oder physikalischen Wirkung stark beeinflussenden Zusatzmittel in historischem Mauerwerk eher zurückhaltend eingesetzt werden sollten, da die meist im Zusatzmittel vorhandenen Salze Ausblühungen verursachen können. Dennoch wird eingeräumt, dass etwaige Zusatzmittel wie Dichtungsmittel oder Einpresshilfen (Bentonit, gemischt in Kolloidalmischern mit ≥ 1000 Upm) in manchen Fällen von Vorteil sein können.

2.1.3.4 Organische Injektionsmittel

Die Richtlinie Injektionstechnik Teil 2: Mauerwerk [11, p. 15] führt im Rahmen einer Mauerwerksverfestigung unabhängig vom Durchfeuchtungsgrad sowohl Injektionsmittel auf Epoxidharzbasis als auch mineralische Injektionsmittel an. Zur Verfestigung des Bestandsmörtels werden bei einem Durchfeuchtungsgrad von weniger als 20 % zum einen Injektionsmittel auf

Epoxidharzbasis (EP-Harz) und zum anderen Ein- bis Zwei-Komponenten-Polyurethanharze (PU-Harze) vorgeschlagen. Liegt der Durchfeuchtungsgrad bei 20 % oder darüber, so wird die Verwendung von Injektionsmitteln auf Epoxidharzbasis oder aber auch von Injektionsmitteln auf Acrylatbasis als Hartacrylgelen empfohlen. Erkenntnisse von Pohlplatz zeigen, dass für feuchte Mauerwerke Harze auf Polyurethan-Basis anzuwenden sind, wohingegen sich für weitgehend trockene Mauerwerke Epoxidharze eignen [21].

Zur Verfestigung von Natursteinmauerwerken ist die Verwendung organischer Injektionsmittel umstritten. Dies liegt hauptsächlich an der Entwicklung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften in Abhängigkeit der Zeit. Zudem ist die Verträglichkeit der Injektionsmittel mit den in-situ Materialien oft nicht gegeben. [3, p. 172] Auch Van Gemert [22, p. 96] teilt diese Ansicht und prognostiziert die vermehrte Verwendung von puzzolanischen Mörteln. Ein weiterer Grund dürfte der größere Hohlraumgehalt in Natursteinmauerwerken sein, welcher einen höheren Injektionsmittelverbrauch und somit höhere Instandsetzungskosten impliziert. Jedoch werden organische Injektionsmittel erfolgreich in der Verfestigung von Ziegelmauerwerken eingesetzt, wobei bei dieser Anwendung im besten Fall auch Risse sowie Hohlräume im Ziegel verfüllt werden. [23, p. 60] „Betrachtet man die Versagenskriterien, sieht man, dass sowohl die Haftscherfestigkeit wie auch die Druckfestigkeit durch eine höhere Mörtelqualität beeinflusst werden, ergänzend ergaben sich auch höhere Haftzugfestigkeiten“ [24, p. 120]. Eine vermeintliche, nach der Injektion mittels Rückprallhammer festgestellte, höhere Druckfestigkeit der Ziegel ist auf den besseren Verbund zwischen Ziegel und Mörtelfuge zurückzuführen und deutet keinesfalls auf eine Verbesserung der Druckfestigkeit der Mauersteine hin [21]. Dies kann anhand der Tatsache erklärt werden, dass durch den Stoß des Rückprallhammers auf den Ziegel infinitesimale Bewegungen dieses Mauersteins durch die verbesserten Mörtelfugen besser „abgefangen“ werden als vor der Injektionsmaßnahme. Es konnte also ein besserer Verbund zwischen Mauersteinen und Mörtelfugen erzielt werden.

Die Wandoberfläche ist vor den Injektionsarbeiten von lockerem Putz freizulegen und zu verdämmen. Während der Ausführung von Injektionen ist auf die Gesundheitsgefährdung infolge der Emission zu achten. Der Grenzwert von 3 mg/m³ Luft wird bei dem Großteil der verwendeten Harze überschritten; nach einer Woche ausgiebiger Raumlüftung ist jedoch keine Beeinträchtigung (mit Ausnahme des Geruchs) mehr zu erwarten. [24, p. 120 f.] Auch Pohlplatz ist der Meinung, dass bei ausreichender Lüftung (1 Woche) keine Gesundheitsgefährdung zu erwarten ist [23, p. 59].

2.1.3.5 Kombiniertes Einsatz

Ein großer Hohlraumgehalt zieht bei Mauerwerken einen hohen Bedarf an Injektionsmitteln nach sich. Eine kostengünstige und technisch sinnvolle Ausführung der Tragfähigkeitsverbesserung ist immer anzustreben, weshalb folgende Vorgehensweise angewendet wird:

Im ersten Schritt werden nach einer Vornässung Injektionen mit mineralischen Materialien wie Zementsuspensionen getätigt, um den Hohlraum erheblich zu verkleinern, was einer Konsolidierung entspricht. Nach einer Austrocknungsphase des Mauerwerks und erneuter Bohrung von Injektionskanälen werden durch diese hindurch organische Injektionsmaterialien eingebracht, was die eigentliche Verbesserung des Bestandes bewirkt und ein Optimum an Verfestigung bei niedrigeren Materialkosten darstellt. [24, p. 122] Einen weiteren wichtigen Aspekt stellt die Hitzeentwicklung beim Aushärtvorgang von Harzen dar. Infolge der eingangs erwähnten Minderung des Hohlraumgehaltes durch die zuvor getätigte Injektion von mineralischen Mörteln wird das Volumen der mit Harz zu verfüllenden Hohlräume verringert, wodurch sich die Hitzeentwicklung weniger stark bemerkbar macht. „Injektionen mit Mikrozement als Bindemittel sind bei reinen Hohlraumverfüllungen nur unter besonderen Randbedingungen (z.B. bei besonders feiner Porenstruktur in der Umgebung der Hohlstellen) zu empfehlen, ihr Haupteinsatzgebiet liegt in der Verstärkung größerer Bereiche“ [25, p. 90].

Auch Van Gemert et al. [22, p. 95] wenden eine Nachinjektion mit Epoxidharz zur nahezu vollständigen Verfüllung von Hohlräumen ihres Forschungsprojektes an. Dieser war eine Injektion mit polymermodifiziertem Zementmörtel vorausgegangen.

Hinsichtlich der Recyclierung von Baustoffen wird jedoch mittlerweile immer mehr davon abgewichen, kombinierte Injektionen zur Verstärkung eines Mauerwerks zu wählen (vgl. Kapitel 2.1.3.9). Als Begründung dafür kann die immer höher werdende Anforderung im Hinblick auf die Lebenszyklusbetrachtung angeführt werden, was im Besonderen Verstärkungsmaßnahmen an denkmalgeschützten Objekten betrifft. Da die Verwendung einer kombinierten Anwendung immer mehr reduziert wird, wird versucht, mechanische Eigenschaften sowie Eigenschaften der Verarbeitbarkeit von mineralischen Injektionsmitteln zu verbessern, wie am Ende von Kapitel 2.1.3.4 beschrieben wurde. [14]

2.1.3.6 Bohrlochraster

Untersuchungen von Maus zeigten, dass mehr als zwei Drittel des bis 1990 verfestigten Mauerwerks (Naturstein) mit weniger als einem Bohrloch pro m² auskamen. Etwa 20 % der untersuchten Bauwerke haben mehrere Bohrlöcher pro m², im Normalfall beläuft sich diese Zahl auf 2,5 Bohrlöcher je m². Weiters merkt er an, dass sich dieser Raster meist über die ganze Mauerwerkshöhe durchgezogen hat. [6, p. 15] Aus heutiger Sicht ist für eine reine Konsolidierung von Mauerwerken ein Raster (R) von 40 cm ausreichend. Soll hingegen eine Verfestigung oder auch hochverfestigende Ergebnisse erzielt werden, so ist der Raster auf unter 30 cm bzw. im letzteren Fall auf 20 cm zu reduzieren und immer zu versetzen. [24, p. 116] Wird im Zuge der Verfestigung eine Kombination zur Abdichtung des Mauerwerks verlangt, so kann sich der Raster auf 15 cm reduzieren, wobei die Rasterwahl oft über ein Herantasten an Probefeldern festgelegt wird [23, p. 18]. In Abb. 2.2 ist ersichtlich, dass die Bohrungen in einem

Winkel α von 30° bis 45° anzuordnen sind (links) und ein halber Versatz des Rasters empfohlen wird (rechts).

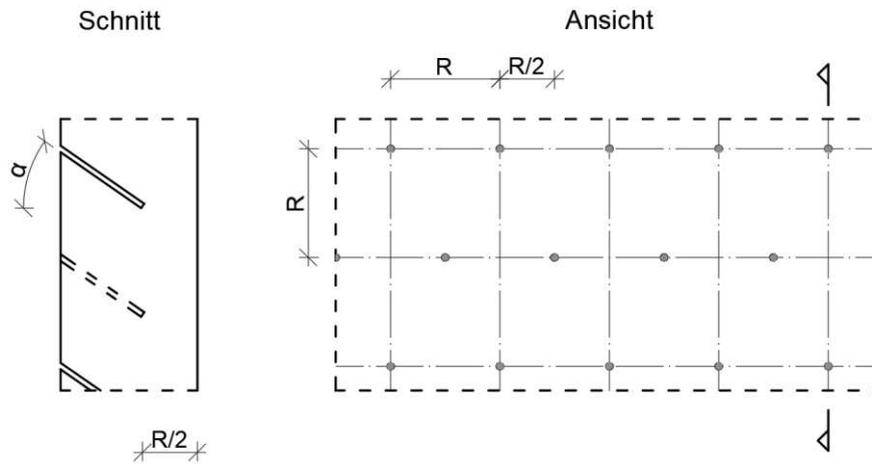


Abb. 2.2 – Bohrlochneigung (links) sowie Bohrlochraster im halben Versatz (rechts) [24, p. 116]

2.1.3.7 Bohrloch

Der Bohrlochdurchmesser beträgt höchstens 3 cm [16, p. 74]. Im Zuge der Herstellung von Bohrungen zum Einbringen der Injektionsmörtel können auch wertvolle Informationen über das Innenleben des Mauerwerks erhalten werden. Augenmerk ist hierbei auf die Bohrgutauspülung (bei Nassbohrverfahren), Bohrmehl (bei Trockenbohrverfahren mit Druckluftspülung) sowie auf den Bohrwiderstand zu legen. Ein hoher Mörtelanteil im Bohrklein lässt Rückschlüsse auf einen geringen Bindemittelanteil zu. Wird ein Abbrechen der Bohrgutförderung festgestellt (Spülwasserverlust oder unkontrollierter Luftaustritt), so kann davon ausgegangen werden, dass das Material in Hohlräume oder größere Fugen eintritt. In diesem Fall ist der Bohrvorgang abzubrechen, die Stelle zu erkunden und ggf. eine Zwischenverpressung durchzuführen. Nach drei Tagen kann der Bohrvorgang (von neuem) fortgesetzt werden [16, p. 74 f.]

2.1.3.8 Injektionsverfahren

Gemäß [11, p. 20] wird hinsichtlich Injektionsverfahren zwischen Niederdruckinjektionsverfahren (max. ca. 10 bar, üblich 6 bar [16, p. 130]) und Hochdruckinjektionsverfahren (ab 10 bar) unterschieden. Mit niedrigen Drucken werden solche Injektionen durchgeführt, welche das Mauerwerksgefüge nicht maßgeblich schädigen sollen. Hingegen ist eine Verwendung von Hochdruckinjektionen bei der Anwendung von Ein- oder Zweikomponenten Injektionspumpen vorgesehen. Oftmals wird die Injektionsmaßnahme bei Forschungsprojekten aber auch allein durch die vorhandene Gravitation durchgeführt.

Eine Druck- bzw. Mengenaufzeichnung ist für kleinere Kubaturen an zu verfestigendem Mauerwerk unwirtschaftlich, da dort nur kleine Gerätschaften zur Durchführung der Injektion verwendet werden. Steigt hingegen die Kubatur des zu verfestigenden Mauerwerks auf über 500 m³ an, so kann eine Druck- bzw. Mengenaufzeichnung durchaus sinnvoll sein. [21]

Hinsichtlich Mauerwerkstemperatur stellen Werte zwischen + 15°C und + 20°C einen Idealwert dar; unter + 5°C ist das Einpressen von mineralischen Injektionsgütern jedoch zu unterlassen [16, p. 131].

2.1.3.9 Dauerhaftigkeit

Im Gegensatz zu mineralischen Injektionsmaterialien verlieren jene mit organischen Hauptbestandteilen durch Hitzeeinwirkung infolge von Bränden ihre Tragfähigkeit. Aus diesem Grund sind injizierte Bauteile nach Brandeinwirkung einer Kontrolluntersuchung (Kapitel 4.2) zu unterziehen, bei welcher die Mauerwerksdruckfestigkeit nachuntersucht wird. [24, p. 122]

Untersteht ein Gebäude dem Denkmalschutz, so ist die Injektion von Kunstharzen oder auch reinen Zementleimen untersagt. Insbesondere bei historischen Gebäuden mit sensiblen Oberflächen ist daher auf die Verträglichkeit des Injektionsmaterials mit den Bestandmaterialien zu achten. [14]

Ist der Lebenszyklus eines mittels organischen Injektionsmaterialien verfestigten Gebäudes beendet, so treten Herausforderungen hinsichtlich des Recyclings auf. Die derzeit einzige Methode stellt die thermische Verwertung im Drehrohfen dar und wird von der Industrie (etwa Zementwerken) angewendet. Im Übrigen sind unter anderem die Vorgaben der EUPVO (Europäische Bauproduktenverordnung) Grundverordnung 7, die Recycling-Baustoffverordnung und die ÖNORM B 3140 2020-08-01 einzuhalten. [14] [21]

Mittels organischer Injektionsmittel verfestigte Tragwerksteile werden sich zukünftig aufgrund der EUPVO auf einzelne Bauteile geringerer Kubatur beschränken. Es kann angenommen werden, dass die organische Verfestigung eines gemauerten Pfeilers inklusive dessen Recycling nach Ablauf des Lebenszyklus´ noch immer kostengünstiger ist als eine Substitution durch eine Betonstütze. [14]

2.2 Betrachtete Beanspruchungen

2.2.1 Allgemein

Die nachfolgend angeführten Beanspruchungen sind jene, auf welche der Fokus dieser Arbeit liegt und auf welche besonders im Kapitel 5, Verfestigtes Mauerwerk – Analytische Tragfähigkeitsprognose, eingegangen wird. Einzige Ausnahme bildet hierbei der Plattenschub, welcher in Kapitel 2.2.3.1 erläutert wird.

2.2.2 Druckbeanspruchung – einaxial

Neben anderen wichtigen Aufgaben eines Mauerwerks stellte jene, Druckbeanspruchungen sicher ableiten zu können, die bedeutendste dar. Spätestens seit der wissenschaftlichen Analyse von durch seismische Aktivitäten zerstörten Mauerwerken wird auch die Schubbeanspruchung immer relevanter, auf welche im Kapitel 5 eingegangen wird.

„Unter einachsialer [sic!] Druckbeanspruchung senkrecht zur Lagerfuge entsteht eine Stauchung des gesamten Mauerwerkgefüges bei gleichzeitig dreiachsigem Spannungszustand in Stein und Mörtel infolge eines ungleichen Querdehnungsverhaltens der beiden Materialien“ [26, p. 130]. Es lässt sich erkennen, dass eine Inhomogenität des Gefüges besteht, welche durch die kombinierte Verwendung zweier unterschiedlicher Werkstoffe entsteht. Diese beiden Materialien stellen den Mauermörtel (Bestandsmörtel) und das vermauerte Gestein bzw. Ziegel dar. Der weichere Mörtel strebt danach, zwischen den Mauersteinen herauszuquellen, was jedoch aufgrund der Reibung der angrenzenden Mauersteine unterbunden wird. Dadurch stellt sich eine behinderte Querdehnung des Mauermörtels ein. Es wird eine gleichmäßige Verformung beider Materialien erzwungen, wodurch der Mauerstein weitere Querspannungen aufnehmen muss und in Richtung der eingeleiteten Last reißt, wie in Abb. 2.3, rechts ersichtlich ist. Für den Mörtel stellt sich allseitiger Druck ein, welcher seine Tragfähigkeit erhöht. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Mauerwerksdruckfestigkeit oberhalb der Mörteldruckfestigkeit aber unterhalb der Steindruckfestigkeit liegt. [27, p. 124] Die drei Hauptspannungen im Mauerstein sind demzufolge Druck (in Belastungsrichtung), Zug und Zug (jeweils orthogonal zur Belastungsrichtung). Der Spannungszustand im Mauermörtel hingegen stellt sich in allen drei Richtungen auf Druck ein, was wie eine allseitige Umschnürung wirkt.

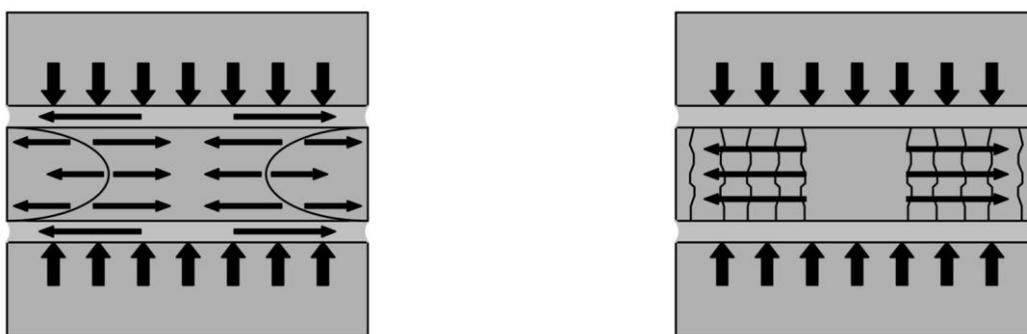


Abb. 2.3 – Vergleich der Querdehnungsbehinderung (mit: links, ohne: rechts) von Mauersteinen zwischen Mörtelfugen, adaptiert nach [28, p. 15]

Wie Pech et al. [26, p. 130] nachstehend darlegen, beeinflussen folgende Faktoren das Bruchverhalten von unverfestigtem Mauerwerk:

- die Fugendicke
- die Steinabmessungen und die Geometrie des Steinquerschnittes

- das Verhältnis zwischen
 - * Zug- und Druckfestigkeit des Steines
 - * Querdehnungsmodule von Stein und Mörtel
 - * Quer- und Längsdehnungsverhalten des Mörtels

Um diese Faktoren eines Mauerwerks im Bestand bestimmen zu können, müssen unweigerlich Proben auf zerstörende Weise nach ÖNORM EN 1052-1 [29] (Kapitel 3.2.4) entnommen werden. Wird eine entnommene Probe größeren Maßstabes auf den Bruchmechanismus hin getestet, so wird von einem Zugversagen der Mauersteine als Grund für das Druckversagen des Mauerwerks ausgegangen [30, p. 23]. Das Spannungs-Dehnungsverhalten der Komponenten Ziegel, Zementmörtel sowie deren Kombination sind in Abb. 2.4 ersichtlich. Allerdings ist in dieser Darstellung zu beachten, dass es sich bei dem verwendeten Baustoff um Ziegel handelt. Die Steigung der Geraden kann für andere Baustoffe wie z. B. Natursteine daher abweichen.

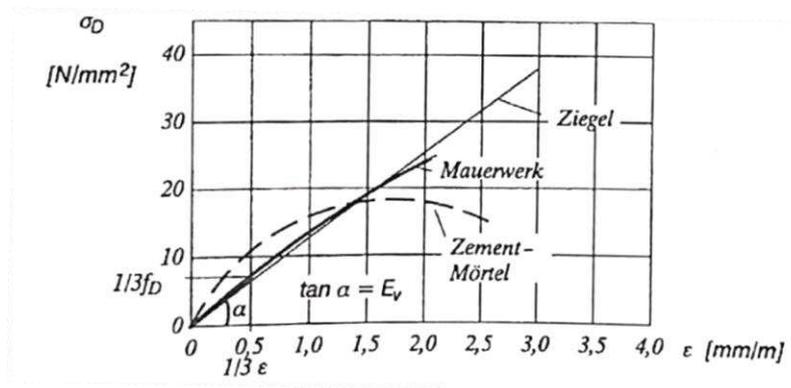


Abb. 2.4 – Spannungs-Dehnungskurve von Mauerwerk [31, p. o. S.]

Besonderes Augenmerk hinsichtlich der Beziehung von Spannung zu Dehnung ist dabei auf den Elastizitätsmodul zu legen. Ermittelt wird dieser i. A. als Sekantenmodul bei einem Drittel der Mauerwerksdruckfestigkeit, was $1/3 f_D$ auf der Ordinate in Abb. 2.4 entspricht.

2.2.3 Schubbeanspruchung

2.2.3.1 Plattenschub

Eine Querkraftbeanspruchung normal zur Wandebene wird Plattenschub genannt. Diese kann durch horizontal angreifende Kräfte wie Winddruck– oder Sog, Erddruck auf Kellerwände oder aber auch infolge einer Beanspruchung durch Erdbeben entstehen. Nachfolgende Abbildung (Abb. 2.5) stellt den Plattenschub als angreifenden Pfeil normal auf die Ebene des Mauerwerks dar. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sei diese Art der Querkraftbeanspruchung lediglich zur Veranschaulichung erwähnt, da sich diese Arbeit mit der Thematik des Scheibenschubs befasst.

2.2.3.2 Scheibenschub

Schubtragfähigkeit

Eine Querkraftbeanspruchung parallel zur Wandebene wird Scheibenschub genannt. Diese kann ebenfalls durch horizontal angreifende Kräfte wie Winddruck- oder Sog, Erddruck auf Kellerwände oder aber auch infolge einer Beanspruchung durch Erdbeben entstehen. Abb. 2.5 stellt den Scheibenschub als angreifenden Pfeil parallel zur Ebene des Mauerwerks dar.

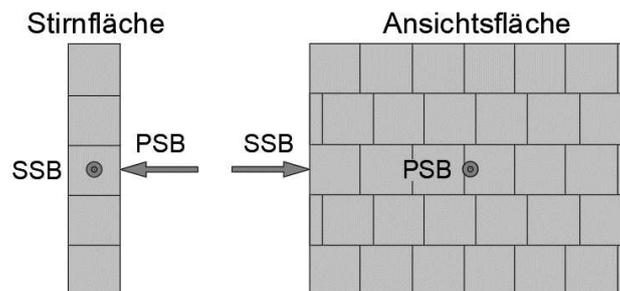


Abb. 2.5 – Scheibenschub- Beanspruchung (SSB) und Plattenschub- Beanspruchung (PSB) an einem Mauerwerk

Im Normalfall ist davon auszugehen, dass unter der Anwendung einer steifen Decke die angreifenden Horizontallasten konstant über die betrachtete Länge des Mauerwerks eingeleitet werden [32, p. 45]. In Abb. 2.6 ist ein Mauerwerk als Schubwand unter Berücksichtigung aller angreifenden Kräfte anschaulich dargestellt. Dabei ist folgende Bezeichnung der Einwirkungen gegeben: Normalkräfte (N) normal auf Lagerfugen, Horizontalkräfte in Längsrichtung der Mauer (H), Schubkräfte (V), Biegemoment (M_z) und Torsions- oder Querbiegemoment (M_y).

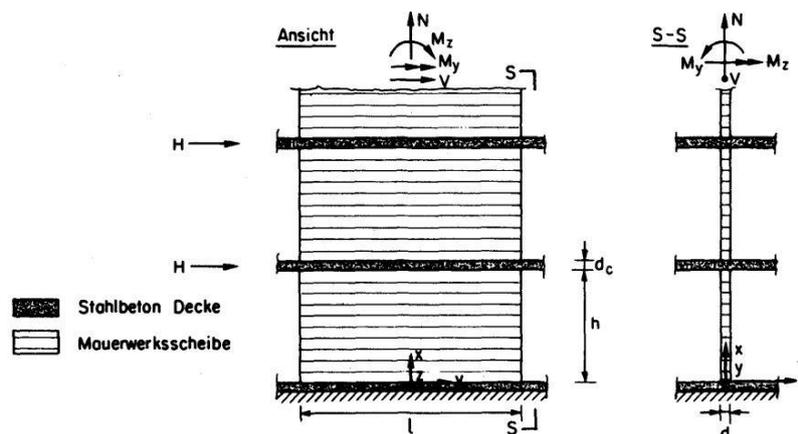


Abb. 2.6 – Tragsystem Schubwand [32, p. 45]

Nach der Vergrößerung des Maßstabes von Abb. 2.6 auf fünf Ziegelscharen⁸ ergibt sich Abb. 2.7., welche eine Wandscheibe unter Scheibenschub nach dem vereinfachten Tragmodell von

⁸ Eine Ziegelschar stellt eine Reihe an Ziegeln dar und ist ein in Österreich gängiger Wortlaut.

Mann/Müller darstellt. Ersichtlich ist hier die Beanspruchung sowie das Gleichgewicht an einem Mauerstein in Wandmitte, wobei in den Stoßfugen eine Vernachlässigung der Spannungsübertragung angenommen wird. [26, p. 137] Die Schubspannung τ erzeugt ein Drehmoment. Um das Gleichgewicht am Einzelstein aufrecht erhalten zu können, wird ein weiteres vertikales Kräftepaar benötigt und als zusätzliche vertikale Spannung $\Delta\sigma$ an den beiden Oberflächen des Steines aufgebracht.

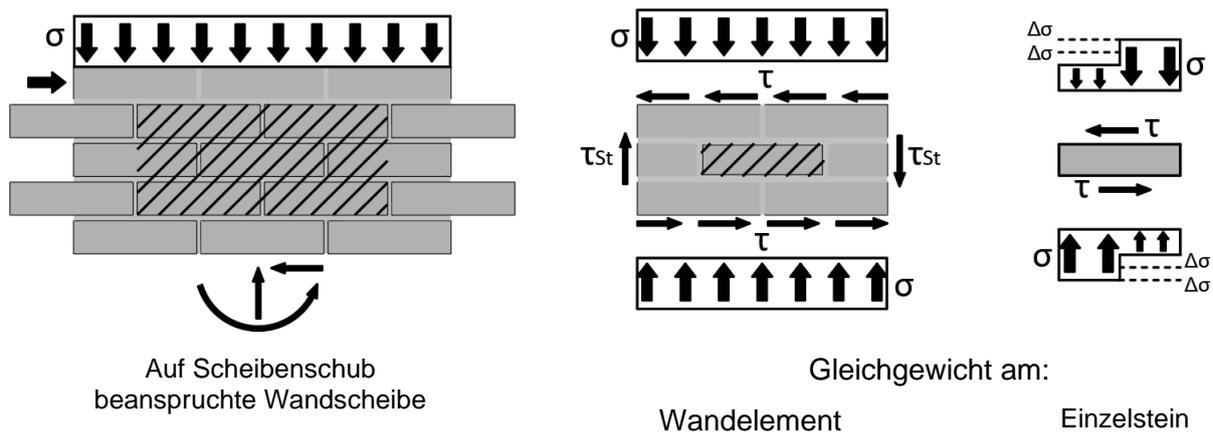


Abb. 2.7 – Wandscheibe unter Scheibenschub nach dem Ansatz von Mann/Müller, adaptiert nach [26, p. 137]

Wie Pech et al. [26, p. 137] nachfolgend darstellen, stellt sich demzufolge eine der angeführten Versagensmechanismen ein:

- Versagen durch Schub: Ist die Auflast zu niedrig, so ist die Druckspannung auf das Mauerwerk zu gering, um ein Abscheren der Mauersteine entlang der Lager- bzw. Stoßfugen zu verhindern. Je größer demzufolge die vertikale Druckspannung auf das Mauerwerk ist, desto mehr Scherspannung kann aufgenommen werden; natürlich vorausgesetzt unter der Einhaltung der Druckfestigkeit des Mauerwerks.
- Versagen durch Überschreiten der Steinzugfestigkeit: Stellt man sich ein Kraftdreieck mit horizontaler (Schub) und vertikaler (Druck) Einwirkung vor, so ändert sich der Neigungswinkel des Dreiecks. Dies so weit, dass in den Mauersteinen Querspannungen entstehen, welche ein Aufreißen bewirken können.
- Versagen durch Überschreiten der Steindruckfestigkeit: Bei gleichzeitiger Wirkung von Horizontalkräften (gering) und Vertikalkräften (hoch), ergeben sich als Resultat sehr stark geneigte Druckstreben. Diese konzentrieren sich im Randbereich des Mauerwerks und führen dort zu einem Druckbruch.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass „[...] die aufnehmbare Schubspannung nicht größer als die Differenz zwischen vorhandener Normalspannung und Mauerwerksfestigkeit sein darf, die natürlich nicht überschritten werden kann“ [26, p. 138]. Abb. 2.8 gibt einen sehr

guten Überblick über die Versagensarten eines Mauerwerks infolge Schubbeanspruchung, wobei der abgebildete Graf die Schubtragfähigkeit in Abhängigkeit der Druckspannung darstellt. Hierbei stellt f_{vk0} die charakteristische Schubfestigkeit ohne Auflast und bei reiner Scherbeanspruchung dar. Auf der Abszisse ist der Wert σ_d angeführt, welcher die Druckspannung normal zur Schubkraft darstellt und den Schubwiderstand sicherstellt. Ein markanter Abfall der Schubfestigkeit f_{vk} (Ordinate) infolge von Steindruckversagen (Fall 3) ist bei zu großer Schubdruckspannung bemerkbar.

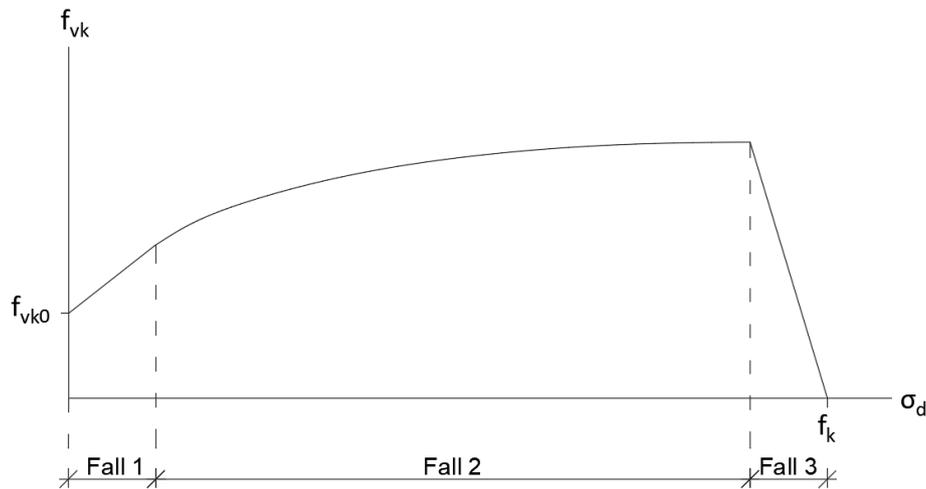


Abb. 2.8 – Versagensarten von Mauerwerk unter Schubbeanspruchung nach Mann/Müller

Fall 1: Lagerfuge versagt
auf Reibung

$$f_{vk-Fall1} = f_{vk0} + \mu_f \cdot \sigma_d \quad (2.1)$$

Fall 2: Stein versagt auf Zug

$$f_{vk-Fall2} = 0,45 \cdot f_{bz} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_d}{f_{bz}}} \quad (2.2)$$

Fall 3: Mauerwerk versagt
auf Druck

$$f_{vk-Fall3} = (f_k - \sigma_d) \cdot \frac{l_{st}}{2 \cdot h_{st}} \quad (2.3)$$

f_{vk0}	Haftscherfestigkeit ohne Auflast (Kapitel 3.2.5.3, ÖN EN 1052-3)
σ_d	Druckspannung normal zur Schubkraft und zur Lagerfuge (im überdrückten Mauerwerksbereich)
μ_f	Reibungsbeiwert zwischen Ziegel und Mörtel (Kapitel 3.2.5.3, ÖN EN 1052-3)
f_{bz}	Zugfestigkeit Mauerstein
f_k	Char. Mauerwerksdruckfestigkeit
h_{st}	Höhe des Mauersteins
l_{st}	Länge des Mauersteins

Schertragfähigkeit

Wird eine Wandscheibe nur durch eine Horizontallast wie in Abb. 2.5 (linker Pfeil) und ohne normal zu den Lagerfugen wirkende Auflast beansprucht, so ist der Scher- bzw. Schubwiderstand sehr gering. Grund dafür ist die fehlende Reibung, welche durch die Auflast auf die Lagerfuge initiiert würde und somit eine rückstellende Wirkung auf die Wandscheibe hätte. Sobald sich die Lagerfugen öffnen, ist nur mehr eine verminderte Übertragung der Reibung gewährleistet. Wird hingegen eine höhere Normalkraft in die Wandscheibe eingeleitet, hat dies eine rückdrehende Wirkung zur Folge und zudem wird die Übertragung der Reibung wieder erhöht. Wird der Wandkopf durch steife Bauteile wie eine Decke gegen Verdrehung gesperrt, so steigt die Aufnahmefähigkeit für Horizontalkräfte wieder signifikant an. [26, p. 139] Im Zuge einer Sanierungstätigkeit wird auf Bestandsdecken mit zwar vorhandener, jedoch gegenüber Decken eines Neubaus verminderter Steifigkeit getroffen werden. Wird diesem begünstigenden Effekt keine Berücksichtigung geschenkt, kann auf der sicheren Seite gerechnet werden. Die Durchführung von Scherversuchen am Mauerwerk ist nach ÖNORM EN 1052-3 [33] geregelt.

3 Unverfestigtes Mauerwerk – Tragfähigkeitsbewertung

3.1 Vorbereitende Maßnahmen

3.1.1 Durchzuführende Untersuchungen

3.1.1.1 Anamnese

Laut Maier [17, p. 145] sollen hierbei alle in der Vergangenheit durchgeführten Eingriffe in das Gefüge des Bauwerks anhand des baulich-konstruktiven Kontext ermittelt werden, was als Ergebnis die Sanierungsgeschichte des Mauerwerks hervorbringt. „Ziel der Anamnese muss es sein, die Schwachstellen des Gebäudes herauszufinden, um den Einsatz von Bauchemischen, bauphysikalischen und restauratorischen Untersuchungen problembezogen zu steuern“ [17, p. 145].

3.1.1.2 Voruntersuchung

Zunächst wird ein konstruktives Vorprojekt angelegt. Hierin sind die in den Bauphasen bzw. im Endzustand beanspruchten Mauerwerksbereiche einzugrenzen. Weiters sollen in diesen Bereichen Sondierungsversuche nach den in den Kapiteln 3.2 und 3.3 beschriebenen Verfahren durchgeführt werden, um die Tragfähigkeit bewerten zu können und die erwarteten Schwankungen einzugrenzen. [14, p. 91] Die Bestandserhebung sollte in Kombination zur OIB-Richtlinie 1 (Festlegung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Bestehenden Tragwerken) erfolgen. Falls möglich, soll auch die Schadensursache (Gefügeschäden, Hohlstellen, Risse) festgestellt sowie dokumentiert und ggf. behoben werden.

3.1.1.3 Verfeinerte Untersuchung

Für jene Bereiche, welche konzentrierte Lasteinleitungen (z. B. Teilflächenpressung im Auflagerbereich von Trägern) erfahren, ist im Rahmen der Detailplanung eine Eingrenzung der Mauerwerksfestigkeiten vorzunehmen. Werden verstärkende Maßnahmen durch Injektionen erforderlich, so sind Versuchsbereiche (Probeinjektionen) zu definieren. In diesen werden die erzielten Verbesserungen anhand von Bohrkernen verifiziert; die Dokumentation derer Ergebnisse bildet die Grundlage für die Detailausschreibung. [14, p. 91 f.] Weiters ist ein Anlegen von Kontrollflächen erforderlich.

3.1.2 Dokumentation

Die Dokumentation der Tragfähigkeitsbewertung ist im bekannten Umfang nach ÖNORM B 4008-1 durchzuführen, wobei die Klassifizierung des Gebäudes, die Ergebnisse der Materialuntersuchungen, das Sicherheitskonzept sowie die Beurteilungsergebnisse insgesamt in besonderem Maße zu berücksichtigen sind. Hinsichtlich der empfohlenen Maßnahmen lässt sich nach ÖN B 4008-1 [34, p. 12] eine genaue Gliederung nach den folgenden Punkten auflisten:

- Sichernde Sofortmaßnahmen
- Weitere detaillierte Untersuchungen
- Reparatur- und Instandsetzungsmaßnahmen
- Überwachungsmaßnahmen
- Verstärkungen bzw. Ersatz des Tragwerks oder von Tragwerksteilen
- Ggf. akzeptierte oder reduzierte Zuverlässigkeit

3.2 Stand der Technik

3.2.1 Allgemein

Um Maßnahmen zur Verfestigung eines Mauerwerks durchführen zu können, ist es erforderlich, eine Erhebung des Bestandes durchzuführen, damit Randbedingungen erhoben bzw. Anwendungsgrenzen der Verfestigungsmethoden ermittelt werden können. Anhand der ÖNORM B 4008-1 [34], auf welche sich dieses Unterkapitel bezieht, ist eine wirklichkeitsnahe Bewertung der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit für Hochbauten⁹ durchführbar. Zudem stellt eine Mauerwerksinjektion einen konstruktiven Eingriff in das Tragwerk dar, weshalb eine Tragwerksbeurteilung nach [34, p. 22] durchzuführen und zu dokumentieren ist, wobei die Anwendung folgender Methoden zur Bestandserhebung empfohlen wird:

- Sichtung der vorhandenen Bauwerksdokumentation unter Berücksichtigung der Nutzererfahrungen, augenscheinliche Kontrolle;
- Zerstörungsfreie in-situ Untersuchungen, geometrische Bestandsaufnahmen;
- Zusätzliche messtechnische Bauwerksuntersuchungen und Laborprüfungen.

Hierbei ist darauf zu achten, dass „Die vorhandene Dokumentation [...] mittels Befund auf augenscheinliche Übereinstimmung mit dem Bestand überprüft werden [muss und] wenn diese gegeben ist, dürfen Felduntersuchungen auf Stichproben beschränkt werden“ [34, p. 22]. Mit *vorhandener Dokumentation* ist das Vorliegen von Technischen Berichten, Prüfberichten der Werkstoffe oder auch Baugenehmigungen gemeint. Wie Pech et al. [24, p. 104] feststellen, geht ein geringer durchzuführender Untersuchungsaufwand mit einem umfangreichen Informationsgehalt über das instand zu setzende Bauwerk einher. Wichtig ist jedoch auch, die vorhandenen Unterlagen stets auf Plausibilität zu prüfen. Wie in Tab. 3.1 ersichtlich ist, sind die Kenntnisstände (KL – Knowledge Level) abhängig vom betrachteten Abschnitt im Gebäude sowie von der festgelegten Schadensfolgeklasse. Weiters geht aus dieser Tabelle hervor, dass umso weiter die Betrachtung des Bauwerkes ins Detail geht, umso genauer muss auch der Kenntnisstand über den zu prüfenden Bauteil sein.

⁹ Im Zuge dieser Arbeit wird festgelegt, dass diese sich bezüglich der Gebäudeklassifizierung auf die Schadensfolgeklassen CC 2 und CC 1 im Sinne der ÖNORM B 1990-1 begrenzen.

Schadensfolgekategorie gemäß ÖNORM B 1990-1	Beispiel	Einzelbauteil	Beispiel Einzelbauteil	Tragwerksbereich	Beispiel Tragwerksbereich	Gesamtgebäude
CC 1	Scheune	KL 3	Sparren	KL 2	Heuboden	KL 1
CC 2	Wohngebäude	KL 3	Unterzug	KL 2	Deckenkonstruktion	KL 2
CC3	Konzerthalle	KL 3	Stütze	KL 3	Tribüne	KL 2

Tab. 3.1 – Festlegung der zumindest erforderlichen Kenntnisstände [34, p. 8]

In Anbetracht der Tatsache, dass viele Gebäude, bei welchen Ertüchtigungsmaßnahmen ergriffen werden, aufgrund ihres Alters nicht oder nur teilweise nach Normen¹⁰ errichtet wurden, ist folgendes festzuhalten: „Der Nachweis der Tragfähigkeit bestehender Bauteile nach aktuellem Normenstand ist hinsichtlich der Widerstandsseite im Allgemeinen vollinhaltlich nur bei solchen Hochbauten möglich, die nach den aktuellen Normen errichtet wurden, da deren Bestimmungen bei älteren, nach früheren Normen errichteten Bauwerken zwangsläufig nicht vollinhaltlich eingehalten werden können“ [34, p. 14]. Der rechnerische Nachweis für Bauteile auf Grundlage von nicht mehr verwendeten Normen ist nur im Zusammenhang mit dem Bestandschutz (Konsens) anzuwenden. Zu beachten ist hierbei, dass heutige Normen charakteristische Werte für Einwirkungen anwenden, frühere Normen hingegen verwenden Gebrauchslasten. Zulässige Spannungen durften von den Gebrauchslasten nicht überschritten werden. [34, p. 14 ff.]

Gemäß ÖN B 4008-1 [34, p. 17] ist zunächst eine qualitative Bewertung der Tragfähigkeit unter folgenden Voraussetzungen erlaubt, wodurch eine ausreichende Tragfähigkeit für die bisher aufzunehmende Belastung vermutet werden kann:

- Es handelt sich um Bauwerke, über deren Konstruktion und deren Tragverhalten ausreichende Erfahrung aus vergleichbaren Bauwerken vorliegen.
- Es handelt sich um Bauwerke, die über längere Zeiträume gleichartig genutzt worden sind und die keine sicherheitsrelevanten Mängel und Schäden aufweisen. Ein längerer Zeitraum für die Beurteilung der Zuverlässigkeit aus der ständigen oder vorübergehenden Bemessungssituation liegt jedenfalls ab der halben planmäßigen Nutzungsdauer vor.
- Es sind keine Widmungsänderungen, die größere Beanspruchungen hervorrufen als die bisher in Verkehr gesetzten, und keine Zu- oder Umbauten geplant.
- Es ist kein sprödes Tragwerksversagen zu erwarten.

¹⁰ Überarbeitete Normen sind im Abschnitt E.14 der ÖNORM B 4008-1 [34, p. 70] einsehbar.

Wird etwa eine Aufstockung des Gebäudes in Betracht gezogen, so ist aufgrund des dritten Punktes eine detailliertere Untersuchung unter Anwendung der Kenntnisstände (KL) erforderlich.

Leserichtung →	Input				Output				
	Unterlagen vorhanden?	Art der Unterlagen bzw. Dokumentation	Bestandsaufnahme	ÖN B 4008-1 2018: Kapitel	KL	Kenntnisstand	Abminderungsfaktor CF	Abminderung des Widerstandes	
Geometrie	Ja	Originalpläne mit äußeren Hauptabmessungen	Stichprobenweise Überprüfung ²⁾	B.4.2.2	1	Beschränkt	1,35	26%	
		Unvollständig detaillierte (z. B. ohne Zahlenwerte)		B.4.2.3	2	Normal	1,2	17%	
		Vollständig detaillierte		B.4.2.4	3	Vollständig	1	0%	
	Nein	Selbst zu erstellen	Beschränkte Aufnahme: 1:200	B.5.2.4	1	Beschränkt	1,35	26%	
			Erweitert Aufnahme: 1:100	B.5.2.3	2	Normal	1,2	17%	
			Umfassend Aufnahme: 1:50	B.5.2.2	3	Vollständig	1	0%	
Konstruktive Einzelheiten	Ja	-	-	B.4.3.2	1	Beschränkt	1,35	26%	
		Unvollständige Originalbaupläne	Beschränkter Umfang	B.4.3.3	2	Normal	1,2	17%	
		Detaillierte Originalbaupläne	Beschränkter Umfang	B.4.3.4	3	Vollständig	1	0%	
	Nein	Selbst zu erstellen	Simulierter Entwurf ¹⁾ u. beschr. Untersuchungsumfang	B.5.3.4	1	Beschränkt	1,35	26%	
			Erweiterter Umfang	B.5.3.3	2	Normal	1,2	17%	
			Umfassender Umfang	B.5.3.2	3	Vollständig	1	0%	
Werkstoffgüten und Zustand der Baustoffe	Ja	Werte aus Normen/Vorschriften zum Errichtungszeitpunkt	Stichprobenweise Überprüfung (wie in Geometrie)	B.4.4.2	1	Beschränkt	1,35	26%	
		Originalstatik mit Bemessungsangaben auf Basis von Werten aus Normen und Vorschriften zur Zeit der Errichtung der Bauteile	Beschränkter Umfang	B.4.4.3	2	Normal	1,2	17%	
		Angaben zu den Baustoffen bzw. Angaben aus Original-Versuchsberichten	Beschränkter Umfang		2	Normal	1,2	17%	
		Originalstatik mit Bemessungsangaben auf Basis von Werten aus Normen und Vorschriften zur Zeit der Herstellung der Bauteile	Erweiterter Umfang	B.4.4.4	3	Vollständig	1	0%	
	Nein	Selbst zu erstellen	Beschränkter Umfang		B.5.4.4	1	Beschränkt	1,35	26%
			Beschränkter Umfang			2	Normal	1,2	17%
			Erweiterter Umfang			3	Vollständig	1	0%

¹⁾ Simulierter Entwurf entspricht einem ideellen Entwurf, dem Gebäude nachempfundenem nach damaligem Normenstand
²⁾ Dient der Verifizierung vorhandener Unterlagen. Untersuchungsumfang beträgt zumindest 20 % der in den Unterlagen maßgebenden Abmessungen

Tab. 3.2 – Vorgehensweise zur Erhaltung der Kenntnisstände, adaptiert nach ÖN B 4008-1, Anhang B

Bei der Ermittlung der Kenntnisstände wird in der ÖN B 4008-1 [34] zwischen den drei Haupt-eigenschaften *Geometrie*, *konstruktive Einzelheiten* sowie *Werkstoffeigenschaften* unterschieden, wie in der ersten Spalte von Tab. 3.2 ersichtlich ist. In Abhängigkeit davon, welche Unterlagen dem Planer zur Verfügung stehen bzw. der Planer bei nicht vorhandenen Unterlagen bereit ist an Untersuchungsaufwand zu betreiben, ergeben sich die Kenntnisstände. Diese wiederum wirken sich, wie in der letzten Spalte ersichtlich, auf die Abminderung der Widerstände aus. Diese können sich im Extremfall um mehr als ein Viertel der Tragfähigkeit redu-

zieren. In Spalte fünf sind jene Kapitel aus der ÖNORM B 4008-1 angeführt, welche das Ausmaß der Untersuchung zur Erlangung der jeweiligen Kenntnisstände erläutern und dort eingesehen werden können.

3.2.2 Prüfungsumfang vor Ort

3.2.2.1 Prüfserien

In Anlehnung an Tab. 3.2 wird auf das dort angeführte Kapitel B.5.4.4 näher eingegangen, da dieses aus Sicht des Verfassers dieser Arbeit eine wichtige Rolle für die Instandsetzung eines Mauerwerks spielt. Gemäß ÖNORM B 4008-1 [34, p. 35] gilt zur Erfüllung des Kenntnisstandes 3 (KL3), dass vor Ort folgender Untersuchungsaufwand zu betreiben ist:

- Je Bestandsobjekt zwei Prüfserien bzw.
- Je Materialart und angefangene 1000 m² BGF eine Prüfserie bzw.
- Je Teilbereich mit gleichartigen Materialien innerhalb des Bestandsobjektes eine Prüfserie

Abgeleitet von KL 1 ist für Kenntnisstand 2 ausreichend, je angefangene 2000 m² BGF eine Prüfserie durchzuführen. Ist im Gegensatz dazu Kenntnisstand 1 ausreichend, so ist je angefangene 5000 m² BGF eine Prüfserie durchzuführen. In Beiden Fällen der Kenntnisstände (1 und 2) ergeben sich je Bestandsobjekt eine Prüfserie. Zusätzlich sind entsprechend weitere Prüfserien bei unterschiedlichen vorhandenen Materialien durchzuführen.

3.2.2.2 Prüfstellen

An den in Kapitel 3.2.2.1 angeführten Prüfserien sind je nach Art der Untersuchungsmethode folgende Anzahl der Prüfstellen zu unterscheiden und durchzuführen:

- Mauerstein- und Mörtelprüfung (Kapitel 3.2.4)
 - * Rückprall- und Eindringmessung: sechs Prüfstellen
 - * Entnahme von Materialproben: drei Prüfstellen
- Einzelprüfkörper (Kapitel 3.2.5): drei Stück

3.2.3 Abgrenzung indirekte Prüfung zu direkter Prüfung

Eine Unterscheidung zwischen indirekten und direkten Prüfungsmethoden in allen Kapiteln ist erforderlich und wird in Tab. 3.3 in Abhängigkeit vom Zustand des Mauerwerks angeführt. „Eine sinnvolle und erfolgversprechende Kombination mehrerer indirekter Verfahren oder eine Kombination von indirekten mit direkten Verfahren ergibt sich oft erst auf der Basis der gemeinsamen Überlegungen [aller am Projekt beteiligten Personen]“ [35, p. 562].

Zustand Mauerwerk	Stand der...	Indirekte Prüfungsmethode		Direkte Prüfungsmethode	
		Bedeutung	Kapitel	Bedeutung	Kapitel
Unverfestigt	Technik	Einzelkomponentenprüfung von Mauersteinen und Mauermörteln	3.2.4	Prüfkörper weisen einen Verbund von Mauersteinen und Mauermörteln auf	3.2.5
Unverfestigt	Wissenschaft	Zerstörungsarm (MDT) bzw. nicht zerstörend (NDT)	3.3.3	Zerstörend (DT)	3.3.2
Verfestigt			4.3		4.3
Verfestigt	Technik	Überprüfung auf vorhandenes Injektionsgut im verfestigten Mauerwerk	4.2.3	Prüfkörper weisen einen Verbund von Mauersteinen bzw. Mauermörtel und Injektionsgütern auf	4.2.2

Tab. 3.3 – Abgrenzung von indirekten zu direkten Prüfungen in Abhängigkeit des Mauerwerkszustandes

3.2.4 Indirekte Prüfung

3.2.4.1 Allgemein

Als indirekte Prüfungsmethode ist die Einzelkomponentenprüfung von Mauersteinen und Mauermörteln zu verstehen. Diese stellt das Gegenteil zur direkten Prüfungsmethoden dar, welche in Kapitel 3.2.5 beschrieben ist. Auf Basis der ermittelten Werte kann unter Miteinbeziehung der gewünschten Tragfähigkeit nach einer Verfestigungsmaßnahme (Injektionsziel) die erforderliche Injektionsmenge ermittelt werden [24, p. 135]. Da die ausführliche Erläuterung der Bestimmung von Festigkeitseigenschaften unverfestigten Mauerwerks nicht den Hauptbestandteil dieser Arbeit bildet, wird lediglich eine straffe Übersicht angeführt.

3.2.4.2 Zerstörende Prüfung (DT¹¹)

Steindruckfestigkeit – Probekörper

Abweichend zur ÖNORM EN 772-1 [36, p. 5] sind fünf Einzelwerte einer Prüfstelle für die Durchführung der Steindruckfestigkeit heranzuziehen. Dies ist für jede unterschiedliche Mauerwerksart zu wiederholen. [37, p. 18] Anschließend wird aus jeder Serie der Mittelwert gebildet. Auf eine erschütterungsarme Entnahme zur Schonung der Proben ist dabei zu achten.

Um parallele Oberflächen zu erhalten, wird das Abschleifen derselben empfohlen. Ausgenommen sind jene Steine, welche Vertiefungen aufweisen. Eine Mindesthöhe von 40 mm und ein Höhen/Breiten-Verhältnis von 0,4 soll eingehalten werden. Vor der Prüfung ist eine Konditionierung der Probekörper auf einen vorgeschriebenen Feuchtegehalt vorzunehmen. In Abhängigkeit der zu erwartenden Druckfestigkeit ist die Belastungsgeschwindigkeit der Prüfmaschine anzusteuern. Gemäß Anhang A aus [36] hat die Umrechnung der Druckfestigkeit von

¹¹ DT: Destructive testing.

Mauersteinen in die normierte Druckfestigkeit f_b zu erfolgen, wobei der Umrechnungsfaktor δ für Mauersteine im Normalformat 0,75 beträgt. [36, p. 5 ff]

Mörteldruckfestigkeit – DIN

Im Zuge der Verfahren II und III laut DIN 18555-9 [38] Abschnitt 5 wird die Fugendruckfestigkeit von Mörtel aus Bestandsmauerwerk durchgeführt. Die praxisnahe Variante III, für welche Fugengebiete mit den Abmessungen von etwa 50/50/12 mm aus dem Bestand entnommen (z. B. herausgesägt) werden, hat sich gegenüber Variante II durchgesetzt. Nach dem Abdrücken mittels Prüfstempeln (Durchmesser 20 mm) ergeben sich die Druckfestigkeiten. Diese können durch Multiplikation des Faktors¹² 1,43 auf Prismenfestigkeiten umgerechnet werden. Es sollen mindestens 10 Einzelprüfungen durchgeführt werden, um aus den Einzelfestigkeiten durch Bildung des arithmetischen Mittels die Gesamtfestigkeit zu ermitteln. Laut dem Stand von 2016 ist diese DIN gegenwärtig die einzige deutsche Norm, welche sich mit dieser Thematik auseinandersetzt. [39, p. 340]

Mörteldruckfestigkeit – Stempeldruckverfahren

Gemäß ÖNORM B 1996-3 [37, p. 18] ist das Stempeldruckverfahren zu verwenden, wenn Mörtel mit geringeren Druckfestigkeiten als 5 MPa angetroffen werden. Es sind zumindest 10 Einzelprüfwerte je Prüfstelle heranzuziehen. Nach der Entnahme von fugendicken Mörtelbruchstücken (d) mit einem Mindestdurchmesser von etwa 50 mm werden diese beidseitig in spezielle Formen aus etwa 5 mm starkem Gips abgeglichen und nach Erhärtung mit einem Prüfstempel (Durchmesser 25 mm) abgedrückt (Abb. 3.1).

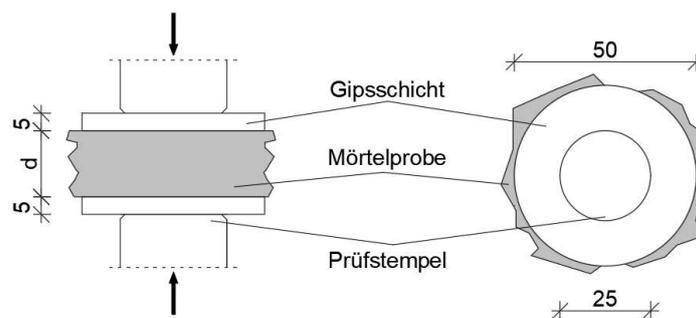


Abb. 3.1 – Prinzipskizze des Stempeldruckverfahrens in [mm], adaptiert nach [40, p. o. S.]

Mörtel mit hydraulischen Bestandteilen, welche i.d.R. eine Festigkeit von mehr als 5 MPa aufweisen, können nur durch Anwendung der Stempeldruckprüfung getestet werden. [26, p. 183 f.] Nach einer Ausgleichsrechnung ergibt sich die Mörteldruckfestigkeit für eine Fugendicke mit 15 mm Stärke [23, p. 7 Anh. C]. Gründerzeitliche Kalkmörtel weisen Druckfestigkeiten zwischen 1 MPa und 2 MPa auf [7, p. 21]. Zurzeit kann dieses Prüfungsverfahren als sehr gängig beurteilt werden.

¹² Bei der Verwendung von Kalkmörteln wird der Faktor 1,0 empfohlen [64, p. 194].

3.2.4.3 Zerstörungsarme Prüfung (MDT¹³)

Steindruckfestigkeit – Rückprallhammer

Bislang ist die Rückprallhammerprüfung in Hinsicht auf Bestandsmauerwerk normativ nicht erfasst. Daher ist es notwendig, unter Heranziehung von Prüfziegeln eine zerstörungsfreie und eine zerstörende Kalibrierung durchzuführen. Da bei der Prüfung eine erhebliche Streuung auftritt, sind mindestens 10 Einzelschläge je Prüfstelle und Mauersteinkategorie erforderlich, um die vorhandene Streuung zu glätten. Der Umrechnungsfaktor δ ist bei den ermittelten Steindruckfestigkeiten bereits enthalten, wobei das Ergebnis als normierte Steindruckfestigkeit an einem 10/10/10 cm Würfel angesehen werden kann. [39, p. 401] [26, p. 182]

Mörteldruckfestigkeit – Eindringprüfung

Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Mörtelfestigkeit f_m des Bestandsmauerwerks und der Eindringtiefe der Prüfschneide des modifizierten Rückprallhammers. Zu beachten ist, dass dies für Mörtel ab 5 MPa gilt; liegt die Mörteldruckfestigkeit darunter, so ist das Stempeldruckverfahren anzuwenden. Während des Versuchsvorganges von 10 Schlägen je Probestelle (gemäß [37, p. 18]) darf der modifizierte Rückprallhammer nicht abgesetzt werden. Anhand von Gleichung (3.1) kann die Normfestigkeit des Fugenmörtels ermittelt werden. Das Messergebnis (i. e. Eindringtiefe) kann durch vorhandene Lunker, großen Zuschlagskörnern oder zu geringe Fugendicken beeinflusst werden. [39, p. 402]

$$f_m = \left(\frac{4,0}{d_1 - d_{10}} \right)^{0,60} \quad (3.1)$$

d_1 Eindringtiefe erster Schuss¹⁴

d_{10} Eindringtiefe zehnter Schuss

Die ermittelten Werte liegen aufgrund von höheren Mörtelfestigkeiten innerhalb des Mauerwerksbestandes auf der sicheren Seite. Im Vergleich zur Stempeldruckprüfung ergeben sich hierbei aufgrund der höheren Mörtelfeuchtigkeit innerhalb des Mauerwerks um etwa 20 % bis 30 % niedrigere Werte. [26, p. 184]

3.2.4.4 Berechnung der Druckfestigkeit von Mauerwerken

Die Mauerwerksfestigkeit kann entweder durch direkte Prüfungen (Kapitel 3.2.5), oder anhand von Berechnungen mittels Komponentenfestigkeiten ermittelt werden. Die Faktoren, welche in die Gleichungen einzusetzen sind, werden durch indirekte Prüfungen, wie im Kapitel 3.2.4 beschrieben, ermittelt. Nachfolgend sind Gleichungen für verschiedene Mauerwerkstypen wie

¹³ MDT: Minor-destructive testing.

¹⁴ Umgangssprachliche Bezeichnung für die Betätigung des Rückprallhammers.

Vollziegelmauerwerk, Quadermauerwerk sowie Bruchsteinmauerwerk nach ÖNORM B 4008-1 angeführt. Generell ist jedoch zu sagen, dass sich die Druckfestigkeit von Mauerwerk mit Gleichung (3.2) ermitteln lässt. Bei Altbauten kann angenommen werden, dass der verwendete Mörtel einem Normalmörtel entspricht. Für unterschiedliche Gruppen von Mauersteinen oder Mörteln ist der Beiwert K bzw. die Exponenten α und β gemäß Tabelle C.8 in [34] zu variieren und wurden anhand von Regression aus umfangreichen Versuchsreihen ermittelt.

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \quad (3.2)$$

Sind Mörtelfugen parallel zur Wandebene im Verbandsmauerwerk hergestellt worden, so darf f_k um 20 % reduziert werden. Weiters gilt, dass für die Mörtelfestigkeit f_m kein größerer Wert als 20 MPa oder das Zweifache der Steindruckfestigkeit f_b eingesetzt werden darf. Der kleinere Wert ist hierbei maßgebend. Hinsichtlich der Steindruckfestigkeit f_b gilt, dass diese 75 MPa nicht überschreiten soll. [34, p. 47] Bei der Verwendung von Natursteinen Gleichung (3.2) nur bedingt maßgebend, da die Druckfestigkeiten dieser nicht selten über 75 MPa liegen (Gneis 160 MPa bis 280 MPa, Marmor 80 MPa bis 180 MPa [27, p. 481]) und somit in den meisten Fällen 20 MPa als Obergrenze für f_m das Ergebnis bilden wird.

Für Mörteldruckfestigkeiten mit weit unter 1 MPa kann Gleichung (3.2) nicht angewendet werden; denn bei solch einer geringen Festigkeit ist es bereits möglich, den Bestandsmörtel mit dem Finger aus den Fugen zu kratzen [14].

Vollziegelmauerwerk

Nachstehende Gleichung ergibt die Druckfestigkeit für Vollziegelmauerwerk (\cong Steingruppe 1), welches mittels Normalmörtel und im Verband hergestellt wurde [34, p. 48].

$$f_k = 0,80 \cdot 0,60 \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25} \quad (3.3)$$

Quadermauerwerk

Nachstehende Gleichung ergibt die Druckfestigkeit für Quadermauerwerk, welches mittels Normalmörtel und im Verband hergestellt wurde [34, p. 48].

$$f_k = 0,80 \cdot 0,45 \cdot f_b^{0,70} \cdot f_m^{0,30} \quad (3.4)$$

Bruchsteinmauerwerk

Nachstehende Gleichung ergibt die Druckfestigkeit für Natursteinmauerwerk, wobei hier ein zusätzlicher Verbandsfaktor K_{VERB} zu berücksichtigen ist. Dieser ist abhängig vom Verhältnis der Stein- zur Mörteldruckfestigkeit [34, p. 49].

$$f_k = K_{\text{VERB}} \cdot 0,6 \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25} \quad (3.5)$$

Bedingung	K_{VERB}	
$\frac{f_b}{f_m} \leq 1$	0,8	(3.6)
$1 < \frac{f_b}{f_m} \leq 25$	$0,8304 - 0,0304 \cdot \frac{f_b}{f_m}$	(3.7)
$\frac{f_b}{f_m} \geq 25$	0,07	(3.8)

3.2.4.5 Berechnung der Schubfestigkeit¹⁵ von Mauerwerken

Vollziegelmauerwerk

Sofern alle Fugen als vollständig vermörtelt angesehen werden können, berechnet sich die Schubfestigkeit von Mauerwerk nach ÖN EN 1996-1-1 [41, p. 38] mit nachstehend angeführter Gleichung (3.9). Hierbei ist eine begünstigende Abhängigkeit zum jeweiligen Lastzustand (σ_d) erkennbar, weshalb die Normalspannung niedrig angesetzt werden sollte; berücksichtigt wird in Gleichung (3.9) das Fugen- sowie das Steinzugversagen [26, p. 150 f.]. Bei zu sanierendem Mauerwerk kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle Fugen vollständig vermörtelt sind, weshalb die Anwendung dieser Gleichung bei Bestandsmauerwerk überdacht werden sollte. In Kapitel 3.3.2 sind Schubversuche angeführt, welche präzisere Ergebnisse liefern.

$$f_{vk} = f_{vk0} + \mu_f \cdot \sigma_d \leq 0,065 \cdot f_b \quad (3.9)$$

- f_{vk0} Haftscherfestigkeit ohne Auflast (Kapitel 3.2.5.3, ÖN EN 1052-3)
- σ_d Druckspannung normal zur Schubkraft und zur Lagerfuge (im überdrückten Mauerwerksbereich), siehe Abb. 2.8
- μ_f Reibungsbeiwert zwischen Ziegel und Mörtel (Kapitel 3.2.5.3, in ÖN EN 1052-3)

Natursteinmauerwerke

Dadurch, dass Natursteinmauerwerke sehr massiv ausgeführt sind, ergibt sich eine grundsätzlich ausreichende Schubfestigkeit, welche in nachfolgender Gleichung dargestellt wird [27, p. 496].

$$f_{vk} = 0,025 \cdot f_b \leq 0,6 \text{ MPa} \quad (3.10)$$

¹⁵ Oftmals auch als Scherfestigkeit bezeichnet.

3.2.5 Direkte Prüfung (DT)

3.2.5.1 Allgemein

Als direkte Prüfungsmethode ist die Prüfung am Bestand (in-situ) oder aus Prüfkörpern, welche einen Verbund von Mauersteinen und Mauermörteln aufweisen, zu verstehen. Diese stellt das Gegenteil zur indirekten Prüfungsmethoden dar, welche in Kapitel 3.2.4 beschrieben ist. Bei direkten Prüfungen handelt es sich anders als bei indirekten Prüfungen immer um zerstörende Prüfungen, bei denen die tatsächlich vorherrschenden Festigkeitsverhältnisse ermittelt werden. Es ist zu erwähnen, dass die Durchführung der nachfolgend angeführten, gängigen Prüfmethode einen hohen Aufwand sowie eine Schwächung des Bestandes¹⁶ mit sich bringen und außerdem kostspielig sind. In Kapitel 3.2.5.3 werden Großversuche dargestellt, welche die Druckfestigkeit nach ÖNORM EN 1052-1 oder aber auch anhand des Flat-Jack-Test bestimmen. Weiters wird die Ermittlung der Anfangsscher- oder Haftscherfestigkeit nach ÖNORM EN 1052-3 dargelegt. Großversuche werden zudem auch im Rahmen wissenschaftlicher Beiträge herangezogen, um Forschungsarbeiten an Modellen realer Größe durchzuführen bzw. diese zu kalibrieren (Kapitel 3.3.2.1).

Da die ausführliche Erläuterung der Bestimmung von Festigkeitseigenschaften unverfestigten Mauerwerks nicht den Hauptbestandteil dieser Arbeit bildet, wird lediglich eine straffe Übersicht angeführt.

3.2.5.2 Kleinprüfkörper – Ansätze Fugenbohrkern

Bevor Bohrungen aller Art durchgeführt werden, ist eine Erkundung der Leitungsführung im Mauerwerk anzustreben. Generell gilt, dass die Entnahmerichtung eines Bohrkerns auf diesem dokumentiert werden soll. Weiters wird ein schonender Umgang mit den entnommenen Proben empfohlen. Transport und Lagerung dürfen die Proben nicht nachhaltig beeinflussen. Die erhaltenen Bohrlöcher im Mauerwerk können für weiterführende Endoskopierungen (Kapitel 3.3.2.7) herangezogen werden.

Verfahren nach Berger

Berger hat im Zuge seiner Forschungsarbeit „[...] eine Proportionalität zwischen den Quotienten aus der Mauerwerksfestigkeit f_k und der Spaltzugfestigkeit von Bohrkernen mit mittiger Lagerfuge $f_{SZ,FK}$ und dem Quotienten aus der Ziegeldruckfestigkeit nach Normprüfungen f_b und der Spaltzugfestigkeit von Ziegelbohrkernen $f_{SZ,b}$ festgestellt“ [39, p. 395]. Eine kritische Betrachtung des hierbei angewendeten Mathematischen Verhältnisses ist jedoch angebracht: Das Verhältnis von Stein- zu Mörtelfestigkeit kann größer als 5:1 werden. Bei Altbauten mit

¹⁶ Bei der Entnahme von Prüfkörpern aus tragenden Wänden muss ein statischer Nachweis hinsichtlich der Resttragfähigkeit erbracht werden [26, p. 180].

Mörtelfestigkeiten von maximal 2 MPa ist die Anwendung dieser Beziehung und des Verfahrens nach Berger daher weniger sinnvoll. [42, p. 136] Zudem stellt die Entnahme von Prüfkörpern aus Mauerwerken von schlechter Qualität eine große Herausforderung dar. Das unbeschadete Einbringen von Proben in die Prüfmaschine wird dadurch erheblich erschwert. Die Prüfung der Spaltzugfestigkeit ist nicht genormt, dennoch ergibt nachstehende Gleichung die Druckfestigkeit eines Mauerwerks.

$$f_k = f_b \cdot \frac{f_{SZ,FK}}{f_{SZ,b}} \quad (3.11)$$

Verfahren nach IBMB Braunschweig

Analog dem Verfahren nach Berger werden beim Verfahren nach IBMB Braunschweig (Gaukler) Bohrkern entnommen. Allerdings unterscheidet sich hierbei der Durchmesser mit 200 mm zu anderen Verfahren und erstreckt sich über drei Lagerfugen. Faktoren ermöglichen die Umrechnung von Probekörperfestigkeiten auf Normalprüfkörperfestigkeiten mit zulässigen Mauerwerksfestigkeiten. Eine Anwendung dieser Methode für Mauerwerke mit geringeren Ziegelfestigkeiten (als bei reichsformatigem¹⁷ Mauerwerk) wird nicht empfohlen. [39, p. 396]

3.2.5.3 Großprüfkörper – Normenreihe ÖNORM EN 1052 (Auswahl)

Zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Mauerwerken (ÖN EN 1052-1)

Wie in Tab. 3.4 ersichtlich ist, bezieht sich die Größe des Versuchskörpers (RILEM¹⁸-Prüfkörper) auf die Größe der historischen Ziegel (zur Beibehaltung der Schlankheit), wobei der Versuch an mindestens drei Prüfkörpern durchzuführen ist. Überschreitet die Höhe des Prüfkörpers 1000 mm, so ist unter bestimmten Voraussetzungen eine Verringerung der Abmessungen durch Säumen jener Mauersteine, welche die äußersten Scharen bilden, erlaubt. Auf Ebenheit und parallele Lastverteilungsflächen ist auch durch Anwendung von Ausgleichsschichten (z. B. Gips) zu achten. Werden Mauersteine niedriger Festigkeit abgedrückt, so liegt der kraftgesteuerte Versuch bei 0,15 MPa je Minute. Bei Mauersteinen höherer Festigkeit hingegen liegt diese bei 1,25 MPa je Minute. Nach Aufzeichnung der Höchstlast $F_{i,max}$, jener Last, bei welcher sichtbare Risse auftreten, sowie der Zeitdauer vom Belastungsbeginn bis zum Erreichen der Höchstlast, kann nach Gleichung (3.12) unter Heranziehung der belasteten Querschnittsfläche A_i die Druckfestigkeit jedes einzelnen Mauerwerksprüfkörpers auf 0,1 MPa genau berechnet werden. [29, p. 6 f.]

¹⁷ In Deutschland im Zuge der Industrialisierung eingeführt, entspricht NF Ziegel mit 25/12/6,5 cm.

¹⁸ International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures [13, p. 196].

l_u [mm]	h_u [mm]	l_s [mm]	h_s [mm]		t_s [mm]
≤ 300	≤ 150	$\geq (2 \times l_u)$	$\geq 5 h_u$	$\geq 3 t_s$ und $\leq 15 t_s$ und $\geq l_s$	$\geq t_u$
	> 150		$\geq 3 h_u$		
> 300	≤ 150	$\geq (1,5 \times l_u)$	$\geq 5 h_u$		
	> 150		$\geq 3 h_u$		

Tab. 3.4 – Maße für kleine Prüfkörper zur Prüfung der Druckfestigkeit am Mauerwerk [29, p. 5]

l_u	Länge des Mauersteins	h_s	Höhe des Prüfkörpers
h_u	Höhe des Mauersteins	t_s	Dicke des Prüfkörpers
t_u	Breite des Mauersteins	l_s	Länge des Prüfkörpers

Die in Tab. 3.4 angeführten Abmessungen sind ebenso qualitativ in Abb. 3.2 ersichtlich, worin *kapazitive Wegaufnehmer* (schwarz) zwischen den Abmessungen $l_s/2$ und $h_s/3$ appliziert werden können, um den Elastizitätsmodul zu bestimmen. Im Falle einer Prüfung von bereits verfestigtem Mauerwerk dürfen Prüfkörper, welche eine geringere Anzahl als vier Lagerfugen aufweisen, nur verwendet werden, wenn es sich um Kontrollprüfungen von mit organischen Harzen verfestigtem Mauerwerk handelt [37, p. 18].

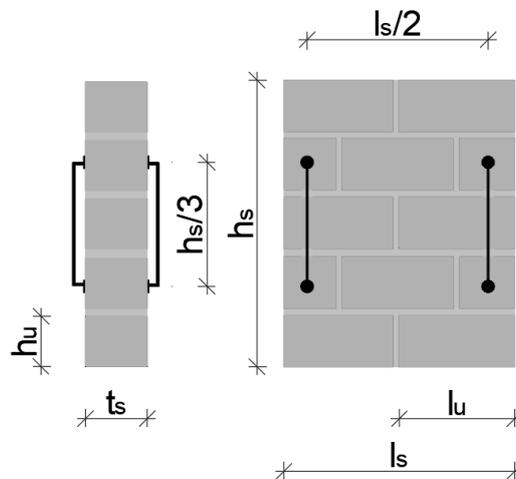


Abb. 3.2 – Mauerwerksprüfkörper (nicht maßstäblich), adaptiert nach [29, p. 5]

$$f_i = \frac{F_{i,max}}{A_i} \quad (3.12)$$

Die Berechnung der charakteristischen Wandfestigkeit f_k erfolgt anschließend anhand einer Division des Mittelwertes der (drei) Prüfergebnisse durch einen Wert von 1,2. Sollte der kleinste Einzelwert einer Prüfserie kleiner als der durch 1,2 dividierte Mittelwert sein, so entspricht dieser Einzelwert der charakteristischen Wandfestigkeit f_k . [26, p. 180] Eine dem Verbandsmauerwerk analoge Prüfung darf bei Bruchsteinmauerwerk durchgeführt werden [13, p. 197].

Zur Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit von Mauerwerken (ÖN EN 1052-3)

Hierbei wird der Reibungswiderstand zwischen Mauerstein und Mörtel überprüft. Die Anfangs- oder Haftscherfestigkeit wird ohne Auflast normal auf die Lagerfugen ermittelt (Verfahren B), wohingegen bei der Scherfestigkeit eine Auflast normal auf die Lagerfugen aufgebracht wird (Verfahren A). Es sind zwei Arten zulässig (Abb. 3.3, Dunkelgrau: Ziegel und Hellgrau dazwischen: Lagerfuge sowie Schwarz: Lastverteilungsplatten bzw. Rollen), um Mauerwerksprüfkörper herzustellen: Typ I, wenn die Steinhöhe maximal 200 mm beträgt, und Typ II, wenn die Steinhöhe mehr als 200 mm beträgt. Das Endergebnis beider Verfahren (A und B) ergibt die charakteristische Anfangsscherfestigkeit f_{vk0} , wobei die Bruchform im Versuchsprotokoll zu dokumentieren ist.

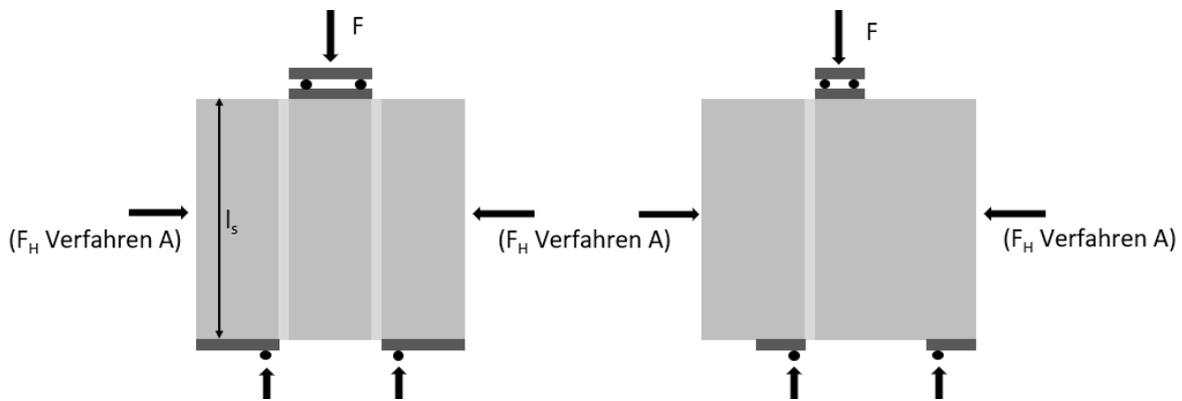


Abb. 3.3 – Belastungstypen: Typ I (links), Typ II (rechts), adaptiert nach [33, p. 8]

- Verfahren A: An drei Prüfkörpern werden je drei Laststufen gleichmäßig aufgebracht, wobei die Vorlast in Abhängigkeit der Steindruckfestigkeit zu wählen und im Bereich von $\pm 2\%$ des Ausgangswertes zu halten ist. Die Scherfestigkeit einer Einzelprobe f_{v0i} wird wie in Gleichung (3.13) dargestellt berechnet. Hierbei stellt $F_{i,max}$ die Höchstlast der Scherkraft dar, A_i ist die Querschnittsfläche eines Prüfkörpers parallel zu den Lagerfugen. Die Druckbeanspruchung einer Einzelprobe f_{pi} wird aus der Druckkraft der Vorbelastung F_{pi} und A_i errechnet, wie Gleichung (3.14) wiedergibt. Nach einer grafischen Darstellung der Scherfestigkeit f_{v0i} der Einzelproben in Abhängigkeit der Druckbeanspruchung f_{pi} ergibt sich die Anfangsscherfestigkeit f_{v0} durch eine lineare Regression der Einzelpunkte aller Prüfungen. Abschließend ist die charakteristische Anfangsscherfestigkeit f_{vk0} durch Multiplikation des Faktors 0,8 mit f_{v0} (Gleichung (3.15)) zu ermitteln. Weiters ist mittels Verfahren A der Winkel der inneren Reibung und der charakteristische Winkel der inneren Reibung grafisch zu ermitteln, welcher für Gleichung (3.9) erforderlich ist. Der Reibungsbeiwert ist abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit, dem Lochanteil sowie dessen Struktur und nicht zuletzt von der Verzahnung zwischen Mörtel und Mauerstein.

$$f_{v0i} = \frac{F_{i,max}}{2 \cdot A_i} \quad (3.13)$$

$$f_{pi} = \frac{F_{pi}}{A_i} \quad (3.14)$$

- Verfahren B: An sechs Prüfkörpern werden Versuche ohne das Aufbringen einer Vorlast durchgeführt. Nach Erreichen der jeweiligen Anfangsscherfestigkeit f_{v0} ist daraus der Mittelwert zu bilden. Zur Berechnung der charakteristischen Anfangsscherfestigkeit f_{vk0} stehen das vereinfachte Verfahren (Gleichung (3.15)) und auch ein statistisches Verfahren zur Verfügung.

$$f_{vk0} = f_{v0} \cdot 0,8 \quad (3.15)$$

„Besteht der Verdacht, dass die Anfangsscherfestigkeit durch eine Vorbelastung überschritten wurde, bzw. sind zyklische Belastungen zu beachten, die im ersten Lastspiel eine Schubbeanspruchung $> f_{vk0}$ bewirken, ist $f_{vk0} = 0$ anzusetzen“ [14, p. 94].

3.2.5.4 Flat-Jack-Test

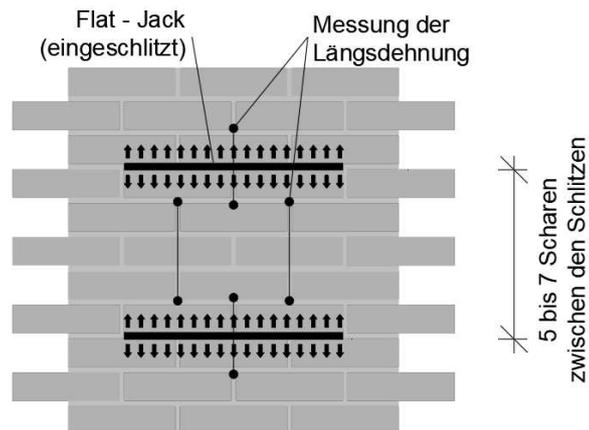


Abb. 3.4 – Anordnung eines Flat-Jack-Tests, adaptiert nach [26, p. 181]

Diese Prüfungsmethode wird herangezogen, um in-situ die Druckfestigkeit eines Mauerwerks mittels Flachpressen zu bestimmen. Nach der Montage der Dehnungsmesseinrichtungen in Richtung der zu messenden Spannung werden in zwei Mörtelfugen im Abstand von fünf bis sieben Scharen (bei großen Flat Jacks) zwei schmale Schlitze mit einigen Zentimetern Tiefe geschnitten. In diesen wird der halbkreisförmige hydraulische Druckschlauch (Flat Jack) eingeführt und mittels einem Ölkreislauf in Gang gesetzt. Der Öldruck wird gesteigert, bis der ursprüngliche Deformationszustand wieder erreicht ist. Um eine laborähnliche Prüfung, bei der Längs- und Querdehnungen gemessen werden, nachzuempfinden, sollten zwei vertikale Randschnitte durchgeführt werden, um Randeffekte zu vermeiden. Soll die Druckfestigkeit abgeschätzt werden, so ist eine Belastung bis zum Bruch nicht erforderlich, da sich aufgrund der Aufzeichnungen der Messeinrichtung der kurz bevorstehende Bruch ableiten lässt. [43, p. 202]

f.] In Abb. 3.4 ist das Schema eines Versuchsaufbaues ersichtlich. Eine parallel zu den Versuchen durchzuführende Korrelation an Prüfpeilern macht das Verfahren aufwändig und zudem ist es kostspielig [26, p. 181].

3.3 Stand der Wissenschaft

3.3.1 Allgemein

In diesem Kapitel werden jene Methoden vorgestellt, welche Überprüfungen des unverfestigten Mauerwerks hinsichtlich Tragfähigkeit und Qualität nach dem Stand der Wissenschaft darstellen, und dem Planer von Injektionsmaßnahmen zusätzliche Werkzeuge zur Tragfähigkeitsbewertung in die Hand geben. Es ist anzumerken, dass diese Anwendungen vor der Verfestigungsmaßnahme Ergebnisse hervorbringen, welche mit den Ergebnissen von Überprüfungen nach der Verfestigungsmaßnahme verglichen werden sollen, um die Qualität bzw. Erfolg des Eingriffes zu überprüfen.

In Kapitel 3.3 kann eine Einteilung in direkte Verfahren, worin zerstörende Prüfungen die Grundlage bilden und auf das Nötigste beschränkt werden sollen, sowie indirekte Verfahren, worin zerstörungsarme Prüfungen die Grundlage bilden, vorgenommen werden. Um bezüglich indirekter und direkter Prüfungsmethoden Verwechslungen auszuschließen, schafft Tab. 3.3 einen guten Überblick. Hinsichtlich der Erkundungsziele kann zwischen Hohlraumgehalt, Mehrschaligkeit, Druckfestigkeit und Schubfestigkeit unterschieden werden. Eine zusätzliche Kalibrierung und Bewertung der Ergebnisse aus den Untersuchungen ist unerlässlich und sollte am Objekt durch Bohrungen, Endoskopierungen, oder aber auch durch Laboruntersuchungen erfolgen [35, p. 563]. Eine Kombination von direkten und indirekten Erkundungsmethoden wird als zerstörungsarmes Verfahren bezeichnet. „Ein möglichst an den Bestand angepasstes Untersuchungskonzept ermöglicht den gezielten und fokussierten Einsatz finanzieller und personeller Mittel“ [8, p. 36].

3.3.2 Direkte Prüfungsmethoden

3.3.2.1 Versuchsgrenzlast für direkte Verfahren

Die ÖNORM B 4008-1 erlaubt experimentelle Tragfähigkeitsbewertungen am Bauwerk (in-situ Prüfung), um Verifizierungen und Kalibrierungen von Rechenmodellen durchzuführen. Grundsätzlich gilt hierbei, dass bei der Versuchsdurchführung keine Schädigungen am Bauwerk auftreten dürfen. Dabei ist ein geeignetes Belastungssystem (Versuchsgrenzlast F_{lim} , Gleichung (3.16)) zu wählen und in Kombination mit geeigneten Apparaturen anzuwenden, mit welchen Schäden vorzeitig erkannt werden. Das Erreichen der Versuchsgrenzlast hat in mindestens 10 Laststufen zu erfolgen und muss aufgezeichnet werden. Nach 3 Stufen hat allerdings eine

Entlastung um mindestens 2 Stufen zu erfolgen, wobei diese entfallen darf, wenn ein eindeutiges lineares Kraft-Verformungs-Verhalten gegeben ist. Nach Abschluss dieses statischen Belastungsversuches sind die aufgetretenen plastischen Verformungen aufzuzeichnen und dessen Ergebnisse an Tragwerksmodellen zu interpretieren. [34, p. 18]

Hinsichtlich der Art der Belastungsversuche sind laut [34, p. 18] folgende vier Typen zu unterscheiden:

- Belastungsversuche Typ 1 zum Nachweis der Beanspruchbarkeit von Bauteilen bis zur rechnermäßig erforderlichen Traglast.
Diese Versuche dienen der Bestimmung der Tragfähigkeit von Bauteilen, von denen einzelne Konstruktionsparameter (Statisches System, Abmessungen, konstruktive Einzelheiten, Materialparameter) nicht ausreichend bekannt sind.
- Belastungsversuche Typ 2 zur Bestimmung der Beanspruchbarkeit von Tragsystemen.
Diese Versuche dienen der Bestimmung der Tragfähigkeit von mehrfach vorhandenen gleichartigen Bauteilen, von denen einzelne Bauteile überprüft werden. Aus diesen Versuchen wird auf die Tragfähigkeit der übrigen Bauteile geschlossen.
- Belastungsversuche Typ 3 zur Bestimmung der Beanspruchbarkeit eines Einzelbauteils.
Diese Versuche dienen der Bestimmung der Tragfähigkeit einer einzelnen Konstruktion, die hinsichtlich Abmessungen, ständigen Beanspruchungen sowie der Materialkennwerte vollständig bekannt ist.
- Belastungsversuche Typ 4 zur Verifizierung von Rechenmodellen und der Gebrauchstauglichkeit.
Diese Versuche werden angewendet als Kontrolle von Rechenmodellen, bei denen das Kraft-Verformungs-Verhalten durch Versuche verifiziert wird und die Rechenparameter kalibriert werden können. Diese Versuche dienen auch dem Nachweis der ausreichenden Gebrauchstauglichkeit der Bestandskonstruktion.

Nach genauer Betrachtung der vier oben angeführten Punkte kann gesagt werden, dass der letzte Punkt (Typ 4) für den Vergleich von wissenschaftlichen Arbeiten herangezogen werden kann und somit für die Verwendung in Frage kommt. Allerdings muss angeführt werden, dass es sich bei Typ 4 um einen Belastungsversuch bei unverfestigtem Mauerwerk handelt. Nachfolgend ist Gleichung (3.16) angeführt, die in Kombination mit den Werten für Belastungsversuche Typ 4 aus Tab. 3.5 und den Teilsicherheitsbeiwerten des Materials die Versuchslast F_{lim} ergeben [34, p. 19].

$$F_{lim} = \left(\begin{array}{c} \gamma_{G,1} \cdot G_{k,1} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \\ \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \end{array} \right) \cdot \gamma_M - G_{k,1} \quad (3.16)$$

- F_{lim} Versuchsgrenzlast
- $G_{k,1}$ Charakteristischer Wert der beim Versuch vorhandenen ständigen Einwirkung
- $G_{k,j}$ Char. Wert der nach dem Versuch aufzubringenden ständigen Einwirkungen
- $Q_{k,1}$ Char. Wert der dominierenden veränderlichen Einwirkung (Leiteinwirkung)
- $Q_{k,i}$ Char. Wert der veränderlichen Einwirkung (Begleiteinwirkung)
- $\gamma_{G,1}$ Teilsicherheitsbeiwert der beim Versuch vorhandenen ständigen Einwirkung gemäß Tab. 3.5
- $\gamma_{G,j}$ Teilsicherheitsbeiwert der nach dem Versuch zusätzlichen ständigen Einwirkungen gemäß Tab. 3.5
- $\gamma_{Q,1}; \gamma_{Q,i}$ Teilsicherheitsbeiwerte der veränderlichen Einwirkungen gemäß Tab. 3.5
- $\psi_{0,i}$ Kombinationswert der veränderlichen Einwirkungen
- γ_M Teilsicherheitsbeiwert des Materials (Tragwerkswiderstand)

Art des Belastungsversuches	Abkürzung	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Beim Versuch vorhandene ständige Einwirkungen	$\gamma_{G,1}$	1,35	1,15 ^a	1 bis 1,15	1
Nach dem Versuch aufzubringende ständige Einwirkungen	$\gamma_{G,1}$	1,35	1,15 ^a	1,35	0
Veränderliche Einwirkungen	$\gamma_{Q,1}, \gamma_{Q,i}$	1,30 ^a	1,30 ^a	1,50	1
Widerstandsfaktor Tragwerk, materialabhängig	γ_M	$\gamma_M \cdot CF$	$\gamma_{M,red} \cdot CF$	1	1

^a Die angegebenen Teilsicherheitsbeiwerte enthalten keinen Anteil der Modellunsicherheit gem. ÖNOMR EN 1990: 2013, Tabelle A.1.2(B)

Tab. 3.5 – Teilsicherheitsfaktoren zur Bestimmung der Versuchsgrenzlast [34, p. 19]

Sowohl γ_M als auch $\gamma_{M,red}$ stellen Teilsicherheitsfaktoren (Teilsicherheitsbeiwerte) für das Material dar und sind für den Tragwerkswiderstand bei KL 3 anzuwenden. Für Mauerwerk ist der

Faktor γ_M mit 2,00 bis 2,50 gemäß ÖNORM B 1996-1-1 festgelegt. Der Faktor $\gamma_{M,red}$ liegt zwischen 1,80 und 2,20, wobei dieser Faktor keinen Anteil γ_{Rd} der Unsicherheit des Widerstandsmodells von $\gamma_{Rd} = 1,10$ enthält. [34, p. 19]

Eine gute Übersicht der experimentellen Tragsicherheitsnachweise ist in Abb. 3.5 dargestellt. Deutlich ersichtlich ist hier, dass die Versuchsgrenzlaster unterhalb der Bruchlast liegt, um die weitere Nutzung des geprüften Bauwerks gewährleisten zu können. „In der deutlichen Mehrzahl aller praktischen Fälle wird die mögliche Schädigungsgrenze [...] F_{lim} nicht ausgenutzt, weil die Versuchszielast einschließlich aller Sicherheitsanteile geringer ist“ [44, p. 248].

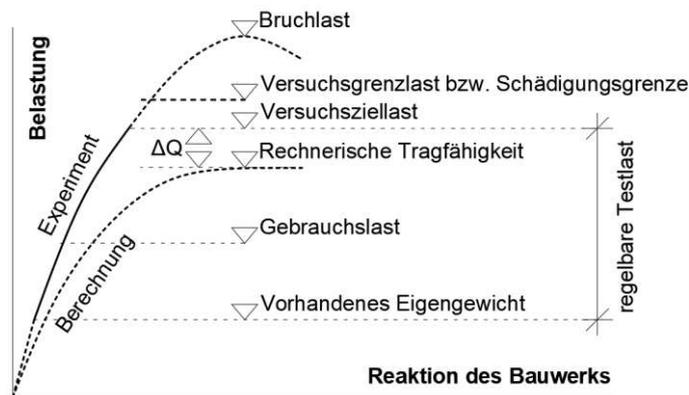


Abb. 3.5 – Prinzip experimenteller Tragsicherheitsnachweise, adaptiert nach [44, p. 247]

Der durch den Kurzzeit-Belastungsversuch observierte Widerstand F_{lim} ist unter der Berücksichtigung aller im Nutzungszeitraum möglichen Widerstandsminderungen weiter zu reduzieren. Dadurch ergibt sich der verbleibende, nutzbare Zuwachs des Bemessungswertes der veränderlichen Einwirkung ΔQ_d . Dieser weist eine Abhängigkeit zu rechnerisch nicht erfassbaren Systemreserven, dem Zustand des Bauwerkes bzw. dessen Schädigungsgrad sowie zur Ausführungsqualität auf. Aufgrund der realen Erfassung der Bauteilwiderstände können die Teilsicherheitsbeiwerte anhand von Tab. 3.5 abgemindert werden, wodurch sich Zuwächse in der ausnutzbaren Einwirkung ergeben. [44, p. 247 f.] Die Bruchlast des Bauteils kann somit nur erreicht werden, indem die Versuchszielast die Versuchsgrenzlaster überschreitet und bei weiterer Steigerung ein Versagen im Bauteil durch Erreichen des Tragwerkswiderstandes hervorruft.

3.3.2.2 Verfahren mittels Klemmbalken

Eine dem Flat-Jack-Verfahren ähnliche Methode wurde entwickelt, um keine Schlitzlöcher für die Druckpolster einbringen zu müssen. Dadurch eignet sich dieses Verfahren besonders für die

in-situ Prüfung der Druckfestigkeit von maximal zweischaligen¹⁹ (!) Mauerwerken aus Natursteinen, wobei jedoch eine Zugänglichkeit auf beiden Seiten des Mauerwerks gegeben sein muss. In Abb. 3.6 ist ersichtlich, wie die Prüfungseinrichtung montiert ist.

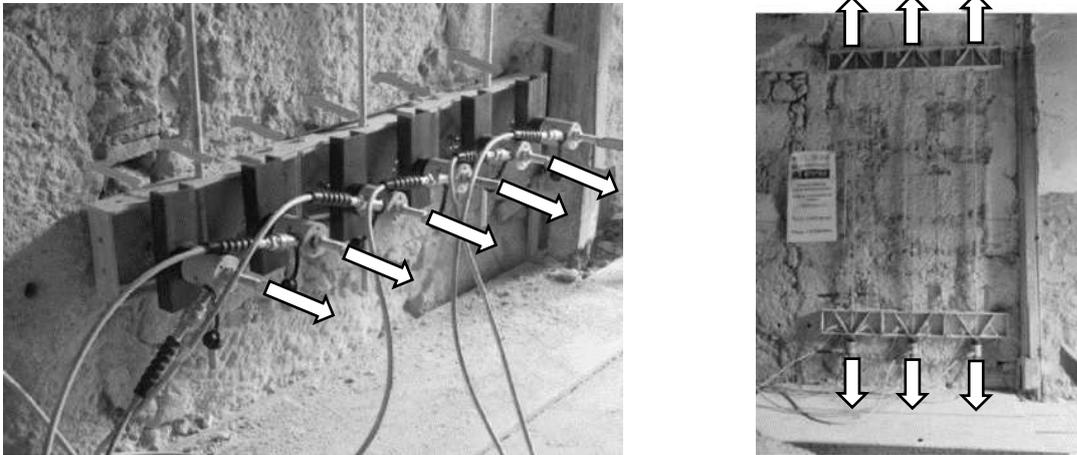


Abb. 3.6 – Anordnung der horizontalen Klemmbalken, adaptiert nach [45, p. 743]

Nachfolgend werden die Arbeitsschritte des Versuchsaufbaues erläutert:

- Durchbohren des Mauerwerks (sechs Bohrlöcher je Klemmbalken)
- Einfädeln der vorzuspannenden horizontalen Gewindestangen durch die Bohrlöcher
- Beidseitiges Aufbringen des Klemmbalkens, sowohl unten als auch oben am Mauerwerk
- Gleichzeitig werden die vorzuspannenden vertikalen Gewindestangen in die Klemmbalken eingefädelt
- Vorspannen der horizontalen Gewindestangen, wodurch die Klemmbalken durch Druck an das Mauerwerk fixiert werden und eine hohe Reibung erzeugen (Pfeile Richtung rechts, Abb. 3.6, links)
- Anspannen der vertikalen Gewindestangen, wodurch das Mauerwerk zwischen den Klemmbalken zusammengedrückt wird (nach Außen weiße Pfeile, Abb. 3.6, rechts)

Ab dem Vorgang des Anspannens der vertikalen Gewindestangen gleicht dieses Verfahren dem Flat-Jack-Verfahren und kann in [45] eingesehen werden.

3.3.2.3 Verfahren mittels Druckschläuchen

Um bei Mauerwerken aus Naturstein, welche nur einseitig begehbar sind, ebenfalls Prüfungen in Bezug auf die Mauerwerksdruckfestigkeit durchführen zu können, wird das Tube-Jack-Verfahren vorgeschlagen. Hierfür werden Bohrlöcher mit einem Durchmesser von etwas mehr als 20 mm in die Mörtelfugen gebohrt, um in diese Druckschläuche einführen zu können. Diese wiederum werden mittels Hydraulikschläuchen verbunden und an eine Presse angeschlossen,

¹⁹ Eine horizontale Kompression (Klemmbalken) der äußeren Schalen auf die meist niedrigfeste Zwischenschicht mehrschaligen Mauerwerks hätte irreversible Folgen für das getestete Mauerwerk.

wie in Abb. 3.7 ersichtlich ist. Ober- und unterhalb der Bohrlöcher werden Messgeräte zur Aufzeichnung der Verformung wie in gewohnter Weise angebracht. [46, p. 1251]

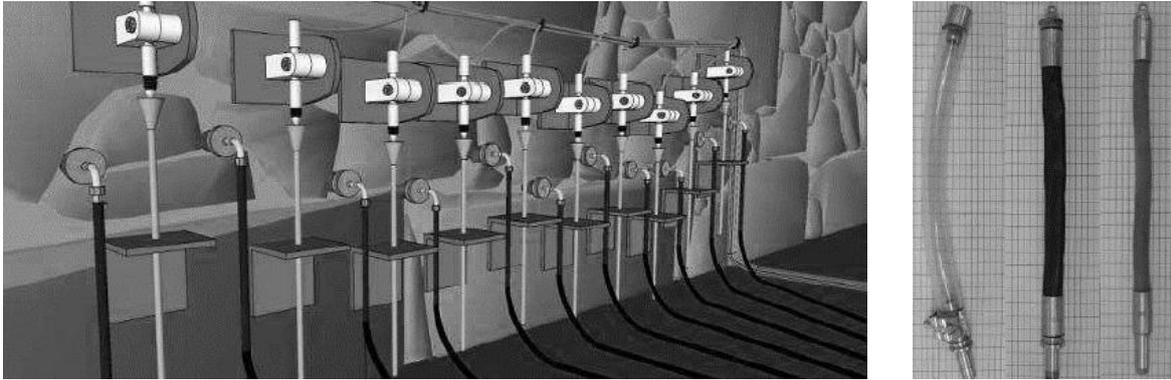


Abb. 3.7 – Anordnung der roten Tube – Jacks (links) sowie deren Gestalt (rechts) [46, p. 1251]

3.3.2.4 Diagonaler Kompressionsversuch

Da für die experimentelle Untersuchung der Schubfestigkeit von Mauerwerken kein genormtes Verfahren besteht, wird das vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) verwendete Verfahren herangezogen. Eine quadratische Mauerwerksscheibe (Seitenlänge= 250 cm, Dicke analog der Steinbreite, Abb. 3.8, links) wird durch die Einleitung einer Diagonalkraft (Frühestens 7 d nach Fertigstellung der Mauerwerksscheibe) auf Schub beansprucht. Zusätzlich kann eine Auflast senkrecht zur Lagerfuge aufgebracht werden. Die aufgebrachte Diagonalkraft ist in ca. zehn Laststufen bis zum Versagen der Mauerwerksscheibe zu steigern, wobei die Verweildauer der einzelnen Laststufen etwa 90 Sekunden zu betragen hat. Die maximal erreichte Schubspannung τ_{\max} ($\cong f_{vk}$) ergibt sich nach Gleichung (3.17); hierbei ist A die Aufstandsfläche (Produkt aus Wanddicke und 2,5 m) und S die diagonal aufgebrachte Schubbruchkraft. Es wird jedoch eingeräumt, dass dieses Verfahren weder eine gleichmäßige Schubspannungsbeanspruchung hervorruft noch eine realitätsnahe Beanspruchung erzeugt. [47, p. 180 f.]

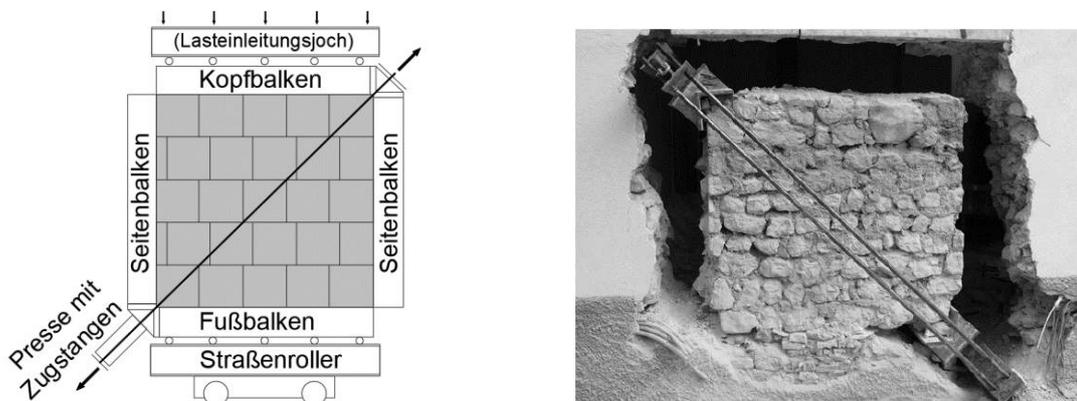


Abb. 3.8 – Prüfverfahren: links nach DIBt an keramischen Mauersteinen, adaptiert nach [47, p. 180], sowie rechts in-situ an Mauersteinen aus Naturstein [48, p. 4408]

$$\tau_{max} = \frac{S}{A \cdot \sqrt{2}} \quad (3.17)$$

Bei Versuchen an einschaligem Natursteinmauerwerk nach Borri et al. [48] wurden in-situ Prüfverfahren angewandt und an einem abzureisenden Bauwerk durchgeführt. Eine in-situ Prüfung zur Bestimmung der Schubtragfähigkeit eines Mauerwerks wie in Abb. 3.8, rechts kann nur als eine zerstörende Prüfung durchgeführt werden. Daher bieten sich im Bauwerk jene Stellen an, welche etwa einem Wanddurchbruch unterzogen werden.

Unter anderen internationalen Verfahren (z. B. Monk, Vogt, ESECMaSE [47, p. 182]) stellt jenes des Zweifeld-Schubversuches ein minder zerstörendes dar und ist in [7, p. 42] anschaulich dargestellt. Weiters gibt es bereits Ansätze, einen Flat-Jack-Versuch diagonal (um 45° geneigt zu den Lagerfugen) anzuordnen und so die Schubfestigkeit eines Ziegelmauerwerks zu ermitteln [49].

3.3.2.5 Scher-Kompressionsversuch

Um in-situ auch die Haftscherfestigkeit ermitteln zu können, eignet sich der Scher-Kompressionsversuch, wie in Abb. 3.9 dargestellt. Hierbei wird sowohl vertikal als auch horizontal eine Belastung auf das ausgestemmte Mauerwerk aufgebracht. Der Versuchsaufbau ähnelt dem Typ 1, Verfahren A nach ÖN EN 1052-3 zur Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit von Mauerwerken, wobei hier allerdings das Versagen nur in einer Fuge eintritt, wie in Gleichung (3.18) entsprechend dargestellt. Der Grund dafür ist, dass kein exakt symmetrisches Versagen (am oberen und unteren Auflager) infolge von Abscheren auftreten kann. Durch Einsetzen der aus dem Versuch erhaltenen Bruchkräfte und Bruchspannungen lässt sich die Haftscherfestigkeit nach Gleichung (3.19) ermitteln.

$$\tau_u = \frac{T_{iu}}{A} \quad (3.18)$$

$$\tau_k = \frac{0,5 \cdot \left(\sqrt{\sigma_0^2 + 4 \cdot b^2 \cdot \tau_u^2} - \sigma_0 \right)}{b} \quad (3.19)$$

τ_u	Entspricht der char. Schubfestigkeit nach [50, p. 466]
T_{iu}	Horizontal eingeleitete Zugkraft
τ_k	Entspricht der char. Haftscherfestigkeit, umgeformt nach [51, p. 4]
σ_0	Vertikal aufgebrauchte Druckspannung
b	Geometrischer Faktor zwischen 1,0 und 1,5; i. A. jedoch 1,5 [51, p. 2]

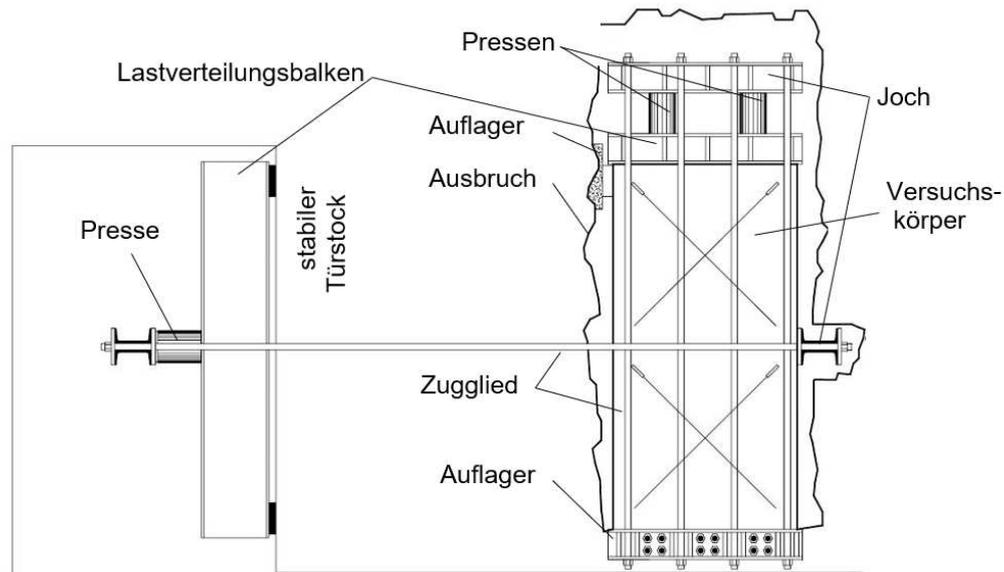


Abb. 3.9 – Bestandteile des Scher-Kompressionsversuchs, adaptiert nach [50, p. 466]

3.3.2.6 Bohrwiderstandsmessung

Die Bohrwiderstandsmessung wird als direktes Prüfverfahren angesehen und eignet sich für die Ermittlung der Druckfestigkeit von Natursteinen, stellt also eine Komponentenprüfung dar. Der gestieftiefenabhängige Widerstand beim Bohren eines vorgegebenen Durchmessers (z. B. 3 mm für Sandsteine) wird während des Bohrvorganges unter konstanter Andrucklast sowie Leistung gemessen. Der Bohrfortschritt wird in Abhängigkeit der Gesteinstiefe und des aufgetragten Vorschubdruckes festgehalten und als Funktion der Zeit auf einem Schreibstreifen aufgezeichnet. Der Vorschubdruck wird über Gewichte (1 kg bis 3 kg) aufgebracht und ist abhängig von der Gesteinsart. Der Bohrwiderstand ergibt sich nach Gleichung (3.20) und sollte mit einem Hartmetall- oder Diamantbohrer durchgeführt werden (Verschleiß des Bohrers ist zu beachten!). Ziel ist eine Korrelation zwischen Bohrparametern und der Festigkeit des Materials. Einen wichtigen Einfluss stellt die Förderung des Bohrmehls dar, da sich dieses bei hohem Feuchtegehalt des zu untersuchenden Materials in der Wendel des Bohrers verkleben kann und somit den Bohrwiderstand erhöht. [52, p. 19 f.] Dieses zerstörende Verfahren kann also einer Komponentenprüfung zugeordnet werden und ist von einer Mauerwerksseite aus durchführbar. Auch kann in Kombination dazu eine Bohrmehlentnahme erfolgen.

$$\text{Bohrwiderstand [-]} = \frac{\text{Papiervorschub [cm]}}{\text{Änderung der Bohrtiefe [cm]}} \quad (3.20)$$

3.3.2.7 Endoskopie

Hierbei wird ein starres oder flexibles Stahlrohr, welches in sich eingebettete lichtleitende Glasfaserbündel aufweist, in vorher herzustellende Bohrlöcher oder bereits vorhandene Schlitze

eingeführt und ggf. bewegt. Der Innenraum wird mit einem Okular aufgenommen sowie in weiterer Folge digital verarbeitet und gespeichert. [52, p. 18] Dieses Verfahren ist also aufgrund des Bohrvorganges ein direktes und kann von einer Mauerwerksseite aus als Flächen- oder Punktuntersuchung durchgeführt werden. Ein Vergleich der Aufnahmen vor bzw. nach der Verfestigung ist hier anzustreben. Auch kann in Kombination dazu eine Bohrmehlentnahme durchgeführt werden, um einen Vergleich nach der Verfestigungsmaßnahme auszuführen.

3.3.3 Indirekte Prüfungsmethoden

Empfohlen wird, ein Raster über das zu untersuchende Mauerwerk zu legen, um Fehlstellen genau zuordnen zu können. Zudem gestaltet sich der Vergleich auf Ansichtsplänen vor und nach der Verfestigungsmaßnahme dadurch wesentlich einfacher. Das Raster kann jedoch entfallen, wenn die verwendeten Gerätschaften und Auswertungsprogramme bereits eine integrierte Aufzeichnungsfunktion besitzen. Jedoch sollte ein markanter Fixpunkt gesetzt werden, an dem sich sowohl das Raster als auch die vom Personal verwendeten Gerätschaften orientieren und ausrichten.

Hinsichtlich Dokumentation schlägt Patitz [8, p. 39] folgende Punkte vor:

- Kurze Beschreibung der Verfahren
- Position und Tiefenlage der Ergebnisse
- Verwendete Mess- und Auswertparameter
- Angabe möglicher Fehlerquellen und deren Ursachen

3.3.3.1 Ultraschall und Mikroseismik

Grundlegendes

Durch Anregung (z. B. durch einen Hammer \triangleq Sender) und Ausbreitung mechanischer Wellen wird eine Beurteilung von Materialeigenschaften möglich. Die Fortpflanzung von Raumwellen im untersuchten Medium hängt von mechanischen Eigenschaften (Rohdichte, Druckfestigkeit) ab. Auch eine Abhängigkeit von Abmessungen, Porosität und Zusammensetzung der geprüften Mauerwerke ist gegeben. Hingegen ist eine geringe Abhängigkeit zum Feuchte- und Salzgehalt des Prüfmediums vorhanden. Der Frequenzbereich der Ultraschallmethode liegt bei begrenzter Reichweite (50 cm) zwischen 20 kHz und 1 MHz, wohingegen der Frequenzbereich der Mikroseismik bei nahezu unbegrenzter Reichweite zwischen 1 kHz und 10 kHz liegt. Das Prinzip der kurzen Wege wird der Ausbreitung von elastischen Wellen zugrunde gelegt, wobei sich die Wellen nicht über Materiallücken ausbreiten, sondern einen Umweg zwischen Sender und Empfänger (z. B. Oszilloskop) gehen. Daraus lassen sich erhöhte Scheingeschwindigkeiten ermitteln und in weiterer Folge vorhandene Risse und Hohlräume ableiten. Anhand von ermittelten Wellengeschwindigkeiten (z. B. festes Gestein oder Ziegel ab

2000 m/s) werden nach erfolgter Kalibrierung die Festigkeiten ermittelt. Die Grenzen des Ultraschallverfahrens sind bei vorhandenen Schalenablösungen erreicht, da sich mechanische Wellen nicht darüber ausbreiten können. In so einem Fall werden meist Radarverfahren (Kapitel 3.3.3.2) zur Anwendung gebracht, welche jedoch keine Aufschlüsse zur Materialfestigkeit bringen. Im Gegensatz dazu kann auf seismische Verfahren zur Ermittlung von Materialeigenschaften zurückgegriffen werden. Hinsichtlich der Anordnung von Messgeräten hat sich zur Untersuchung von Mauerwerken die Transmissionsanordnung bewährt, wobei diese in Durchschallungsanordnung (für beidseitige Zugänglichkeit bei bekannter Bauteildicke) und Profilierungsanordnung (für einseitige Zugänglichkeit) unterteilen lässt. Der Untersuchungsaufwand bei der Profilierungsanordnung ist aufgrund des Erfordernisses von mehreren Empfängern entlang einer Linie am Mauerwerk ungleich höher als bei der Durchschallungsanordnung. Das Vorhandensein eines Bohrloches infolge Bohrkernentnahme kann für die Anwendung von Down-hole-Seismik bzw. Cross-hole-Seismik (Abb. 3.10) für genauere, ergänzende Untersuchungen herangezogen werden. [8, p. 53 ff.]

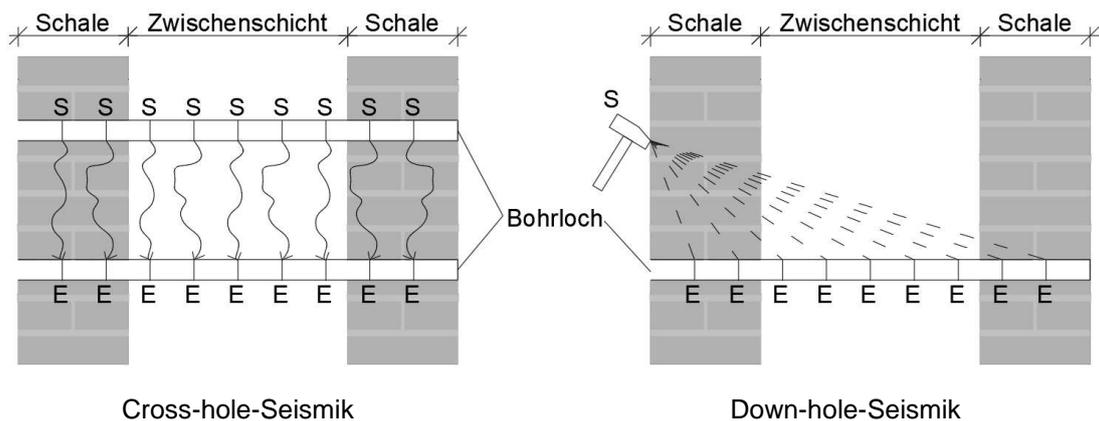


Abb. 3.10 – Durchführung zerstörungsfreier seismischer Verfahren mittels Sender (S) und Empfängern (E), adaptiert nach [35, p. 558 f.]

Bei der Untersuchung großer Flächen gestaltet sich die Methode des Ultraschalls zeitaufwändig, da eine Vielzahl von Messstellen erforderlich ist und daher einen nicht vertretbaren arbeitstechnischen und wirtschaftlichen Aufwand bedeutet. Empfohlen wird, zuerst Radarverfahren anzuwenden und Ultraschall bzw. Seismische Untersuchungen als Ergänzung einzusetzen. Als vorteilhaft erweist sich jedoch die schnelle Auswertung (vor Ort) sowie eine hohe Flexibilität im Vergleich zum Radarverfahren. [8, p. 67 f.]

Beurteilung von Mehrschaligkeit sowie der Qualität von Zwischenschichten

Eine kombinierte Anwendung von Transmissions- und Profilierungsanordnung kann zur Ermittlung von Mehrschaligkeit angewendet werden [8, p. 57]. Bezüglich der Druckfestigkeit der Zwischenschichten wird nach geschütteten (bestehend aus Bindemittel und Zuschlägen) und

geschichteten Innenfüllungen unterschieden. In Abhängigkeit der Art und des Anteils von Bindemitteln sowie von der Art, Größe und Kornverteilung der Zuschläge kann unter Verwendung der Wellengeschwindigkeit ein Vergleich zu Beton hergestellt werden. Daraus lässt sich wiederum die Druckfestigkeit der geschütteten Zwischenschicht ableiten. Der wesentliche Unterschied zur Untersuchung von Betontragwerken besteht hierbei in der Verwendung von niedrigen seismischen Frequenzen. [8, p. 63 f.]

Tomographie

Hiermit werden Schichtenaufnahmen vom Inneren eines Bauteils gefertigt, woraus sich ein Grundriss oder ein Schnitt über eine Messfläche erstellen lässt. Neben diesen zweidimensionalen Ergebnissen lassen sich auch bereits dreidimensionale Ergebnisse erzeugen (vgl. [53]), wobei hierfür eine mehrfache Durchstrahlungsmessung der Messebenen erfolgt. Diese können über verschiedene Winkel und verschiedene Höhen angeordnet werden. Jedem Ort werden gemessene physikalische oder chemische Kenngrößen zugeordnet. Mithilfe von Rechenprogrammen und darin enthaltenen Isolinien werden Punkte mit gleichen Eigenschaften verbunden und einer Farbcodierung unterzogen. Hinsichtlich Zugänglichkeit können vorhandene Bohrlöcher genutzt werden, ansonsten wird allseitiger Zugang vorausgesetzt. [8, p. 61 f.]

3.3.3.2 Radar

Das Radio Detection and Ranging Verfahren bezeichnet Erkundungs- sowie Ortungsverfahren und beruht auf der Aussendung (und dem Empfang) von elektromagnetischen Wellen im Mikrowellenfrequenzbereich (0,5 GHz bis 2 GHz). Das Messgerät wird an der Oberfläche des Mauerwerks angesetzt und darauffolgend werden ausgehend davon kurze elektromagnetische Impulse in das dahinterliegende Medium abgestrahlt. Reflektionen, Beugungen, Brechungen, Streuungen oder Absorptionen können durch sprunghafte Änderungen der elektrischen Eigenschaften hervorgerufen werden. Demzufolge wird das Radar zur Ermittlung von Hohlräumen und zur Bestimmung der Morphologie des Mauerwerks eingesetzt. Eine Anordnung des Messgerätes kann entweder reflektierte oder transmittierte Wellen (Abb. 3.11, rechts) empfangen, wobei die Laufzeiten und Amplituden der elektrischen Feldstärke aufgezeichnet werden. [54, p. 20 f.]

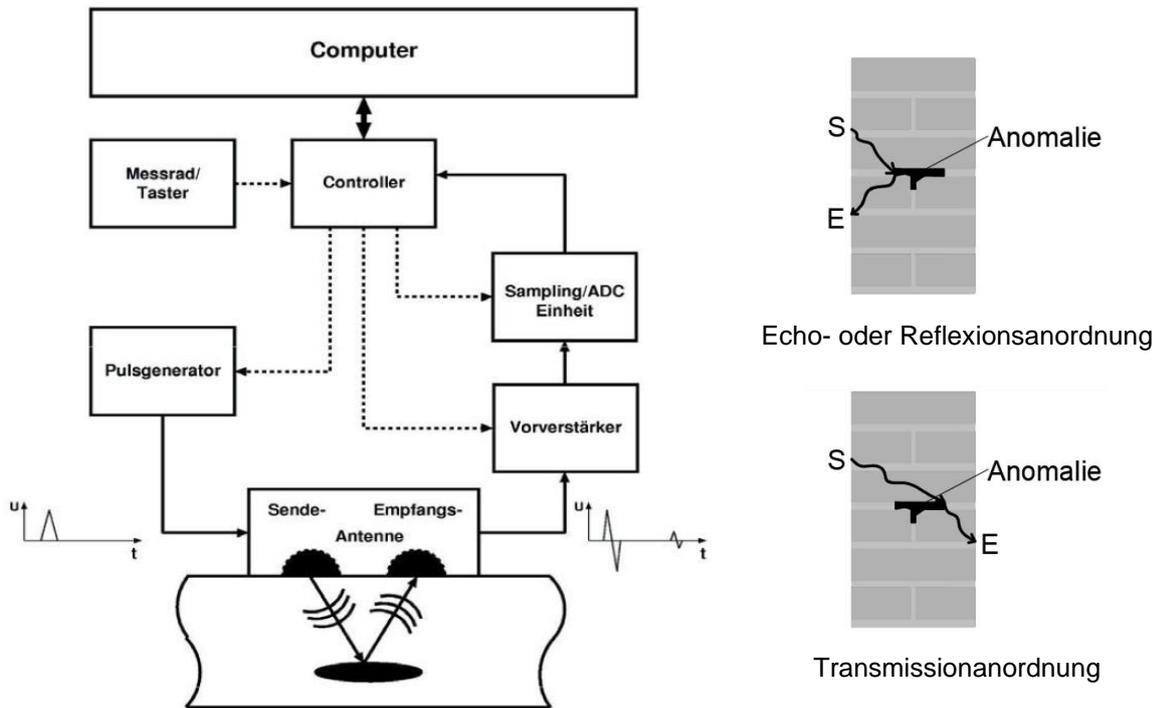


Abb. 3.11 – Links: Versuchsaufbau einer Radarmessung, sowie rechts: Anordnungsmöglichkeiten am Querschnitt von Sender (S) und Empfänger (E), adaptiert nach [54, p. 22 f.]

Da jedes Material durch seine eigene Dielektrizitätszahl ϵ ($\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$)²⁰ gekennzeichnet ist, können Materialgrenzen durch diese Methode bestimmt werden. Wenn Hohlräume innerhalb des Mauerwerks verfüllt werden, ändert sich der Reflexionskoeffizient R , welcher in Gleichung (3.21) dargestellt ist. Ein durchgeführter Versuch von Uranjek et al. [55, p. 868] zeigt etwa eine Veränderung des Reflexionskoeffizienten von vor der Injektion (zwischen -0,1 und 0,1) zu nach der Injektion (zwischen -0,5 und 0,5). Die geringeren berechneten Differenzen (von 0,2 auf 0,1) sind der Injektion des Mauerwerks geschuldet, welche grafisch in Abb. 3.12 durch die verschwommenen (after) Darstellungen abgebildet sind. [55, p. 868] Ob die Zugänglichkeit zum Mauerwerk nur von einer Seite gewährleistet ist, spielt bei diesem indirekten Verfahren keine Rolle, da der Empfänger auf beiden Seiten angebracht werden kann. Jedoch kann unter der Transmissionsanordnung (Abb. 3.13, rechts unten) eine räumliche Strukturanalyse, wie eine Tomographie mit hochgradiger Überdeckung, durchgeführt werden. Es bietet sich sowohl eine Punktuelle als auch eine vollflächige Untersuchung des Mauerwerks an, wobei ein hoher Anteil an gelösten Salzen die Messergebnisse erheblich beeinflussen kann. Die Durchführung in einer Messrichtung (entweder vertikal oder horizontal) hat sich als ausreichend herausgestellt, wobei Profilabstände ≤ 30 cm für den Erhalt genauerer Informationen herangezogen werden. Eine ebene Oberfläche führt zu genaueren Messergebnissen, da das Messgerät kontinuierlich und ohne Verkantungen darauf bewegt werden kann. Bei der Untersuchung alter

²⁰ $\epsilon_{\text{Luft}} = 1$; $\epsilon_{\text{Minerale}} = 4$ bis 8, wird jedoch maßgeblich vom Feuchtegehalt beeinflusst [8, p. 43].

Mauerwerke werden die Grenzen der Reichweite von Messgeräten kaum erreicht. Sollten besonders starke Mauern untersucht werden, so bieten sich dafür hochauflösende Geräte und eine Messanordnung von zwei Seiten an. [8, p. 37 ff.]

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_2} - \sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{\varepsilon_2} + \sqrt{\varepsilon_1}} \quad (3.21)$$

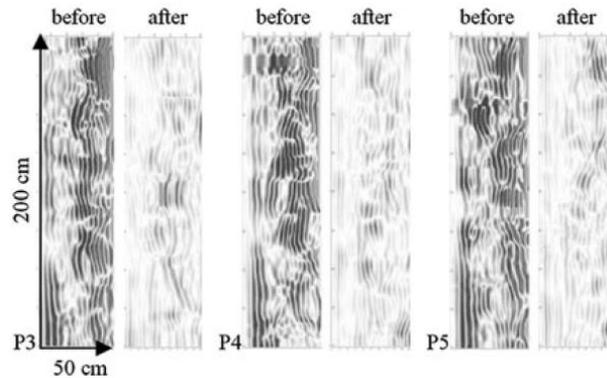


Abb. 3.12 – Vertikale Tiefenschnitte vor (before) und 180 Tage nach (after) der Injektion [55, p. 868]

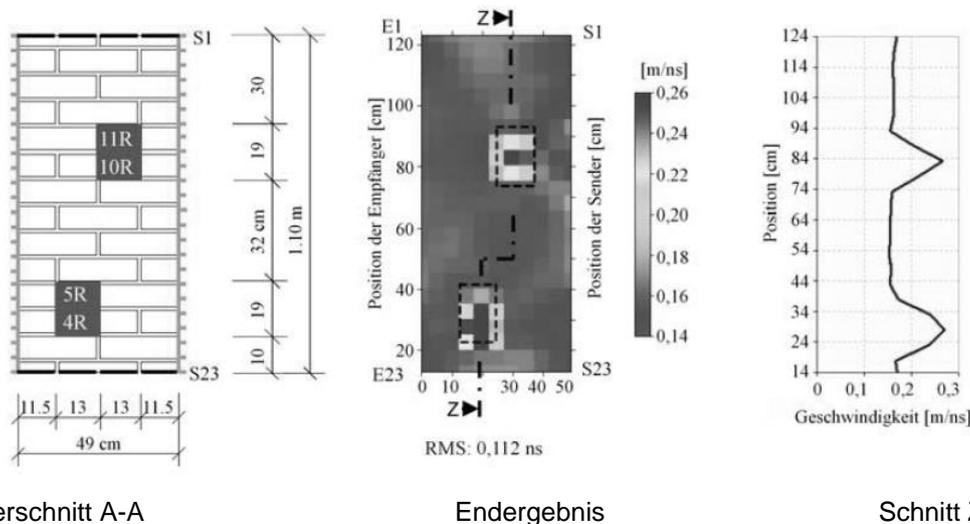


Abb. 3.13 – Ausgangssituation (links) sowie Endergebnis (Mitte) und Geschwindigkeitsprofil (rechts) der Radarmessung [54, p. 78]

Nach einer von Wendrich [54, p. 78] durchgeführten Untersuchung entlang der Höhe des Mauerwerks mit eingebauten Hohlräumen (Querschnitt A-A, blau) ergibt sich unter der Transmissions-Anordnung ein Plot, wie in Abb. 3.13, Mitte, dargestellt. Erkennbar ist eine höhere Geschwindigkeit entlang der Hohlräume. Die unterschiedlich dargestellten Untersuchungsergebnisse in Abb. 3.13, Mitte und in Abb. 3.12 sind vermutlich auf die Verwendung unterschiedlicher Gerätschaften und Auswertungsprogramme zurückzuführen.

Abschließend führt Patitz [8, p. 31] eine zusätzliche Auswahl an Einsatzgebieten des Radarverfahrens an. Es können Ermittlungen folgender Punkte durchgeführt werden:

- Feuchte- und Versalzungszustand
- Metallische Verbindungsmittel
- Verzahnung von Steinen in das angrenzende Mauerwerk
- Bauteildicken

3.3.3.3 Widerstandselektrik

Beim indirekten Verfahren des Electrical Resistivity Tomography (ERT) wird Strom durch Kontaktelektroden in das zu untersuchende Mauerwerk geleitet, wodurch sich ein elektrisches Gleichstromfeld bildet. Mit weiteren Kontaktelektroden wird das elektrische Potenzial in der unmittelbaren Umgebung gemessen; es erfolgt eine Aufzeichnung und Speicherung durch externe Gerätschaften. Eine Verzerrung des Potenzialfeldes tritt nur dann ein, wenn auch eine Inhomogenität im untersuchten Medium auftritt, was wiederum eine Spannungsänderung zwischen den zwei Potenzialsonden zur Folge hat. Maßgebliche Beeinflussung ist durch den Feuchtegehalt und durch die Konzentration an gelösten Salzen gegeben [16, p. 12]. In Abb. 3.14 ist ersichtlich, wie der Versuchsaufbau erfolgt: Der Abstand a wird (hier) mit 10 cm festgelegt, S stellt zwei Elektroden dar, welche die Stromzufuhr (I) gewährleisten, und P stellt zwei Sonden zur Potenzialmessung dar. Mit dieser Konfiguration können Inhomogenitäten bis in eine Tiefe von etwa 15 cm festgestellt werden. [56, p. 46] Es existieren jedoch bereits Ansätze, welche bis zu einer Tiefe von 0,6 m reichen, wie in Abb. 3.15 ersichtlich ist.

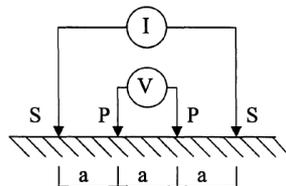


Abb. 3.14 – Schema des Versuchsaufbaus nah der Wenner Konfiguration [56, p. 47]

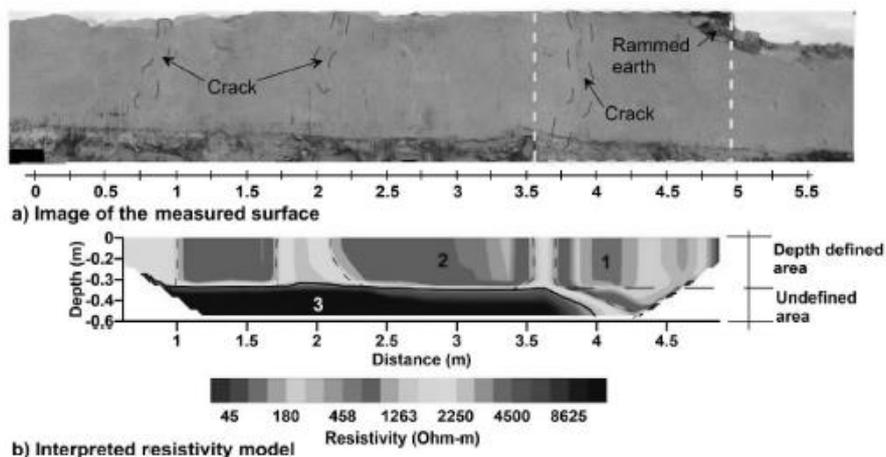


Abb. 3.15 – Bestandsmauerwerk (a) sowie Versuchsergebnisse im Horizontalschnitt (b) [57, p. 648]

Bevor eine verfestigende Maßnahme an einem Mauerwerk durchgeführt wird, sollte eine großflächige geoelektrische Messung durchgeführt werden. Ein Vergleich, dargestellt auf einem Plot, mit den Ergebnissen nach der Verfestigung bringt einen guten Aufschluss über den Erfolg der Maßnahme, wie in Abb. 3.16 ersichtlich ist. Die dunklen Einfärbungen stellen die Hohlräume im Mauerwerk dar. Leicht erkennbar ist hier, dass der lange vertikale Riss in der Mitte des Mauerwerks durch die Injektionsmaßnahme weitestgehend geschlossen wurde. Der nicht injizierte Riss am Fuße des Mauerwerks bleibt hingegen klar erkenntlich und ist weiterhin dunkel eingefärbt. Grundsätzlich entscheidet die Wirkungstiefe des angewendeten Verfahrens darüber, ob ein Mauerwerk von beiden Seiten aus zugänglich sein muss oder nicht.

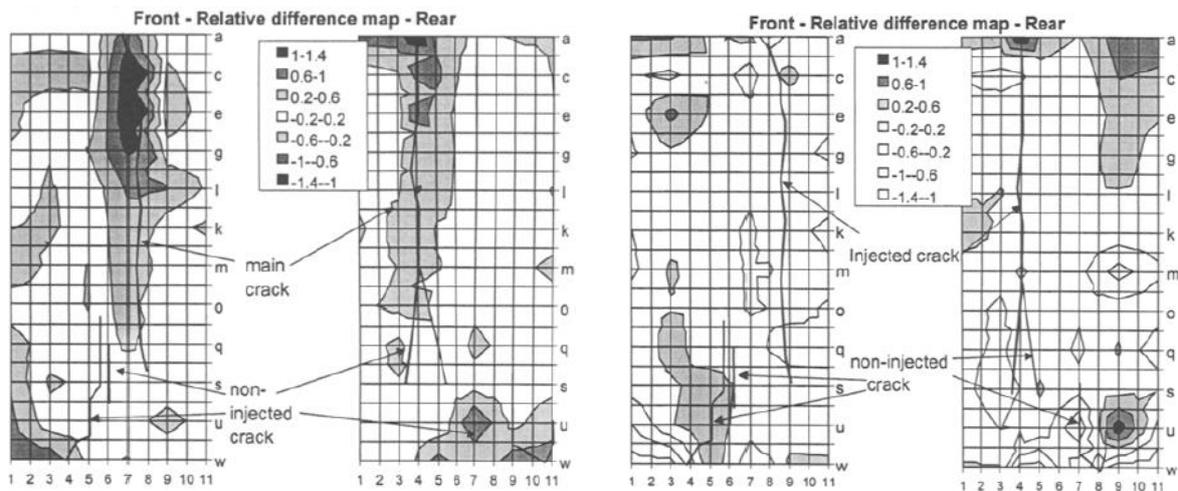


Abb. 3.16 – Versuchsergebnisse vor (links) und nach (rechts) der Injektion [56, p. 49]

3.3.4 Zusammenfassung

Vorgestellt wurde die Versuchsgrenzlasterlast, welche erforderlich ist, wenn Bauwerke im Bestand geprüft werden sollen, ohne bleibende Schäden zu verursachen. Darauf folgend wurde eine Auswahl an direkten Prüfungsmethoden angeführt, welche die Bausubstanz mehr oder weniger schädigen. Manche Methoden davon werden standardmäßig zur Untersuchung sanierbedürftigen Substanzen herangezogen. So kann eine einfache visuelle Prüfung im Inneren des Mauerwerks durch Bohrungen und anschließende visuelle Betrachtung durch die Endoskopie erfolgen. Andererseits sind auch indirekte Methoden angeführt, wobei das flächendeckend anwendbare Radarverfahren im Gegensatz zu den Methoden mittels Ultraschall oder Tomographie eine eher breite Anwendung findet. Eine ausführliche Zusammenstellung der einzelnen Untersuchungsmethoden ist im Anhang auf Seite 78 (Tab. 7.1) ersichtlich. Zu beachten ist auch die Tatsache, dass in den meisten Fällen (in Österreich) auf die Anwendung von physikalischen Untersuchungsmethoden zur Zustandsbewertung von Ziegelmauerwerken verzichtet wird [21]. Ein Grund dafür dürfte sein, dass physikalische Untersuchungen ihre Anwendung eher im Bereich der Ertüchtigung von Natursteinmauerwerken finden.

4 Verfestigtes Mauerwerk – Tragfähigkeitsbewertung

4.1 Baubegleitende Überwachung

4.1.1 Dokumentation der Ausführung

„Unabhängig von der Überwachungsstufe ist es empfohlen, Maßnahmen zur Mauerwerksverfestigung mit einer vollständigen Ausführungsdokumentation zu kontrollieren und mit Materialuntersuchungen nach Kenntnisstand 3 zu überprüfen“ [37, p. 26].

Die Ausführungsdokumentation ist laut Richtlinie Injektionstechnik Teil 2: Mauerwerk [11, p. 28 f.] einzuteilen in drei Arten, wobei jede davon u. a. folgende Bestandteile enthält:

- Allgemeine Dokumentation: Vom ausführenden Unternehmen zu führen und enthält u. a. das Injektionsprotokoll (Anhang 1 in [11]), Kontroll- und Gewährleistungsflächenprotokoll, Bautagesberichte in überprüfbarer Form
- Spezielle Dokumentation: Vom Planer vorzugeben und enthält u. a. die Fotodokumentation, elektronische Druck- und Mengenaufzeichnung sowie die Wirksamkeitskontrolle (z. B. Vollständigkeit der Verfüllung, Prüfung Bohrkerne)
- Abschlussbericht, welcher alle Dokumente enthält und die Prüfungsergebnisse der Anwendung zusammenfassend darstellt

In besonderem Maß ist auf die Dokumentation nachfolgender Punkte [24, p. 124] Wert zu legen:

- | | |
|--|--|
| ▪ Witterungsverhältnisse sowie minimale und maximale Temperaturen | ▪ Lieferscheine der Injektionsstoffe |
| ▪ Zeitaufwand je Verfestigungsabschnitt | ▪ Überprüfung der Bohrlochraster |
| ▪ Injektionsstoffe sowie deren Verbrauch je Verfestigungsabschnitt | ▪ Injektionsdruck- sowie Menge je Verfestigungsabschnitt |

Je nach vorgegebener Überwachungsstufe (IL) und Umfang der Dokumentation der Ausführung ergibt sich der Prüfungsumfang nach Kenntnisständen (KL). Werden diese mit den Zuverlässigkeits-Klassen (RC) aus ÖN B 1990-1 verknüpft, so ergibt sich die daraus resultierende Art der Überwachung. Zusammenfassend ist dies in Tab. 4.1 ersichtlich, wobei die Leserichtung von links nach rechts zu erfolgen hat. Liegt z. B. keine Ausführungsdokumentation bei einer vorgegebenen Überwachungsstufe IL3 vor, so hat der Prüfungsumfang an den verfestigten Materialien in einem anderthalbfachen Umfang von Kenntnisstand 3 zu erfolgen, wobei eine Eigenüberwachung ausreichend ist. Es kann also gesagt werden, dass umso ausführlicher die Ausführungsdokumentation angefertigt wird, umso geringer ist der Prüfungsaufwand. Die Kenntnisstände können Tab. 3.2 entnommen werden.

Vorgegebene Überwachungsstufe	Vollständigkeitsgrad der Ausführungsdokumentation und daraus resultierender Prüfungsumfang nach Kenntnisständen			Kombination von IL mit Zuverlässigkeitsklasse	Grad der Überwachung	Resultierende Art der Überwachung
	vollständig	teilweise/lückenhaft	ohne Vorlage			
IL1	KL1	KL2	KL3	RC1	normal	Fremdüberwachung
IL2	KL2	KL3	120 % von KL3	RC2	normal	Organisationseigene Überwachungsstelle
IL3	KL3	150 % von KL3		RC3	verstärkt	Eigenüberwachung

Tab. 4.1 – Überwachungsstufen für die Herstellung, adaptiert nach [37, p. 24] [24, p. 124]

4.1.2 Auswirkung der Verfestigung auf die Zuverlässigkeits-Klasse

Eine Verfestigung des Mauerwerks (bei konstanter Streuung) verringert entweder die Versagenswahrscheinlichkeit, oder sie erhöht den Zuverlässigkeitsindex der ÖNORM EN 1990 und hat somit Auswirkung auf die Zuverlässigkeits-Klasse. Auch kann eine Verringerung der Streuung der Festigkeitswerte eine Erhöhung des Zuverlässigkeitsindex bewirken. [22, p. 90]

4.1.3 Güte der Baustoffe

Neben einer ordnungsgemäßen Ausführungsdokumentation gemäß ÖNORM B 2110 sowie der Richtlinie für Injektionstechnik Teil 2 ist auch eine Überprüfung der Baustoffgüte erforderlich. Die Häufigkeit der Überprüfung von Baustoffen ist abhängig von der Qualität der Ausführungsdokumentation (Vollständig dokumentiert, teilweise lückenhaft dokumentiert und ohne Dokumentation) und essenziell für den Erhalt der durchzuführenden Überwachungsstufe (IL1 bis IL3). [37, p. 25 f]

Bei kraftschlüssigem Füllen ab einer Menge von 100 kg sind 100 ml je Komponente bzw. 500 g bei mineralischen Ausgangsmaterialien je Charge für zumindest ein Jahr zu lagern und als Rückstellprobe ausreichend zu kennzeichnen sowie im Injektionsprotokoll zu vermerken [11, p. 27].

4.2 Durchführbare Untersuchungen – Stand der Technik

4.2.1 Grundlagen

Nach durchgeführter Bestandserhebung (vgl. Kapitel 3) und Verfestigung des Mauerwerks ist i.d.R. eine Einzelüberprüfung an Bauteilen gemäß ÖNORM B 1996-3 Anhang G [37] erforderlich. Diese bezieht sich in erster Linie auf die statisch-konstruktive Verfestigung eines Mauerwerks mit organischen Harzen. Allerdings kann diese Vorgehensweise auch für andere als organische Materialien (z. B. mineralische Injektionsmaterialien) in analoger Weise angewendet und beurteilt werden. [37, p. 25]

Zur Erfüllung des Kenntnisstandes 3 (KL3) im Zuge der Ausführungsüberprüfung gilt gemäß ÖNORM B 1996-3 Anhang G [37, p. 26], dass pro angefangenen 50 m² Wandansichtsfläche und Mauerwerksart eine Prüfstelle vorliegen soll; bzw. muss mindestens eine Prüfserie (beinhaltet drei Prüfstellen) je Bestandsobjekt durchgeführt werden. Zur Erlangung des Kenntnisstandes 2 sind 50 % und zur Erlangung des Kenntnisstandes 1 sind 20 % des Umfanges von KL3 erforderlich. Eine Prüfserie besteht dabei aus zumindest drei Mauerwerksprüfkörpern nach Kapitel 3.2.5.3 (Zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Mauerwerken) sowie aus drei Fugenbohrkernen, bestehend aus jeweils drei Einzelprüfkörpern nach Kapitel 4.2.2.2. Um hinsichtlich nachstehend angeführter direkter und indirekter Prüfungsmethoden Verwechslungen auszuschließen, schafft Tab. 3.3 einen guten Überblick.

4.2.2 Direkte Prüfung

4.2.2.1 Mauerwerksprüfkörper

Die Entnahme der Prüfkörper hat gemäß ÖNORM EN 1052-1 [29] (Kapitel 3.2.5.3) zu erfolgen; hierbei gilt, dass mit organischen Harzen verfestigte Prüfkörper auch weniger als vier Lagerfugen aufweisen dürfen [37, p. 18]. Mittels Division des Mittelwertes einer Prüfserie durch den Wert von 1,2 wird die Wandfestigkeit f_k berechnet. Sollte jedoch der kleinste Einzelwert kleiner als die berechnete Wandfestigkeit f_k sein, so gilt dieser Einzelwert als Wandfestigkeit f_k . [37, p. 26]

4.2.2.2 Fugenbohrkern mit Einzelprüfkörper

Der Fugenbohrkern hat einen Durchmesser von etwa 120 mm aufzuweisen und zusätzlich muss seine Mittelachse entlang einer Lagerfuge verlaufen, in welcher kein Injektionskanal verläuft. Entlang der Lagerfuge sind zumindest drei Würfel (Einzelprüfkörper²¹) mit einer Kantenlänge von 80 mm zu schneiden und normal auf die Lagerfuge auf Druck zu prüfen. Sollten Wände eine Stärke von unter 30 cm aufweisen, so können zusätzliche Bohrkerne entnommen werden, um auf eine Anzahl von drei Einzelprüfkörper zu kommen. Die Berechnung der Wandfestigkeit f_k erfolgt analog zu Kapitel 4.2.2.1. [37, p. 27] Eine Vernachlässigung von maximal 20 % der Einzelprüfkörper ist für die Mittelwertbildung einer Prüfserie ist erlaubt, jedoch gilt die Injektionsmaßnahme als nicht erfolgreich, wenn die geforderten Nachweise nicht in vollem Umfang erfüllt werden können. In diesem Fall ist eine Nachverpressung durchzuführen. [24, p. 127] „Die wohl wichtigste Größe bei der Nachuntersuchung von Kunstharzinjektionen ist mit Sicherheit die Festigkeitsüberprüfung von Würfeln, entnommen aus Bohrkernen“ [24, p. 127]. Bohrkerne werden jedoch auch zur Überprüfung von durch mineralischen Injektionsmitteln verfestigtem Mauerwerk herangezogen.

²¹ Optisch muss im Prüfkörper eine ausreichende Menge an Harz feststellbar sein, anderenfalls darf keine Prüfung durchgeführt werden [24, p. 127].

4.2.3 Indirekte Prüfung

4.2.3.1 Allgemein

Bei indirekten Prüfungen handelt es sich nicht um Versuche, bei denen Festigkeitsparameter ermittelt werden. Vielmehr geht es um ergänzende Überprüfungen, ob ausreichend Injektionsgut im überprüften Bereich vorhanden ist. Demzufolge wird verglichen, ob an den untersuchten Prüfstellen etwa dieselbe Menge an Injektionsgut vorhanden ist, wie an jenen Prüfstellen, welche einer direkten Prüfung (punktuelle Kontrolle) unterzogen wurden. Diese Prüfungsmethode stellt sich verhältnismäßig als weniger aufwändig dar und kann daher im Vergleich zu direkten Prüfungen flächendeckend und zudem kostengünstiger durchgeführt werden. Auch soll ein Vergleich der in den Injektionsprotokollen angeführten Injektionsmengen sowie des Injektionsdruckes als Nachweis bzw. zum Vergleich herangezogen werden.

4.2.3.2 Organische Injektionen

Glühverlustversuch

Hierbei wird der Gewichtsverlust des Bohrmehls (im nachstehenden Punkt beschrieben) durch Erhitzen verglichen. Verascht wird ausschließlich der organische Harzanteil, wodurch der verbleibende anorganische Anteil bestimmt werden kann. Die Probenahme soll sich auf die Fugen beschränken, da sich das Injektionsmaterial hauptsächlich auf diese beschränkt. [24, p. 128]

Entnahme von Bohrmehl

Vor der Injektion ist ein schräg anzusetzender Bohrkanal mit vordefiniertem Durchmesser und Tiefe auszuführen, bei welchem Bohrmehl entnommen und in Bezug auf Volumen sowie Wichte bewertet wird. Nach durchgeführter Injektion ist der Vorgang in denselben Bereichen zu wiederholen; der Injektionserfolg ist durch eine Erhöhung der entnommenen Materialmenge ersichtlich. [24, p. 129]

4.2.3.3 Mineralische Injektionen

Messung des pH-Wertes

Nach durchgeführter Injektion (z. B. durch hydraulisches Injektionsgut) und erfolgter Bohrmehlentnahme entlang mehrerer Mörtelfugen wird aus diesem ein Eluat hergestellt und daran der pH-Wert festgestellt. Unverfestigtes Bohrmehl weist einen neutralen pH-Wert von 6 bis 7 auf, verfestigtes hingegen weist deutlich höhere pH-Werte von bis zu 12 auf. [24, p. 129]

Carbonatisierung

Eine auf der Baustelle schnell durchzuführende Methode stellt die Besprühung entnommenen Bohrgutes mit einer Phenolphthalein-Lösung dar. Das Vorhandensein von zementhaltigen Injektionsmitteln wird durch Verfärbung in einen rosa-violetten Farbton ersichtlich. [24, p. 129 f.]

Entnahme von Bohrmehl

Dieses Verfahren ist analog jenem, welches in Kapitel 4.2.3.2 beschrieben wurde.

4.3 Durchführbare Untersuchungen – Stand der Wissenschaft

Im Wesentlichen eignen sich für die Untersuchung an verfestigtem Mauerwerk auch jene Methoden, welche im Kapitel 3.3 erläutert wurden. Wichtig ist jedoch, einen Vergleich der erhaltenen Werte von vor der Verfestigung mit jenen nach der Verfestigung durchzuführen.

5 Verfestigtes Mauerwerk – Analytische Tragfähigkeitsprognose

Kapitel 5 befasst sich mit der rechnerisch erreichbaren Tragfähigkeit injizierter Mauerwerke. Normativ sind diese Verfahren nicht geregelt und bilden den Stand der Wissenschaft ab.

5.1 Mehrschaliges Mauerwerk

5.1.1 Wirkung der Injektion

Nach der Injektion mit meist mineralischen Injektionsmörteln ist das mehrschalige Natursteinmauerwerk mehr oder weniger homogenisiert. Grund dafür ist, dass der Großteil des Injektionsmörtels die Festigkeit des Füllmaterials in der Zwischenschicht verbessert und auch eine bessere Bindung an der Grenzfläche von Füllmaterial zu den äußeren Schalen hervorruft. Weiters werden dadurch die Spannungen in den äußeren Schalen sowie die unterschiedlichen horizontalen Verformungen infolge Dilatanz reduziert. Von einer Verfestigung der äußeren Schalen kann nur bedingt ausgegangen werden. Eine Vernachlässigung der Verfestigung von äußeren Schalen ist zudem auf der sicheren Seite liegend. Weiters wird davon ausgegangen, dass, sofern Schädigungen in den äußeren Schalen vorhanden waren, diese durch Injektion wieder auf die ursprüngliche Festigkeit zurückgeführt werden. [3, p. 175] [3, p. 180] In der Praxis kann davon ausgegangen werden, dass die Zwischenschicht einen Hohlraumanteil vor der Injektion von etwa 10 % bis 30 %, in den meisten Fällen jedoch nicht mehr als 25 % aufweist. Eine vorauseilende Ermittlung des Hohlraumanteils sollte durch die im Kapitel 3.3.3 beschriebenen Methoden erfolgt sein. Maus [6, p. 120] führt an, dass aber auch bei mehrschaligen Ziegelmauerwerken eine gute Tragfähigkeitserhöhung möglich ist. Voraussetzung dafür ist wenig saugfähiger und bindemittelarmer²² Mörtel im Bestand, sodass sich das Injektionsmaterial gleichmäßig einbringen lässt und gut mit den Bestandsmaterialien verbindet. Hinsichtlich der Aufnahme von Injektionsgut berichtet Maus [6, p. 15], dass über die Hälfte der von ihm untersuchten Bauwerke einen Verfüllungsgrad zwischen 5 % und 15 % aufweisen.

5.1.2 Prognose der Druckfestigkeit

5.1.2.1 Unverfestigtes Mauerwerk

Eine der Injektion vorausgehende Untersuchung der Druckfestigkeit von äußeren Schalen ($f_{ex,c}$) sowie der Zwischenschicht kann nach den in Kapitel 3 beschriebenen Methoden erfolgen und bildet den Ist-Zustand des Mauerwerks ab. Nach Valluzzi et al. [4, p. 189] kann aufgrund der Ergebnisse von Egermann jedoch der Beitrag der Zwischenschicht zur Druckfestigkeit vernachlässigt werden, da in den meisten Fällen keine Bindung zwischen den einzelnen Schalen mehr besteht. Daraus ergibt sich Gleichung (5.1) nach Tassios.

²² Bindemittelarme Mörtel sind i.d.R. sehr saugfähig – der W/B Wert des Injektionsgutes muss daher nach oben hin angepasst werden [16, p. 119].

$$f_{wc,0} = \left(\frac{V_{ex}}{V} \right) \cdot f_{ex,c} \quad (5.1)$$

$f_{wc,0}$	Druckfestigkeit des dreischaligen Mauerwerks vor Injektion
V_{ex}	Volumen der beiden äußeren Schalen
V	Gesamtvolumen des Mauerwerks
$f_{ex,c}$	Druckfestigkeit der äußeren Schale

Ein von Silva et al. [2, p. 33] durchgeführter Versuch bestätigt Gleichung (5.1), zeigt aber gleichzeitig, dass diese Gleichung die Tragfähigkeit im Großteil der Fälle leicht unterschreitet (-6 %). Bei dem Versuch wurde allerdings Mauerwerk getestet, das zu jenem Zeitpunkt erst wenige Monate alt war und folglich wenige verschlissene Mörtelfugen aufwies. Daher wird sich der Fehler der angeführten Gleichung bei Bestandsmauerwerk eventuell in die andere Richtung verlagern und stellt damit noch immer einen hinreichend genauen Ergebniswert dar. Eine auf etwa 25 % genaue Prognose kann noch als gut erachtet werden [14].

5.1.2.2 Verfestigtes Mauerwerk

Ausgehend von Gleichung (5.1) wurden anhand von empirischen Versuchen und Kalibrierungen durch Vintzileou die Gleichungen (5.2) und (5.3) ermittelt. Hervorzuheben ist, dass die angeführten Gleichungen nur für die Verwendung von niedrigfesten Injektionsmörteln, wie ternären oder hydraulischen Kalkmörteln, anwendbar sind. [3, p. 180 f.] Zudem ist erkennbar, dass die verwendete Menge an Injektionsmörtel in keiner der Gleichungen Einzug findet. Aus diesem Grund ist eine Evaluierung des eingebrachten Injektionsmittelvolumens, wie in Kapitel 4 beschrieben, durchaus sinnvoll. Nach Einfügen von (5.3) in (5.2) ergibt sich zur Veranschaulichung Gleichung (5.4).

$$f_{wc,i_VIN} = f_{wc,0} \cdot \left(1 + \frac{V_i}{V} \cdot \frac{f_{i,s_VIN}}{f_{wc,0}} \right) \quad (5.2)$$

$$f_{i,s_VIN} = 1,60 + 0,50 \cdot f_{gr,t} \quad (5.3)$$

$$f_{wc,i_VIN} = \frac{f_{wc,0} \cdot V + 0,5 \cdot V_i \cdot (f_{gr,t} + 3,2)}{V} \quad (5.4)$$

f_{wc,i_VIN}	Druckfestigkeit des dreischaligen Mauerwerks nach Injektion nach [3]
V_i	Volumen der Zwischenschicht (= $V - V_{ex}$)

f_{i,s_VIN}	Druckfestigkeit der Zwischenschicht für ternäre oder hydraulische Kalkmörtel nach [3]
$f_{gr,t}$	Zugfestigkeit des Injektionsmörtels

Durch Anwendung der Gleichungen (5.2) und (5.3) ist auf der Abszisse von Abb. 5.1 ein anschaulicher Vergleich zur tatsächlichen Druckfestigkeit des dreischaligen Mauerwerks durch Experimente (exp.) dargestellt. Ersichtlich ist, dass in den meisten Fällen eine leichte Unterschätzung der tatsächlichen Druckfestigkeit des Mauerwerks gegeben ist, da die Werte mehrheitlich linksseitig der Diagonalen liegen.

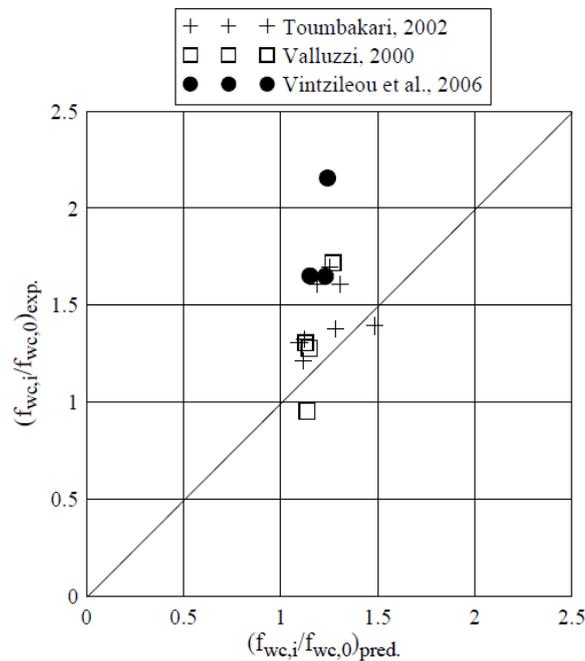


Abb. 5.1 – Vergleich zwischen prognostizierter (pred.) und tatsächlicher Druckfestigkeit [3, p. 181]

Hinsichtlich der Druckfestigkeit der Mauersteine gibt Vintzileou [3, p. 175] an, dass diese bei Natursteinen eine geringere Rolle spielen als die Druckfestigkeit der Zwischenschicht sowie die der injizierten Mörtel. Bei einem von Vintzileou durchgeführten Vergleich mit Toumbakaris' Ergebnissen zeigte sich außerdem, dass Mauerwerke mit geringerer Druckfestigkeit der Mauersteine eine größere Druckfestigkeit des Mauerwerks erreichten. Zurückzuführen ist dieses Ergebnis auf die höhere Qualität der Zwischenschicht sowie die der Injektionsmörtel.

Nach der Kalibrierung durch Valluzzi et al. [4, p. 189] wurde Gleichung (5.5) abgeleitet, welche im Gegensatz zu Gleichung (5.2) die Zugfestigkeit des Injektionsmörtels $f_{gr,t}$ sowie die Druckfestigkeit der Zwischenschicht $f_{i,s}$ nicht berücksichtigt. Hier fließt allerdings der Parameter der Druckfestigkeit des Injektionsmörtels $f_{gr,c}$ mit ein. Diese Gleichung eignet sich für die Anwendung von niedrigfesten Injektionsmörteln mit $f_{gr} \leq 4$ MPa bis 5 MPa und weist als Ergebnis die Mauerwerksdruckfestigkeit f_{wc,i_VAL} nach [4] aus.

$$f_{wc,i_VAL} = f_{wc,0} \cdot \left(1 + 1,25 \cdot \frac{V_i}{V} \cdot \frac{f_{gr,c}^{0,5}}{f_{wc,0}} \right) \quad (5.5)$$

Silva et al. [2, p. 34], die neben Mauerwerksproben auch den Maßstabseffekt dieser untersuchten, geben nach Kalibrierung ihrer Ergebnisse Gleichung (5.6) an, welche eine Überschätzung der Druckfestigkeit von etwa 7 % berechnet. Anzuführen ist hierbei, dass bei dieser Kalibrierung ein NHL Injektionsmörtel mit einer Druckfestigkeit von 12,8 MPa verwendet wurde, was einem höherfesten Injektionsmörtel entspricht. In Tab. 5.1 sind zur Übersicht die gängigen Gleichungen für die Berechnung der Druckfestigkeit von mehrschaligen Mauerwerken angeführt.

$$f_{wc,i_SIL} = f_{wc,0} + 0,35 \cdot f_{gr,c}^{1,1} \cdot \left(\frac{V_i}{V} \right) \quad (5.6)$$

Art der mineralischen Injektionsmörtel	Gleichung	Autor
niedrigfest	$f_{wc,i_VIN} = \frac{f_{wc,0} \cdot V + 0,5 \cdot V_i \cdot (f_{gr,t} + 3,2)}{V}$	Vintzileou [3]
niedrigfest	$f_{wc,i_VAL} = f_{wc,0} \cdot \left(1 + 1,25 \cdot \frac{V_i}{V} \cdot \frac{f_{gr,c}^{0,5}}{f_{wc,0}} \right)$	Valuzzi [4]
höherfest	$f_{wc,i_SIL} = f_{wc,0} + 0,35 \cdot f_{gr,c}^{1,1} \cdot \left(\frac{V_i}{V} \right)$	Silva [2]

Tab. 5.1 – Übersicht: Gleichungen zur Prognose der Druckfestigkeit von dreischaligem Natursteinmauerwerk nach Injektion

5.1.3 Druckfestigkeit Injektionsmörtel kontra Druckfestigkeit Mauerwerk

Die Druckfestigkeit der verwendeten Injektionsmörtel hat einen entscheidenden Einfluss auf die angestrebte Druckfestigkeit des Mauerwerks nach erfolgter Injektion. Ein durchgeführter Vergleich von Vintzileou [3, p. 176 f.] hat gezeigt, dass bei einer Mörtelfestigkeit von mehr als etwa 10 MPa kein signifikanter Anstieg der Druckfestigkeit des injizierten Mauerwerks festzustellen ist. Ein linearer Anstieg der Druckfestigkeit des Mauerwerks kann im ersten Drittel der Abszisse in Abb. 5.2 erkannt werden. Auf der Ordinate ist die Druckfestigkeit des injizierten Mauerwerks ersichtlich, wohingegen die Druckfestigkeit des Injektionsmörtels auf der Abszisse aufgetragen ist. Bei mineralischen Injektionsmörteln ist daher die Verwendung von höherfesten Bestandteilen wie Zementen auf unter 50 Masseprozent²³ zu drosseln, zumal dadurch keine nennenswerte Erhöhung der Druckfestigkeit des zu konsolidierenden Mauerwerks zu erwarten ist [3, p. 176 f.].

²³ Masseprozent von Stoff k in den Stoffen k und l: $0 \leq w_k = \frac{m_k}{m_k + m_l} \leq 1$

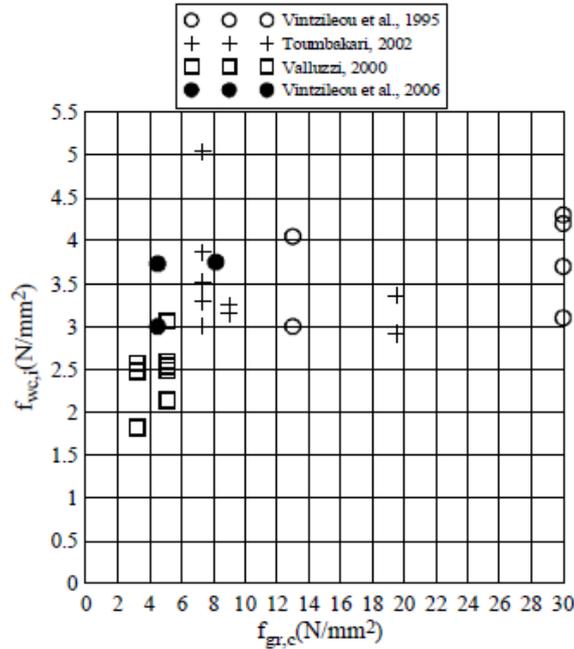


Abb. 5.2 – Beziehung der Druckfestigkeit Injektionsmörtel zu Mauerwerksdruckfestigkeit [3, p. 176]

Im Zuge von Versuchen und der Anwendung von Gleichung (5.5) durch Valuzzi et al. [4, p. 190] hat sich gezeigt, dass sich bei der Verwendung von höherfesten Injektionsmörteln eine Erhöhung der Druckfestigkeit der Zwischenschicht einstellt. Diese Steigerung wirkt sich jedoch nicht auf die Gesamttragfähigkeit des Mauerwerks hinsichtlich Druckfestigkeit aus, wie in Abb. 5.3 ersichtlich ist. Hierbei ist f_{cyl} die Zylinderdruckfestigkeit, welche die Druckfestigkeit der injizierten Zwischenschicht darstellt. Die Parameter $f_{wc,0}$ bzw. $f_{wc,s}$ stellen die Druckfestigkeit des Mauerwerks im unverfestigten bzw. verfestigten Zustand dar. Die Abszisse bildet das Verhältnis von Druckfestigkeit des gewählten Injektionsmörtels zur Druckfestigkeit des unverfestigten Mauerwerks.

Wird die obere Funktion diskutiert (hell), so ist zu erkennen, dass sich höherfestige Injektionsmörtel erheblich auf die Druckfestigkeit der injizierten Zwischenschicht auswirken. Bei Division der Druckfestigkeiten der Zwischenschicht im verfestigten Zustand durch jene des unverfestigten Zustandes ergeben sich in Abb. 5.3 auf der Ordinate Werte von bis zu 8, was bedeutet, dass infolge Injektion die achtfache Druckfestigkeit der Zwischenschicht erreicht wurde.

Den tatsächlich vorhandenen Fall stellt jedoch die untere Funktion (dunkel) dar, da diese das gesamte Mauerwerk in verfestigtem Zustand abbildet. Der Parameter $\Delta f_{wc,i}$ in Gleichung (5.7) wird vom Autor der vorliegenden Arbeit als tatsächlicher, durch die Injektion erreichter Zuwachs an Druckfestigkeit im Mauerwerk definiert. Durch Division und somit erfolgter Aufteilung dieses Zuwachses auf die Druckfestigkeit des Mauerwerks in unverfestigtem Zustand ergibt sich somit eine weitaus flachere Funktion, deren Ergebnisse auf der Ordinate in Abb. 5.3 ein

Ausmaß von maximal 2 erreichen. Im Vergleich zur oberen Funktion wirkt sich die Injektion der Zwischenschicht auf das gesamte Mauerwerk nur maximal um das Doppelte aus.

$$\Delta f_{wc,i} = f_{wc,s} - f_{wc,0} \tag{5.7}$$

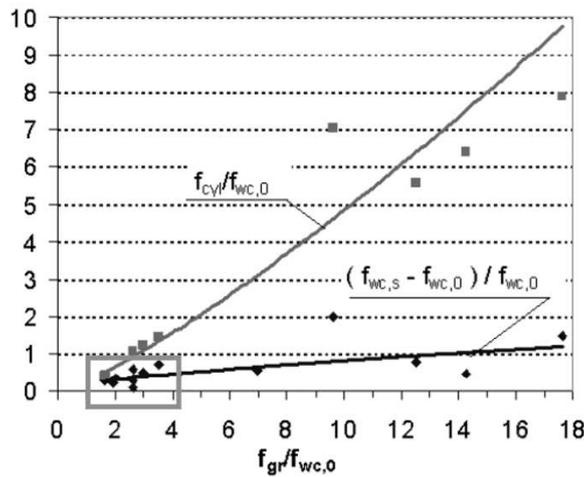


Abb. 5.3 – Normalisierte Zylinderdruckfestigkeit und Mauerwerksdruckfestigkeit kontra Mörteldruckfestigkeit [3, p. 190]

Aus der Darstellung auf der Abszisse (Rechteck) in Abb. 5.3 kann zudem abgeleitet werden, dass aus wirtschaftlicher und vor allem technischer Sicht ausreichend ist, Injektionsmörtel zu verwenden, die maximal eine etwa vier Mal so große Druckfestigkeit aufweisen, wie die unverfestigte Zwischenschicht des Mauerwerks [4, p. 190]. Eine höhere Druckfestigkeit der gewählten Injektionsmörtel wirkt sich zwar auf die durch eine Injektion erhaltene höhere Druckfestigkeit der Zwischenschicht, nicht aber auf die Gesamtdruckfestigkeit des Mauerwerks aus.

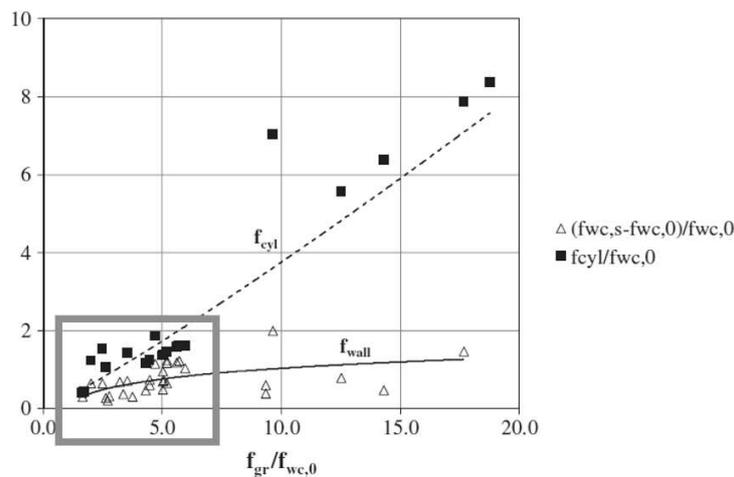


Abb. 5.4 – Normalisierte Zylinder- und Mauerwerksdruckfestigkeit kontra Mörteldruckfestigkeit [2, p. 36]

Ein in etwa ähnliches Ergebnis wie Valuzzi in Abb. 5.3 erhalten auch Silva et al. [2, p. 36], in obiger Grafik. Erwähnenswert ist jedoch bei dieser Abb. 5.4 der Unterschied im Verhältnis Druckfestigkeit Injektionsmörtel zu Druckfestigkeit Zwischenschicht, welches 6:1 beträgt (Bereich im Rechteck).

Zusammenfassend kann anhand der in Kapitel 5.1.3 angeführten Beiträge gesagt werden, dass bei der Verfestigung von mehrschaligen Natursteinmauerwerken mittels mineralischen Injektionsmörteln folgende Aspekte berücksichtigt werden sollen, um ressourcenschonend Verfestigungen erreichen zu können:

- Die Druckfestigkeit des angewendeten Injektionsmörtels $f_{gr,c}$ soll eine Festigkeit von etwa 10 MPa bis 12 MPa nicht überschreiten, und
- Die Druckfestigkeit des angewendeten Injektionsmörtels $f_{gr,c}$ soll nicht mehr als das Fünf- bis Sechsfache der Druckfestigkeit der unverfestigten Zwischenschicht (welche hier als f_{cyl} bezeichnet wird) betragen.

Einen Vorschlag für die Ermittlung von Druckfestigkeiten unverfestigter Zwischenschichten stellt die Anwendung der Mikroseismik (Kapitel 3.3.3.1) dar. Auch ist die (meist schwierige) Entnahme von Bohrkernen dafür anwendbar, wobei ein Durchmesser von 100 mm nicht unterschritten werden soll [8, p. 41].

5.1.4 Prognose der Schubfestigkeit

5.1.4.1 Bindung zwischen Injektionsmörtel und in-situ Materialien

Vintzileou [3, p. 179] und Van Gemert et al. [58, p. 40] weisen darauf hin, dass nicht die hohe Druckfestigkeit des Injektionsmörtels für eine hohe Schubfestigkeit eines Mauerwerks von Bedeutung ist. Der Fokus soll hierfür auf gute rheologische Eigenschaften wie die Bindung des Injektionsmörtels an den Bestandsmörtel und an die Mauersteine gelegt werden, wofür gering- bis mittelfeste Injektionsmörtel ausreichend sind. Die Bindung hängt von Faktoren wie von den Eigenschaften der Mauersteine (Druckfestigkeit, Oberflächenbeschaffenheit, Porengröße, Rauigkeit, Feuchtigkeitsgehalt, Wasseraufnahmekapazität) als auch von den Eigenschaften der Injektionsmörtel (Druckfestigkeit, Stärke und der Normalspannung an der Grenzfläche) und der Reibung ab [59, p. 400 f.]

5.1.4.2 Versuchsergebnisse und Interpretation

Bei diagonalen Kompressionsversuchen dreischaliger Mauerwerke konnten Steigerungen der Schubfestigkeit von 110 % bis 250 % festgestellt werden. Die Schubfestigkeiten der unverfestigten Mauerwerksproben ($\sim 1,0/0,8/0,4$ m) beliefen sich auf 0,1 MPa bis 0,47 MPa, wohingegen sich die Werte der verfestigten Mauerwerksproben zwischen 0,22 MPa und 0,75 MPa befanden. [3, p. 179 ff.] Eine so weitgestreute Ergebnisbandbreite lässt sich nicht mathematisch

interpretieren und ist wohl auch der Tatsache geschuldet, dass mehrschaliges Mauerwerk noch viel inhomogener im Aufbau ist, als einschaliges Mauerwerk. Weiters wird festgestellt, dass „[...] die verfügbaren Daten hinsichtlich dem Schubverhalten von unverfestigtem und verfestigtem Mauerwerk eher begrenzt sind und daher keine verlässliche Vorhersage über die Effektivität einer Steigerung der Schubtragfähigkeit gemacht werden kann“ [3, p. 179].

5.2 Einschaliges Mauerwerk

5.2.1 Wirkung der Injektion

Mauerwerke aus Ziegel oder auch durchgemauerte Natursteinmauern weisen vor der Verfestigungsmaßnahme einen Hohlraum von meist unter 5 % auf, sofern es sich um Bereiche über dem Sockelbereich handelt. Unterhalb des Sockels kann ein Hohlraumvolumen von mehr als 30 % vorhanden sein, was sich auf augenscheinlich nicht erfassbare Bauteile zurückführen lässt. [6, p. 241] Eine Ermittlung des Hohlraumanteils im Vorfeld kann durch die im Kapitel 3.3.3 beschriebenen Methoden erfolgen. Eine Veränderung der bauphysikalischen Eigenschaften sowie eine Festigung des statischen Systems treten auf [16, p. 64].

5.2.2 Mörtelbedarf neues Ziegelmauerwerk

Abmessungen Ziegel			Länge für 1 m ³	Läufer	Stoßfugen Läufer	Binder	Stoßfugen Binder	Scharen	Lagerfuge	Scharen Läufer	Scharen Binder	MK eigen gesamt	MK nach Daub	Mörtel je m ³ eigen	Mörtel je m ³ Daub		
Länge l _b	Breite b _b	Höhe h _b															
[cm]			[m]	[Stk]	[cm ³]	[Stk]	[cm ³]	[Stk]	[cm ³]	[Stk]		[m ³]		[kg/m ³]			
25	12	6,5	2,00	7,7	2500	15,4	2500	26	6000	13	13	0,22	0,25	387	451		
29	14	6,5	1,86	6,2	2334	12,4	2334	25	6462	13	12	0,21	0,24	384	429		
24	11,5	7,1	2,04	8,2	2783	16,3	2783	25	5879	13	12	0,21	0,24	379	440		
28,9	14,5	5,3	1,86	6,2	1942	12,0	1838	29	6451	15	14	0,24	0,26	424	473		
28,9	13,2	6,6	1,86	6,2	2312	13,1	2499	24	6451	12	12	0,21	0,24	371	432		
23	14	7	2,09	8,7	3162	13,9	2238	26	5755	13	13	0,21	0,24	385	426		
29	14	7	1,86	6,2	2513	12,4	2513	23	6462	12	11	0,20	0,23	360	414		
30	15	5	1,83	5,9	1796	11,4	1712	30	6573	15	15	0,24	0,27	438	483		
												Mittelw.	0,22	0,25	391	443	
Kalkmörtel												1800 kg/m ³	STAW	0,01	0,01	25	23
Stoßfugenstärke												1 cm	VAR	6%	5%	6%	5%
Lagerfugenstärke												1,2 cm	VAR min	0,20	0,23	366	421
MK												Mörtelkubatur	VAR max	0,23	0,26	416	466

Tab. 5.2 – Eigenberechnung sowie Berechnung nach Daub der Fugenkubatur je m³ Mauerwerk

Zunächst stellt sich die Frage, wie viel kg Mörtel bei einem neuen Ziegelmauerwerk, vereinfachend im Blockverband gemauert, benötigt wird. Zu diesem Zweck wurde Tab. 5.2 angefertigt, welche den Mörtelbedarf eines Mauerwerks aus unterschiedlichen Vollziegelformaten des 19. – und 20. Jahrhunderts²⁴ [60] ermittelt. Dieses Ziegelmauerwerk weist eine Kubatur von 1 m³ auf und ist etwa eine Steinlänge breit²⁵. Daraus lassen sich die Länge des Mauerwerks sowie

²⁴ Standardisierung der Ziegelabmessungen mit 29/14/6,5 cm (Wr. Bauordnung 1883) [13, p. 189].

²⁵ Gründerzeithäuser weisen lt. Wr. Bauordnung von 1859 bei Kellerwänden eine Stärke zwischen 60 cm und 90 cm auf [13, p. 190].

die dazugehörige Anzahl von Läufer- und Binderscharen inklusive Bruch und Verhau, gemauert im Blockverband, ermitteln. Ausgegangen wird von einer Stoßfugenbreite (f_s) mit 1 cm und einer Lagerfugenstärke (f_l) von 1,2 cm. Läuferscharen weisen auf den Breit- sowie Längsseiten des Ziegels Stoßfugen auf. Binderscharen weisen im Gegensatz dazu nur an den Längsseiten Stoßfugen auf und zwischen den Scharen befindet sich jeweils eine Lagerfuge.

Bei der Verwendung von Kalkmörtel (1800 kg/m^3) ergibt sich somit für die Eigenberechnung ein Mörtelbedarf von etwa 400 kg je m^3 Mauerwerk. Daub [61, p. 73] berechnet den Mörtelbedarf (MB) nach Gleichung (5.8) woraus etwa 450 kg/m^3 an Mörtelbedarf je m^3 Mauerwerk resultieren. Krapfenbauer [62, p. 342] hingegen legt den Mörtelbedarf mit 250 Liter fest, was ebenfalls 450 kg/m^3 entspricht. Der Mittelwert aller Ergebnisse ergibt etwa $430 \text{ kg Mörtel je m}^3$ Mauerwerk, was einen plausiblen Wert darstellt.

$$MB = 1 - \frac{l_b \cdot b_b \cdot h_b}{(l_b + f_s) \cdot (b_b + f_s) \cdot (h_b + f_l)} \quad (5.8)$$

5.2.3 Prognose der Druckfestigkeit – mineralische Injektionsmörtel

Ansatz „mittlere Mörtelfestigkeit“

Pech et al. [24, p. 117] gehen davon aus, dass sich nach einer Verfestigung des Mauerwerks eine mittlere Mörteldruckfestigkeit entwickelt. Diese setzt sich nach den Raumanteilen des Bestandsmörtels sowie des Injektionsmörtels in Kombination mit der jeweiligen Druckfestigkeit zusammen und stellt laut Kolbitsch [14] aktuell einen brauchbaren Ansatz dar.

Um die jeweiligen Raumanteile abschätzen zu können, muss anfangs eruiert werden, wie viel Mörtel sich im Bestandsmauerwerk befindet. Wie in Kapitel 5.2.2 ersichtlich, sind für die Herstellung von Mauerwerken etwa $430 \text{ kg Mörtel je m}^3$ Mauerwerk erforderlich. Nach einer Bestandsaufnahme, wie in Kapitel 3 beschrieben, kann in Kombination mit verschiedenen Verfahren (Kapitel 4.3) ermittelt werden, in welchem Zustand sich der Bestand befindet. Daraus lässt sich unter der Zuhilfenahme von Erfahrungswerten der ungefähr vorhandene Anteil an Bestandsmörtel im Mauerwerk ableiten. Dies erfolgt unter der Multiplikation der vorhandenen Hohlräume [m^3] mit dem Gewicht des Bestandsmörtels [kg/m^3].

$$f_{m,m} = \frac{G_{m,b}}{G_m} \cdot f_m + \frac{G_{m,i}}{G_m} \cdot f_{gr,c} \quad (5.9)$$

- $f_{m,m}$ Mittlere Mörteldruckfestigkeit nach Injektion $\leq \min \left\{ \begin{array}{l} 20 \text{ MPa} \\ 2 \cdot f_b \end{array} \right.$
- $G_{m,b}$ Geschätzte vorhandene Menge Bestandsmörtel [kg/m^3]
- $G_{m,i}$ Menge Injektionsmörtel [kg/m^3]

G_m	Geschätzte Menge Bestandsmörtel zum Zeitpunkt der Herstellung [kg/m ³]
f_m	Druckfestigkeit Bestandsmörtel
$f_{gr,c}$	Druckfestigkeit Injektionsmörtel

Nach der Berechnung der mittleren Mörteldruckfestigkeit kann die Mauerwerksdruckfestigkeit nach Injektion $f_{k,i,1_PEC}$ (Injektionsziel) wie gewohnt nach Gleichung (5.10) ermittelt werden. Acht zu geben ist hierbei jedoch auf das Einfügen der mittleren Mörteldruckfestigkeit $f_{m,m}$, womit sich die allgemeine Gleichung (5.11) ergibt

$$f_{k,i,1_PEC} = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_{m,m}^\beta \quad (5.10)$$

$$f_{k,i,1_PEC} = K \cdot f_b^\alpha \cdot \left(\frac{G_{m,b}}{G_m} \cdot f_m + \frac{G_{m,i}}{G_m} \cdot f_{gr,c} \right)^\beta \quad (5.11)$$

$f_{k,i,1_PEC}$ Druckfestigkeit des einschaligen Mauerwerks nach Injektion nach [24]

Gleichung (5.10) kann unter Verwendung des Verbandsfaktors (Gleichungen (3.6) bis (3.8)) ebenso für einschaliges Natursteinmauerwerk verwendet werden [24, p. 118]. Krapfenbauer [62, p. 342] gibt für den Bestand eine Mörtelmenge von 630 kg/m³ (350 Liter) an. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass die Injektionsmengen auch über 200 kg/m³ liegen können, da bei der Herstellung von Natursteinmauerwerken der Auftrag²⁶ von Mauermörtel nicht so genau erfolgen kann, wie bei Ziegelmauerwerk.

Bei festgelegtem Injektionsziel und „bekannter“ Menge an Bestandsmörtel im Mauerwerk ist eine Rückrechnung auf die erforderliche Druckfestigkeit des Injektionsmörtels als wenig sinnvoll anzusehen. Die Begründung liegt darin, dass die Menge an Bestandsmörtel nicht in hinreichend genauem Ausmaß ermittelt werden kann und sich deshalb entweder weniger, oder im schlechteren Fall (aus Sicht der Injektion) mehr Bestandsmörtel im Mauerwerk befindet und somit weniger Eintrag an hochwertigerem Injektionsmörtel erfolgen kann.

Pech et al. [24, p. 118 f.] empfehlen, dass bei einem Injektionsziel von 5 MPa bis 6 MPa vorwiegend mineralische Injektionsmittel verwendet werden sollen, da deren Wirkung für solche Zwecke als ausreichend empfunden wird. Weiters wird angemerkt, dass typische Injektionsmengen von wenigen kg/m³ Mauerwerk bis hin zu 200 kg/m³ Mauerwerk reichen können (vgl. Abb. 2.1).

²⁶ Mauermörtel wird mit einer Maurerkelle auf die einzelnen Scharen und Stoßfugen aufgetragen.

Ansatz „mittlere Mauerwerksfestigkeit“

Der Ansatz von Van Gemert et al. [22, p. 94] beruht auf einem ähnlichen Prinzip, wie jenes von Pech et al. mit der mittleren Mörtelfestigkeit. Hierin wird jedoch nur das Gesamtvolumen des instand zu setzenden Mauerwerks sowie der darin enthaltene Hohlraum und der injizierte Hohlraum betrachtet. Weiters ist die vorhandene Druckfestigkeit des unverfestigten²⁷ Mauerwerks sowie die Druckfestigkeit des Injektionsmörtels für die Berechnung erforderlich, wie in Gleichung (5.12) ersichtlich ist. Eine notwendige Bedingung stellt die Ungleichung (5.13) dar. Diese Ungleichung weist darauf hin, dass das Volumen des injizierten Materials V_i nur in den seltensten Fällen dem Volumen der Hohlräume im Mauerwerk V_0 gleich kommt, da kaum von einer vollkommenen Verfüllung aller Hohlräume ausgegangen werden kann; ausgedrückt wird dies durch den weiter unten angeführten Injektionsgrad i . Zusätzlich verknüpfen Van Gemert et al. die Berechnung der Festigkeiten mit einer stochastischen Zuverlässigkeitsanalyse, womit der Zuverlässigkeitsindex β bzw. die Versagenswahrscheinlichkeit ermittelt werden können und, wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, ihre Anwendung finden und worauf hierin nicht näher eingegangen wird.

$$f_{k,i_GEM} = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \cdot \left(\frac{V - V_0}{V} \right) + \left(\frac{V_i}{V} \right) \cdot f_{gr,c} \quad (5.12)$$

$$\left(\frac{V - V_0}{V} \right) + \left(\frac{V_i}{V} \right) \leq 1 \quad (5.13)$$

f_{k,i_GEM}	Druckfestigkeit des (einschaligen) Mauerwerks nach Injektion nach [22]
V_0	Volumen der Hohlräume im Mauerwerk
V	Gesamtvolumen des Mauerwerks
V_i	Volumen des injizierten Materials
f_k	Druckfestigkeit des (einschaligen) Mauerwerks vor Injektion
$f_{gr,c}$	Druckfestigkeit des Injektionsmörtels

Gegenüberstellung der beiden Ansätze

Wird Gleichung (5.11) von Pech et al. auf Volumen umgelegt und mit Gleichung (5.12) von Van Gemert et al. verglichen, so ist zu erkennen, dass

- Pech et al. den eingebrachten Injektionsmörtel mit dem Exponenten β berücksichtigen, wohingegen

²⁷ Van Gemert et al. setzen hierbei die ursprüngliche Druckfestigkeit (vor Degradation durch Umwelteinflüsse) an, vereinfachend wird die Mauerwerksfestigkeit nach Komponenten herangezogen.

- Van Gemert et al. den eingebrachten Injektionsmörtel als eigenen Bestandteil betrachten, der zur Tragfähigkeit des Mauerwerks beiträgt.

Nachfolgende Gleichungen legen die beiden Ansätze bezogen auf das Volumen dar. Der Injektionsgrad i lässt sich mit den im Kapitel 4.2.3 beschriebenen indirekten Verfahren bestimmen.

$$V_{m,i} = V_m - V_{m,b} \quad (5.14)$$

$$f_{k,i,1_PEC} = K \cdot f_b^\alpha \cdot \left(\frac{V_{m,b}}{V_m} \cdot f_m + \frac{(V_m - V_{m,b})}{V_m} \cdot f_{gr,c} \right)^\beta \quad (5.15)$$

$$f_{k,i_GEM} = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta \cdot \left(\frac{V - (V_m + V_{m,b})}{V} \right) + \frac{(V_m - V_{m,b}) \cdot i}{V} \cdot f_{gr,c} \quad (5.16)$$

$V_{m,i}$	Eingebrachtes Volumen an Injektionsmörtel
V_m	Geschätztes Volumen an Bestandsmörtel zum Zeitpunkt der Errichtung
$V_{m,b}$	Ermitteltes Volumen an noch vorhandenem Bestandsmörtel
$f_{k,i,1_PEC}$	Mauerwerksfestigkeit für einschaliges Mauerwerk nach [24]
f_{k,i_GEM}	Mauerwerksfestigkeit für ein- oder mehrschaliges Mauerwerk nach [22]
V	Volumen des betrachteten Mauerwerks
i	$0 < \text{Injektionsgrad} \leq 1$

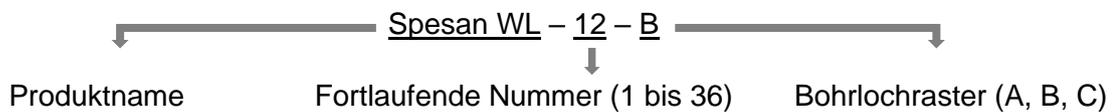
5.2.4 Prognose der Druckfestigkeit – organische Injektionsmittel

5.2.4.1 Ausgangsparameter

Pohlplatz [23] führte Versuche mit organischen Injektionsmitteln an Ziegelmauerwerken mit dem Ziel der Verfestigung und auch zur Minimierung der Mauerwerksfeuchte durch. Die Untersuchungsergebnisse hinsichtlich des unverfestigten als auch des verfestigten Mauerwerks sind im Anhang (Tab. 7.2 und Tab. 7.3) anschaulich dargestellt. Angewendet wurden an zwölf Mauern drei verschiedene Injektionsraster (versetzt um den halben Achsabstand) mit den Achsabständen sowie zugehörigem Zweck:

- Raster A: 7,5/7,5 cm (Vorrangig Abdichtung, Verfestigung als Nebeneffekt)
- Raster B: 40/40 cm (Verfestigung und Abdichtung)
- Raster C: 60/60 cm (Verfestigung)

Jede der zwölf Mauern wurde in fünf Stellen eingeteilt, wobei die Stellen 1 und 2 zur Ermittlung der Mauerwerksfestigkeit vor der Injektionsmaßnahme herangezogen wurden ($f_{k,0}$ durch Komponentenfestigkeiten nach Stempeldruckverfahren und EN 771-2). Die Stellen 3 bis 5 wurden vor der Injektion auf die gewünschte Mauerwerksfeuchte (hoch: 100 %, mittel: 50 % bis 60 % und gering: 20 %) eingestellt und nach der Injektion wurde dort die Mauerwerksfestigkeit direkt an Würfeln ermittelt. Die Zusammenfassung aller Ergebnisse hinsichtlich Verfestigung sowie die grafische Zusammenstellung wurden im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt und sind in Abb. 5.5 ersichtlich. Bei den verwendeten Injektionsmitteln handelte es sich einerseits um drei Polyurethan Harze (2-K PU und 1-K PU) und andererseits um ein Epoxidharz (2-K EP). Die in Abb. 5.5 auf der Abszisse dargestellten Injektionsmittel lassen sich wie folgt anhand eines Beispiels erklären:



5.2.4.2 Versuchsergebnisse und Interpretation

Hierfür wird erneut Abb. 5.5 herangezogen. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass aus wirtschaftlicher Sicht für eine reine Verfestigung des Mauerwerks Bohrlochraster mit großen Abständen (hier: B und eher C) zu wählen sind. Raster C weist nur geringfügig weniger Injektionsmitteleintrag als Raster B auf. Eine Tendenz in Zusammenhang mit Mauerwerksdruckfestigkeit sowie Injektionsmitteleintrag und vorhandener Mauerwerksfeuchte lässt sich visuell nicht erkennen. Eine mittels Microsoft Excel durchgeführte multiple lineare Regression mit den unabhängigen Variablen:

- Mauerwerksfeuchte [%]
- Injektionsmitteleintrag [kg/m³]
- Mauerwerksdruckfestigkeit vor der Injektion [MPa]

führte zu keinem eindeutigen Ergebnis für die abhängige²⁸ Variable der Mauerwerksdruckfestigkeit nach der Injektion. Grund dafür ist das Überschreiten des P-Wertes (\triangleq Irrtumswahrscheinlichkeit) über das Signifikanzniveau von 5 %. Ein mathematischer Zusammenhang lässt sich generell nur bei einer Unterschreitung dieser Grenze erklären. Für jene Mauern, welche die Raster B und C aufweisen, ist der Injektionsmitteleintrag nicht in einem hohen Maße voneinander abweichend. Aus diesem Grund sei für jene beiden Raster die multiple lineare Regression in Tab. 5.3 angeführt. Erkennbar ist, dass die P-Werte für jede unabhängige Variable

²⁸ Die abhängige Variable soll durch unabhängige Variablen erklärt werden.

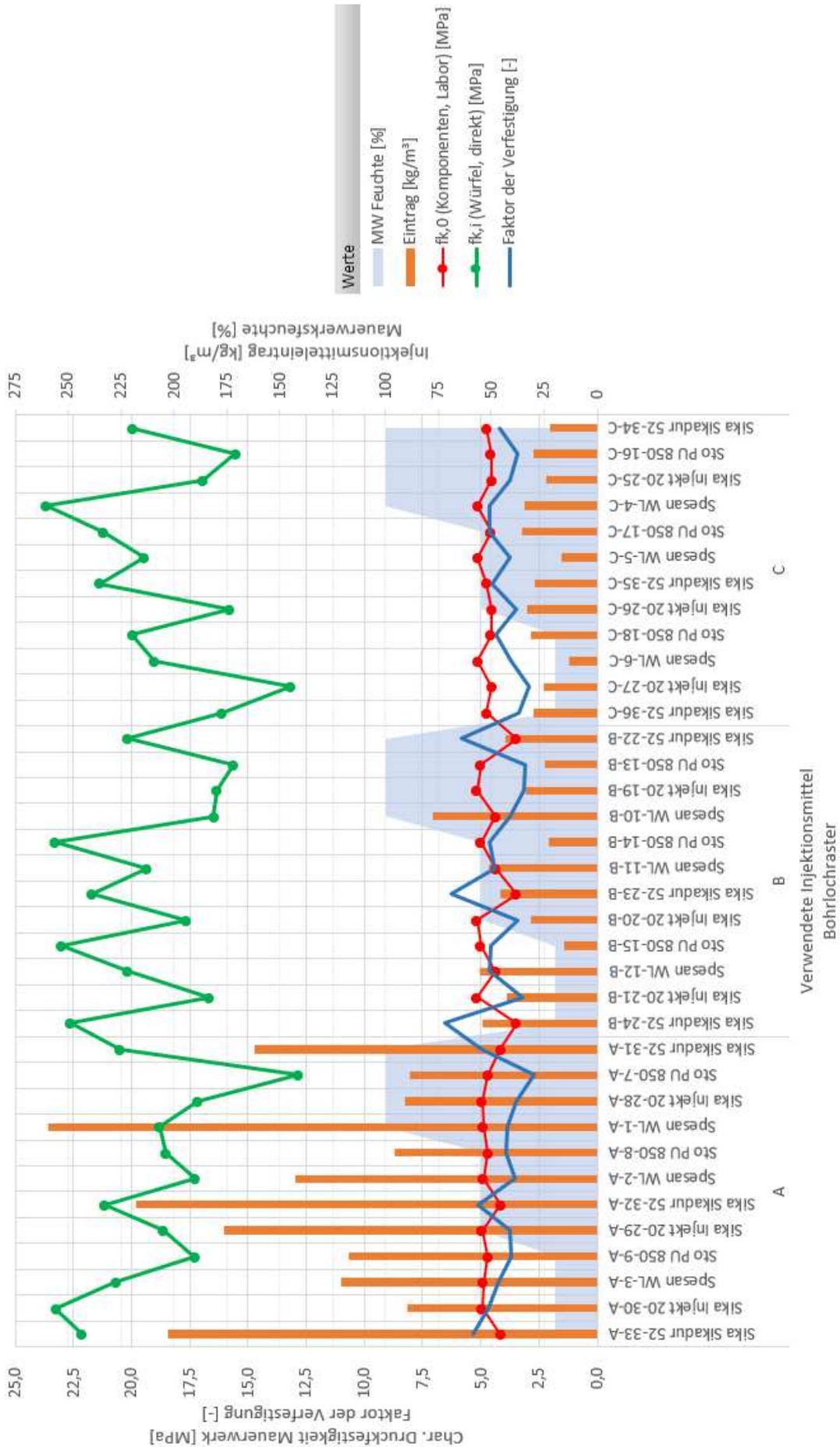


Abb. 5.5 – Zusammenstellung von Ergebnissen der Mauerwerksverfestigung aus [23]

5.2.4.3 Empfehlungen

Unabhängig von den in Kapitel 5.2.4.2 diskutierten Ergebnissen konnte jedoch die Erkenntnis gewonnen werden, dass bei hohen Mauerwerksfeuchten Harze auf Polyurethanbasis und bei geringen Mauerwerksfeuchten Harze auf Basis von Epoxidharz verwendet werden sollen [21]. Zu beachten ist allerdings, dass manche der verwendeten Produkte nicht mehr am Markt erhältlich sind oder aber auch schon längst (durch bessere) ersetzt wurden.

Im Anhang sind drei Tabellen (Tab. 7.4 bis Tab. 7.6) angeführt, welche die verwendeten Injektionsmittel sowie deren Eintrag in Abhängigkeit der Mauerwerksfeuchte (20 %, 55 % und 100 %) nach [23] darlegen. Anhand eines Beispiels soll erklärt werden, wie die erwähnten Tabellen anzuwenden sind: Es wurden eine charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit von 4,3 MPa (vertikaler Pfeil in Tab. 5.4) sowie eine Mauerwerksfeuchtigkeit von etwa 20 % (links oben, gelb) festgestellt. Gefordert wird eine Druckfestigkeit des Mauerwerks, welche zwischen 20 MPa und 22,5 MPa liegt (horizontaler Pfeil in Tab. 5.4) und mittels Injektion erreicht werden soll. Demzufolge ergibt sich die in der Praxis bereits angewendete und bewährte Möglichkeit, das Injektionsgut „Spesan WL“ im Raster B oder das Injektionsgut „Sika Sikadur 52“ im Raster A zu verpressen. Aus wirtschaftlichen Gründen ist dem ersten der beiden Vorschläge der Vorzug zu geben, da der Aufwand zur Herstellung der Bohrlöcher weitaus geringer ist und zudem nur etwa ein Viertel des Injektionsgutes benötigt wird.

MW Feuchte [%]		fk,0 (Komponenten, Labor) [MPa]					
20		>	≤	>	≤	>	≤
fk,i (Würfel, direkt) [MPa]		4	4,5	4,5	5	5	5,15
>	≤	Harzname	Eintrag [kg/m³]	Harzname	Eintrag [kg/m³]	Harzname	Eintrag [kg/m³]
22,5	23,67			Sika Injekt 20-30-A	90	Sto PU 850-15-B	16
20	22,5	Sika Sikadur 52-33-A	203	Spesan WL-3-A	121		
		Spesan WL-12-B	55				
17,5	20			Sto PU 850-18-C	31	Spesan WL-6-C	13
15	17,5			Sto PU 850-9-A	118	Sika Injekt 20-21-B	43
				Sika Sikadur 52-36-C	30		
12,85	15			Sika Injekt 20-27-C	26		

Tab. 5.4 – Ausschnitt aus Tab. 7.4

Ersichtlich ist in den vollständigen Tab. 7.4 bis Tab. 7.6, dass nicht alle Felder ausgefüllt wurden, da im Zuge der Versuchsreihe nach [23] schlichtweg nicht mehr Daten ermittelt oder benötigt wurden. Interessant wäre allerdings der Versuch, alle Daten von Mauerwerksverfestigungen durch organische Injektionsmittel in einer Stadt (z. B. Wien) in eine Datenreihe einzutragen und daraus Zusammenhänge abzuleiten.

Pech et al. empfiehlt heute (fast 20 Jahre nach Pohlplatz´ Versuchsreihe), dass für eine Verfestigung Injektionsmengen ab 50 kg/m³ erforderlich sind und in einem Raster von 30/30 cm

eingbracht werden sollen. Ausgehend von diesem²⁹ Eintrag werden mindestens 10 MPa Mauerwerksdruckfestigkeit erreicht. Weiters werden für jeden MPa mehr an Mauerwerksdruckfestigkeit 20 kg/m³ auf die 50 kg/m³ beaufschlagt. Eine vollständige Sättigung findet bei etwa 250 kg/m³ statt; die damit maximal erreichbare Mauerwerksdruckfestigkeit ist hierfür mit 80 % der Steindruckfestigkeit beschränkt. [24, p. 120] Wird jedoch ein Vergleich mit Abb. 7.1 (Anhang) durchgeführt, so lässt sich erkennen, dass auch mit Injektionsmitteleinträgen von weit unter 50 kg/m³ bereits sehr gute, produktabhängige Erfolge in der Verfestigung erzielt werden können.

5.2.5 Prognose der Schubfestigkeit

5.2.5.1 Unverfestigtes Mauerwerk

Hierfür kann das Bruchkriterium nach Ganz/Thürlimann [32] herangezogen werden, welches in Abb. 5.6 in drei- und zweidimensionaler Ausführung dargestellt ist (links bzw. rechts).

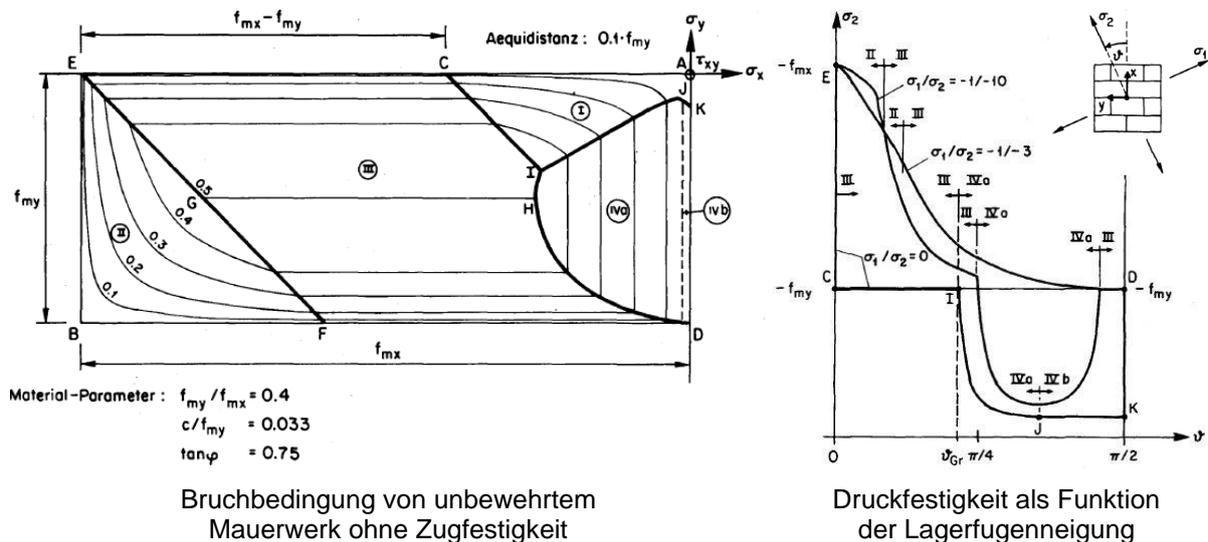


Abb. 5.6 – Bruchbedingung nach Ganz/Thürlimann, adaptiert nach [32, p. 12 ff.]

Die Ebene $\sigma_x - \sigma_y$ (Spannung senkrecht bzw. parallel zur Lagerfuge) stellt in Abb. 5.6, links, die Symmetrieebene dar und es wird nur die positive Schubspannung in Fugenrichtung τ_{xy} dargestellt, wobei die Linien 0,1 bis 0,5 Höhenschichtenlinien in Richtung τ_{xy} (aus der Ebene) darstellen. Die Bruchbedingungen I und II stellen zwei elliptische Kegel (Zug- bzw. Druckversagen im Stein) dar. Weitere Bruchbedingungen III und IVb sind als Kreiszyylinder (Schubversagen im Stein bzw. Zugversagen in den Lagerfugen) zu interpretieren. Bruchbedingung IVa ist als Ebene (Gleiten entlang der Lagerfugen) zu verstehen. [32, p. 11]

²⁹ Unter einem Eintrag von 50 kg/m³ findet keine gleichmäßige Verteilung des Injektionsgutes im Mauerwerk statt [24, p. 120 ff.].

Wird eine Betrachtung von Abb. 5.6, rechts, durchgeführt, so ist eine Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Lagerfugenneigung ϑ zu erkennen. Die minimale Festigkeit wird im Punkt J erreicht und setzt sich aus $\pi/4 + \varphi/2$ zusammen, wobei φ den Reibungswinkel darstellt. Weiters lässt sich erkennen, dass schon unter geringen zweiachsigen Druckbeanspruchungen ein starker Festigkeitsanstieg hervorgerufen wird und weiters wird bei großen Verhältnissen von σ_1 zu σ_2 die Bruchbedingung IVa (Gleiten entlang der Lagerfugen) vermieden. [32, p. 13 f.]

5.2.5.2 Verfestigtes Mauerwerk

Die Schubfestigkeit kann in Zusammenhang mit der Druckfestigkeit des Bestandsmörtels gesetzt werden [14]. Momentan wird an Methoden gearbeitet, welche mit dem aus dem Grundbau stammendem Verfahren des Triaxialversuches die Schubfestigkeit bestimmen und woraus sich in weiter Folge eventuell Erkenntnisse über die Prognose der Schubfestigkeit von verfestigtem Mauerwerk ableiten lassen [21].

5.2.6 Organische Injektionsmittel: Bemessung als unbewehrte Betonwand

5.2.6.1 Voraussetzungen

Werden im Zuge der Verfestigungsmaßnahme organische Injektionsmittel verwendet, so ergibt sich in den allermeisten Fällen eine sehr hohe Mörteldruckfestigkeit, welche jene der Mauersteine bei weitem übersteigt. Ein von Pohlplatz [23] Anfang der 2000er Jahre durchgeführter Versuch an Ziegelmauerwerken zeigt, dass Bestandsmörtel mittels organischen Injektionen um den Faktor 14 bis 37 verbessert werden können, wie in Abb. 5.7 ersichtlich ist. Ausgegangen werden kann von einer Mörtelfestigkeit im unverfestigten Zustand ($f_{m,0}$), welche mittels Stempeldruckverfahren ermittelt wurde und durchschnittlich etwa 1,92 MPa (Varianz: 5 %) beträgt. Nach der Verfestigungsmaßnahme konnten mittels Rückprallhammer ($f_{m,i}$) Mörteldruckfestigkeiten zwischen 27 MPa und 75 MPa ermittelt werden. Hierbei lässt sich ein (wenn auch kein mathematischer) Zusammenhang zwischen Injektionsmitteleintrag und dadurch erzielter Mörteldruckfestigkeit erkennen. Auch das injizierte Material zeigt große Auswirkungen auf das Endergebnis: Epoxidharze erzielen gegenüber Polyurethan-Harzen bessere Resultate. Eine Beeinflussung durch die vor der Verfestigung vorhandene Mauerwerksfeuchte kann nicht erkannt werden.

Fällt die nach der Injektion erhaltene Mörteldruckfestigkeit ($f_{m,i}$) unter jene der Steindruckfestigkeit ($f_{b,0}$), ist keine Homogenisierung des Mauerwerks erzielt worden. Dieser Fall ist in Abb. 5.7 (ganz rechts) in der schwarzen Ellipse ersichtlich. Hier darf keine Berechnung als unbewehrte Betonwand nach ÖN EN 1992-1-1 [63] erfolgen.

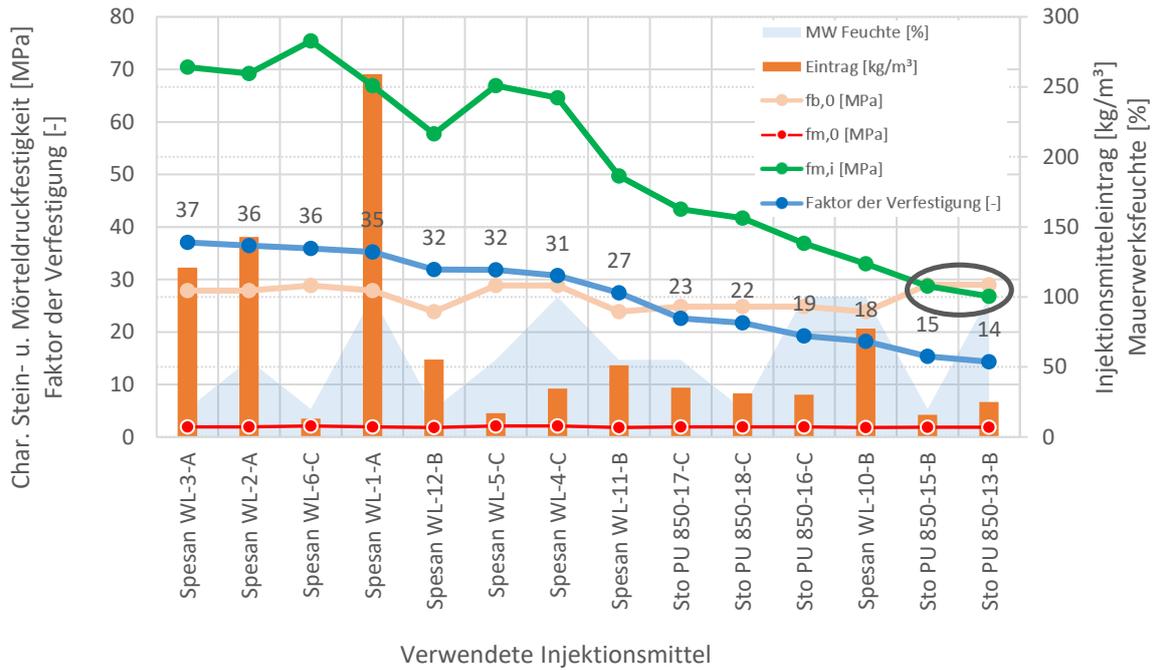


Abb. 5.7 – Zusammenstellung der Mörteldruckfestigkeiten vor und nach der Injektionsmaßnahme aus [23]

5.2.6.2 Durchführung

ÖNORM EN 1992-1-1 legt in Kapitel 12 [63, p. 216] das vereinfachte Verfahren für Einzeldruckglieder und Wände dar. Sind die Voraussetzungen nach Kapitel 5.2.6.1 erfüllt, kann die Mauerwerksfestigkeit nach Gleichung (5.19) berechnet werden.

$$N_{Rd} = b \cdot h_w \cdot f_{cd,pl} \cdot \Phi \quad (5.19)$$

- N_{Rd} Bemessungswert der aufnehmbaren Normalkraft
- b Länge des Mauerwerks
- h_w Stärke des Mauerwerks
- $f_{cd,pl}$ Entspricht der durch Teilsicherheitsbeiwerte abgeminderten charakteristischen Mauerwerksfestigkeit
- Φ Faktor zur Berücksichtigung der Lastausmitte, einschließlich der Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung

Die Berechnung des Faktors Φ erfordert die genaue Aufnahme bzw. Ermittlung von etwaigen Einspannmomenten zwischen Platte und Wand, horizontaler Einwirkungen, zusätzliche Lastausmitte infolge geometrischer Imperfektionen sowie Exzentrizität infolge Kriechen; hierauf wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

Der Faktor $f_{cd,pl}$ wird durch Division der charakteristischen Mauerwerksfestigkeit (direkt aus der Würfelfestigkeit nach Kapitel 4.2.2 oder indirekt mittels Komponentenfestigkeit) nach Injektion durch den Teilsicherheitsbeiwert von 2,5 ermittelt. Hierbei gilt 2,5 als Fixwert, da die in den Gebäuden der Gründerzeit (und auch Jahrzehnte danach) verwendeten Vollziegel keiner Normenreihe wie etwa ISO oder EN entsprachen.

5.2.7 Geklebtes Mauerwerk

Die charakteristische Druckfestigkeit unverfestigten geklebten Mauerwerks wird anhand der Gleichung (5.20) berechnet und wurde durch einen Beiwert κ ergänzt, welcher den Beitrag der Mörteldruckfestigkeit ersetzt [26, p. 159].

$$f_k = \kappa \cdot K \cdot f_b^{0,7} \tag{5.20}$$

Im Rahmen dieser Arbeit wurde versucht, anhand der von Pohlplatz durchgeführten Versuche [23] einen Beiwert κ für durch Kunstharze verfestigtes Ziegelmauerwerk zu ermitteln. Dieser Beiwert soll durch Umformung von Gleichung (5.20) bei bekannter Mauerwerks- und Steindruckfestigkeit ermittelt werden. Für die Konstante K wurde nach EN 1996-1-1 ein Wert von 0,9 angenommen. Die Ergebnisse sind gestaffelt nach Injektionsmitteleintrag in Abb. 5.8, links ersichtlich, wobei sich keine Tendenz bzw. kein Zusammenhang ableiten lässt. Ein erstellter Boxplot³⁰ über den gesamten Injektionsmitteleintrag ist in Abb. 5.8, rechts zu sehen. Der Mittelwert für κ liegt bei etwa 2,2, wobei auch Ausreißer um den Bereich von 3,5 erkennbar sind. Demzufolge ergibt sich eine Varianz von 22 %.

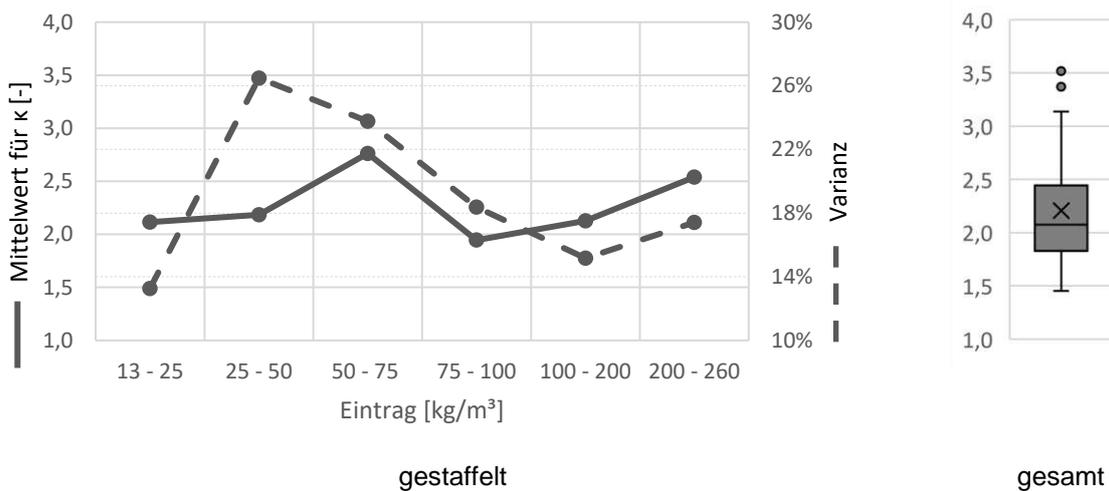


Abb. 5.8 – Gegenüberstellung der errechneten Beiwerte κ

³⁰ Erläuterung Boxplot: Siehe Anhang, Legende Seite 84.

Es kann also gesagt werden, dass sich kein eindeutiger Wert für κ ermitteln lässt. Wohl aber kann eine Einschränkung auf den Wertebereich zwischen 1,9 und 2,5 gemacht werden.

5.3 Zusammenfassung

Zunächst wurde die Wirkung von Injektionen auf mehrschalige Mauerwerke beleuchtet. Hierbei konnte festgestellt werden, dass drei Gleichungstypen für die Prognose der Druckfestigkeit von verfestigten mehrschaligen Mauerwerken zur Verfügung stehen. Die drei Gleichungstypen lassen sich nach den verwendeten mineralischen Injektionsmörteln unterteilen, wobei diese in niedrigfest und hochfest erfolgt. Weiters wurde nachvollzogen, dass eine Druckfestigkeit der verwendeten Injektionsmörtel 10 MPa bis 12 MPa bzw. das Fünf- bis Sechsfache der Druckfestigkeit der Zwischenschicht nicht zu übersteigen braucht. Hinsichtlich Schubfestigkeit von verfestigten Mauerwerken wurden durch Prüfungen Steigerungen von bis zu 250 % im Verhältnis zu unverfestigten mehrschaligen Mauerwerken erreicht.

Nach der Feststellung des Mörtelbedarfs für Ziegelmauerwerke wurde auf die Prognose der Druckfestigkeit von durch mineralische Injektionsgüter verfestigten Mauerwerken eingegangen. Hierbei stehen zwei Gleichungstypen zur Verfügung, wobei nur eine Unterscheidung nach der Berücksichtigung des eingebrachten Injektionsmörtels besteht.

Eine Analyse von durch organische Injektionsmittel verfestigten Mauerwerken wurde angewendet, um mathematische Zusammenhänge zu erkennen, welche sich allerdings nur ungenügend formulieren lassen. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass, sofern die Mörteldruckfestigkeiten nach Injektion jene der Mauersteine überschreiten, eine Berechnung des Mauerwerks in Anlehnung an eine unbewehrte Betonwand nach Eurocode 2 möglich ist. Sollte die Mörteldruckfestigkeiten jene der Mauersteine unterschreiten, so ist unter Umständen eine Berechnung als geklebtes Mauerwerk angebracht. Der hierfür benötigte Beiwert κ lässt sich allerdings nur grob eingrenzen bzw. es kann hierfür kein eindeutiger Wert ermittelt werden. Generell ist jedoch zu sagen, dass die Mörteldruckfestigkeiten in Abhängigkeit des Injektionsmitteleintrages (und der Qualität des Injektionsgutes) etwa um das 15 bis 35-fache verbessert werden können.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist das Anführen der Möglichkeiten zur Zustandsbewertung von ein- und mehrschaligen Mauerwerken im unverfestigten und durch Injektionen verfestigten Zustand. Dies sowohl im Hinblick auf normative Vorgaben als auch in wissenschaftlicher Hinsicht.

In Kapitel 1 wird eine kurze Einführung über die Arbeit angestellt.

Kapitel 2 enthält einen geschichtlichen Rückblick über Injektionsmaßnahmen und stellt die betrachteten Mauerwerkstypen dar. Weiters werden jene Injektionstechniken vorgestellt, die heutzutage den Stand der Technik abbilden. Ein Überblick über normativ zu verwendende Injektionsmittel wird unter der Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit angeführt. Einen nicht unwesentlichen Teil von Injektionsarbeiten bilden die Bohrlöcher, welche in den beschriebenen Bohrlochrastern abgeteuft werden. Auch die gängigen Beanspruchungen auf zu verfestigendes Mauerwerk werden erläutert. Erwähnenswert ist die Tatsache, dass organische Injektionsmittel zukünftig nur mehr in Sonderfällen ihre Anwendung finden werden.

Dem einer Verfestigung zu unterziehendem Mauerwerk widmet sich Kapitel 3, worin anfangs vorausseilende Maßnahmen, welche der Untersuchung und der Dokumentation dienen, beschrieben werden. Die Vorgehensweise zur Erlangung der erforderlichen Kenntnisstände wird erläutert und zusätzlich wird der Aufwand an durchzuführenden Prüfungen vor Ort beleuchtet. Wesentlich in diesem Kapitel sind die angeführten Prüfungsmethoden der Baustoffe Mörtel und Mauersteine (beide indirekt) sowie aus Teilen des Mauerwerks (direkt). Nur dadurch kann Aufschluss über die Tragfähigkeit des Bestandes erhalten werden. Auch die dargestellten physikalischen Prüfungsmethoden zeigen Aufschluss über den Zustand des Mauerwerks und werden in einer anschaulichen Übersicht angeführt.

Welche Untersuchungen in welchem Umfang am verfestigten Mauerwerk im Zuge der baubegleitenden Kontrolle durchzuführen sind, ist in Kapitel 4 erklärt.

Kapitel 5 widmet sich ebenfalls dem bereits verfestigten Mauerwerk und erfährt eine Unterteilung in einschaliges und mehrschaliges Mauerwerk. Im Falle von Mehrschaligkeit ist erwähnenswert, dass die meist mineralischen Injektionsmittel hauptsächlich in der wenig tragfähigen Zwischenschicht ihrer Verwendung entsprechend die Tragfähigkeit erhöhen. Weiters kann gesagt werden, dass die Druckfestigkeit des verwendeten Injektionsmörtels nicht mehr als das Fünffache jener Druckfestigkeit der unverfestigten Zwischenschicht aufzuweisen braucht. Bei einschaligen Ziegelmauerwerken ist unter der Voraussetzung der bekannten Hohlräume eine Prognose der durch mineralische Injektionsmittel erhaltenen höheren Druckfestigkeit möglich. Eine Analyse von durch organischen Injektionsmitteln verfestigten Mauerwerken lässt keine mathematische Interpretation der Verfestigungsmaßnahme zu, wobei jedoch anzumerken ist,

dass im Falle der Verfestigung der Mörtelfugen über die Druckfestigkeit der Mauersteine hinaus eine Berechnung als unbewehrte Betonwand nach Eurocode 2 möglich ist. Eine Berechnung als geklebtes Mauerwerk kann unter grober Annäherung des ermittelten Beiwertes κ ebenso erfolgen, wenn die erreichte Mörteldruckfestigkeit jene der Mauersteine nicht übersteigt. Letztlich können diverse Empfehlungen für die Verwendung von organischen Injektionsmitteln abgegeben werden.

Über zukünftige Verfestigungsmaßnahmen kann aus Sicht des Autors gesagt werden, dass noch großer Aufklärungsbedarf in Hinblick auf zu verfestigende Ziegelmauerwerke besteht. Die im Jahr 2020 zugängliche, eingesehene und teils verwendete Literatur befasst sich mehrheitlich mit Mauerwerken hergestellt aus Natursteinen. Ungeachtet der Tatsache, dass auch Natursteinmauerwerke einen wichtigen Bestandteil von diversen Bauwerken darstellen, darf nicht übersehen werden, dass Bauwerke, hergestellt während und nach der Industrialisierung, mit Ziegelsteinen anstatt von Natursteinen gemauert wurden. So sind diese Gebäude, welche in der Gründerzeit errichtet wurden, immer häufiger Sanierungen – auch im Zuge von Aufstockungen – zu unterziehen. Da der Umweltgedanke zukünftig eine immer wesentlichere Rolle einnimmt, ist auf das Verfestigen mittels organischen Injektionsmitteln im großen Maßstab künftig zu verzichten und mehrheitlich auf mineralische Injektionsmittel zurückzugreifen. Auf diesen Bereich sollte sich die Wissenschaft in Kooperation mit diversen ausführenden Unternehmen konzentrieren, da auch ein wirtschaftlich positiv anzusehender Faktor berücksichtigt werden muss.

7 Anhang

Kapitel	Methode	Zugänglichkeit (ein-/zweiseitig)	Mauerwerk	Schalen	Art der Untersuchung	Leistung	Druckfestigkeit des Mauerwerks	Druckfestigkeit der Zwischenschicht	Druckfestigkeit des Mauersteins	Schubfestig- keit	E- Modul	Schicht- dicke	Bohr- mehl	Hohlraum	Mehrschalig- keit	Einschränkung
3.3.2.2	Kleimbalken	2	NS	Einsch.	direkt	Pktl.	x				x		x			Nicht bei Mauerwerken mit Zwischenschicht
3.3.2.3	Druckschläuche	1	NS	Einsch.	direkt	Pktl.	x				x		x			
3.3.2.4	Diagonaler C-Versuch	2	Bel.	Bel.	direkt	Pktl.		Nach Probenahme des Ausbruchs		fvk		x	x	lokal begrenzt	nur in-situ	
3.3.2.5	Scher - C-Versuch	2	Bel.	Bel.	direkt	Pktl.		Nach Probenahme des Ausbruchs	Nach Probenahme des Ausbruchs	fvk, fvk0		x	x	lokal begrenzt	lokal begrenzt	
3.3.2.6	Bohrwiderstandsmessung	1	NS	Bel.	direkt	Fidd. / Pktl.			x				x			
3.3.2.7	Endoskopie	1	Bel.	Bel.	direkt	Fidd. / Pktl.							x	x	x	
3.3.3.1	Ultraschall	1	Bel.	Einsch.	indirekt	Pktl.	Teil der Forschung		x					x		Reichweite 50-100 cm
3.3.3.1	Bohrlochseismik	1	Bel.	Bel.	indirekt	Pktl.		x	x		x	x	x	x	x	
3.3.3.1	Tomographie	2	Bel.	Bel.	indirekt	Fidd. / Pktl.	x	x	x			x		x	x	
3.3.3.2	Radar	1	Bel.	Bel.	indirekt	Fidd. / Pktl.						x		x	x	Salzempfindlich
3.3.3.3	Widerstandselektrik	abh. v. Wirkungstiefe	Bel.	Bel.	indirekt	Fidd. / Pktl.						x		x	x	Feuchte-/Salzempfindlich

Fidd. Flächendeckend
 Pktl. Punktuell
 Einsch. Einschalig
 Bel. Beliebig
 NS Naturstein

Tab. 7.1 – Übersicht der Prüfungsmethoden nach dem Stand der Wissenschaft

Lokation		Unverfestigt										Injektionsmittel					Verfestigt											
		Komponentenfestigkeiten					MW Druckfestigkeit					MW Feuchtigkeits [%] (Engestellte Sektoren)	Injektionsmenge [kg/m³]	Name	Typ	Druckfestigkeit [MPa]	Rückprallhammer		MW Druckfestigkeit		MW Feuchtigkeits [%] (Gemessen aus Ergebnis Tabellen)							
		Rückprallhammer	Stempeldruckv.	Labor	EN 771-2	Rückprallh.	Indirekt	Direkt	fb,0	fm,0	fb,0						fk,0	fk,0	fk,0	fm,j		fb,j	fk,j	fk,j	fk,j			
Wand	Raster	Stelle	fm,0	fb,0	fm,0	fb,0	Stempeldruckv.	Labor	EN 771-2	Rückprallh.	Indirekt	Direkt	MW Feuchtigkeits [%] (Engestellte Sektoren)	Injektionsmenge [kg/m³]	Name	Typ	Druckfestigkeit [MPa]	Rückprallhammer	fm,j	fb,j	fk,j	fk,j	MW Druckfestigkeit	Spaltzug	Würfel	fk,j	MW Feuchtigkeits [%] (Gemessen aus Ergebnis Tabellen)	
7		1	0,54	26,7	1,87	30,3	-	-	-	3,48	5,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7		2	0,61	20,47	-	-	-	-	-	3,02	-	8,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	B	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	33,75	H3: Sika Injekt 20	1-K PU	n.v.	n.v.	30	n.v.	30	11,84	16,34	100	-	-	-	-
7	B	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	55	31,25	H3: Sika Injekt 20	1-K PU	n.v.	n.v.	30	n.v.	30	12,74	17,62	55	-	-	-	-
7	B	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	42,5	H3: Sika Injekt 20	1-K PU	n.v.	n.v.	30	n.v.	30	11,41	16,65	20	-	-	-	-
8		1	0,66	14,31	1,82	16,6	-	-	-	2,44	3,46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8		2	0,55	19,5	-	-	-	-	-	2,85	-	7,56	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	B	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	43,33	H4: Sika Sikadur 52	2-K EP	66	n.v.	30	n.v.	30	10,67	20,18	100	-	-	-	-
8	B	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	55	45,83	H4: Sika Sikadur 52	2-K EP	66	n.v.	26,7	n.v.	26,7	10,44	21,67	20	-	-	-	-
8	B	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	54,17	H4: Sika Sikadur 52	2-K EP	66	n.v.	27,9	n.v.	27,9	7,03	22,63	20	-	-	-	-
9		1	0,48	12,58	1,88	24,83	-	-	-	2,07	4,53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9		2	0,41	14,76	-	-	-	-	-	2,21	-	6,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	C	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	23,89	H3: Sika Injekt 20	1-K PU	n.v.	n.v.	26,1	n.v.	26,1	5,39	16,96	100	-	-	-	-
9	C	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	55	33,33	H3: Sika Injekt 20	1-K PU	n.v.	n.v.	30	n.v.	30	8	15,76	55	-	-	-	-
9	C	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	25,56	H3: Sika Injekt 20	1-K PU	n.v.	n.v.	30	n.v.	30	7,76	13,18	20	-	-	-	-
10		1	0,74	28,5	1,68	29,6	-	-	-	3,93	4,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10		2	0,73	27,9	-	-	-	-	-	3,86	-	10,72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	A	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	91,18	H3: Sika Injekt 20	1-K PU	n.v.	n.v.	30	n.v.	30	12,68	17,15	100	-	-	-	-
10	A	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	55	176,47	H3: Sika Injekt 20	1-K PU	n.v.	n.v.	30	n.v.	30	7,65	18,62	20	-	-	-	-
10	A	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	89,71	H3: Sika Injekt 20	1-K PU	n.v.	n.v.	28,5	n.v.	28,5	14,69	23,25	20	-	-	-	-
11		1	0,61	21,67	1,88	21,67	-	-	-	3,13	4,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11		2	0,57	15,3	-	-	-	-	-	2,46	-	8,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	A	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	161,76	H4: Sika Sikadur 52	2-K EP	66	n.v.	24,3	n.v.	24,3	13,6	20,5	100	-	-	-	-
11	A	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	55	217,65	H4: Sika Sikadur 52	2-K EP	66	n.v.	23,1	n.v.	23,1	10,09	21,14	100	-	-	-	-
11	A	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	202,94	H4: Sika Sikadur 52	2-K EP	66	n.v.	26,7	n.v.	26,7	9,09	22,13	20	-	-	-	-
12		1	0,45	30	1,89	26,53	-	-	-	3,59	4,74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12		2	0,62	30	-	-	-	-	-	3,89	-	10,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	C	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	22,22	H4: Sika Sikadur 52	2-K EP	66	n.v.	30	n.v.	30	7,76	19,95	100	-	-	-	-
12	C	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	55	29,44	H4: Sika Sikadur 52	2-K EP	66	n.v.	30	n.v.	30	11,69	21,34	55	-	-	-	-
12	C	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	30	H4: Sika Sikadur 52	2-K EP	66	n.v.	30	n.v.	30	6,31	16,09	20	-	-	-	-

Tab. 7.3 – Aufstellung der Ergebnisse (Wand 7 bis Wand 12) nach [23]

MW Feuchte [%]		fk,0 (Komponenten, Labor) [MPa]											
>	≤	≥	≤	>	≤	>	≤	>	≤	>	≤	>	≤
22,5	23,67	3,46	3,5	3,5	3,5	4	4	4,5	4,5	4,5	5	5	5,15
		Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]
		Sika Sikadur 52-24-B	54					Sika Injekt 20-30-A	90	Sto PU 850-15-B	16		
20	22,5			Sika Sikadur 52-33-A Spesan WL-12-B	203 55			Spesan WL-3-A	121				
17,5	20							Sto PU 850-18-C	31	Spesan WL-6-C	13		
15	17,5							Sto PU 850-9-A Sika Sikadur 52-36-C	118 30	Sika Injekt 20-21-B	43		
12,85	15							Sika Injekt 20-27-C	26				

Tab. 7.4 – Verwendete Injektionsmittel bei Mauerwerksfeuchte von 20 % nach [23]

MW Feuchte [%]	fk,0 (Komponenten, Labor) [MPa]														
	55	3,46		3,5		3,5		4		4,5		4,5		5	
fk,i (Würfel, direkt) [MPa]	≤	≥	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]
>															
22,5	23,67													Sto PU 850-14-B	23
20	22,5	Sika Sikadur 52-23-B	46			Sika Sikadur 52-32-A	218	Sika Sikadur 52-35-C	29	Sto PU 850-17-C	35				
17,5	20					Spesan WL-11-B	51	Sika Injekt 20-29-A	176	Sto PU 850-8-A	96	Sika Injekt 20-20-B	31		
15	17,5							Spesan WL-2-A	143			Sika Injekt 20-26-C	33		
12,85	15														

Tab. 7.5 – Verwendete Injektionsmittel bei Mauerwerksfeuchte von 55 % nach [23]

MW Feuchte [%]		fk,0 (Komponenten, Labor) [MPa]											
>	≤	≥	≤	>	≤	>	≤	>	≤	>	≤	>	≤
3,46	3,5	3,5	3,5	3,5	4	4	4,5	4,5	4,5	4,5	5	5	5,15
Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]	Harzname	Eintrag [kg/m ³]
22,5	23,67											Spesan WL-4-C	35
20	22,5	Sika Sikadur 52-22-B	43			Sika Sikadur 52-31-A	162						
17,5	20							Spesan WL-1-A	259				
15	17,5							Sika Sikadur 52-34-C	22				
12,85	15									Sika Injekt 20-28-A	91	Sika Injekt 20-19-B	34
										Sika Injekt 20-25-C	24	Sto PU 850-13-B	25
										Sto PU 850-16-C	30		

Tab. 7.6 – Verwendete Injektionsmittel bei Mauerwerksfeuchte von 100 % nach [23]

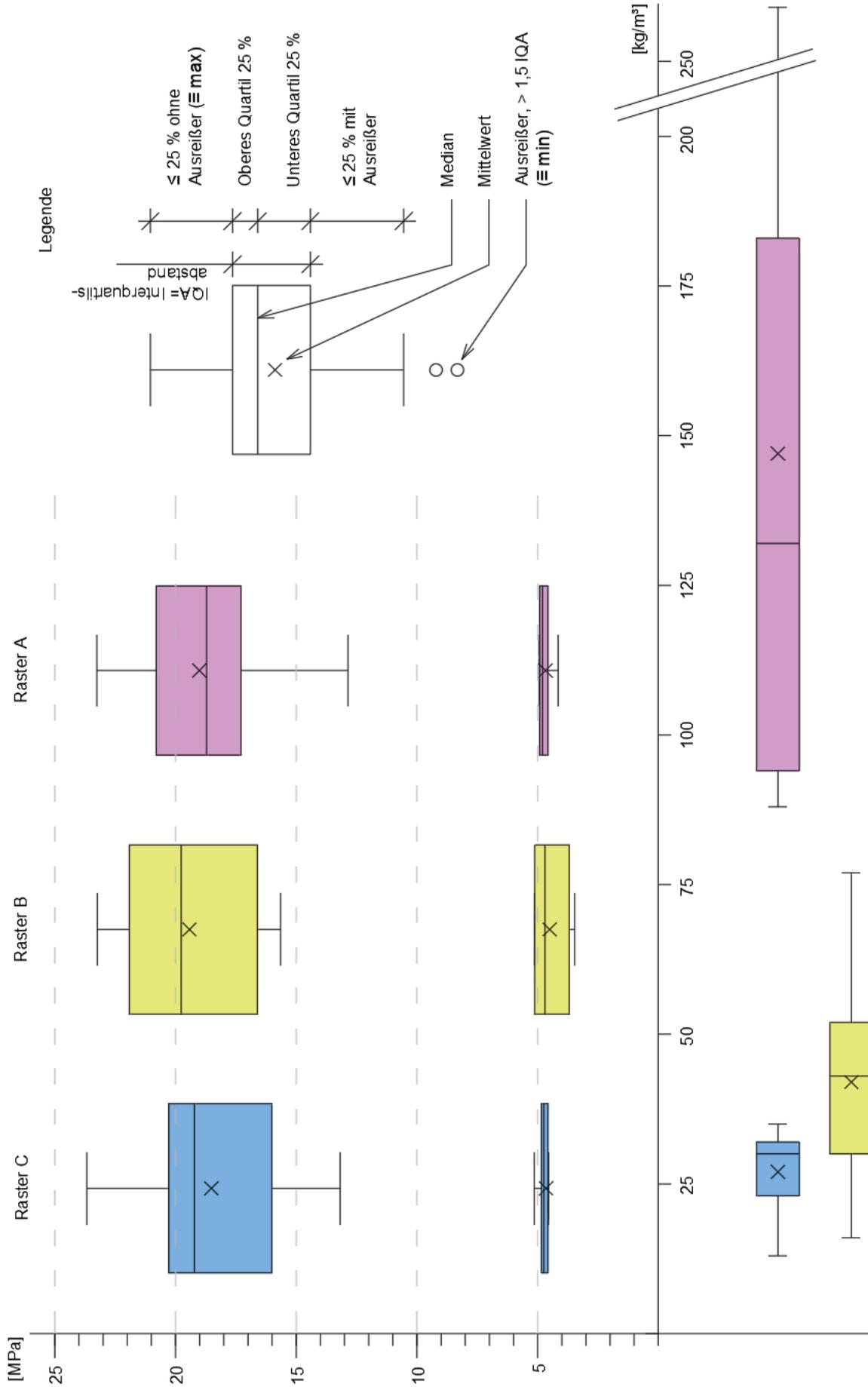


Abb. 7.1 – Steigerung der Mauerwerksdruckfestigkeit aus [23] in Boxplotdarstellung

Literaturverzeichnis

- [1] E. Vintzileou und A. Miltiadou-Fezans, „Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts,“ *Engineering Structures* 30, pp. 2265-2276, 2008.
- [2] B. Silva, A. Pigouni, M. Valuzzi und C. Modena, „Calibration of analytical formulations predicting compressive strength in consolidated three-leaf masonry walls,“ *Construction and Building Materials*, pp. 28-38, 04 2014.
- [3] E. Vintzileou, „Researchgate,“ 01 2007. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/242419246_GROUTING_OF_THREE-LEAF_MASONRY_EXPERIMENTAL_RESULTS_AND_PREDICTION_OF_MECHANICAL_PROPERTIES. [Zugriff am 24 08 2020].
- [4] M. R. Valuzzi, F. da Porto und C. Modena, „Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls,“ in *Materials and Structures* 37 (267), Bagneuc, RILEM, 04 2004, pp. 184-192.
- [5] F. Wenzel und H. Maus, „Nachuntersuchungen an ingenieurmäßig sanierten Mauerwerksbauten Erster Zwischenbericht,“ in *Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke Sonderforschungsbereich 315*, Karlsruhe, Ernst & Sohn, 1986, pp. 211-221.
- [6] H. Maus, Injiziertes und bewehrtes altes Mauerwerk, Dissertation, Karlsruhe, 1995.
- [7] V. Dunjic, Tragfähigkeitbewertung ausgewählter gründerzeitlicher Mauerwerkskonstruktionen, Dissertation, Wien, 2017.
- [8] G. Patitz, Zerstörungsfreie Untersuchung an altem Mauerwerk DIN, Stuttgart: Beuth Verlag GmbH, 2010.
- [9] H. Maus, „Über die Anfänge der Technik des Verpressens von Zement bei Mauerwerksbauten,“ in *Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Sonderforschungsbereich 315*, Karlsruhe, Ernst & Sohn, 1987, pp. 101-114.
- [10] F. Wenzel, „Verpressen, Vernadeln und Vorspannen von Mauerwerk historischer Bauten. Stand der Forschung, Regeln für die Praxis,“ in *Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Sonderforschungsbereich 315*, Karlsruhe, Ernst & Sohn, 1987, pp. 53-72.
- [11] Österreichische Bautechnik Vereinigung, Injektionstechnik-Teil 2: Mauerwerk, Wien: ÖBV, 12 2015.
- [12] E. Luso und P. Lourenco, „Experimental characterization of commercial lime based grouts for stone masonry consolidation,“ *Construction and Building Materials*, pp. 216-225, 11 2016.
- [13] W. Kirchmayer, R. Popp und A. Kolbitsch, Dachgeschoßausbau in Wien, Wien: Verlag Österreich, 2011.
- [14] A. Kolbitsch, Erhaltung und Erneuerung von Hochbauten, Wien: TU Verlag, 2019.
- [15] E. Toumbakari, Lime-Pozzolan-Cement Grouts and their Structural Effects on Composite Masonry Walls, (PhD thesis), Katholieke Universiteit Leuven, Belgien, 2002.
- [16] F. Wenzel und J. Kleinmanns, Historisches Mauerwerk: Untersuchen, Bewerten und Instandsetzen (Sonderforschungsbereich 315), Karlsruhe: Fraunhofer IRB, 2000.
- [17] J. Maier, Handbuch Historisches Mauerwerk, Erlangen: Springer Vieweg, 2012.
- [18] L. Restuccia, A. Lopez, D. Liberatore und J. M. Tulliani, „An investigation of the beneficial effects of adding carbon nanotubes to standard injection grout,“ in *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, Wiley, 2018, pp. 119-128.
- [19] A. Vavricuk, „The influence of Metakaolin on the properties of NHL-based grouts for historic masonry repair,“ in *Construction and Building Materials* 172, 2018, pp. 706-716.

- [20] L. G. Baltazar, M. Henriques, F. Jorne und M. Cidade, „Combined effect of superplasticizer, silica fume and temperature in the performance of natural hydraulic lime grouts,“ in *Construction and Building Materials* 50, ELSEVIER, 2014, pp. 584-597.
- [21] K. Pohlplatz, Interviewee, *Mauerwerksverfestigung*. [Interview]. 22 09 2020.
- [22] D. Van Gemert, E.-E. Toumbakari und L. Schuremans, „Konstruktive Injektion von historischem Mauerwerk mit mineralisch- oder polymergebundenen Mörteln,“ in *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege*, 5. Jahrgang, 1999, pp. 73-98.
- [23] K. Pohlplatz, Wirksamkeit von organischen Injektionsmitteln zur Verfestigung und Feuchtigkeitsabdichtung von Bestandsmauerwerk, sowie deren Emmisionsverhalten, Dissertation, Wien, 2005.
- [24] A. Pech und A. Herzina, „Mauerwerksverfestigungen,“ in *Mauerwerk-Kalender 2020: Bauen im Bestand, Befestigungen, Lehmmauerwerk*, Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2020, pp. 103-139.
- [25] A. Kolbitsch, „Aktuelle Verfahren zur Sanierung von Altbauten unter besonderer Berücksichtigung von Mauerwerkskonstruktionen,“ in *Baustofflehre Bauphysik Brandschutz: Festschrift zum 60. Geburtstag von Ulrich Schneider*, Wien, 2002, pp. 85-93.
- [26] A. Pech, H. Gangoly, P. Holzer und P. Maydl, Ziegel im Hochbau, Basel: Birkäuser, 2018.
- [27] W. Jäger und G. Marzahn, Mauerwerk Bemessung nach DIN 1053-100, Berlin: Ernst & Sohn, 2010.
- [28] M. Graubohm, Einfluss des Kontakts zwischen Mauerstein und Mauermörtel auf das Drucktragverhalten von Mauerwerk, Aachen: Dissertation, 2018.
- [29] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 1052-1: Prüfverfahren für Mauerwerk-Bestimmung der Druckfestigkeit, Wien, 01 01 1999.
- [30] M. Spanraft, Verstärkung von Mauerwerkskörpern durch Injektionen, Wien: Diplomarbeit, 2006.
- [31] S. Al Bosta, Risse im Mauerwerk: Verformungen infolge von Temperatur und Schwinden; Baupraktische Anwendungsbeispiele, 2. Auflage, Düsseldorf: Werner, 1999.
- [32] H. R. Ganz, Mauerwerksscheiben unter Normalkraft und Schub, Dissertation, Zürich: R. Langer, 1985.
- [33] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 1052-3: Prüfverfahren für Mauerwerk-Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit (Haftscherfestigkeit), Wien, 01 06 2007.
- [34] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM B 4008-1: Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Tragwerke - Teil 1: Hochbau, Wien, 15 10 2018.
- [35] G. Patitz, „Mikroseismische Verfahren zur Beurteilung von mehrschaligem altem Mauerwerk, Band 1,“ in *Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen V*, Freiburg, MSR V, 1999, pp. 549-564.
- [36] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 772-1: Prüfverfahren für Mauersteine, Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit, Wien, 15 12 2015.
- [37] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM B 1996-3: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten - Nationale Festlegungen und Ergänzungen zur ÖNORM EN 1996-3, Wien, 01 07 2016.
- [38] Deutsches Institut für Normung, DIN 18555-9 Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln - Teil 9: Bestimmung der Fugendruckfestigkeit von Festmörteln, Berlin: Beuth, 09 1999.
- [39] J. Henkel, „Die Ermittlung der Mauerwerksgüte von Bestandsmauerwerk aus kleinformatischen Ziegeln, Varianten der Festigkeitsprüfung,“ in *Mauerwerk 20, Heft 5*, Berlin, Ernst & Sohn, 2016, pp. 391-406.

- [40] A. Pauser, R. Schmiedmayer und A. Pech, Bestimmung der Festigkeit von Mauermörtel mittels Schlagversuchen, Wien: TU Wien, 1995.
- [41] Österreichisches Normungsinstitut, Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten, Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk, Wien, 01 12 2019.
- [42] A. Pech und F. Zach, „Mauerwerksdruckfestigkeit- Bestimmung bei Bestandsobjekten,“ in *Mauerwerk 13, Heft 3*, Berlin, Ernst & Sohn, 2009, pp. 135-139.
- [43] P. Maydl, „Prüfung von Mauerwerk in situ und in der Versuchsanstalt,“ in *Erhaltung und Erneuerung von Bauten, Band 1 - Grundlagen*, Wien, Österr. Ges. zur Erhaltung von Bauten, 1986, pp. 199-217.
- [44] K. A. Steffens und T. Burkert, „Instandsetzung und Ertüchtigung von Mauerwerk, Teil 7: Experimentelle Bestimmung der Tragfähigkeit von Mauerwerk - Belastungsversuche an Mauerwerksbauten in situ,“ in *Mauerwerk Kalender 2009*, Berlin, Ernst & Sohn, 2009, pp. 243-270.
- [45] R. Silva, A. Arede, P. Rocha und C. Almeida, „A Novel Approach to the in situ Compression Testing of Stone Masonry Walls,“ *RILEM Bookseries 18*, pp. 741-750, 2019.
- [46] F. M. Fernandes, L. F. Ramos, E. Manning, J. Ferreira und P. Mendes, „Multi-Technique Approach for the Assessment of Historical Masonry Constructions,“ in *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2013, pp. 1249-1256.
- [47] W. Brameshuber, U. Schmidt, M. Graubohm und I. Beer, „Prüfverfahren zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften von Mauerwerk,“ in *Mauerwerk-Kalender*, Berlin, Ernst & Sohn, 2008, pp. 165-191.
- [48] A. Borri, G. Castori, M. Corradi und E. Speranzini, „Shear behavior of unreinforced and reinforced masonry panels subjected to in situ diagonal compression tests,“ in *Construction and Building Materials 25*, 2011, pp. 4403-4414.
- [49] N. Viale und G. Ventura, „Shear Flat Jack Test for Evaluating Shear Characteristics on Unreinforced Masonry Structures,“ in *International Journal of Architectural Heritage*, Taylor & Francis, 2020, pp. 1-29.
- [50] M. Corradi, C. Tedeschi, L. Binda und A. Borri, „Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: Deep repointing,“ in *Constructions and Building Materials*, Elsevier, 2008, pp. 463-472.
- [51] S. Chiostrini, L. Galano und A. Vignoli, „ON THE DETERMINATION OF STRENGTH OF ANCIENT MASONRY WALLS VIA EXPERIMENTAL TESTS,“ *12WCEE 2000*, 2000.
- [52] S. Iffert-Schier, Einsatz von Festigungsmitteln zur Konsolidierung der Tragfähigkeit von Bestehendem Mauerwerk, Dissertation, Hannover, 2000.
- [53] F. Jorne, F. Henriques und L. G. Baltazar, „Evaluation of consolidation of grout injection with ultrasonic tomography,“ in *Construction and Building Materials 66*, ELSEVIER, 2014, pp. 494-506.
- [54] A. Wendrich, Zerstörungsfreie Ortung von Anomalien in historischem Mauerwerk mit Radar und Ultraschall - Möglichkeiten und Grenzen, Dissertation, Berlin: BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 2008.
- [55] M. Uranjek, V. Bosiljkov, R. Zarnic und V. Bokan-Bosiljkov, „In situ tests and seismic assessment of a stone-masonry building,“ in *Materials and Structures*, RILEM, 2012, pp. 861-879.
- [56] L. Schuremans, F. Van Rickstal, K. Venderickx und D. Van Gemert, „Evaluation of masonry consolidation by geo-electrical relative difference resistivity mapping,“ in *Materials and Structures, Vol. 36*, Heverlee, RILEM, 2003, pp. 46-50.
- [57] R. P. Ceniceros, J. A. Martines, M. H. Martin, J. A. Lozano und E. E. Tapia, „Internal Geometrical Characterization of Stone Masonry Walls Using Electrical Resistivity Tomography,“ in *Structural Analysis of Historical Constructions, RILEM Bookseries 18*, RILEM, 2019, pp. 664-651.

- [58] D. Van Gemert, S. Ignoul, K. Brosens und E.-E. Toumbakari, „Consolidation and Strengthening of Historical Masonry by Means of Mineral Grouts: Grout Development,“ in *Restoration of Buildings and Monuments* , BIRKHÄUSER, 2015, pp. 29-45.
- [59] E. N. Vintzileou und C.-E. N. Adami, „The Bond Mechanism in Stone- or Brick-to-Grout Interfaces,“ in *Strain*, Blackwell Publishing Ltd, 2009, pp. 400-409.
- [60] H. Wohlrab, Chronologische Formate- Tabelle des österr. Mauerziegels, Heft 3/4, (ohne Jahr).
- [61] H. Daub, Hochbaukunde: 1. Gebäude, Baustoffe ; Holz-, Stein- und Eisenverbände ; Träger, Stützen ; Wände, Decken, Wien: Deuticke, 1922.
- [62] T. Krapfenbauer, Bautabellen, 16. Ausgabe, Wien: Jugend & Volk, 2007.
- [63] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 1992-1-1:Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Wien, 15 02 2015.
- [64] J. Henkel und C. Neuwald-Burg, „Ermittlung der Mauerwerksgüte von Bestandsmauerwerk,“ in *Tagungsband der 30. Hanseatischen Sanierungstage*, Lübeck, Fraunhofer IRB, 07 11 2019, pp. 191-208.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1 – Gegenüberstellung Injektionsmittelverbrauch zu relativen Kosten [13, p. 204] [14].....	7
Abb. 2.2 – Bohrlochneigung (links) sowie Bohrlochraster im halben Versatz (rechts) [24, p. 116]	12
Abb. 2.3 – Vergleich der Querdehnungsbehinderung (mit: links, ohne: rechts) von Mauersteinen zwischen Mörtelfugen, adaptiert nach [28, p. 15]	14
Abb. 2.4 – Spannungs-Dehnungskurve von Mauerwerk [31, p. o. S.]	15
Abb. 2.5 – Scheibenschub- Beanspruchung (SSB) und Plattenschub- Beanspruchung (PSB) an einem Mauerwerk.....	16
Abb. 2.6 – Tragsystem Schubwand [32, p. 45]	16
Abb. 2.7 – Wandscheibe unter Scheibenschub nach dem Ansatz von Mann/Müller, adaptiert nach [26, p. 137].....	17
Abb. 2.8 – Versagensarten von Mauerwerk unter Schubbeanspruchung nach Mann/Müller	18
Abb. 3.1 – Prinzipskizze des Stempeldruckverfahrens in [mm], adaptiert nach [40, p. o. S.]	26
Abb. 3.2 – Mauerwerksprüfkörper (nicht maßstäblich), adaptiert nach [29, p. 5]	32
Abb. 3.3 – Belastungstypen: Typ I (links), Typ II (rechts), adaptiert nach [33, p. 8]	33
Abb. 3.4 – Anordnung eines Flat-Jack-Tests, adaptiert nach [26, p. 181].....	34
Abb. 3.5 – Prinzip experimenteller Tragsicherheitsnachweise, adaptiert nach [44, p. 247]	38
Abb. 3.6 – Anordnung der horizontalen Klemmbalken, adaptiert nach [45, p. 743]	39
Abb. 3.7 – Anordnung der roten Tube – Jacks (links) sowie deren Gestalt (rechts) [46, p. 1251].....	40
Abb. 3.8 – Prüfverfahren: links nach DIBt an keramischen Mauersteinen, adaptiert nach [47, p. 180], sowie rechts in-situ an Mauersteinen aus Naturstein [48, p. 4408].....	40
Abb. 3.9 – Bestandteile des Scher-Kompressionsversuchs, adaptiert nach [50, p. 466].....	42
Abb. 3.10 – Durchführung zerstörungsarmer seismischer Verfahren mittels Sender (S) und Empfänger (E), adaptiert nach [35, p. 558 f.]	44
Abb. 3.11 – Links: Versuchsaufbau einer Radarmessung, sowie rechts: Anordnungsmöglichkeiten am Querschnitt von Sender (S) und Empfänger (E), adaptiert nach [54, p. 22 f.]	46
Abb. 3.12 – Vertikale Tiefenschnitte vor (before) und 180 Tage nach (after) der Injektion [55, p. 868]	47
Abb. 3.13 – Ausgangssituation (links) sowie Endergebnis (Mitte) und Geschwindigkeitsprofil (rechts) der Radarmessung [54, p. 78]	47
Abb. 3.14 – Schema des Versuchsaufbaus nah der Wenner Konfiguration [56, p. 47]	48
Abb. 3.15 – Bestandsmauerwerk (a) sowie Versuchsergebnisse im Horizontalschnitt (b) [57, p. 648].....	48
Abb. 3.16 – Versuchsergebnisse vor (links) und nach (rechts) der Injektion [56, p. 49].....	49
Abb. 5.1 – Vergleich zwischen prognostizierter (pred.) und tatsächlicher Druckfestigkeit [3, p. 181]	57
Abb. 5.2 – Beziehung der Druckfestigkeit Injektionsmörtel zu Mauerwerksdruckfestigkeit [3, p. 176]	59
Abb. 5.3 – Normalisierte Zylinderdruckfestigkeit und Mauerwerksdruckfestigkeit kontra Mörteldruckfestigkeit [3, p. 190].....	60
Abb. 5.4 – Normalisierte Zylinder- und Mauerwerksdruckfestigkeit kontra Mörteldruckfestigkeit [2, p. 36].....	60
Abb. 5.5 – Zusammenstellung von Ergebnissen der Mauerwerksverfestigung aus [23]	69
Abb. 5.6 – Bruchbedingung nach Ganz/Thürlimann, adaptiert nach [32, p. 12 ff.]	71
Abb. 5.7 – Zusammenstellung der Mörteldruckfestigkeiten vor und nach der Injektionsmaßnahme aus [23]	73
Abb. 5.8 – Gegenüberstellung der errechneten Beiwerte κ	74
Abb. 7.1 – Steigerung der Mauerwerksdruckfestigkeit aus [23] in Boxplotdarstellung	84

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1 – Kategorisierung von zu konsolidierendem Mauerwerk [11, p. 6]	5
Tab. 3.1 – Festlegung der zumindest erforderlichen Kenntnisstände [34, p. 8]	22
Tab. 3.2 – Vorgehensweise zur Erhaltung der Kenntnisstände, adaptiert nach ÖN B 4008-1, Anhang B	23
Tab. 3.3 – Abgrenzung von indirekten zu direkten Prüfungen in Abhängigkeit des Mauerwerkszustandes	25
Tab. 3.4 – Maße für kleine Prüfkörper zur Prüfung der Druckfestigkeit am Mauerwerk [29, p. 5]	32
Tab. 3.5 – Teilsicherheitsfaktoren zur Bestimmung der Versuchsgrenzlast [34, p. 19]	37
Tab. 4.1 – Überwachungsstufen für die Herstellung, adaptiert nach [37, p. 24] [24, p. 124]	51
Tab. 5.1 – Übersicht: Gleichungen zur Prognose der Druckfestigkeit von dreischaligem Natursteinmauerwerk nach Injektion	58
Tab. 5.2 – Eigenberechnung sowie Berechnung nach Daub der Fugenkubatur je m ³ Mauerwerk	62
Tab. 5.3 – Ergebnisse der multiplen linearen Regression für die Raster B und C aus [23]	68
Tab. 5.4 – Ausschnitt aus Tab. 7.4	70
Tab. 7.1 – Übersicht der Prüfungsmethoden nach dem Stand der Wissenschaft	78
Tab. 7.2 – Aufstellung der Ergebnisse (Wand 1 bis Wand 6) nach [23]	79
Tab. 7.3 – Aufstellung der Ergebnisse (Wand 7 bis Wand 12) nach [23]	80
Tab. 7.4 – Verwendete Injektionsmittel bei Mauerwerksfeuchte von 20 % nach [23]	81
Tab. 7.5 – Verwendete Injektionsmittel bei Mauerwerksfeuchte von 55 % nach [23]	82
Tab. 7.6 – Verwendete Injektionsmittel bei Mauerwerksfeuchte von 100 % nach [23]	83