FORSCHUNGSINITIATIVE Zukunft BAU

F 3187

Wolfram Jäger, Hassan Youssef, Fabian Meyer

Faseranker und -nadeln (FaAnNa) – Einsatz von Ankern und Nadeln aus Faserwerkstoffen bei der Sanierung historischer Bauwerke

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

F 3187

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0463-8

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

Fraunhofer IRB Verlag
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Architektur Lehrstuhl Tragwerksplanung

C:\Users\wjaeger\AppData\Local\Temp\Temp1_19_05_21-Endbericht_FaAnNa - komprimiert.zip\19-06-05-Endbericht_FaAnNa - f.docx

ENDBERICHT

Faseranker und -nadeln (FaAnNa)

Titel: „Einsatz von Ankern und Nadeln aus Faserwerkstoffen bei der Sanierung historischer Bauwerke“

Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.60
Projektnummer TU/LS Twpl.: 61503-FaAnNa

Auftraggeber: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn

Auftragnehmer: Technische Universität Dresden
Fakultät Architektur
Lehrstuhl Tragwerksplanung
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger
01062 Dresden

Bearbeiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger
Dipl.-Ing. Hassan Youssef
Dipl.-Ing. Fabian Meyer

Das Forschungsprojekt wird mitfinanziert sowie durch Materialspenden und Eigenleistungen unterstützt durch:

S & P Clever Reinforcement
Karl-Ritscher-Anlage 5
60437 Frankfurt a.M.

Jäger und Bothe Ingenieure GmbH
Haydnstraße 3
09119 Chemnitz

Jäger Ingenieure GmbH
Wichernstraße 12
01445 Radebeul

Minova CarboTech GmbH
Am Technologiepark 1
45307 Essen

Schöck Bauteile GmbH
Vimbucher Straße 2
76534 Baden-Baden

CASEA GmbH
Werk Ellrich
Pontelstr. 3
99755 Ellrich

quick-mix Leipzig GmbH & Co. KG
Tornauer Straße 6
04356 Leipzig

Ziegelwerk Freital Eder GmbH
Wilsdruffer Straße 25
01705 Freital

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert (Az.: SWD-10.08.18.7-15.60). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1 Abstract/ Kurzzusammenfassung 6
2 Einführung 8
2.1 Problemstellung 8
2.2 Zielsetzung 8
2.3 Theoretische Untersuchung 8
2.4 Experimentelle Arbeiten 9
2.5 Auswertung und Zusammenfassung 10
3 Stand der Technik 12
3.1 Einsatz von Ankern und Nadeln 12
3.1.1 Schloss Steinort, Sztynort, Polen 12
3.2 Aktuelle Nachweisführung 20
3.3 Probleme bei sulfathaltigem Mauerwerk 21
4 Theoretische Untersuchung 23
4.1 Allgemein 23
4.2 Wirkungsweise 23
4.2.1 Verpressanker im Mauerwerk 24
4.2.2 Kraftübertragung im Verpressanker 24
4.2.2.1 Krafteinleitung in den Ankerstab 25
4.2.2.2 Krafteinleitung in den Verpresskörper 26
4.2.3 Versagensarten des Verpressankers 26
4.3 Analytische Beschreibung der Verbundfestigkeit bei Nadeln/Verpressankern 27
4.3.1 Verbundverhalten zwischen Stabanker und Injektionsmörtel 28
4.3.2 Verbundverhalten zwischen Injektionsmörtel und Naturstein 32
5 Untersuchungen zum Verbundverhalten 37
5.1 Experimentelle Untersuchungen - Mauerwerksbewehrung 37
5.1.1 Allgemeines 37
5.1.2 Konstruktive Vorschreibungen in der Norm 37
5.1.3 Materialeigenschaften 38
5.1.3.1 Steinarten 38
5.1.3.2 Mauermörtel 38
5.1.3.3 Verwendete Mauerbewehrung 39
5.1.4 Prüfkörperherstellung 39
5.1.5 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung 43
5.1.6 Auswertung der Versuchsserien 45
5.1.6.1 Auswertung Versuchs-Serie 1 45
5.1.6.2 Auswertung Versuchs-Serie 2 46
5.1.6.3 Auswertung Versuchs-Serie 3 47
5.1.6.4 Auswertung Versuchs-Serie 4 48
5.1.6.5 Auswertung Versuchs-Serie 5 49
5.1.7 Auswertung der Versuche der Mauerwerksbewehrung nach Barlet 50
5.1.8 Zusammenfassung 52
5.2 Experimentelle Untersuchungen -Faserverbundwerkstoffe 53
5.2.1 Versuche zum Verbundverhalten mit kleiner Verbundlänge 53
5.2.1.1 Allgemeines 53
5.2.1.2 Materialeigenschaften 54
5.2.1.3 Prüfkörperherstellung 60
5.2.1.4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung 65
5.2.1.5 Ergebnisse der Versuche mit GFK-Stäben Combar der Fa. Schöck, Durchmesser 16mm, variierenden Verpressmörtelsorten, Verbundlänge 2 ds und 5 ds 67

5.2.1.6 Eignung der Mörtelsorten 79
5.2.1.7 Ergebnisse der Versuche mit variierenden Faserverbundwerkstoffen, Durchmesser 8 mm, Verbundlänge 2 ds und 5 ds 88
5.2.2 Versuche zum Verbundverhalten mit großer Verbundlänge 92
5.2.2.1 Beschreibung 92
5.2.2.2 Materialeigenschaften 92
5.2.2.3 Prüfkörperherstellung 94
5.2.2.4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung 95
5.2.2.5 Auswertung der Versuche 97
5.2.3 Auswertung der experimentellen Untersuchungen 102
5.2.3.1 Mittlere Verbundspannung 102
5.2.3.2 Schrittweise Integration mittels Verbundgrundgesetzen 104
5.2.3.3 Zusammenfassung 106
5.3 Zwischenfazit 108
6 Untersuchung des Vorspannverhaltens von Ankern aus Faserverbundwerkstoffen 109
6.1 Allgemeines 109
6.2 Stand der Forschung 109
6.3 Technologie des Vorspannens 109
6.3.1 Vorspanntechnik 109
6.3.2 Vorspannen mit Verbund 109
6.3.3 Vorspannen ohne Verbund 110
6.4 Experimentelle Untersuchungen zum Vorspannverhalten von Faserverbundwerkstoffen 110
6.4.1 Vorspannsystem 110
6.4.2 Dauerstandversuche 111
6.4.2.1 Ziel der Versuche 111
6.4.2.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung 111
6.4.2.3 Messtechnik 114
6.4.2.4 Auswertung der Dauerstandversuche 116
6.4.3 Torsionsfestigkeit 117
6.4.3.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung 117
6.4.3.2 Auswertung der experimentellen Untersuchung der Torsionsfestigkeit 119
6.5 Zwischenfazit 122
7 Praxistest 122
8 Zusammenfassung der Ergebnisse für die Praxis 128
9 Anwendungsbeispiel 133
10 Ausblick 138
11 Literatur- und Quellenverzeichnis 140
12 Anhang-Fotodokumentation und Messwerte der Versuche 146
12.1 Versuche der Mauerwerksbewehrung 146
12.1.1 Verwendete Steinformate 146
12.1.2 Verwendete Mörtelsorten 146
12.1.3 Geprüfte Verbundlänge der Mauerbewehrung 147
12.1.4 Aufmauern der Prüfkörper 147
12.1.5 Versuchsbegleitende Materialprüfungen-Mörtelprüfungen 148
12.1.6 Versuchsbegleitende Materialprüfungen-Fugendruckfestigkeit 150
12.1.7 Versuchsbegleitende Materialprüfungen-Stahlzug 152
12.1.8 Ausziehversuche 154
12.2 Versuche zum Verbundverhalten im Naturstein 158

12.2.1 Verwendete Faserverbundwerkstoffe 159
12.2.2 Versuchsbegleitende Materialprüfung – Natursandstein 160
12.2.3 Versuchsbegleitende Materialprüfung – Saugfähigkeit Natursandstein 161
12.2.4 Versuchsbegleitende Materialprüfung – GFK-Stäbe 162
12.2.5 Prüfkörperherstellung- kurze Verbundlänge 163
12.2.6 Prüfkörperherstellung große Verbundlänge 164
12.2.7 Ausziehversuche mit kurzer Verbundlänge 165
12.2.7.1 Ausziehversuche mit 16mm GFK Stab 165
12.2.7.2 Ausziehversuche mit 8mm GFK-Stab 166
12.2.7.3 Ausziehversuche mit 8mm CFK-Stab 167
12.2.8 Ausziehversuche mit großer Verbundlänge 168
12.2.8.1 Ausziehversuch mit 16mm GFK-Stab 168
12.2.8.2 Ausziehversuch mit 27mm GFK-Stab 169
12.3 Torsionsversuche 170
12.4 Dauerstandversuche 171
12.5 Versuchsmauerwerk 173

1 Abstract/ Kurzzusammenfassung

Abstract

When preserving and strengthening historical constructions, bracing and needling of damaged or insufficiently self-supporting masonry are technologies that are frequently applied. The use of steel bar to brace masonry has the disadvantage that a suitable cement-containing mortar is required to ensure corrosion protection. But there are compatibility problems associated with cement if the masonry contains sulphate. An attack reaction occurs through the formation of ettringite. A potential alternative here is fibre-reinforced plastics. The intention of the research project is to research the key principles of fibre composite reinforcement use for the purpose of bracing and needling historical masonry, and to examine building materials and technologies used in practice. This will help establish conditions that will enhance the quality of building materials' use in monument preservation, when renovating historical masonry. The solutions must be sustainable, and must be able to satisfy the increased demands being made in the area of monument preservation. Regarding the theoretical foundations the professor for structural design of the faculty of architecture performed extensive experimental analyses on the behaviour of composites. For the analyses test bodies made of natural sandstone, varying grouting mortars and braces made of glass fibre reinforced plastics (GFRP) or carbon fibre reinforced plastics (CFRP) were produced. By performing structural pull-out tests [Figure 1] with large and small bonded lengths it was possible to determine and analyse the bond stresses in the composite system [Figure 2]. Furthermore the susceptibility to torsion of the fibre composite building materials and the pre-stress characteristics in the masonry were examined using technologies that are used in practice. The structural pull-out tests of the bars supplied important information on the behaviour of the composites in the composite components. It could be shown that conventional strengthening methods using steel bar and cement as grouting mortar can be replaced by the use of fibre composite reinforcement and gypsum-containing grouting mortar in historical masonry containing sulphate.

For that reason, the experimental analyses of the behaviour of the composites represent an important contribution to the preservation and strengthening of historical constructions in ways suitable for monuments.

Kurzzusammenfassung

Die Verankerung und Vernadelung von geschädigtem oder nicht ausreichend tragfähigem Mauerwerk ist eine häufig angewendete Technologie bei der Erhaltung und Ertüchtigung historischer Bauwerke. Die Verwendung von Stabstahl bei der Verankerung von Mauerwerk hat dabei den Nachteil, dass ein entsprechender zementhaltiger Mörtel zur Gewährleistung des Korrosionsschutzes notwendig ist. Der Zement bringt bei sulfathaltigem Mauerwerk Verträglichkeitsprobleme mit sich. Es kommt zu einer Treibreaktion durch Ettringitbildung. Faserverstärkte Kunststoffe stellen hier eine mögliche Alternative dar. Mit dem Forschungsvorhaben wurden wesentliche Grundlagen für den Einsatz von Faserverbundbewehrung zur Verankerung und Vernadelung von historischem Mauerwerk erforscht und praxisnahe Baustoffe und Technologien untersucht. Somit wurden die Voraussetzungen für eine verbesserte Qualität des Baustoffeinsatzes in der Denkmalpflege bei der Sanierung von historischem Mauerwerk geschaffen. Die Lösungen sollen sich durch Nachhaltigkeit auszeichnen und den gestiegenen Anforderungen der Denkmalpflege Rechnung tragen. Zu den theoretischen Grundlagen führte die Professur für Tragwerksplanung, der Fakultät Architektur umfangreiche experimentelle Untersuchungen zum Verbundverhalten durch.

Für die Untersuchungen zum Verbundverhalten wurden Prüfkörper aus Natursandstein, variierenden Verpressmörteln und Stabanker aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) bzw. kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) hergestellt. Unter Anwendung statischer Stab-Ausziehversuche konnten aus den gewonnenen Versuchsdaten die Verbundspannungen im Verbundsystem ermittelt und ausgewertet werden [Bild2]. Hierzu wurde die Verschiebung des Stabes am unbelasteten Stabende bei einer entsprechenden Ausziehkraft gemessen. Neben geringen Verbundlängen von 2 ds (Stabdurchmesser) und 5 ds erfolgten die statischen Stab-Ausziehversuche mit einer Verbundlänge von 25 ds. Die verschiedenen Versuchsserien untersuchten dabei sowohl den Verbund zwischen Anker und Verpressmörtel als auch den Verbund zwischen Verpressmörtel und Naturstandstein. In Bruchkurven im Verbundspannungs- Verschiebungsdiagramm wurde das Verbundverhalten dargestellt. Mit den Versuchsergebnissen zum Verbundverhalten konnte neben den charakteristischen Verbundfestigkeiten auch ein geeigneter Mörtel ermittelt und durch weiterführende Untersuchungen für den Verpressvorgang angepasst werden. Die experimentellen Untersuchungen zum Vorspannverhalten wurden unter Verwendung von GFK-Stäben mit Endverankerung durchgeführt. Ziel war es, eine gewisse Vorspannung in das Mauerwerk zu leiten, um die Anker sofort bei Beanspruchung wirksam zu haben. Ist der Anker nicht vorgespannt, treten Verformungen in einer Größenordnung auf, die zu neuen Rissen im Mauerwerk führen. Um die Technologie kostenmäßig und praxisnah zu beherrschen, wurde das Vorspannen über einen Drehmomentschlüssel und einer entsprechenden Anker-Mutter untersucht. Um diese Vorspanntechnologie anzuwenden wurden Torsionsversuche in einer Tension –Torsion- Prüfmaschine zur Untersuchung des Verdrillverhaltens der GFK-Stäbe unter Torsionsbeanspruchung durchgeführt.Zur Anwendung der Vorspanntechnologie mittels Drehmomentschlüssel wurden ebenfalls Dauerstandversuche an GFK-Stäben vorbereitet. Unter konstanter, ruhender Zugbelastung treten Dehnungen im Werkstoff auf, die im Laufe der Zeit einen geringen Betrag annehmen. Die Schwierigkeit im Mauerwerk besteht darin, dass Kriechen und Schwinden im Mauerwerk die aufgebrachte Vorspannung reduzieren. Dehnmessstreifen in den GFK Ankern und Setz-Dehnungsmessungen am Mauerwerk und ein digitaler Drehmomentschlüssel stellen ein zielführendes Messprogramm für die Untersuchung des Dauerstandverhaltens dar. Die im Zuge des Versuchsprogramms, bestehend aus Laborversuchen und der praktischen Umsetzung an einem zweischaligen Versuchsmauerwerk gewonnenen Erkenntnisse werden als Empfehlungen für die Praxis aufbereitet und zusammengefasst.

2 Einführung

2.1 Problemstellung

Die Verankerung und Vernadelung von geschädigtem oder nicht ausreichend tragfähigem Mauerwerk mit Stabstahl ist heute eine häufig angewendete Technologie bei der Erhaltung und Ertüchtigung historischer Bauwerke (vgl. u.a. [10], [19], [25], [26], [27], [28], [29], [39], [42], [48]). Der Nachteil dabei ist, dass ein entsprechender Korrosionsschutz bei schwarzem Stahl bzw. Edelstahl zum Einsatz kommen muss.

Bei dem Einsatz von schwarzem Stahl ist ein entsprechender zementhaltiger Mörtel zur Gewährleistung des Korrosionsschutzes notwendig. Der Zement bringt Verträglichkeitsprobleme mit sich, wenn das Mauerwerk sulfathaltig ist. Es kommt zu einer Treibreaktion durch Ettringitbildung. Die Anwendung von Edelstahl ist mit hohen Materialkosten verbunden. Faserverstärkte Kunststoffe stellen hier eine mögliche Alternative dar. Während Verstärkungen mit Geweben oder Lamellen relativ gut erforscht sind, ist das bei stabförmiger Ausbildung der Bewehrung noch nicht der Fall. Für stabförmige Bewehrungselemente aus faserverstärktem Kunststoff gibt es zwar vereinzelte Anwendungen (z.B. [37], [38]), die jedoch für eine Verallgemeinerung nicht ausreichen (z.B. für [39]).

2.2 Zielsetzung

Mit dem Forschungsvorhaben sollen wesentliche Grundlagen für den Einsatz von Faserverbundbewehrung zur Verankerung und Vernadelung von historischem Mauerwerk erforscht und für die Praxis die entsprechenden Daten und Bemessungsalgorithmen bereitgestellt werden. Dadurch kann dem Einsatz dieses innovativen Baustoffes bei der Erhaltung historischer Bauwerke der Weg geebnet und der inzwischen auf Grund von Verträglichkeitsproblemen als nachteilig erkannte Einsatz von Zement zur Ummantelung und zur Herstellung des Verbundes ausgeschlossen werden (vgl. [44], [45], [46]).

Somit werden die Voraussetzungen für eine verbesserte Qualität des Baustoffeinsatzes in der Denkmalpflege bei der Sanierung von historischem Mauerwerk geschaffen. Die Lösungen sollen sich durch Nachhaltigkeit auszeichnen und den gestiegenen Anforderungen der Denkmalpflege Rechnung tragen. Präzisere Bemessung und ein optimierter Materialeinsatz wird ermöglicht und die Anforderungen einer behutsamen Sanierung erfüllt.

Die internationale Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen wird dadurch gefördert und Deutschland kann seine Rolle als Technologieführer auf dem Gebiet der Sanierung historischer Bauwerke festigen.

2.3 Theoretische Untersuchung

Die Untersuchung beginnt bei den wesentlichen Materialien, dem Faserverbundwerkstoff, dem Mauerwerk und dem Injektionsgut. Aus den Erkenntnissen zum Verhalten von unterschiedlichem historischem Mauerwerk wird das Anforderungsprofil an das Anker- und Nadelmaterial auf der Basis einer umfangreichen Werkstoffanalyse festgelegt.

Geeigneter Faserverbundwerkstoff:
Auf Grundlage der Anforderungen aus dem Mauerwerksbau sind die möglichen Materialien auf ihre Eignung hin zu untersuchen (GFK, CFK, Aramidfasern und

Basaltfasern). Die innere Struktur ist den Anforderungen gegenüber zu stellen und gegebenenfalls zu optimieren.

Profilierung und Oberflächengestaltung:
In Abstimmung mit der Herstellung sind geeignete Oberflächengestaltungen und Profilierungen herauszuarbeiten, die einen möglichst hohen Haftverbund gewährleisten.

Verankerung:
Für die Endverankerung auf Verbund ist bei Ankern die Verbundtragfähigkeit maßgebend und bei Nadeln ebenfalls. Insofern soll die Ermittlung der Verbundfestigkeit und deren Optimierung in Abstimmung mit der Herstellung der Anker eine wichtige Rolle spielen. Es sind dazu sowohl theoretische Überlegungen, FEM-Analysen als auch Versuche nötig. Bei der Endverankerung über Druckplatten spielt die Frage der Einleitung der Kräfte eine wesentliche Rolle, nicht nur im Mauerwerk, sondern auch im Anker.

Vorspannung:
Die Vorspanntechnologie spielt eine wesentliche Rolle. Anker wirken nur sofort, wenn sie vorgedehnt sind und das Mauerwerk sich unter einer Vorspannung befindet. Häufig sind die sonst eintretenden Dehnwege so groß, dass das Mauerwerk eher zerstört wird als dass die Anker oder Nadeln wirken können. Außerdem ist die Frage der Krafteinleitung und des Verhaltens des umliegenden Mauerwerks ist zu untersuchen.

Modellierung:
Das Modell "Hamdan" [25], [26] ist zu überprüfen, insbesondere auf eine größere Parametervariation hin. Es ist ein Modell abzuleiten oder zu entwickeln für den Fall der Ummantelung - "Verklebung", wobei das Ziel mineralische Lösungen sind. FEM-Analysen dienen der Problemanalyse und der Lösungsfindung. Sie begleiten die theoretischen Analysen und die Experimente.

2.4 Experimentelle Arbeiten

Den theoretischen Untersuchungen schließen sich folgende experimentelle Untersuchungen an:

- Verpressgut und Festigkeit: Prüfung eines geeigneten Verpressgutes und dessen physikalische Werte.
- Verbundversuche: Zwischen Mauerwerk und Verpressgut sowie zwischen Verpressgut und Bewehrung aus Faserwerkstoffen. Ziel ist es, das Verbundverhalten zu studieren und eine entsprechende Datenbasis zu schaffen. Die Untersuchungen des Verbundverhaltens werden in Abhängigkeit von der Profilierung und von der Überdeckung mit Injektionsgut untersucht.
- Auszugsversuche: an ganzen Ankern und Nadeln in Mauerwerksprobekörpern bzw. in situ.
- Spannversuche: Diese sind notwendig, um die geeignete Vorspanntechnologie abzuleiten. Ferner soll das Verhalten der Materialien unter Vorspannung und entstehende Spannverluste untersucht werden.
- Technologie der Vorspannung: Einleitung der Vorspannkraft über Kopplungsstück oder direkt. Außerdem ist die Einleitung der Vorspannkraft über das Anziehen mit einem Drehmomentschlüssel zu untersuchen. Das Ziel ist hier, ein praktikables Verfahren auszuwählen, welches keine Spezialkräfte zur Ausführung erfordert.
- Verdrillung der Anker: Faserverstärkte Verbundanker sind gegenüber Querzug und Drillbeanspruchung empfindlich. Ziel ist die Bestimmung der Verdrillfestigkeit,

Veränderungen der inneren Struktur und die Entwicklung von Verbesserungsmöglichkeiten.

- Dauerstandverhalten: Zum Dauerstandverhalten unter Einleitung eines Torsionsmomentes (Drehmomentschlüssel) liegen keine Erfahrungen vor, weshalb bisher diese einfache Variante ausgeschlossen wurde. Dahingehend sollen Dauerstandversuche durchgeführt werden.

2.5 Auswertung und Zusammenfassung

Die Forschungsarbeit zur Ertüchtigung von historischem Mauerwerk mittels Faserverbundwerkstoffen wurde mit dem Ziel der Entwicklung einer ingenieurmäßig, praxisbezogenen Lösung zur Sicherung von Mauerwerk durchgeführt. Mit den Untersuchungen zum Verbundverhalten und zur Vorspannung von Ankern konnten signifikante Ergebnisse und Lösungen zur Anwendung von Faserverbundwerkstoffen und gipshaltigen Verpressmörtel im historischen Mauerwerk entwickelt werden.

In der Vergangenheit wurden i.d.R. Anker und Nadeln aus schwarzem Stahl eingesetzt, welcher entsprechend mit zementhaltigem Mörtel zu ummanteln ist, um Korrosion zu verhindern. Es ist alternativ auch möglich nicht korrodierbaren Edelstahl zu verwenden, was jedoch auf Grund der Edelstahlkosten zu einer wesentlichen Verteuerung führt. Die Nutzung von Zement führt zu Verträglichkeitsproblemen, wenn das Mauerwerk sulfathaltig ist. Es kommt dann zu Treiberscheinungen infolge sekundärer Ettringitbildung, welches das Mauerwerk stark schädigen bzw. sogar ganz zerstören kann. Durch den Eintrag von reaktivem Kalk kann es zu einer Gefügezerstörung durch Thaumasit kommen. Bei gipshaltigem Mauerwerk ist somit der Zementeinsatz ausgeschlossen. Für diese Problematik können stabförmige Faserverbundwerkstoffe in Verbindung mit gipshaltigen Mörtel angewendet werden. Während Verstärkungen mit Geweben oder Lamellen relativ gut erforscht sind, ist das bei stabförmiger Ausbildung der Bewehrung noch nicht der Fall.

Zunächst wurde Verbundverhalten von Mauerwerkbewehrung unter Variation der Verbundlänge betrachtet. Hier wurde der Einfluss der Verbundlänge auf die entstehende Verbundspannung zwischen horizontal angeordneter Stahlbewehrung und dem Mörtel im Mauerwerk festgestellt. Die hier erzielten Ergebnisse bestätigen i.W. im Gegensatz zu [59], dass die Verbundspannungen auf der Grundlage der Erkenntnisse von Rehm an Verbundkörpern mit einer Verbundlänge von 2 ds bis maximal 5 ds durchzuführen sind.

Die Untersuchung des Verbundverhaltens im Natursteinmauerwerk unter Variation der Mörtelsorten, Faserverbundbewehrung und Verbundlänge wurde ebenfalls im statischen Stab-Ausziehversuch durchgeführt.

Die Ergebnisse müssen vor allem in Bezug auf die Mörtelsorte differenziert betrachtet werden. Hier konnte nur der Trass-Kalk-Mörtel (HSTV-P01) stabile Ergebnisse vorweisen. Der Abgleich mit früheren Untersuchungen von Gigla [63] zeigt vergleichbare Ergebnisse.

Der verwendete Gipsmörtel (casea casusan HGE) weist ebenfalls gute Ergebnisse der Verbundspannungen zwischen Stab und Verpressmörtel auf. Die Ergebnisse der statischen Stab-Ausziehversuchen zeigen, dass bei Mörtelsorten mit hoher Druckfestigkeit die charakteristische Verbundfestigkeit höhere Werte annimmt.

Dies gilt sowohl für den Verbund Stab/Verpressmörtel als auch für den Verbund Natursandstein/Verpressmörtel. Der Einfluss der Verbundlänge auf die Verbundspannungen ist im Verbund Stab/Verpressmörtel gering. Im Verbund Natursandstein/Verpressmörtel hingegen lässt sich ein Zusammenhang von Verbundlänge

und Verbundfestigkeit feststellen. Hier zeigen sich mit zunehmender Verbundlänge geringere Verbundspannungen

Der maßgebende Verbund zwischen Naturstein und Verpressmörtel zeigt in Bezug auf die Verbundspannungen instabile Ergebnisse. Dieser Problematik muss weitere Bedeutung beigemessen werden, da hier bessere Ergebnisse erstrebenswert sind. Durch die Anpassung des W/B-Wertes in Bezug auf das tatsächliche Saugverhalten des Natursandsteins konnten die Verbundspannungen im geringen Maß stabilisiert und verbessert werden, jedoch konnten auf Grundlage der stark streuenden Ergebnisse und der in geringen Anzahl durchgeführten Versuche keine präzise Vorgehensweise zur Bemessung der Verbundspannungen mit Gipsmörtel erfolgen.

Die Untersuchung des Vorspannverhaltens des ausgewählten Ankersystems erfolgte anhand von Torsionsversuchen und Dauerstandversuchen. Mit dem Aufbringen der Vorspannkraft über einen Drehmomentschlüssel wird ein Torsionsmoment in den Stab eingeleitet. Ziel war die Untersuchung des Torsionswiderstandes und der Verdrillbarkeit der verwendeten GFK-Stäbe. Die Ergebnisse aus den Torsionsversuchen können positiv bewertet werden. Das eingeleitete Torsionsmoment und die Verdrillung des Stabens bis zum Bruch sind deutlich über den angezielten Werten. Die verwendeten GFK Stäbe können Torsionsmomente infolge des Vorspannens mit Drehmomentschlüssel aufnehmen.

Ankersysteme aus glasfaserverstärkten Kunststoff sind bereits jetzt in der Anwendung. Neben der Anwendung im Bergbau werden GFK-Ankersysteme zum Verankern von historischem Mauerwerk genutzt [39],[64],[65],[90]. Hierfür werden die verwendeten Verpressmörtel aufwendig in Versuchen ihr Verbundverhalten untersucht. Die präzise Bemessung der Verbundspannung von gipshaltigem Mörtel im Verbund zwischen Anker und Naturstein bedarf weiterer Untersuchungen zum Verbundverhalten, insbesondere einer Erweiterung der Datenbasis.

3 Stand der Technik

3.1 Einsatz von Ankern und Nadeln

3.1.1 Schloss Steinort, Sztynort, Polen

Eingesetzt wird das nachträgliche Verankern von Mauerwerk zum Beispiel bei der Sicherung und Sanierung von historischen Mauerwerken. Anker sind auf Grund ihres Durchmessers (Ø > 20 mm) geeignet große Kräfte aufzunehmen und abzutragen. Ein Beispiel dafür ist die Sicherung des Nordwestturmes am Schloss Steinort [39].

a) Nordwestturm Schloss Steinort

b) Verankerungsplanung (Burkert, Jäger Ingenieure)

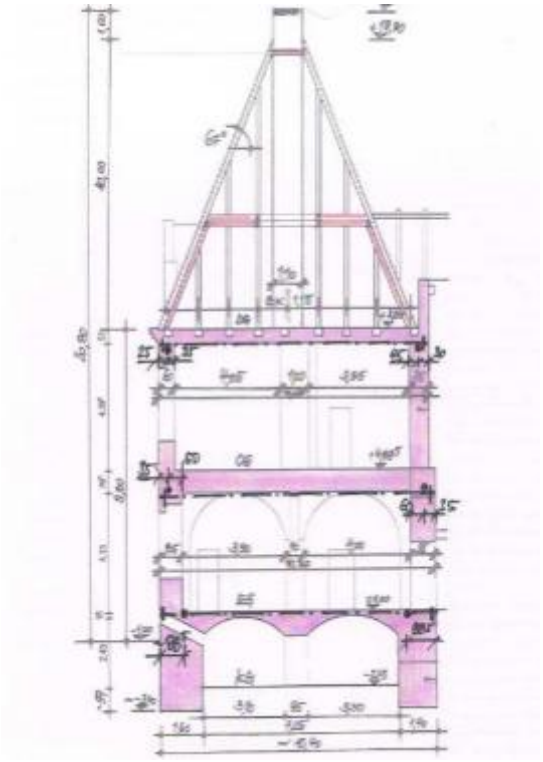


Bild 1 *Einsatz einer Verankerung am Schloss Steinort mit dem Orica System K60-32 d_m = 32mm (allerdings mit Endplatten aber verpresst) und Schöck-Nadeln d_m=8 und 12 mm (Rissvernadelung und Querzugnadeln unter den Endplatten)*

Ein typischer Einsatz von Nadeln (Ø < 20 mm) ist immer dort wo Schwachstellen im Mauerwerk vorzufinden sind und sich damit begründet Risse bilden. Zum Teil sind solche Risse statisch bedingt aber auch baukonstruktiv oder temperaturbegründet. Ein Beispiel dafür sind solche Risse die sich über Fensteröffnungen bilden können, wie auf Bild 2a gezeigt. Solche Risse kommen in der Regel nicht wieder zur Ruhe, wenn man sie nicht in irgendeiner Weise behandelt. Das reine überputzen solcher Risse ist also meistens nicht hinreichend, da sie sich nach relativ kurzer Zeit wieder im Putz abzeichnen.

a) Rissbildung über Festeröffnung (Schloss Steinort)

b) Vernadelung von mehrschaligem Mauerwerk

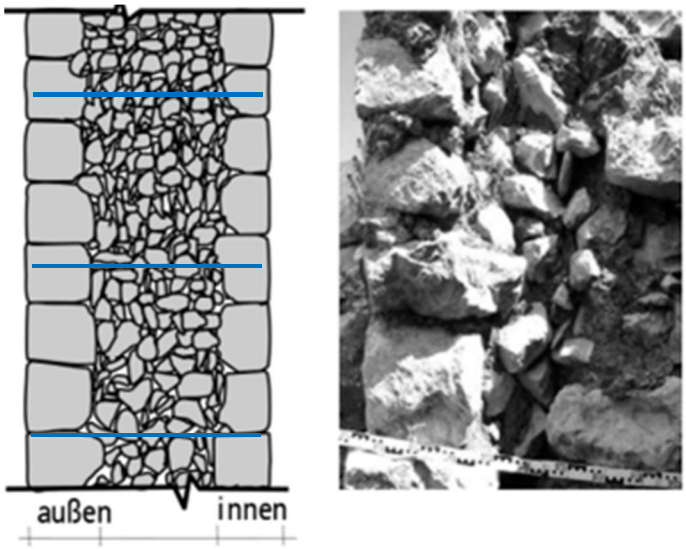


Bild 2 *Einsatz von Vernadelungen*

In solchen Fällen wird die sogenannte „Rissvernähung“ als Rissbewehrung eingesetzt. Dafür werden auf beiden Wandseiten mehrere schräge Bohrungen eingebracht, mit dem Ziel den Riss etwa in der Wandmitte zu treffen. In diese Bohrungen werden anschließend Nadeln eingebaut und auf Verbund verankert. Mittels einer hinreichenden Anzahl von Nadeln, die sich aus der Rissgröße, Risslänge und weiteren Randbedingungen ableitet, wird der Riss sozusagen vernäht.

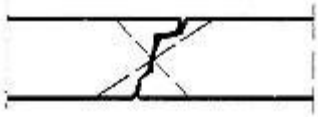


Bild 3 *Kreuzweises „Vernähen“ eines Risses mit Nadeln*

Häufig werden Vernadelungen auch genutzt, um mehrschaliges, historisches Mauerwerk zu stabilisieren und zu verbinden (Bild 2b). Es werden dafür horizontal Löcher gebohrt, die Nadeln eingesetzt und verankert. Im Idealfall lässt sich die Verankerung über die vorhandene Verbundfläche verankern, man kann sie aber auch über eine Endplatte realisieren. Allerdings ist die Ankerplatte später sichtbar und müsste bei Bedarf verdeckt werden, um den ästhetischen Anforderungen genügen zu können.

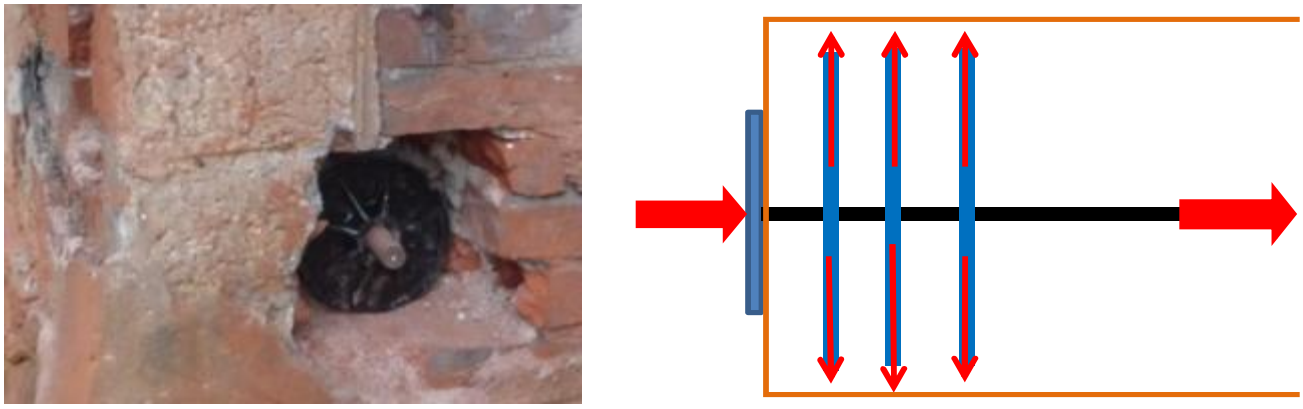


Bild 4 *Einsatz von Querzugvernadelungen (links Ankerplatte des Orica-Systems K60-32, rechts Entstehung des Querzuges)*

Außerdem werden Vernadelungen dort notwendig wo starke, konzentrierte Lasten in das Mauerwerk eingetragen werden, zum Beispiel bei einer Endverankerung mittels Ankerplatte. Die in dem Bereich der Lasteinleitung entstehenden Querzugkräfte müssen abgetragen werden, häufig reicht die zur Verfügung stehende Mauerwerksfestigkeit allerdings nicht dafür aus. In solchen Fällen werden Querzugvernadelungen notwendig (Bild 4).

Zusammenfassend zeigt Bild 5 einige Einsatzmöglichkeiten aus den Arbeiten von Gigla und Wenzel, veröffentlicht im Mauerwerk-Kalender.

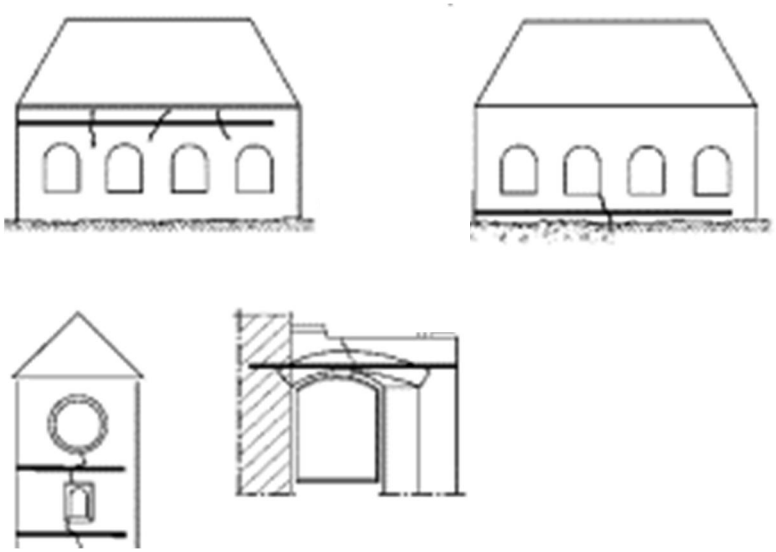


Bild 5 *Beispiele für den Einsatz von Ankern und Nadeln [48], Prinzipdarstellung*

Nachfolgend sollen einige Arbeitsschritte beim Einbau von Ankern und Nadeln in historisches Mauerwerk anhand der statischen Sicherungsarbeiten am Schloss Steinort im Osten von Polen (ehem. Ostpreußen) erläutert werden. Die Arbeiten waren Bestandteil eines von der DBU geförderten Forschungsprojektes, wobei dort die Sicherungsarbeiten inhaltlich sekundär waren, allerdings vor dem Einbau der Drainage durchgeführt werden mussten.

Dem Einbau gehen eine dezidierte Bestands- und Schadensaufnahme sowie eine konkrete Planung voraus. Vor Beseitigung der Ursachen bzw. ohne Kenntnis dieser, sind derartige Maßnahmen nicht sinnvoll.

Im NW-Turm des Schlosses drohten der Abriss und das Herauskippen sowie die damit einhergehende Zerstörung einer gesamten Gebäudeecke (siehe Bild 1a). Die Sicherung erfolgte hier durch Verankerung in Höhe der Decken (siehe Bild 1b). Die erstellte Verankerung wirkte an den eingebauten Stellen wie eine Art Ringanker, der nach heutigem Stand der Technik an solchen Bereichen im Mauerwerk einzubauen ist. Aus der vorhandenen Schiefstellungen und weiteren Imperfektionen wurden die Abtriebskräfte errechnet und die Verankerungen dementsprechend dimensioniert, um diese Abtriebskräfte über die Anker abtragen zu können. Vor Beginn der Arbeiten erfolgte die Konsolidierung des völlig aus dem Verbund geratenen Kellermauerwerks unter der Gebäudeecke.

Für die Ringanker wurde das System Orica K 60-32 mit einem d_m= 32 mm gewählt. Die Verankerung erfolgte über Endplatten bzw. konstruktiv über Verbund mit Abschätzung der übertragbaren Kräfte. Ein Ausschnitt aus der Ausführungsplanung ist im nachfolgenden Bild dargestellt.

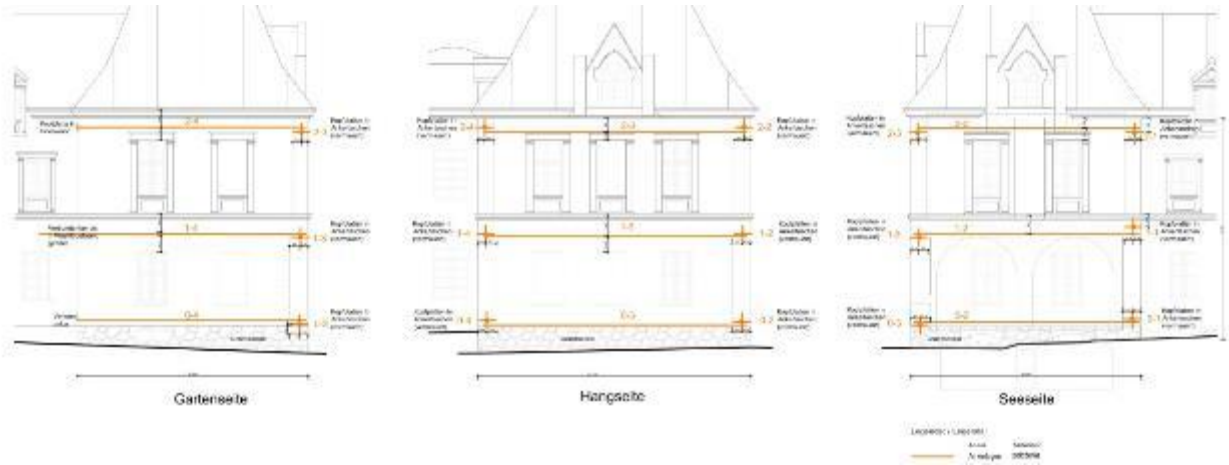


Bild 6 *Lage der Anker in den Fassadenansichten [65]*

Das Herstellen der Ankerbohrungen setzt hohe Präzision voraus.

a) Ansetzen der Bohrung nach Ausrichten an der Schnur

b) Schüsse zur Verlängerung des Bohrgestänges

Bild 7 *Herstellen einer Kernbohrung (nass) für den Einbau eines Ankers (Nord-West-Turm Schloss Steinort 2014) [65]*

Das nachfolgende Bild zeigt das Verpressen und die Sicherung des Abstandes zur Bohrwandung.

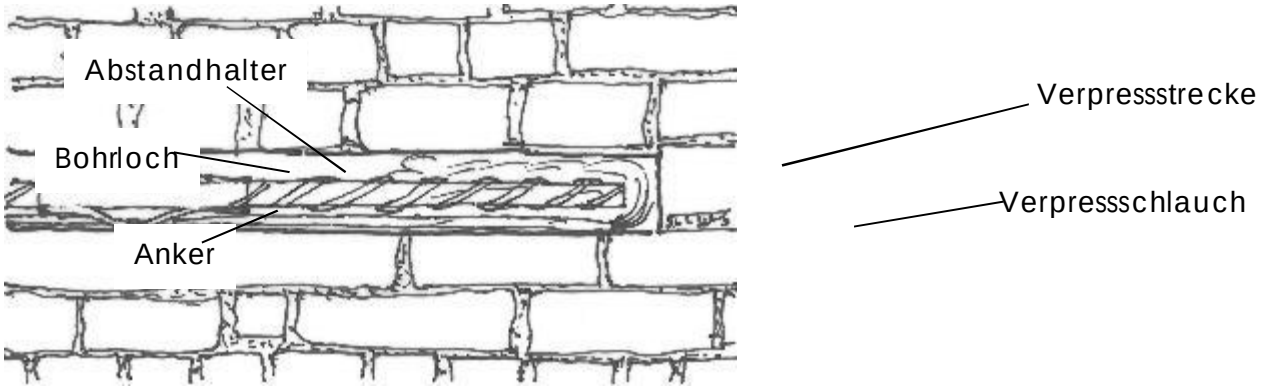


Bild 8 *Schnitt Anker mit Abstandhalter (gestauchtes und aufgeschnittenes PVC-Rohr) und Verpressschlauch beim Verpressen des Bohrloches aus der Tiefe*

Ein Anker musste aus konstruktiven Gründen auf Verbund verankert werden. Mangels Bemessungsregeln und Kennwerten wurde die Verankerungslänge ingenieurmäßig abgeschätzt. Aufgrund des stark geschädigten Mauerwerks wurde die Injektion mittels Siebschlauch realisiert.

Bild 9 *Vorbereitung eines Ankers zum Verpressen auf Verbund mittels Siebschlauchs (1- Siebschlauch, 2 - Glasfaseranker der Firma Orica, 3 - Verpressschlauch)*

Bild 10 *Einsetzen einer Nadel mit Entlüftungsschlauch (gleichzeitig Abstandhalter) (Glasfasernadeln Schöck, Typ ComBar, gerippt, d_m=12 mm; Schloss Steinort, NW-Turm 2014)*

Bild 11 zeigt den Einsatz von Nadeln im Bereich von Rissen als Planungsunterlage für die Ausführung.

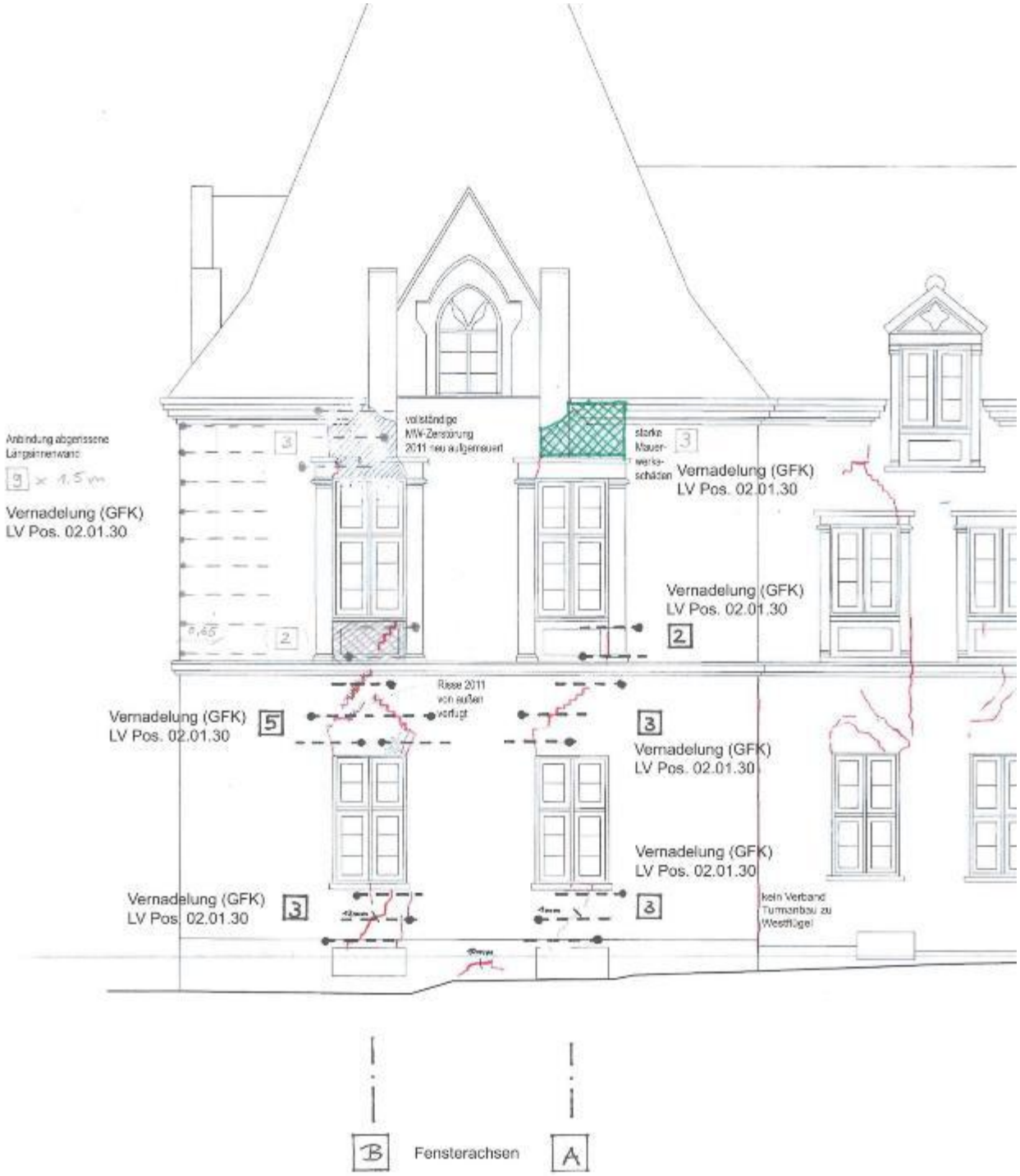


Bild 11 *Planung der Anker und Nadeln – eingetragen in das Rissaufmaß (Schloss Steinort, Nord-West-Turm 2014), wobei die Abstände der Packer im Verlauf der Risse pauschal vorgegeben waren mit 0,6 m £ a £ 0,8 m*

Das Verpressen wird mit herkömmlicher Technik vorgenommen (s. Bild 12).

Bild 12 *Komplette Arbeitsstation zum Verpressen/Verfüllen von Hohlräumen und Bohrungen von Ankern und Nadeln (Schloss Steinort, Keller Kernbau, 2015)*

Bild 13 *Verpressen vom Gerüst aus mit Manometer und Pumpensteuerung (Schloss Steinort, Nord-West-Turm, 2014)*

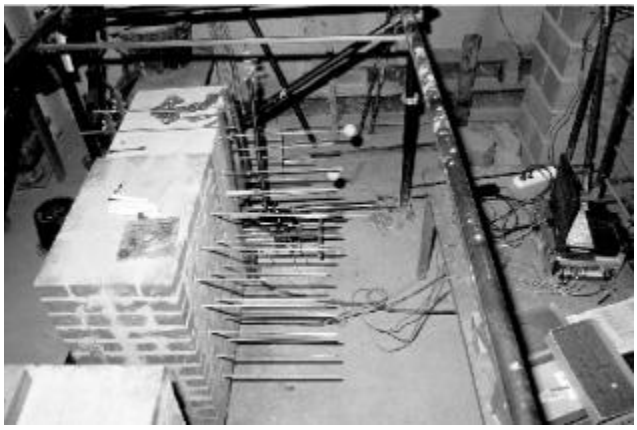
Wichtig beim Erreichend des gewünschten Verpresserfolges ist die Kontrolle über das Manometer und ggf. vorhandene Austrittstellen. (Vgl. Bild 13 und Bild 14)

Bild 14 *Abdichten undichter Stellen im Mauerwerk mit Hanf, sodass die im Mauerwerk enthaltene Luft noch entweichen kann (Nordwest-Turm, Schloss Steinort 2014) [64]*

Dazu zählt auch, vereinzelte Stellen zu überbohren oder freizulegen und zu dokumentieren.

3.2 Aktuelle Nachweisführung

Wesentliche Grundlagen für die Nachweisführung und den Umgang mit Verankerungen bzw. Vernadelung von Mauerwerk gehen auf die Arbeiten von Wenzel und Gigla zurück [35], [42], [43], [48]. Dort wurden Anker mit relativ großer Verbundlänge in Wände eingebracht und anschließend mit einer Presse gezogen (Bild 15). Die Auszugsversuche wurden messtechnisch begleitet. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurde eine Hilfestellung zur Bemessung abgeleitet. Diese Bemessungswerte ergeben sich u.a. in Abhängigkeit von der Mauerwerksdruckfestigkeit, dem verwendeten Verpressmaterial, der Mauerwerkssaugfähigkeit, dem Stabdurchmesser und dem Verpresskörperdurchmesser.



Bemessungswert des Ankerwiderstandes:

$$R_{A,d} = X_{A,d} \cdot \frac{A_B}{A_{G,d}} \cdot A_{A,d} \qquad (4)$$

Um ein Zugversagen des umgebenden Steinquerschnitts auszuschließen, ist in Abhängigkeit von der Steinzugfestigkeit die Zugkraft im Ankerstab zu begrenzen (vgl. Abschn. 4.2).

Begrenzung der Zugkraft im Ankerstab:

$$F \leq \frac{1{,}9 \cdot f_{B,t} \cdot L_b \cdot \pi \cdot d_B \cdot \left(h_S^2 - d_B^2\right)}{\gamma_m \cdot \tan\varphi \cdot \left(d_B^2 + h_S^2\right)} \qquad (5)$$

Bild 15 *Auszugsversuche und Bemessungshilfe gem. Wenzel und Gigla [48]*

Aus heutiger Sicht muss eingeschätzt werden, dass diese Vorgehensweise nicht ganz konform ist mit den Versuchen die später zum Verbund gemacht wurden. Diesbezügliche Arbeiten im Bereich des Stahlbetonbaus, die im Wesentlichen auf Rehm [52] zurückgehen, gingen davon aus, dass Verbundgesetz an möglichst nur ein oder zwei Rippen des gerippten Ankerstabes zu bestimmen. Es wird die Meinung vertreten, dass man mit größer werdender Verbundlänge unschärfere Aussagen erhält und sich außerdem nicht gewünschte Verteilungseffekte einstellen könnten. Praktisch wird dafür im Prüfkörper ein Teil der Länge durch ein PVC-Rohr abgetrennt und es ergibt sich eine tatsächliche Verbundlänge von zwei bis dreimal Stabdurchmesser Bild 16b/c. An diesem Prüfkörper werden anschließend die Auszugsversuche durchgeführt. Auf diese Art und Weise kommt man zu sehr genauen Aussagen bezüglich der vorhandenen Verbundspannungen.

Auch am eigenen Lehrstuhl gab es bereits Verbund- und Auszugsversuche. In der Arbeit von Hamdan wurden solche Versuche, allerdings im Schwerpunkt hinsichtlich dynamischer Beanspruchungen, durchgeführt [26]. Dafür wurden Standartprobekörper hergestellt und in Haltevorrichtungen eingespannt. In diese Probekörper wurden mittels Kernbohrmaschine Bohrlöcher eingearbeitet und Bewehrungsstäbe eingebaut. Anschließend wurden die Ankerstäbe unter dynamischen Einflüssen mittels Spannpresse gezogen.

a)

b)

c)

Bild 16 *Versuchsaufbau nach Hamdan*

Mittels dieser Versuche konnten vielfältige Erkenntnisse bezüglich Verbundfestigkeit, Versagensformen, Einfluss der Stabprofilierung, Stabdurchmesser, Bohrlochdurchmesser, Stabdurchmesser und dynamischer Einwirkungen gewonnen werden.

Auf die dargestellten Untersuchungen soll im Rahmen dieser Forschungsarbeit aufgebaut werden.

3.3 Probleme bei sulfathaltigem Mauerwerk

In der Vergangenheit wurden i.d.R. Anker und Nadeln aus schwarzem Stahl eingesetzt, welcher entsprechend mit zementhaltigem Mörtel zu ummanteln ist, um Korrosion zu verhindern. Nachuntersuchungen an bestehenden Verankerungen (Sonderforschungsbereich 315 an der Universität Karlsruhe) zeigten, dass eine Ummantelung mit 20 mm zementhaltigen Mörtel hinreichend für den Korrosionsschutz ist. Es ist alternativ auch möglich nicht korrodierbaren Edelstahl zu verwenden, was jedoch auf Grund der Edelstahlkosten zu einer wesentlichen Verteuerung führt. Die Nutzung von Zement führt zu Verträglichkeitsproblemen, wenn das Mauerwerk sulfathaltig ist. Es kommt dann zum sogenannten Treiberscheinungen infolge sekundärer Ettringitbildung, welches das Mauerwerk stark schädigen bzw. sogar ganz zerstören kann (Bild 17a). Durch den

Eintrag von reaktivem Kalk kann es zu einer Gefügezerstörung durch Thaumasit kommen. Bei gipshaltigem Mauerwerk ist somit der Zementeinsatz ausgeschlossen. Häufig wurden historische Mauerwerke aber mit gipshaltigem Mörtel errichtet. Weiterhin kann es durch bestehende Umwelteinflüsse zu einem nachträglichen Sulfateintrag in Mauerwerke gekommen sein.

Ein weiteres Verträglichkeitsproblem ergibt sich aus der Reaktion von Alkalien und Sulfat, bei Feuchtigkeitseintrag kommt es an der Oberfläche zu Ausblühungen (Bild 17b).

a) Zementtreiben

b) Ausblühungen

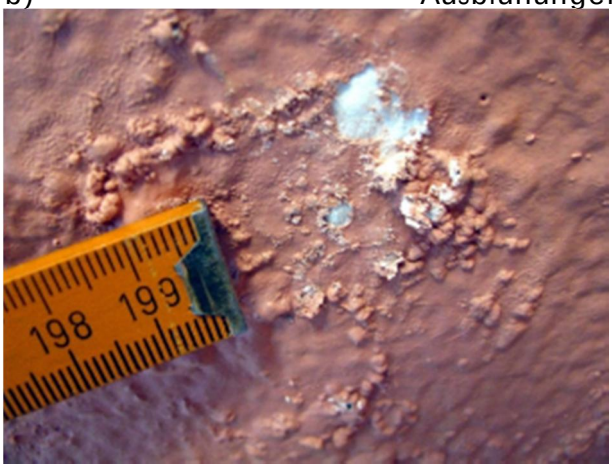


Bild 17 *Verträglichkeitsprobleme bei der Nutzung von sulfathaltigem Verpressgut*

Insofern sind die Anforderungen der Denkmalpflege vom konservatorischen Standpunkt her immer höher mit Blick auf nachhaltige Lösungen geworden. Zement ist bei der Denkmalpflege aller Bundesländer als Reparaturbaustoff nur noch bedingt akzeptierbar. Diese Haltung ist vom wissenschaftlichen Standpunkt her durchaus begründet und verständlich.

Alternativen ergeben sich zum einen aus Edelstahl oder Faserverbundwerkstoffen auf Glasfaser- oder Kohlefaserbasis. Bei diesen Baustoffen spielt der Korrosionsschutz keine Rolle, weshalb nicht kalkhaltiges Verpressgut genutzt werden kann. Kohlefaser und Glasfaser werden heute im Bauwesen, insbesondere im Stahlbetonbau, regelmäßig eingesetzt. Für den Einsatz in historischen Mauerwerken gibt es bisher allerdings kaum Erfahrungen. Eine weitere zu betrachtende Möglichkeit ist die Entwicklung eines zementarmen oder im Idealfall zementfreien Verpressgutes, dies ist Inhalt eines weiteren Forschungsprojektes des Lehrstuhls.

Auf Grund dieser Überlegungen wurden vorwiegend Materialien genutzt welche für sulfathaltiges Mauerwerk deklariert sind. Es wurde auch ein Verpressmaterial auf Gipsbasis eingesetzt, das mit umliegendem gipshaltigem Mauerwerk kompatibel ist.

4 Theoretische Untersuchung

4.1 Allgemein

In der ersten Projektphase wurde zuerst noch einmal der Stand der Wissenschaft und Technik zur Problematik eruiert. Dazu gehören die bisherigen Erfahrungen mit dem Einsatz derartiger Anker bei der Sanierung von Mauerwerk aus Lehm, aus künstlichen Steinen und aus Natursteinen.

Bei der theoretischen Durchdringung der Problematik kann man sich an den Stahlbeton anlehnen, jedoch ist eine bloße Übertragung der Erkenntnisse und Algorithmen nicht möglich, da die Parametervariation der Einflussgrößen anders ist (vgl. [52], [53], [54], [24]). Hinzu kommt neben dem Verbundproblem "Bewehrungselement - Injektionsmörtel" noch das Verbundproblem zwischen "Verpresskörper und umgebendem Mauerwerk" (vgl. [25], [48]).

Da bei der Bemessung von Ankern und Nadeln auf die Grundlagen des bewehrten Mauerwerks nach Europäischer Mauerwerksnorm EC 6 [1] zurückgegriffen werden kann, wurden die dort ausgewiesenen Bemessungsregeln und die Verbundspannungen nochmals einer kritischen Betrachtung unterzogen. Quellen für die Verbundspannungen im EC 6 und damit Grundlagen für deren Ermittlung konnten bisher nicht gefunden werden. Es ist anzunehmen, dass sie aus dem Stahlbeton übernommen worden sind, was wegen der wesentlich anderen Bedingungen im Mauerwerk nicht zulässig ist. Derzeit läuft noch eine Anfrage an englische Experten, die das entsprechende Hintergrundwissen der Britischen Norm haben. Ein neueres Forschungsvorhaben von Brameshuber/ Saenger [13] macht auf die Unterschiede aufmerksam und zeigt besonders bei höherfesten Mörteln/ Füllbetonen erhebliche Abweichungen. Da alle dort angegebenen Werte deutlich unter den bisher benannten liegen, wirft sich die Frage auf, inwieweit die verwendete Verbundlänge von 10 ds zur Absenkung führen kann. Rehm empfiehlt 2 ds [52] und die CEB-Richtlinie [55] 5 ds. Hier sind zuerst Tastversuche mit kurzer Verbundlänge notwendig, um für das Forschungsvorhaben dann die maßgebende und zutreffende Verbundlänge verwenden zu können.

Insgesamt kann auf die bisher am Lehrstuhl vorliegenden Erfahrungen und Ergebnisse zu Verpressankern unter Erdbebeneinwirkung zurückgegriffen werden [25], [56]. Versuchsaufbauten wurden hier erprobt und entsprechende Modelle auf Ingenieurbasis und für numerische Modellierungen erarbeitet worden. Sie sind auf Faseranker mit anderer Profilierung zu übertragen und auf ihre Gültigkeit hin zu prüfen.

4.2 Wirkungsweise

Die Grundidee der der Nadeln und Anker in historischem Mauerwerk liegt in der Verbundwirkung zwischen unterschiedlichen Materialien, sowohl zwischen Bewehrungsstahl und Verpresskörper aus Injektionsmörtel als auch zwischen Verpresskörper und Naturstein. In beiden Verbundfällen handelt es sich nicht um einen starren, sondern um einen verschieblichen Verbund. Es tritt in der Regel eine Relativverschiebung zwischen dem Ankerstab und dem ihn umgebenden Verpresskörper sowie zwischen dem Verpresskörper und dem ihn umgebenden Naturstein auf. Für die gemeinsame Tragwirkung zwischen Verpressanker und Natursteinmauerwerk wird eine Lastübertragung zwischen den einzelnen Materialkomponenten vorausgesetzt. Die Kräfte greifen an der Verpresskörperoberfläche an und verursachen im Verpresskörper Spannungen und Verformungen. Der im Verpresskörper eingelegte Bewehrungsstab ist gezwungen diese Verformung weitgehend mitzumachen und wird gedehnt bzw. gestaucht. Es entstehen Kräfte im Bewehrungsstab. Diese Kräfte werden mit Hilfe von

Verbundspannungen vom Bewehrungsstahl in den Verpresskörper geleitet und umgekehrt. Das gleiche Verhalten findet zwischen dem Verpresskörper und seiner Umgebung von Natursteinen statt.

4.2.1 Verpressanker im Mauerwerk

Die Ertüchtigung von dreischaligem Mauerwerk mit Hilfe von Nadeln bietet die Möglichkeit, die einzelnen Schalen miteinander zu verbinden. Die in gewissen Abständen eingebauten horizontalen Anker versteifen den Mauerwerksquerschnitt und binden die äußeren Schalen über die innere Füllung zusammen. Ein Ausweichen nach außen unter vertikaler Last bzw. unter dem Druck der Füllung wird verhindert. Durch das Einsetzen eines Verpressankers (Länge L_{An}) in dreischaliges Mauerwerk wird eine Verbundspannung zwischen dem Anker und seiner Umgebung sowohl im statischen Fall als auch umso mehr unter horizontalen Erdbebenkräften aufgebaut. Die Verbindung der äußeren Schalen erfolgt über den effektiven Wirkungsbereich des Ankers im Mauerwerk (s. Bild 18).

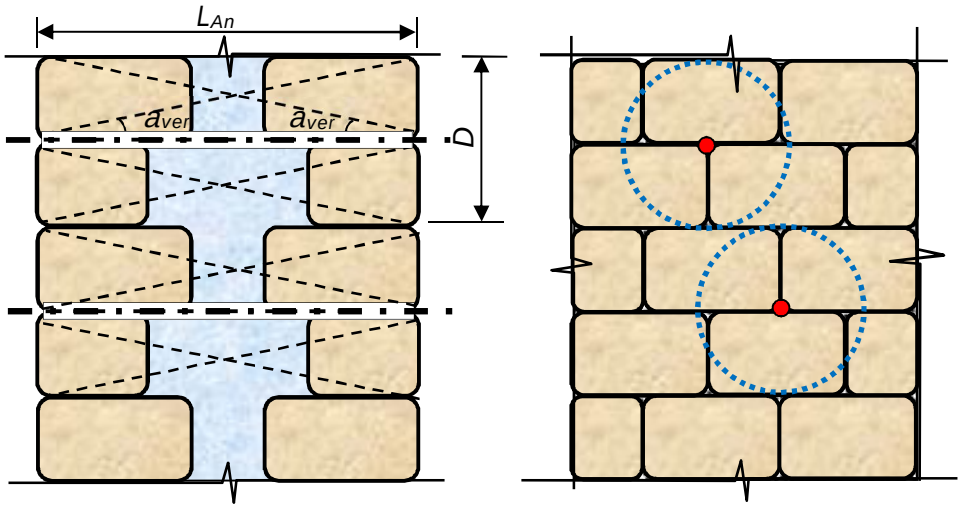


Bild 18 *Wirkungsbereich eines Verpressankers bei der Schwingung von dreischaligem Mauerwerk infolge eines Erdbebens*

Der Radius des effektiven Wirkungsbereichs kann wie folgt berechnet werden:

$$D = 2 \times L_{An} \times \tan a_{ver} \qquad (1)$$

Für einen guten Verbund zwischen den Außenschalen müssen die effektiven Bereiche des Verpressankers miteinander gekreuzt werden. Der Winkel a ist abhängig von der Verbundspannung zwischen Verpressanker und seiner Umgebung.

4.2.2 Kraftübertragung im Verpressanker

Die Hauptaufgabe einer Nadel oder eines Verpressankers in gerissenem Mauerwerk ist, die gerissenen Teile des Mauerwerks zu verbinden und die auftretenden Zugkräfte zu übertragen. Die Krafteinleitung in den Verpressanker lässt sich in zwei prinzipielle Arten unterscheiden.

4.2.2.1 Krafteinleitung in den Ankerstab

Die wirkenden Kräfte werden nicht über die Verpresskörperoberfläche, sondern unmittelbar in den Ankerstab eines im Mauerwerk eingebauten Verpressankers eingeleitet. Die Kraftübertragung erfolgt vom Ankerstab über die Kontaktfläche zum Verpresskörper und weiterhin zum Natursteinmauerwerk. Diese Form der unmittelbaren Krafteinleitung tritt beim nachträglichen Einleiten äußerer Zugkräfte auf das Mauerwerk, beispielsweise im Ausziehversuch (Bild 20-links) ein. Dieser Fall liegt z.B. auch vor, wenn der Anker zwei sich kreuzende Wände verbindet, um die relative Verschiebung zwischen beiden Wänden zu reduzieren (Bild 19).

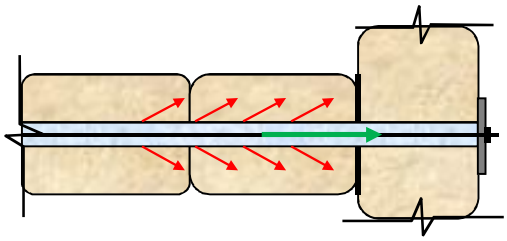
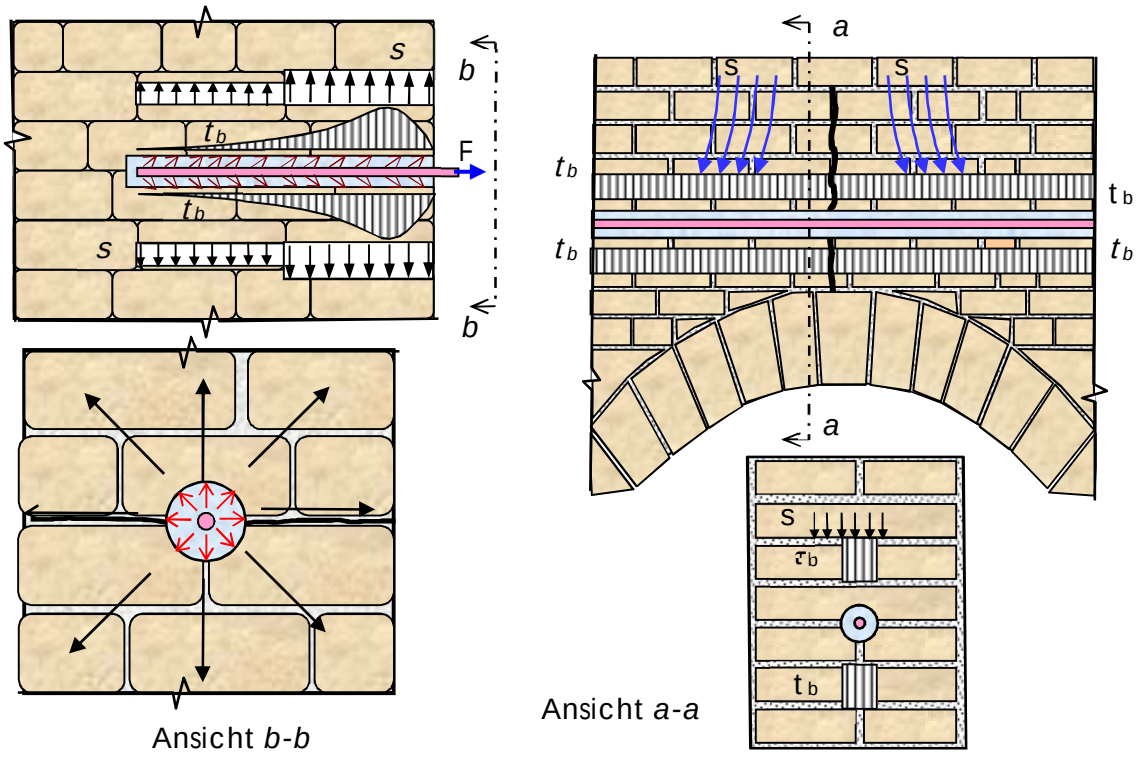


Bild 19 *Verpressanker zwischen zwei Wänden*



Kräfte am Verpressanker

Bild 20 *(links) Krafteinleitung in den Ankerstab, (rechts) Krafteinleitung in den Verpresskörper nach Gigla [63]*

4.2.2.2 Krafteinleitung in den Verpresskörper

Die vorhandenen Spannungen im Mauerwerk werden über den Verpresskörper zum Ankerstab weitergeleitet. Durch die Stabdehnungen entsteht ein kegelförmiger Ausbruch am Ende des Verpresskörpers, der die Verbundlänge der inneren Kontaktfläche reduziert. Entlang der verbleibenden Verbundstrecke bilden sich entsprechend der resultierenden Hauptspannung nachfolgend Risse im Verpresskörper. Die von der Druckspannung hervorgerufene Radialspannung beansprucht das umgebende Material im Krafteinleitungsbereich auf Zug (s. Bild 20-rechts).

4.2.3 Versagensarten des Verpressankers

Durch die Kraftübertragung sowohl in den Verpresskörper als auch in den Ankerstab werden die Verpressankerteile bis zum Versagen verschoben. Nach den experimentellen Beobachtungen während der Ausziehversuche an Verpressankern in Natursteinmauerwerk (Sandstein) wurden unterschiedliche Versagensformen festgestellt:

- Ein Verbundversagen zwischen Verpresskörper und Bohrlochoberfläche tritt ein, wenn Verpresskörper und Ankerstab parallel und gleichzeitig in der Richtung der Zugkraft verschoben werden (Bild 21). Das passiert in der Regel, wenn die Verbundspannung zwischen Verpresskörper und Sandstein geringer ist als die Verbundspannung zwischen Stahlanker und Verpresskörper. Die Rauheit der Bohrlochmantelfläche spielt eine große Rolle bei der Erzielung des gewünschten Verbundes zwischen Verpresskörper und Naturstein.

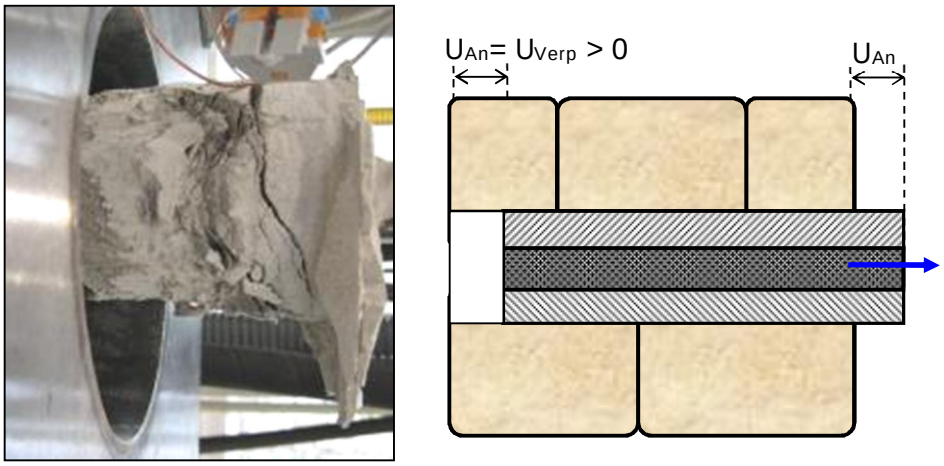


Bild 21 *Verbundversagen zwischen Verpressanker und Sandstein*

- Verbundversagen zwischen dem Ankerstab und dem Verpresskörper lässt sich feststellen, wenn die Verschiebung nur am Ende des Ankers und nicht gleichzeitig mit der Verschiebung im Verpresskörper gemessen wird (Bild 22). In diesem Fall ist die Zugkraft größer als die Adhäsions- und die Reibungskräfte zwischen Stahlanker und Verpresskörper.

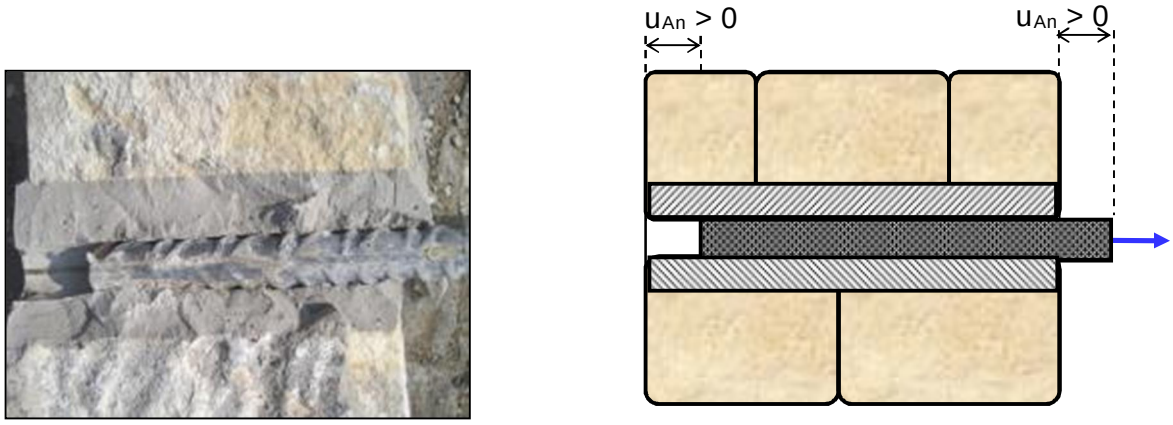


Bild 22 *Verbundversagen zwischen Stahlanker und Verpresskörper*

- Druck- und Schubversagen des Verpresskörpers tritt auf, wenn die Verschiebung des Verpresskörpers nicht gleichzeitig mit der Verschiebung des Ankers stattgefunden hat (Bild 23). Das ist der Fall, wenn sich Stabanker, Verpresskörper und Steine gegeneinander relativ verschieben, wodurch Risse sowohl im Verpresskörper als auch im Stein bzw. in Lager- und Stoßfugen auftreten.

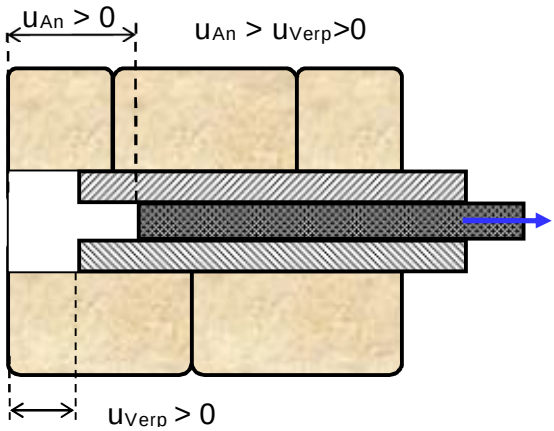


Bild 23 *Gemischtes Verbundversagen eines Verpressankers im Natursteinmauerwerk*

4.3 Analytische Beschreibung der Verbundfestigkeit bei Nadeln/Verpressankern

Ausgehend von einem Verpressanker im Mauerwerk wird die einwirkende Kraft vom Verpressanker ins Mauerwerk bzw. vom Mauerwerk in den Verpressanker über die Kontaktflächen übertragen. Die Verbundfestigkeit zwischen GFK-Stab und Injektionsgut sowie zwischen Injektionsgut und Stein hat einen entscheidenden Einfluss beim Bruchmechanismus des Verpressankers. Die theoretische Beschreibung der Verbundfestigkeit von Verpressankern erfolgte auf der Grundlage von Ausziehversuchen, die im Otto-Mohr-Labor (OML) an der TU Dresden durchgeführt worden sind. Bei den Ausziehversuchen wurde der Ankerstab durch Maschinenkraft aus dem Steinkörper herausgezogen.

4.3.1 Verbundverhalten zwischen Stabanker und Injektionsmörtel

Die Kraftübertragung vom Stabanker in den Verpresskörper erfolgt in der Verbundzone zwischen Verpresskörper und Stabanker und wird somit oft vereinfacht mit einer Verbundspannung entlang der Mantelfläche des Ankers ähnlich dem Verbundproblem in Stahlbeton beschrieben.

$$t_{An} = \frac{\Delta F_{An}}{p \cdot f_{An} \cdot L_{An}} \qquad (2)$$

ΔF_{An}: Stahlkraft,

L_{An}: Verankerungslänge,

t_{An}: Verbundspannung.

Infolge der Verbundwirkung zwischen Anker und Verpresskörper lässt sich das Ergebnis für einen beliebigen Verbundlängenabschnitt $L_{An,i}$ weiter detaillieren und wiederum vereinfachen:

$$t_{An,i} = \frac{\Delta s_{An,i} \cdot A_{An}}{p \cdot f_{An} \cdot L_{An,i}} = \frac{\Delta s_{An,i} \cdot p \cdot f_{An}^2}{p \cdot f_{An} \cdot L_{An,i} \cdot 4} = \frac{\Delta s_{An,i} \cdot f_{An}}{4 \cdot L_{An,i}} \qquad (3)$$

Die Stabankerdehnung führt zu einer Druckbeanspruchung im Inneren des Verpresskörpers. Hier wird die resultierende Querdehnung durch die Zugfestigkeit des Verpresskörpers um den Stab behindert. Dadurch entsteht ein Druck auf die Stahloberfläche, der die Längsdehnung des Stahls behindert. Bei zunehmender Stahlankerdehnung entstehen im Verpresskörper Haarrisse parallel zu den resultierenden Druckspannungen im Verpresskörper. Im Stahlbeton wurde von *Tepfers* [61] zur Erklärung des Verbundwiderstands von Rippenstahl das entstehende dreidimensionale Zug- und Druckstreben-System eine sogenannte Zugringtheorie eingeführt (s. Bild 24). Das Modell soll hier bei der Behandlung der Verbundfestigkeit zwischen gerippten Stahlankern und Injektionsgut verwendet werden. Der Stahl stützt sich dabei über die Rippen und in einem bestimmten Winkel α gebildete Druckstreben gegen einen Zugring in der Injektionsgutdeckung um die Stabachse ab. Die radial über die Rippen abgestrahlte Druckkomponente des Verbundsystems wird durch die Zugringspannungen des Verpresskörpers in hydrostatischem Gleichgewicht gehalten. Die horizontale Komponente erzwingt eine Verpresskörperdehnung gegen den Zugwiderstand des umgebenen Verpresskörpers, der zu einer Zugspannung im Verpresskörper führt.

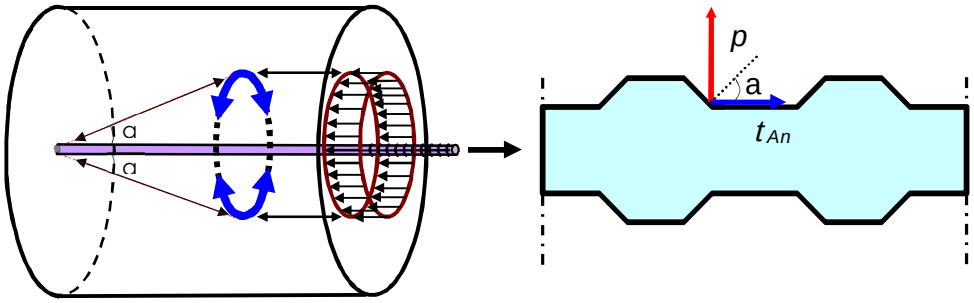


Bild 24 *Einfaches Zugringmodell von Tepfers [61]*

Ein sehr einfacher Formelansatz für das Problem kann damit lauten:

$$t_{An,i} = \frac{p_i}{\tan a} \qquad (4)$$

p_i: Innendruck auf den dickwandigen Verpresskörperring,

a: Stützwinkel ($35° \leq a \leq 55°$).

Die tangentialen Ringzugspannungen haben einen großen Anteil am Verbundverhalten des Verpressankers. Allerdings bilden sich schon bei geringer Belastung die Haftreibungskräfte zwischen Stahl und Injektionsmörtel durch die Form der Stahlrippen infolge des höheren Drucks auf die Verpressmörtelkonsolen zwischen den Stahlrippen. Daraus folgen feine radiale Risse. Deren Risswachstum wird jedoch im Grenzzustand der Verbundtragfähigkeit instabil wachsen. Das Materialverhalten der unmittelbaren Verpresskörperumgebung des Ankerstahls lässt sich - wie im Bild 25 dargestellt - durch drei verschiedene Zustände beschreiben:

- Elastisch,
- Teilweise gerissenen- elastisch,
- Plastisch.

Es ist klar, dass es sich hier offensichtlich um idealisierte Grenzfälle handelt. Der elastische Fall stellt sich bei großem Bohrdurchmesser ein.

Der plastische Fall ist bei kleinem Bohrdurchmesser mit $(D_B - f_{An})/2f_{An} \gg 1$ zu erwarten. Für realistische Verpresskörperdurchmesser ist jedoch anzunehmen, dass die innere Zone des Verpresskörpers um den Ankerstahl aufreißt und den Peak der Verteilung tangentialer Spannungen (Ringspannungen) weiter nach außen verlagert. Damit vergrößert sich die Völligkeit der Ringspannungen, was einen größeren Verbundwiderstand bedingt. Zusätzlich wird daher die Ausdehnung des radial gerichteten Innenrisses, des sogenannten *Tepfers*-Risses *r*, als ein Parameter zur Bestimmung der Verbundspannung herangezogen.

Im Bild 25 zeigt die Verteilung der tangential bestimmten Ringzuspannungen s_{Inj} für verschiedene Modellfälle. Der Druck breitet sich im Querschnitt des Verpresskörpers im ungerissenen Bereich radial vom Stahlanker aus. Der Innendurchmesser dieses Drucksystems entspricht dem Durchmesser des Stahlankers. Für die Horizontalkomponente gilt in Abhängigkeit vom Radius *r* beginnend in der Stabmitte folgende Beziehung für die Entwicklung des vom Stab ausgehenden Drucks in einem elastisch verbleibenden Verbundsystem nach [62] und [61]

$$s_{\mathrm{Inj}}(r) = \frac{(f_{An}/2)^2 \times p}{(D_B/2)^2 - (f_{An}/2)^2} \times \left[1 - \frac{(D_B/2)^2}{r^2}\right] \qquad (5)$$

Nach Umstellung dieser Gleichung folgt:

$$s_{Inj}(r) = \frac{f_{An}^2 \times p}{D_B^2 - f_{An}^2} \times \left[1 - \frac{D_B^2}{4 \times r^2}\right] \qquad (6)$$

$s_{Inj}(r)$: Veränderliche Druckspannung über den Radius, die mit dem Zugring in hydrostatischem Gleichgewicht im Verpresskörperbereich steht,

p: Druckkomponente des Verbundsystems ($p = t_{An} \times \tan a$) ,

r: Variabler Radius $(D_B - f_{An})/2 \leq r \leq f_{An}/2$,

r_e: Radius des gerissenen Bereiches,

D_B: Durchmesser des Bohrlochs.

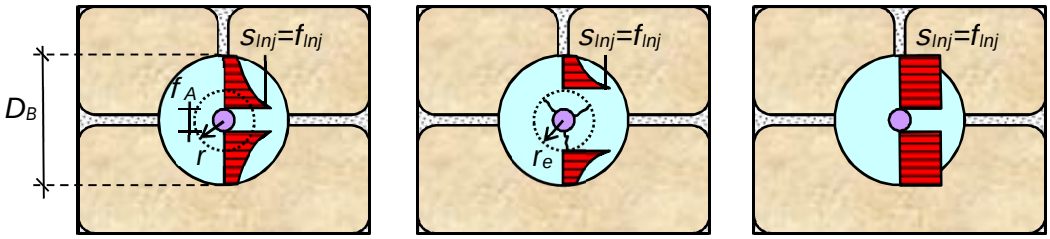


Bild 25 *Schematische Verteilung der Ringzugspannung s_{Inj} im elastisch-gerissenen und plastischen Modell nach Tepfers [61] (von links nach rechts) in dem Verpressanker*

Das hydrostatische Verhalten, das der umliegende Verpresskörper gleichzeitig zeigt, führt in der Umgebung des Stahlankers zu einer tangentialen Zugspannung s_t, da der Verpresskörper die Querdehnung durch den radialen Druck infolge seiner Zugfestigkeit behindert. Dieses querdehnungsbehindernde Verhalten des Verpresskörpers stellt praktisch ein hydrostatisches Gleichgewicht zwischen Belastung und Verpresskörperreaktion her.

$$s_t(r) = \frac{(f_{An}/2)^2 \times p}{(D_B/2)^2 - (f_{An}/2)^2} \times \left[1 + \frac{(D_B/2)^2}{r^2}\right] \qquad (7)$$

$$s_t(r) = \frac{f_{An}^2 \times p}{D_B^2 - f_{An}^2} \times \left[1 + \frac{D_B^2}{4 \times r^2}\right] \qquad (8)$$

$s_t(r)$: Tangentiale Zugspannung in Abhängigkeit vom Radius $(D_B - f_{An})/2 \le r \le f_{An}/2$.

Die tangentiale Zugspannung bei $r = f_{An}/2$ ist:

$$s_t(r) = \frac{f_{An}^2 \times p}{D_B^2 - f_{An}^2} \times \left[1 + \frac{D_B^2}{f_{An}^2}\right] \qquad (9)$$

Nach Auflösung dieser Gleichung folgt:

$$s_t(r) = p \times \frac{D_B^2 + f_{An}^2}{D_B^2 - f_{An}^2} \qquad (10)$$

Die tangentiale Zugspannung bei $r = (D_B - f_{An})/2$ ergibt sich zu:

$$s_t(r) = \frac{f_{An}^2 \times p}{D_B^2 - f_{An}^2} \times \left[1 + \frac{D_B^2}{4 \times \left(\frac{D_B - f_{An}}{2}\right)^2}\right] = \frac{f_{An}^2 \times p}{D_B^2 - f_{An}^2} \times \left[1 + \left(\frac{D_B}{D_B - f_{An}}\right)^2\right] \qquad (11)$$

Vom elastischen Modellansatz der Verbundspannung lässt sich die elastische Verbundfestigkeit t_{An}^{el} in Abhängigkeit von der maximalen Zugfestigkeit f_{Inj} des Verpresskörpers herleiten.

$$t_{An}^{el} = \frac{f_{Inj}}{\tan a} \times \frac{D_B^2 - f_{An}^2}{D_B^2 + f_{An}^2} \qquad (12)$$

f_{Inj}: Zugfestigkeit des Injektionsmörtels,

a: Stützwinkel nach Bild 24.

Aus der Gleichung (12) ist erkennbar, dass die Völligkeit der radialen Verteilung der tangentialen Verpresskörperzugspannung $s_t(r)$ im elastischen Modell sehr gering ist. Dies ist der Fall, wenn die Bedingung $s_t(r) < f_{inj}$ eingehalten wird.

Der Teilsicherheitsbeiwert wird in Anlehnung DIN EN 1998-1:2010-12 ([61], S. 179, Abschnitt 9.6) mit der gleichen Größe wie im statischen Fall angenommen.

Unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwerts für die Zugfestigkeit des Injektionsmörtels mit g_m = 1,35 nach *Gigla* kann die maximale übertragende Zugkraft F_{An} im elastischen Grenzfall durch den Ankerstahl berechnet werden:

$$t_{An}^{el} = \frac{f_{Inj}}{\tan a} \times \frac{D_B^2 - f_{An}^2}{D_B^2 + f_{An}^2} = g_m \times \frac{F^{el}}{p \times f_{An} \times L_{An}} \qquad (13)$$

$$F^{el} = \frac{p \times f_{An} \times L_{An} \times f_{Inj}}{g_m \times \tan a} \times \frac{D_B^2 - f_{An}^2}{D_B^2 + f_{An}^2} \qquad (14)$$

F^{el}: Maximale Zugkraft im elastischen Fall, wenn Versagen zwischen Ankerstahl und Verpresskörper auftritt.

Bei Überschreitung der Verpresskörperzugfestigkeit wegen starker Belastung eines Verbundabschnitts und steigendem Stützwinkel a bis zu einer Distanz $r > r_e$ wird das Gesamtsystem durch den im verbleibenden ungerissenen Ring ($D_B/2 > r > r_e$) erzeugten hydrostatischen Druck im Gleichgewicht gehalten. Falls der maximale Widerstand überschritten ist, wird das Risswachstum instabil und das Versagen tritt plötzlich und heftig ein. Der aufgerissene innere Bereich des Verpresskörpers liefert tangential keinen Beitrag zur Verbundtragfähigkeit, kann aber in radialer Richtung zum Stahlanker den Verbunddruck elastisch an den ungerissenen Bereich weitergeben. Deswegen ist dieser Verbundbereich „teilweise gerissen-elastisch" genannt worden. Beim Modell für teilweise-gerissen-elastischen Verbund ergibt sich:

$$t_{An}^{el,cr} = \frac{f_{Inj} \times 2 \times r_e}{\tan a \times f_{An}} \times \frac{D_B^2 - r_e^2}{D_B^2 + r_e^2} \qquad (15)$$

$t_{An}^{el,cr}$: Verbundspannung aus dem elastisch-gerissenen Modellansatz,

r_e: Radius des aufgerissenen Bereichs um den Stahlanker.

Die maximale Zugkraft im Anker im Fall des sogenannten teilweise-gerissenen Modells kann wie folgt berechnet werden:

$$t_{An}^{el,cr} = \frac{f_{Inj} \times 2 \times r_e}{\tan a \times f_{An}} \times \frac{D_B^2 - r_e^2}{D_B^2 + r_e^2} = g_m \times \frac{F_{An}^{el,cr}}{p \times f_{An} \times L_{An}} \qquad (16)$$

$$F_{An}^{el,cr} = \frac{p \times L_{An} \times f_{Inj} \times 2 \times r_e}{g_m \times \tan a} \times \frac{D_B^2 - r_e^2}{D_B^2 + r_e^2} \qquad (17)$$

Unter der theoretischen Voraussetzung einer rechteckigen Zugspannungsverteilung mit Völligkeit (s. Bild 25 rechts) im Verpresskörperring kann das Verbundmodell im gerissenen

Bereich für den gesamten Verpresskörper des ideal-plastischen *(f_{Inj} = konstant)* Zustands eingeführt werden. Dieser wird die Obergrenze der Verbundtragfähigkeit definieren, wenn die gesamte Ankerdeckung (Verpresskörper) ungerissen bleibt (s. Bild 25).

$$t_{An}^{pl} = \frac{f_{Inj}}{\tan a} \times \frac{D_B - f_{An}}{f_{An}} \qquad (18)$$

Damit ergibt sich die maximale Zugkraft im ideal-plastischen Zustand, wenn die Verbindung zwischen Ankerstahl und Verpresskörper versagt, zu:

$$t_{An}^{pl} = \frac{f_{Inj}}{\tan a} \times \frac{D_B - f_{An}}{f_{An}} = g_m \times \frac{F_{An}^{pl}}{p \times f_{An} \times L_{An}} \qquad (19)$$

$$F_{An}^{pl} = \frac{p \times L_{An} \times f_{Inj}}{g_m \times \tan a} \times (D_B - f_{An}) \qquad (20)$$

Zur sicheren Kraftübertragung vom oder zum Stahlanker durch den Verpresskörper dürfen die auftretenden Spannungen im Verpresskörper ihre Grenzen im elastischen Zustand nicht überschreiten, wenn er dauerhaft wirken soll. Insbesondere gilt diese Bedingung, wenn der Verpressanker im Mauerwerk einer dynamisch transienten Belastung, wie im Erdbebenfall, widerstehen soll und das auch im Wiederholungsfalle. Die Ausnutzung eines möglichen duktilen Verhaltens scheidet dabei aus.

4.3.2 Verbundverhalten zwischen Injektionsmörtel und Naturstein

Durch die radiale Druckspannung im Injektionskörper werden die Natursteine in der Umgebung des Verpressankers auf Zug beansprucht. Diese Spannungen stehen im Gleichgewicht mit den vorhandenen Druckspannungen im Mauerwerk. Die übertragene Spannung vom Verpresskörper zum Mauerwerk wird durch die Zugfestigkeit der umgebenden Steine bzw. der Stoß- oder Lagerfuge begrenzt. Hier können beim Einsatz des Verpressankers zwei Fälle unterschieden werden [63]:

- Der Verpressanker befindet sich vollständig im Steinquerschnitt. Die Zugspannungen werden in Längsrichtung in die Steine über den Mantel des Verpresskörpers eingetragen. Die Zugkraft wird durch die Steinzugfestigkeit begrenzt. Wird die lotrechte Komponente der radialen Normalspannung überdrückt, werden die Steine in Querrichtung auf Zug beansprucht und Risse können senkrecht in der Steinebene auftreten (Druckversagen infolge Querzug). Falls die lotrechte Komponente nicht groß genug ist, versagt der Stein entlang des geringeren Zugspannungsquerschnitts bei Naturstein z.B. in Schichtungen oder Störungsebenen (s. Bild 26).

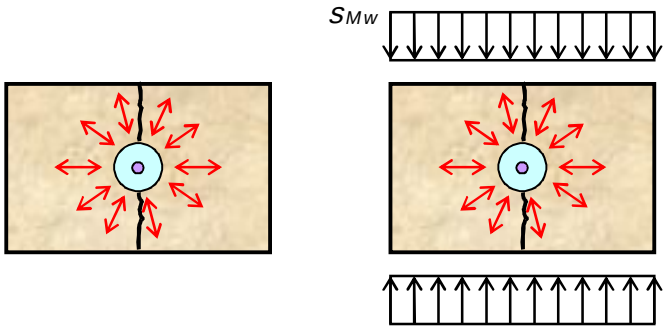


Bild 26 *Verpressanker im Steinquerschnitt nach [63]*

- Der Verpresskörper wurde teilweise im Fugenbereich eingesetzt, die Zugfestigkeit in der Stoß- bzw. Lagerfuge zwischen Steinen und Mörtel wird den Grenzwert bilden. Sofern die Druckspannung im Mauerwerk hoch genug ist, kann sich in diesem Fall eine Druckwirkung einstellen. Im Fall dass die Druckspannung geringer ist als die radiale Normalspannung, kann teilweise eine Verbundkraft übertragen werden. Die Reibung zwischen dem Verpresskörper und der Bohrlochoberfläche nimmt sofort nach Aufreißen der Lagerfuge ab. Dieser Fall kann bei Verpressankern im Bereich von Mauerwerkskronen auftreten (s. Bild 27).

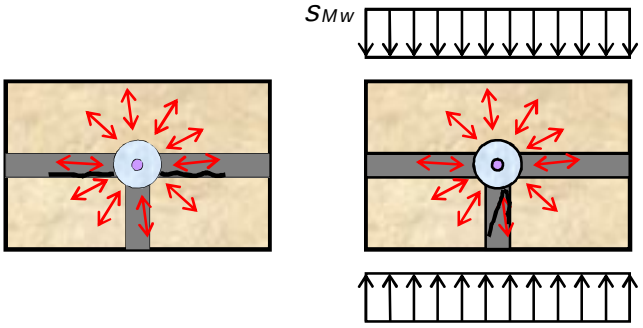


Bild 27 *Verpressanker im Fugenbereich nach [63]*

Zur Analyse des Verbundverhaltens zwischen dem Verpresskörper und seiner Umgebung aus Natursteinen bzw. Natursteinen und Mörtel wurde in diesem Bereich vorausgesetzt, dass der Verpresskörper als kontinuierliches Material angenommen wird.

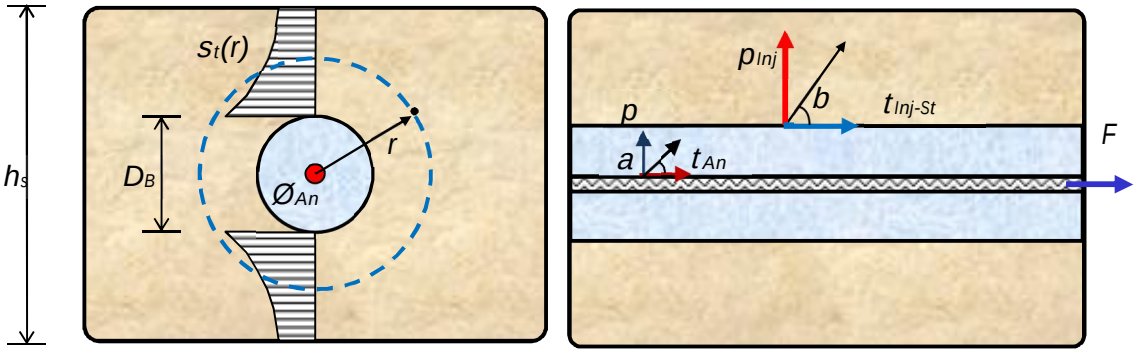


Bild 28 *Spannungsverteilung in einem Steinquerschnitt mit zentrischem Bohrloch unter Innendruck*

Wenn der Verpressanker im Steinbereich eingesetzt wird, kann die veränderliche Druckspannung bei elastischem Verbundsystem in Abhängigkeit von dem variablen Radius *r* im Steinbereich nach [62] ermittelt werden.

$$\sigma_{st}(r) = \frac{p_{Inj} \cdot (D_B/2)^2}{(h_s/2)^2 - (D_B/2)^2} \cdot \left[1 - \frac{(h_s/2)^2}{r^2}\right] \qquad (21)$$

$$\sigma_{st}(r) = \frac{p_{Inj} \cdot D_B^2}{h_s^2 - D_B^2} \cdot \left[1 - \frac{h_s^2}{4 \cdot r^2}\right] \qquad (22)$$

Die tangentiale Zugspannung ergibt sich in Abhängigkeit vom Radius (*r*) zu:

$$\sigma_t(r) = \frac{p_{Inj} \cdot (D_B/2)^2}{(h_s/2)^2 - (D_B/2)^2} \cdot \left[1 + \frac{(h_s/2)^2}{r^2}\right] \qquad (23)$$

$$s_t(r) = \frac{p_{Inj} \times D_B^2}{(h_s^2 - D_B^2)} \times \left[1 + \frac{h_s^2}{4 \times r^2}\right] \qquad (24)$$

Die maximale tangentiale Zugspannung zwischen Verpresskörper und Naturstein tritt an der Bohrlochwandung bei $r = D_B/2$ auf:

$$s_t(D_B/2) = p_{Inj} \times \frac{(h_s^2 + D_B^2)}{(h_s^2 - D_B^2)} \qquad (25)$$

$s_t(D_B/2)$: Tangentiale Zugspannung an der Bohrlochwandung,

p_{Inj}: Druckkomponente des Verbundsystems ($p_{Inj} = t_{Inj\text{-}st} \cdot \tan\beta$) nach Bild 28,

$t_{Inj\text{-}st}$: Verbundspannung zwischen Verpresskörper und Naturstein.

Die tangentiale Zugspannung wird mit der Steinzugfestigkeit begrenzt:

$$f_{bz} = t_{Inj\text{-}st} \times \tan\beta \times \frac{(h_s^2 + D_B^2)}{(h_s^2 - D_B^2)} \qquad (26)$$

$$t_{Inj\text{-}st} = \frac{f_{bz}}{\tan\beta} \times \frac{(h_s^2 - D_B^2)}{(h_s^2 + D_B^2)} \qquad (27)$$

f_{bz}: Zugfestigkeit des Steins.

Die Verbundspannung kann auch in Abhängigkeit von Verankerungslänge und Bohrlochdurchmesser unter äußerer Belastung F^{el} im elastischen Bereich berechnet werden zu:

$$t_{Inj\text{-}st} = \gamma_m \times \frac{F^{el}}{\pi \times D_B \times L_{An}} \qquad (28)$$

Daraus ergibt sich die maximale Zugkraft in Abhängigkeit von Steinzugfestigkeit, Bohrlochdurchmesser und Verbundlänge:

$$F^{el} = \frac{f_{bz} \times \pi \times D_B \times L_{An}}{\gamma_m \times \tan\beta} \times \frac{(h_s^2 - D_B^2)}{(h_s^2 + D_B^2)} \qquad (29)$$

Im Fall, dass der Verpressanker teilweise im Fugenbereich eingesetzt wurde, werden die Eigenschaften der Fuge, insbesondere die Zugfestigkeit, eine erhebliche Rolle im Verbundsystem spielen. Die Verbundspannung kann an der Bohrlochwand unter Berücksichtigung des Fugeneinflusses beschrieben werden.

$$t_{Verp} = t_{Inj\text{-}st} + t_{Inj\text{-}Mö} \qquad (30)$$

$$t_{Inj\text{-}st} + t_{Inj\text{-}Mö} = \frac{f_{bz}}{\tan\beta} \times \frac{(h_s^2 - D_B^2)}{(h_s^2 + D_B^2)} \times \frac{A_{st}}{A_G} + \frac{f_{Mö}}{\tan\beta} \times \frac{(h_s^2 - D_B^2)}{(h_s^2 + D_B^2)} \times \frac{A_{Mö}}{A_G} \qquad (31)$$

Nach Zusammenfassung der Gleichung folgt:

$$t_{Inj\text{-}st} + t_{Inj\text{-}Mö} = \frac{1}{A_G \times \tan\beta} \times \frac{(h_s^2 - D_B^2)}{(h_s^2 + D_B^2)} \times [f_{bz} \times A_{st} + f_{Mö} \times A_{Mö}] \qquad (32)$$

Die Verbundspannung steht im elastischen Bereich in Abhängigkeit von Zugkraft und gesamter Kontaktfläche:

$$t_{Inj-st} + t_{Inj-Mö} = g_m \times \frac{F^{el}}{A_G} \qquad (33)$$

Damit berechnet sich die Zugkraft zu

$$F^{el} = \frac{1}{\tan b} \times \frac{(h_s^2 - D_B^2)}{(h_s^2 + D_B^2)} \times [\, f_{bz} \times A_{st} + f_{Mö} \times A_{Mö} \,] \qquad (34)$$

$f_{Mö}$: Zugfestigkeit des Mauermörtels,

A_{st}: Kontaktfläche im Natursteinbereich,

$A_{Mö}$: Kontaktfläche im Fugenbereich,

A_G: Gesamte Kontaktfläche (A_G=A_{st}+$A_{Mö}$).

Die Kontaktfläche im Fugenbereich wird nach dem Bild 29 mit Hilfe der Bogenlänge über dem Winkel q berechnet:

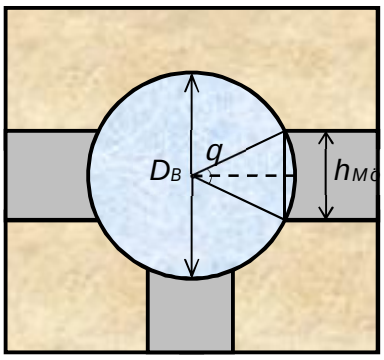


Bild 29 *Verpressanker im Fugenbereich*

Der Winkel q ist:

$$q = 2 \times \arccos\left(\frac{h_{Mö}}{D_B}\right) \qquad (35)$$

Das entsprechende Bogenmaß des Winkels q kann berechnet werden aus:

$$L_q = D_B \times p \times \frac{q}{360} \qquad (36)$$

Damit ergibt sich die Kontaktfläche im Fugenbereich:

$$A_{Mö} = n_{Mö} \times L_q \times L_{An} \qquad (37)$$

Die Kontaktfläche im Steinbereich ist:

$$A_{st} = A_G - A_{Mö} = p \times D_B \times L_{An} - L_{An} \times n_{Mö} \times p \times D_B \times \frac{q}{360}$$

$$A_{st} = p \times D_B \times L_{An} \times \left(1 - n_{Mö} \times \frac{q}{360}\right)$$

A_G: Gesamte Kontaktfläche zwischen dem Verpresskörper und der Bohrlochwandung,

$n_{Mö}$: Anzahl der Ankreuzung des Bohrlochs mit dem Mörtel, s. Bild 29 $n_{Mö} = 3$,

L_q: Länge des Bogens entsprechend dem Winkel q,

L_{An}: Länge des Ankers.

5 Untersuchungen zum Verbundverhalten

5.1 Experimentelle Untersuchungen - Mauerwerksbewehrung

5.1.1 Allgemeines

Das Ziel dieser Versuche ist die Feststellung des Einflusses der Verbundlänge auf der entstehenden Verbundspannung zwischen der horizontal angeordneten Stahlbewehrung und dem Mörtel im Mauerwerk. Hierbei werden Auszugsversuche an zwei unterschiedlichen Bewehrungsstäben aus der Mörtelfuge unter Verwendung von jeweils zwei Steinarten und Mörtelgruppen durchgeführt. Die zu prüfenden Verbundlängen werden zwischen 5d, 10d und 15 d variiert, um Einflüsse von Unregelmäßigkeiten bei der Vermörtelung in der Lagerfuge auszugleichen.

Zur Prüfung der ansetzbaren Verbundspannungen für die Verankerung der Bewehrungsstäbe im Mauerwerk nach DIN 1053-3 und DIN EN 1996-1-1 [1] liegen schon Vorkenntnisse von Brameshuber [13] vor. Diese Ergebnisse basierten auf der experimentellen Untersuchung der Verbundspannung an Bewehrungsstäben mit einem konstanten Durchmesser von (ds=6 mm) und einer konstanten Verbundlänge von (10.ds). Dabei wurde der Einfluss der Mörtelgruppen sowie Steinarten auf die Ergebnisse ebenfalls untersucht. Andere Parameter, wie das Bewehrungsmaterial, der Bewehrungsdurchmessers (ds) und die Verbundlänge(l) sind nicht in Betracht gezogen. Darüber hinaus lässt sich die Untersuchung der Verbundspannung im bewehrten Mauerwerk unter Berücksichtigung der vorgenannten Parameter nicht vermeiden.

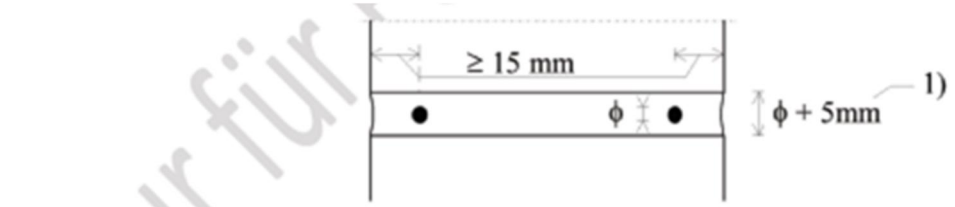
Zu diesem Zweck wurde hier die Verbundspannung zwischen dem Mauerwerk und Mauerbewehrung mit der Wahl verschiedener Verbundlängen (2ds,5ds,10ds und 15ds) sowie der Variation des Bewehrungsdurchmesse (ø=6 mm und 10 mm) und der Mörtelgruppen (NMIIa und NM III) untersucht.

Ziel dieser Untersuchung ist eine genauere Ermittlung der ansetzbaren Verbundspannung für die Verankerung der Bewehrungsstäbe im Mauerwerk.

5.1.2 Konstruktive Vorschreibungen in der Norm

Im Abschnitt 8 der DIN EN 1996-1-1[1] sind die konstruktiven Vorschreibungen für die Anordnung von Bewehrung in der Lagerfuge von Mauerwerk angegeben. Abweichende Angaben sind im NA [2] nicht enthalten. Der Mindestdurchmesser beträgt 5 mm (Abschn. 8.2.4, Abs. (2) [2]).

Das Bild 8.2 in DIN EN 1996-1-1[1] gibt die Lage und die zu gewährleistenden Überdeckungsmaße an.



Legende
1) für Normal- und Leichtmörtel

Bild 30 *Anordnung der Bewehrung in der Fuge nach [1], Bild 8.2*

Die seitliche Überdeckung laut DIN EN 19961-1[1] muss mindestens 15 mm betragen, weshalb der Maßpfeil im Bild falsch ist. Die Mörteldeckung soll oberhalb und unterhalb so groß sein, dass sich die Fugendicke aus Bewehrungsdurchmesser + 5 mm ergibt.

Die Fugendicke allgemein bei Normalmörtel ist nach 8.1.5 [1], Abs. (1) nicht größer als 15 mm. Die DIN 1053-3 [72] hatte eine Lagerfugendicke bei bewehrtem Mauerwerk von maximal 20 mm zugelassen.

5.1.3 Materialeigenschaften

5.1.3.1 Steinarten

Aufgrund seiner großen Wasseraufnahme wirkt der Kalksandstein am ungünstigsten auf die Festigkeitsentwicklung des Mauermörtels und gegebenenfalls auf die Verbundfestigkeit zwischen Mörtel und Bewehrung. Zum Vergleich wurde der Einfluss von verschiedenen Steinarten auf die Verbundeigenschaften durch die Verwendung von Hochlochziegel untersucht.

Die Versuche zum Verbundverhalten bei der in Lagerfugen eingebetteten Bewehrung wurden mit den folgenden zwei Steinarten durchgeführt.

Steinart	Format
Kalksandstein	KS 20-2,0-2DF (l/b/h 240/115/113 mm)
Hochlochziegel	HLz 12-0,9-2DF (l/b/h 240/115/113 mm)

Tabelle 1 *Verwendete Steinarten für Auszugversuche der Mauerbewehrung*

a) Kalksandstein, KS 2DF (l/b/h 240/115/113, mit NMIIa+MGIII

b) Hochlochziegel, HLz 2DF (l/b/h 240/115/113, mit NM IIa

Bild 31 *Verwendete Steinformate*

5.1.3.2 Mauermörtel

Als Mauermörtel wurden bei den Versuchsserien Normalmörtel NM IIa (M5) und NM III (M10) untersucht. Die Druckfestigkeit bei beiden Sorten erfüllt die Mindestanforderungen der DIN V 18580 [74]. Die zuvor genannten Mörtel wurden zum Vermauern der Mauersteine (Mauermörtel) verwendet. Das Mischen der Mauermörtel erfolgte nach Herstellerangaben im Zwangsmischer.

Die Festmörteleigenschaften wurden nach DIN EN 1015-11:2007-05 [73] (Biegezug- und Druckfestigkeit) bestimmt. Die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Mörtelarten sind im Anhang zusammengefasst.

a) Verwendeter Normalmörtel NMIIa b) Verwendeter Mörtel NMIII

Bild 32 *Verwendete Mörtelsorten*

5.1.3.3 Verwendete Mauerbewehrung

Als Bewehrung wurden Bewehrungsstähle nach DIN 488-1 [75] mit den Durchmessern 6 und 10 mm verwendet (Bild 35). Für beide Bewehrungsdurchmesser wurde ein Betonstahl B500B mit zwei Rippenreihen verwendet. Die Bewehrungsstäbe wurden mit 30 mm Mörteldeckung zum Prüfkörperrand eingelegt. Die Soll-Fugendicke wurde auf die nach DIN 1053-3 [72] maximal zulässige Dicke von 20 mm eingestellt. An den Bewehrungsstäben wurden die Zugfestigkeit Rm, die Streckgrenze Re und die bezogene Rippenfläche fR bestimmt. Die Ergebnisse sind im Anhang zusammengestellt.

a) Betonstahl in Ringen B500 A mit drei Rippenreihen, ds = 6 mm

b) Betonstabstahl B500 B mit vier Rippenreihen, ds = 10 mm

Bild 33 *Verwendete Bewehrungsstäbe in Anlehnung an [75]*

5.1.4 Prüfkörperherstellung

Zur Untersuchung des Verbundverhaltens zwischen Bewehrung und Mörtel in bewehrtem Mauerwerk wurden Ausziehversuche an kleinen Mauerwerkprüfkörpern nach RILEM/CEB/FIP Recommendations [55] durchgeführt.

Die hergestellten Prüfkörper repräsentieren einen Ausschnitt aus einer Mauerwerkswand. Mit den Versuchskörpern werden die wesentlichen Erkenntnisse des Stahlbetonbaus sowie die RILEM-Empfehlungen [55] berücksichtigt.

Zur Prüfkörperherstellung wurden jeweils 4 Mauersteine, im 2 DF-Format gesägt, verwendet. Die Lagerfuge wurde in zwei Arbeitsschritten hergestellt. Zunächst wurde eine etwa 12 mm dicke Mörtelschicht aufgetragen. Die Bewehrung wurde mit 30 mm Mörteldeckung zu jedem Prüfkörperrand eingelegt. Der Abstand zwischen den beiden Bewehrungsstäben betrug etwa 18 cm, so dass in jedem Prüfkörper zwei Auszugversuche durchgeführt werden konnten. Die Soll-Fugendicke wurde auf die nach [DIN 1053-3:1990-02 Mauerwerk [72]] maximal zulässige Dicke von 20 mm eingestellt. Alle Prüfkörper wurden vollfügig vermauert.

Die Verbundlänge für die Ausziehversuche variierte bei den Versuchsserien zwischen [2.ds, 5.ds, 10·ds und 15.ds]. Die Verbundlänge wurde jeweils mittig im Prüfkörper angeordnet.

Bild 34 *Geprüfte Verbundlängen der Bewehrung [2.ds, 5.ds, 10.ds und 15.ds]*

Bild 35 *Herstellung des Mauerwerkprüfkörpers aus Hochlochziegeln*

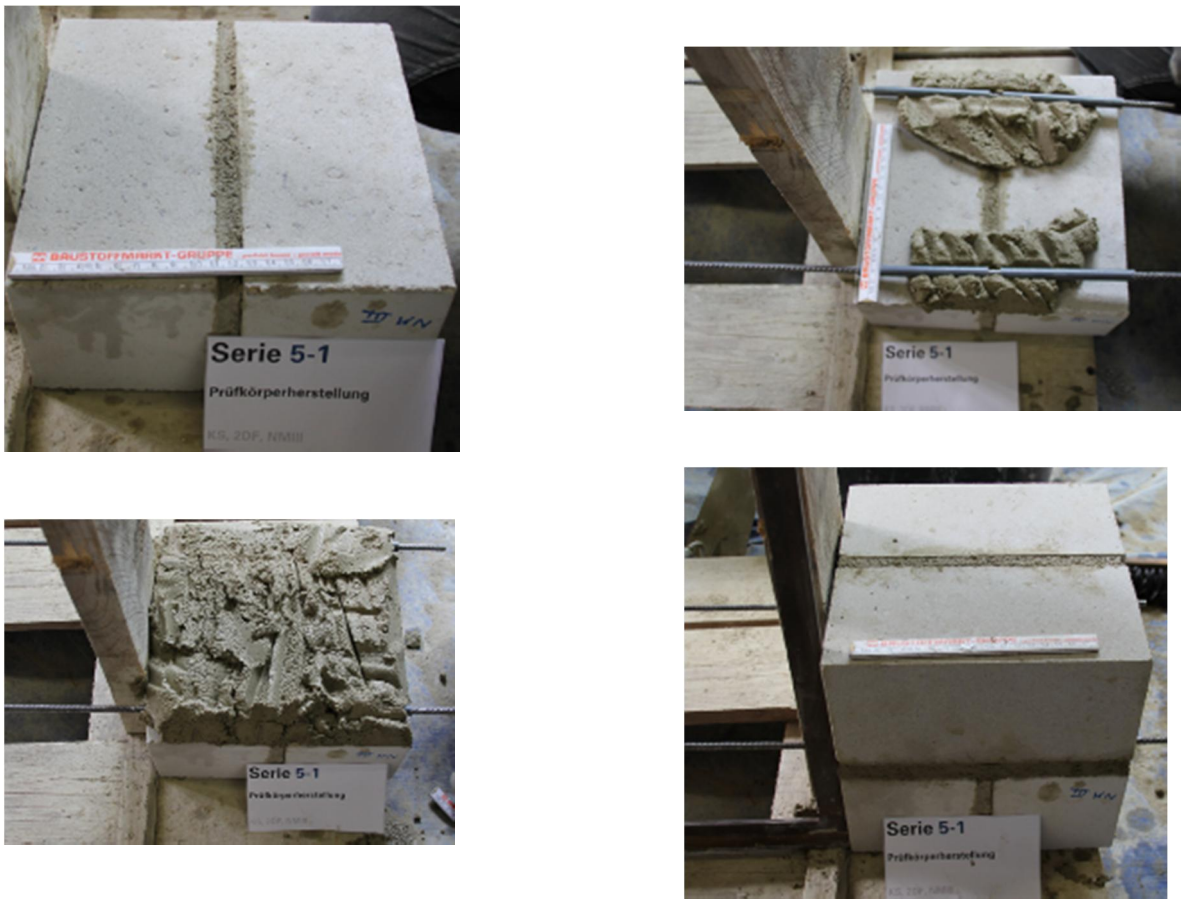


Bild 36 *Herstellung des Mauerwerkprüfkörpers aus Kalksandstein*

Nach der Herstellung der Versuchskörper konnten die Auszugsversuche der Mauerbewehrung durchgeführt werden. Für diese Ausziehversuche wurden folgende Versuchskörperserien mit unterschiedlichen Verbundlängen, Bewehrungsdurchmessern und Mörtelsorten hergestellt:

Prüfserie	Nummer	Verwendete Materialien			Verbundlänge	Prüfkörper
		Stein	Mörtelgruppe	Bewehrung		
1	1_1	KS, 2DF	NM IIa	6 mm	2.ds=12 mm	6
	1_2	KS, 2DF	NM IIa	6 mm	5.ds=30 mm	6
	1_3	KS, 2DF	NM IIa	6mm	10.ds=60 mm	6
	1_4	KS, 2DF	NM IIa	6mm	15.ds=90 mm	6
2	2_1	Hlz, 2DF	NM IIa	6 mm	2.ds=12 mm	10
	2_2	Hlz, 2DF	NM IIa	6 mm	5.ds=30 mm	6
	2_3	Hlz, 2DF	NM IIa	6mm	10.ds=60 mm	6
	2_4	Hlz, 2DF	NM IIa	6mm	15.ds=90 mm	6
3	3_1	KS, 2DF	NM IIa	10 mm	2.ds=20 mm	6
	3_2	KS, 2DF	NM IIa	10 mm	5.ds=50 mm	6
	3_3	KS, 2DF	NM IIa	10 mm	10.ds=100 mm	6
	3_4	KS, 2DF	NM IIa	10 mm	15.ds=150 mm	6
4	4_1	Hlz, 2DF	NM IIa	10 mm	2.ds=20 mm	10
	4_2	Hlz, 2DF	NM IIa	10 mm	5.ds=50 mm	6
	4_3	Hlz, 2DF	NM IIa	10 mm	10.ds=100 mm	6
	4_4	Hlz, 2DF	NM IIa	10 mm	15.ds=150 mm	8
5	5_1	KS, 2DF	MM III	6 mm	2.ds=20 mm	6
	5_2	KS, 2DF	MM III	6 mm	5.ds=30 mm	6
	5_3	KS, 2DF	MM III	6mm	10.ds=60 mm	6
	5_4	KS, 2DF	MM III	6mm	15.ds=90 mm	6
Summe						130

Tabelle 2 *Versuchsserien-Auszugversuche der Mauerbewehrung*

5.1.5 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Verssuchsaufbau:

Der Versuchskörper wurde mit einer der langen Stabenden der Bewehrungsstäbe zentrisch durch das vorgesehene Loch in der unteren Platte nach unten in die Prüfmaschine eingebracht. Das andere freie Langende des zweiten Bewehrungsstabes wurde durch ein zweites Loch eingebracht, so dass keine Einflüsse auf den Verbund beim Ausziehen des ersten Stabende entstanden.

Die Mauerbewehrungsstäbe wurden mit Hilfe eines speziellen Gestells exakt senkrecht ausgerichtet. Danach wurde der zu prüfende Bewehrungsstab in die Prüfmaschine mit einem passenden Einspanndruck eingespannt.

Am kurzen, nicht eingespannten Ende des Bewehrungsstabes wurde ein induktiver Wegaufnehmer für die Messung der Relativverschiebung zwischen Bewehrungsstab und Prüfkörper angebracht (siehe Messtechnik).

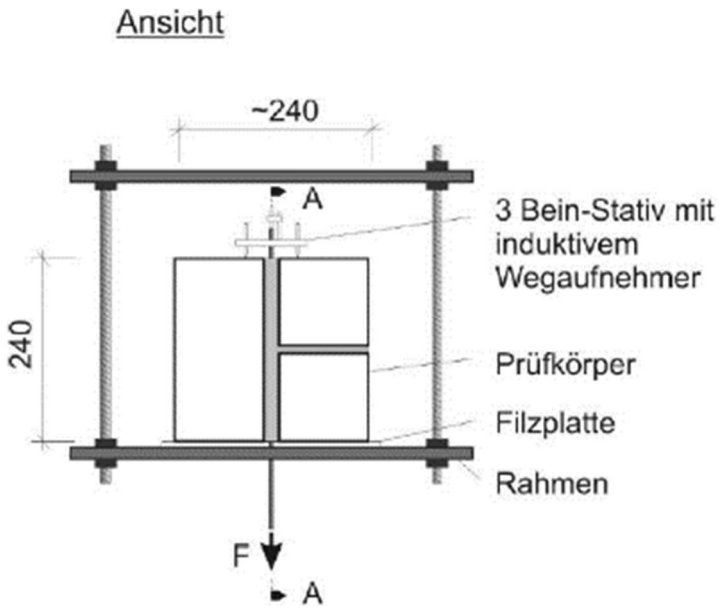


Bild 37 *Versuchsaufbau nach RILEM/CEB/FIP Ausziehversuch, Prüfkörper und Prüfgestell*

Bild 38 *Versuchsaufbau Otto Mohr Laboratorium TU Dresden, statische Bewehrung-Ausziehversuche mit kleiner Verbundlänge in Hydropul-Prüfmaschine*

Versuchsdurchführung:

Die baumechanische Untersuchung des Verbundverhaltens zwischen Bewehrung und Mörtel im Mauerwerk wurde im Otto-Mohr Laboratorium an der Technischen Universität Dresden als statischer Ausziehversuch durchgeführt. Dabei wurde der Versuchskörper in der Prüfmaschine (Hydropuls-Prüfmaschine) lagesicher eingebaut und die Bewehrungsstäbe senkrecht ausgerichtet. Für die Ausziehversuche wurde das lange, nach unten gerichtete Ende des Bewehrungsstabes in die Prüfmaschine eingespannt. Der Einspanndruck muss so gewählt werden, dass die Haltekraft der Spannbacken der Prüfmaschine einen Schlupf zwischen Einspannung der Maschine und Bewehrungsstab

verhindert. Die Durchführung der Ausziehversuche erfolgte durch eine kontinuierlich eingeleitete Zugkraft über den Bewehrungsstab in den Versuchskörper. Die eintretende Relativverschiebung zwischen Bewehrungsstab und Versuchskörper wurde dabei mit einen induktiven Wegaufnehmer am unbelasteten Stabende ermittelt. Für die Bestimmung der Verbundfestigkeit wurde der Versuchskörper bis zum Erreichen einer Relativverschiebung zwischen Bewehrungsstab und Versuchskörper von 3 mm bis 5 mm beansprucht. Folgendes Belastungs- und Messprogramm wurde durchgeführt:

Belastungsart:	weggesteuert
Belastungsgeschwindigkeit:	0,01 mm/s
Messprogramm:	Kraft-Weg Ausgaben mit einer Messrate von 1/20s

Nach den statischen Ausziehversuchen wurden die geprüften Versuchskörper auf Höhe der Mörtelfuge aufgespalten. Die Spaltung der Versuchskörper ermöglichte eine Analyse zum Verbundverhalten zwischen Bewehrungsstab und Mauermörtel sowie zum Verbundversagen des Prüfkörpers.

Bild 39 *Aufspaltung eines Versuchskörpers aus Hochlochziegel und NM IIa mit Bewehrung 6 mm Verbundlänge 10 ds*

Bild 40 *Aufspaltung eines Versuchskörpers Kalksandstein und NM III mit Bewehrung 6 mm und Verbundlänge 5 ds*

Parallel zu den statischen Ausziehversuchen wurden die verwendeten Mörtelsorten als Mörtelprismen (siehe Anhang) auf ihre mechanischen Eigenschaften unter gleichen Laborbedingungen nach Versuchsprogramm geprüft.

5.1.6 Auswertung der Versuchsserien

5.1.6.1 Auswertung Versuchs-Serie 1

Steinsorte: KS-Stein 2DF
Bewehrung: 6 [mm]
Verbundlängen: $2.d_s, 5.d_s, 10.d_s$ &15. d_s
Mörtelsorte: NM IIa Biegezugfestig.: Rf = 1,8 MPa Druckfestig. Rc= 9,6 MPa

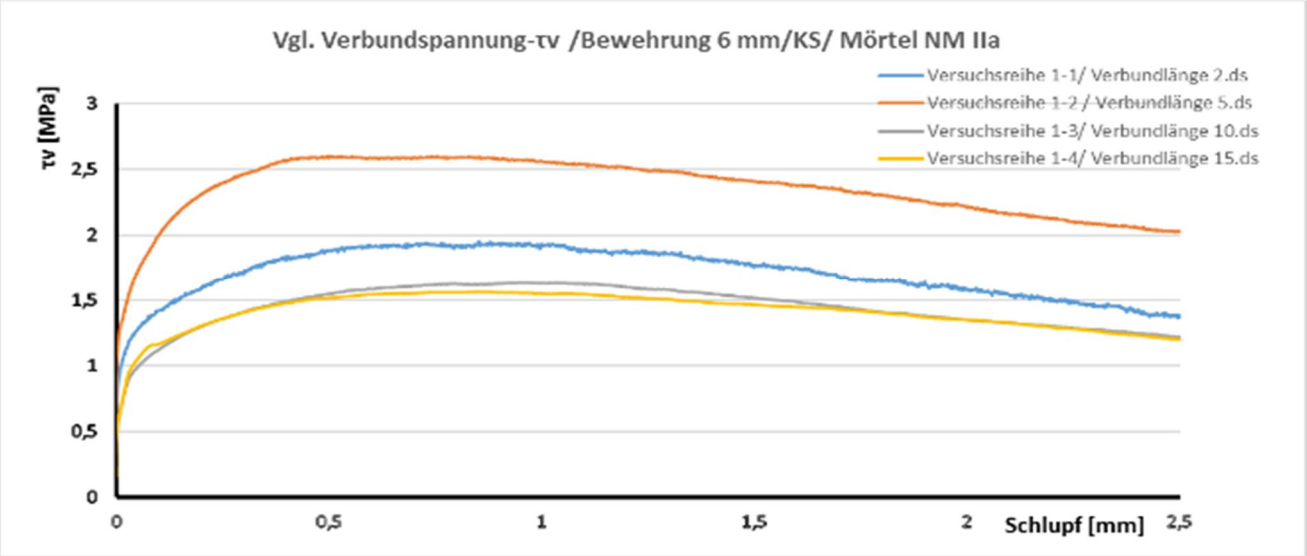


Diagramm 1 Verbundspannung-Schlupf Beziehung der Mauerbewehrung- Serie 1

Auswertung Versuchsergebnisse

Im Diagramm 1 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 1 dargestellt. Die Prüfkörper dieser Serie wurden aus KS-Steinen mit der Mörtelsorte NM IIa hergestellt. Hierbei wurden Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 6 [mm] verwendet. Die Versuchsreihen in der Serie 1 sind in Abhängigkeit von den verschiedenen Verbundlängen aufgezeigt. Der Verbund zwischen der Bewehrung und dem Mauermörtel wurde in der Serie 1 mit vier verschiedenen Verbundlängen von 2.ds=12, 5.ds=30, 10.ds=60 mm und 15.ds=90 mm geprüft. Zu Beginn wächst die Verbundspannung etwa proportional zum Schlupf bis zu einem Grenzwert von 1,06 MPa bis 2,09 MPa bei einer kleinen Relativverschiebung des Bewehrungsstabes bis 0,1 mm. Dieser Prüfbereich beschreibt den Scherverbund. Nach dem Versagen des Mörtels auf Abscherung der Mörtelkonsole am Peak der Kurven erfolgt der Abbau der Reibungskräfte zwischen der Bewehrung und dem Mauermörtel. Die Serie 1 wurde erfolgreich auf den Verbund zwischen Bewehrung und Mauermörtel im Ausziehversuch geprüft. Die Aufspaltung der Prüfkörper bestätigte das Verbundversagen.

Bild 41 *Geprüfter und aufgespaltener Versuchskörper der Prüfserie 1*

5.1.6.2 Auswertung Versuchs-Serie 2

Steinsorte: Hochlochziegel 2 DF
Bewehrung: 6 [mm]
Verbundlängen: $2.d_s, 5.d_s, 10.d_s$ &15. d_s
Mörtelsorte: NM IIa Biegezugfestig.: Rf = 1,8 MPa Druckfestig. Rc= 9,6 MPa

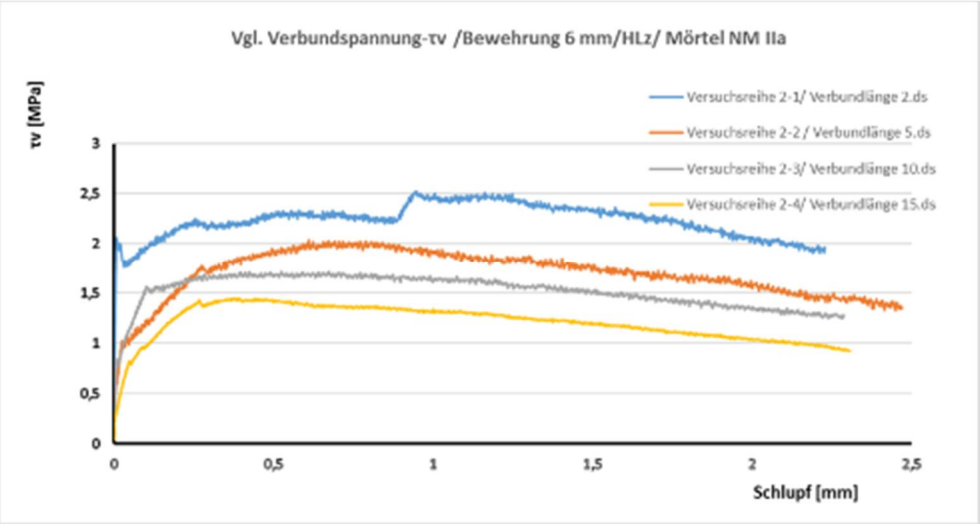


Diagramm 2 Verbundspannung-Schlupf Beziehung der Mauerbewehrung –Serie 2

Auswertung Versuchsergebnisse:

Im Diagramm 2 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 2 dargestellt. Die Prüfkörper dieser Serie wurden aus KS-Steinen mit der Mörtelsorte NM IIa hergestellt. Hierbei wurden Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 6 [mm] verwendet. Die Versuchsreihen in der Serie 2 sind in Abhängigkeit von den verschiedenen Verbundlängen aufgezeigt. Der Verbund zwischen der Bewehrung und dem Mauermörtel wurde in der Serie 2 mit vier verschiedenen Verbundlängen von 2.ds=12, 5.ds=30, 10.ds=60 mm und 15.ds=90 mm geprüft. Zu Beginn wächst die Verbundspannung etwa proportional zum Schlupf bis zu einem Grenzwert von 1,36 MPa bis 2,41MPa (Aufstieg zwischen 15 und 30% im Vergleich zu PK mit KS-Steinen mit den gleichen Randbedingungen in Serie 1) bei einer kleinen Relativverschiebung des Bewehrungsstabes bis 0,1 mm. Dieser Prüfbereich beschreibt den Scherverbund. Nach dem Versagen des Mörtels auf Abscherung der Mörtelkonsole am Peak der Kurven erfolgt der Abbau der Reibungskräfte zwischen der Bewehrung und dem Mauermörtel. Die Serie 2 wurde erfolgreich auf den Verbund zwischen Bewehrung und Mauermörtel im Ausziehversuch geprüft. Die Aufspaltung der Prüfkörper bestätigte das Verbundversagen.

Bild 42 *Geprüfter und aufgespaltener Versuchskörper der Prüfserie 2*

5.1.6.3 Auswertung Versuchs-Serie 3

Steinsorte: KS-Stein 2 DF
Bewehrung: 10 [mm]
Verbundlängen: $2.d_s, 5.d_s, 10.d_s$ &15. d_s
Mörtelsorte: NM IIa Biegezugfestig.: Rf = 1,8 MPa Druckfestig. Rc= 9,6 MPa

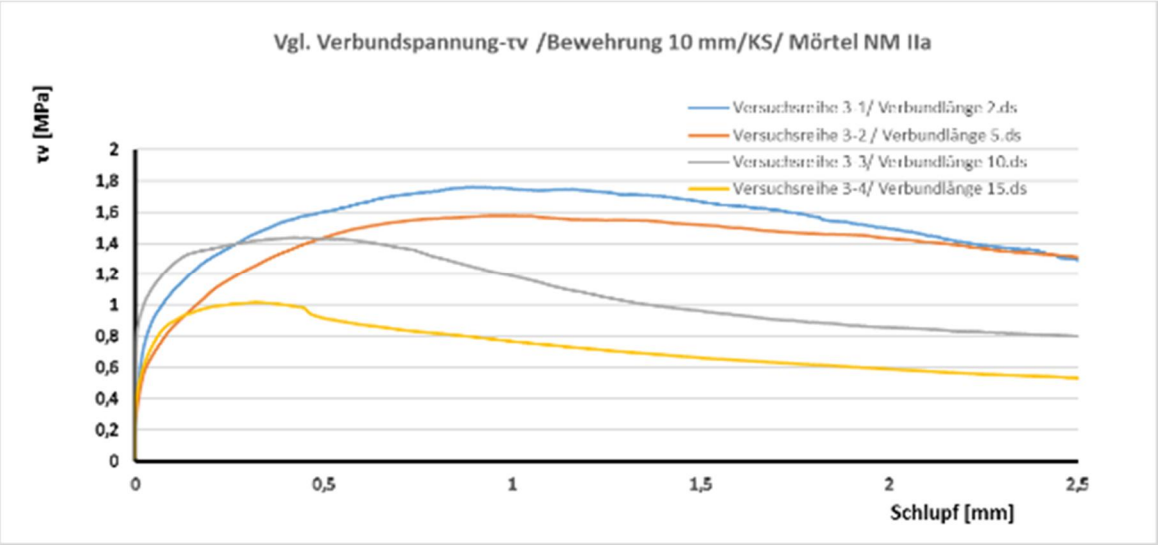


Diagramm 3 Verbundspannung-Schlupf Beziehung der Mauerbewehrung –Serie 3
Auswertung Versuchsergebnisse:

Im Diagramm 3 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 3 dargestellt. Die Prüfkörper dieser Serie wurden aus KS-Steinen mit der Mörtelsorte NM IIa hergestellt. Hierbei wurden Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 6 [mm] verwendet. Die Versuchsreihen in der Serie 3 sind in Abhängigkeit von den verschiedenen Verbundlängen aufgezeigt. Der Verbund zwischen der Bewehrung und dem Mauermörtel wurde in der Serie 3 mit vier verschiedenen Verbundlängen von 2.ds=20, 5.ds=50, 10.ds=100 mm und 15.ds=150 mm geprüft. Zu Beginn wächst die Verbundspannung etwa proportional zum Schlupf bis zu einem Grenzwert von 1,0 MPa bis 1,79 MPa (Abstieg zwischen 6 und 16% im Vergleich zu Serie 1 mit Bewehrung 6 mm) bei einer kleinen Relativverschiebung des Bewehrungsstabes bis 0,1 mm. Dieser Prüfbereich beschreibt den Scherverbund. Nach dem Versagen des Mörtels auf Abscherung der Mörtelkonsole am Peak der Kurven erfolgt der Abbau der Reibungskräfte zwischen der Bewehrung und dem Mauermörtel. Die Serie 3 wurde erfolgreich auf den Verbund zwischen Bewehrung und Mauermörtel im Ausziehversuch geprüft. Die Aufspaltung der Prüfkörper bestätigte das Verbundversagen.

Bild 43 *Geprüfter und aufgespaltener Versuchskörper der Prüfserie 3*

5.1.6.4 Auswertung Versuchs-Serie 4

Steinsorte: Hochlochziegel 2 DF
Bewehrung: 10 [mm]
Verbundlängen: $2.d_s, 5.d_s, 10.d_s$ &15. d_s
Mörtelsorte: NM IIa Biegezugfestig.: Rf = 1,8 MPa Druckfestig. Rc= 9,6 MPa

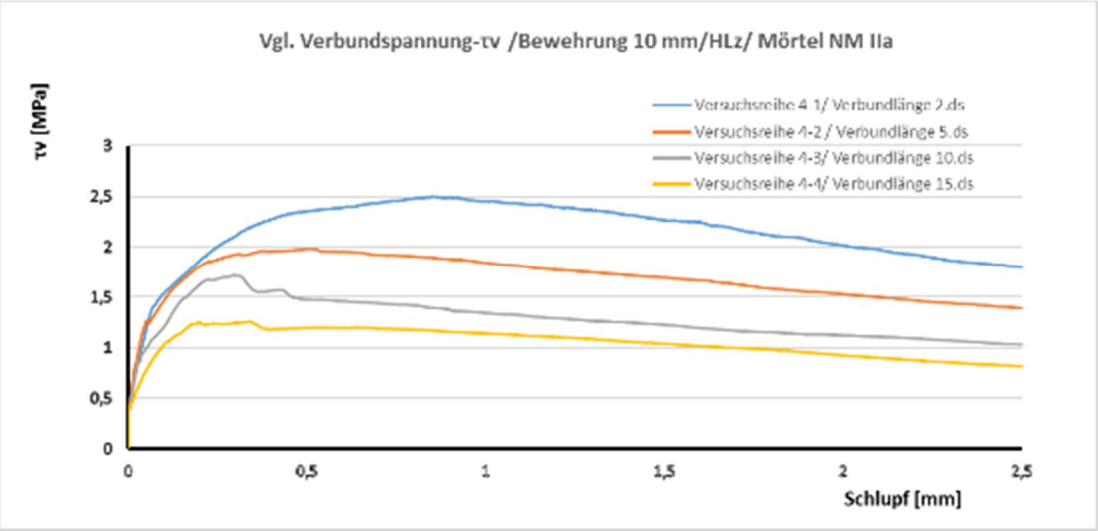


Diagramm 4 Verbundspannung-Schlupf Beziehung der Mauerbewehrung –Serie 4
Auswertung Versuchsergebnisse:

Im Diagramm 4 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 4 dargestellt. Die Prüfkörper dieser Serie wurden aus KS-Steinen mit der Mörtelsorte NM IIa hergestellt. Hierbei wurden Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 6 [mm] verwendet. Die Versuchsreihen in der Serie 4 sind in Abhängigkeit von den verschiedenen Verbundlängen aufgezeigt. Der Verbund zwischen der Bewehrung und dem Mauermörtel wurde in der Serie 4 mit vier verschiedenen Verbundlängen von 2.ds=20, 5.ds=50, 10.ds=100 mm und 15.ds=150 mm geprüft. Zu Beginn wächst die Verbundspannung etwa proportional zum Schlupf bis zu einem Grenzwert von 1,27 MPa bis 1,93 MPa (Abstieg zwischen 7 und 20% im Vergleich zu Serie 2 mit Bewehrung 6 mm den gleichen Randbedingungen) bei einer kleinen Relativverschiebung des Bewehrungsstabes bis 0,1 mm. Dieser Prüfbereich beschreibt den Scherverbund. Nach dem Versagen des Mörtels auf Abscherung der Mörtelkonsole am Peak der Kurven erfolgt der Abbau der Reibungskräfte zwischen der Bewehrung und dem Mauermörtel. Die Serie 4 wurde erfolgreich auf den Verbund zwischen Bewehrung und Mauermörtel im Ausziehversuch geprüft. Die Aufspaltung der Prüfkörper bestätigte das Verbundversagen.

Bild 44 *geprüfter und aufgespaltener Versuchskörper der Prüfserie 4*

5.1.6.5 Auswertung Versuchs-Serie 5

Steinsorte: KS-Stein 2 DF
Bewehrung: 6 [mm]
Verbundlängen: $2.d_s, 5.d_s, 10.d_s$ &15. d_s
Mörtelsorte: NM III Biegezugfestig.: Rf = 3,1 MPa Druckfestig. Rc= 22,8 MPa

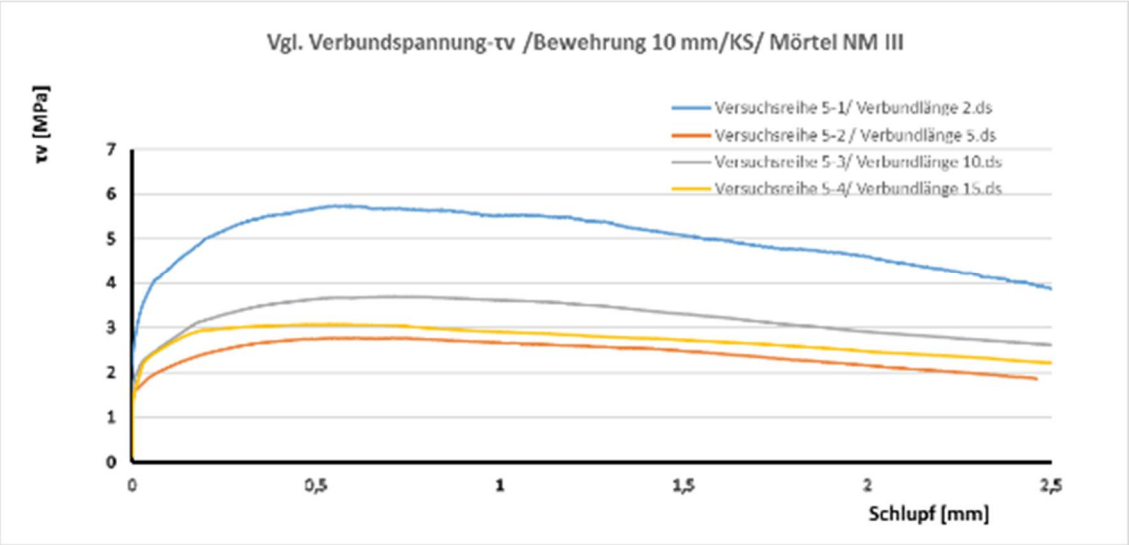


Diagramm 5 Verbundspannung-Schlupf Beziehung der Mauerbewehrung- Serie 5
Auswertung Versuchsergebnisse:

Im Diagramm 5 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 5 dargestellt. Die Prüfkörper dieser Serie wurden aus KS-Steinen mit der Mörtelsorte NM III hergestellt. Hierbei wurden Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 6 [mm] verwendet. Die Versuchsreihen in der Serie 5 sind in Abhängigkeit von den verschiedenen Verbundlängen aufgezeigt. Der Verbund zwischen der Bewehrung und dem Mauermörtel wurde in der Serie 5 mit vier verschiedenen Verbundlängen von 2.ds=12, 5.ds=30, 10.ds=60 mm und 15.ds=90 mm geprüft. Zu Beginn wächst die Verbundspannung etwa proportional zum Schlupf bis zu einem Grenzwert von 3,16 MPa bis 5,99 MPa (Aufstieg zwischen 180 und 200% im Vergleich zu Serie 1 mit NM IIa) bei einer kleinen Relativverschiebung des Bewehrungsstabes bis 0,1 mm. Dieser Prüfbereich beschreibt den Scherverbund. Nach dem Versagen des Mörtels auf Abscherung der Mörtelkonsole am Peak der Kurven erfolgt der Abbau der Reibungskräfte zwischen der Bewehrung und dem Mauermörtel. Die Serie 5 wurde erfolgreich auf den Verbund zwischen Bewehrung und Mauermörtel im Ausziehversuch geprüft. Die Aufspaltung der Prüfkörper bestätigte das Verbundversagen.

Bild 45 *Geprüfter und aufgespaltener Versuchskörper der Prüfserie 5*

5.1.7 Auswertung der Versuche der Mauerwerksbewehrung nach Barlet

Die Ermittlung der mittleren Verbundspannung der Mauerbewehrung erfolgte wie im Abschnitt 5.2.3.1 über die experimentell ermittelte Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung. Für die Annährung des experimentell ermittelten Kurvenverlaufs wird die gleiche Ersatzfunktion verwendet. Die Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung der mittleren Versuchskurven wird durch die Ersatzfunktion bis zum Peak integriert. Die Festlegung von Kriterien für den Gebrauchszustand und den Bruchzustand sowie die Berechnung der mittleren Verbundspannung wird ebenfalls wie im Abschnitt 5.2.3.1ermittelt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 3 zusammengefasst.

Bei den durchgeführten Versuchsserien wurde der Einfluss der Verbundlänge, Mauerwerkssteinarten sowie des Bewehrungsdurchmessers auf der entstehenden Verbundspannung zwischen der horizontal angeordneten Stahlbewehrung und dem Mörtel im Mauerwerk untersucht. Hierbei werden die Ergebnissee der Auszugsversuche an zwei unterschiedlichen Bewehrungsstäben (6 mm und 10 mm) aus der Mörtelfuge unter Verwendung von jeweils zwei Steinarten (Kalksandstein und Mauerziegel) und Mörtelgruppen (NMIIa und NMIII) sowie bei Variierung der Verbundlängen zwischen [2ds, 5ds, 10ds und 15 ds] zusammengestellt. Die Auswertung der gewonnenen Versuchsdaten nach [Barlet] zeigte bei Verbundlängen von [2ds und 5 ds] relativ gleiche Werte der Verbundspannungen. Die Steigung der Verbundspannung entlang der Verbundlänge während der Ausziehversuche war in diesem Fall gleichmäßig, so dass die Bruchspannungen aufgrund der kürzen Verbundlänge gleichzeitig erreicht wurden.

Im Vergleich dazu sind die Verbundspannungen bei größeren Verbundlängen [10 ds und 15 ds] deutlich geringer. Der Grund dafür ist die unregelmäßige Spannungsverteilung entlang des Bewehrungsstabes. Die Verbundspannung erreichte deren Maximalwert am Stabanfang (in Ausziehrichtung), wobei die Verbundspannung am Stabende relativ geringere Werte aufweist. Ein anderer Einflussfaktor sind ebenfalls die Unregelmäßigkeiten bei der Vermörtelung in der Lagerfuge. Dieser herstellungstechnischen Fehler nimmt mit den größeren Verbundlängen zu.

					ser					
1	1_1	Mittelwert	KS, 2DF	NMIIa	6mm	2 ds= 12	1,96	1,07	260	401
	1_2					5 ds= 30	2,60	1,43	191	300
	1_3					10 ds= 60	1,63	0,91	306	470
	1_4					15 ds= 90	1,56	0,88	309	487
2	2_1	Mittelwert	HLZ, 2DF	NMIIa	6mm	2 ds= 12	2,52	1,27	204	337
	2_2					5 ds= 30	2,03	1,09	264	392
	2_3					10 ds= 60	1,71	0,94	269	455
	2_4					15 ds= 90	1,44	0,78	330	552
3	3_1	Mittelwert	KS, 2DF	NMIIa	10 mm	2 ds= 20	1,76	1,00	458	713
	3_2					5 ds= 50	1,57	0,88	523	811
	3_3					10 ds= 100	1,43	0,81	512	880
	3_4					15 ds= 150	1,01	0,50	831	1441
4	4_1	Mittelwert	HLZ, 2DF	NMIIa	10 mm	2 ds= 20	2,50	1,36	342	524
	4_2					5 ds= 50	1,98	1,13	380	632
	4_3					10 ds= 100	1,71	0,77	543	931
	4_4					15 ds= 150	1,26	0,61	684	1180
5	5_1	Mittelwert	KS, 2DF	NMIII	6mm	2 ds= 12	5,75	2,89	101	149
	5_2					5 ds= 30	2,77	1,52	184	283
	5_3					10 ds= 60	3,69	1,95	147	219
	5_4					15 ds= 90	3,07	1,71	154	251

Tabelle 3 *Ergebnisse für die Auszugversuche der Mauerbewehrung*

Bild 46 gibt einen Vergleich zwischen den in [59] untersuchten Verbundspannungen zu den durchgeführten Versuchen an der TU Dresden.

Die untersuchte Verbundspannung der Mauerbewehrung bei Prüfkörpern aus Kalksandstein in Verbindung mit dem Mörtel NMIIa hat bis etwa 50% höhere Werte bei den an der TU Dresden durchgeführten Versuchen im Vergleich zu den Ergebnissen bei Brameshuber [59] aufgezeigt. Bei Verwendung vom Mauermörtel NM III liegt dieser Wert bei 85%. Hergestellte Prüfkörper aus Hochlochziegel haben im Gegenteil etwa 20% weniger Verbundspannung gezeigt. Die unterschiedlichen Versuchsergebnisse sind auf den unterschiedlichen Versuchsaufbau bzw. die Versuchsdurchführung zurückzusetzen. Ein anderer Einflussfaktor könnte die Verbundstörung während der Herstellung der Prüfkörper sein.

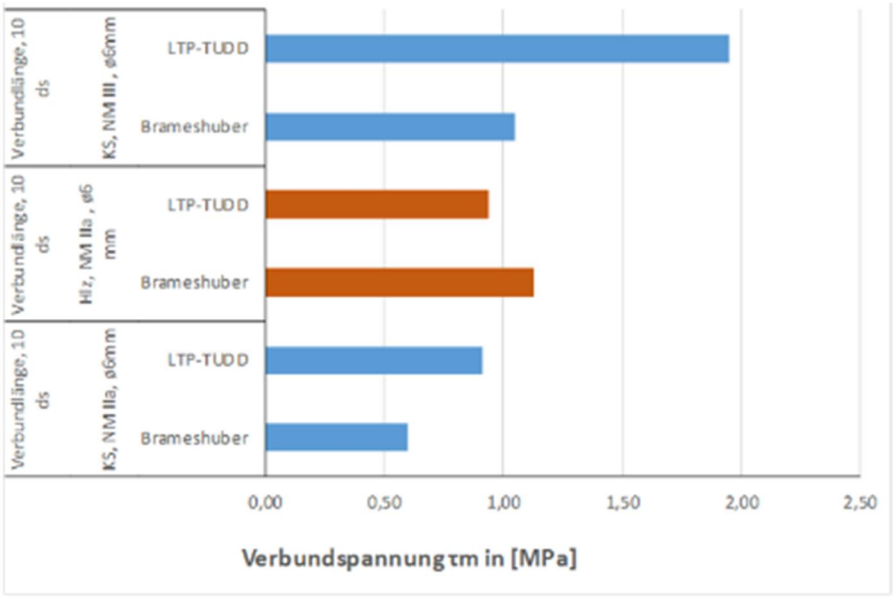


Bild 46 *Vergleich der Verbundspannung zwischen Brameshuber [59] und LTP-TUDD*

Die Auswertemethodik wird später dann auch für die Nadeln/Anker angewendet.

5.1.8 Zusammenfassung

Die Serien 1 bis 5 wurden im Ausziehversuch erfolgreich auf den Verbund zwischen Bewehrung und Verpressmörtel geprüft. Die Aufspaltungen der Prüfkörper bestätigten das Verbundversagen.

Die Verbundspannungen werden mit steigender Verbundlänge geringer. In den meisten Fällen sinkt die Verbundspannung mit steigendem Bewehrungsdurchmesser, Ausnahme KS PK 10mm, Bild 47). In den Probekörpern aus Ziegeln konnten höhere Verbundspannungen als in denen aus KS aufgenommen werden. Weiter wurde nachgewiesen, dass Mörtel der Mörtelgruppe III höhere Verbundspannungen als die Mörtelgruppe IIa aufnehmen konnte (Bild 48).

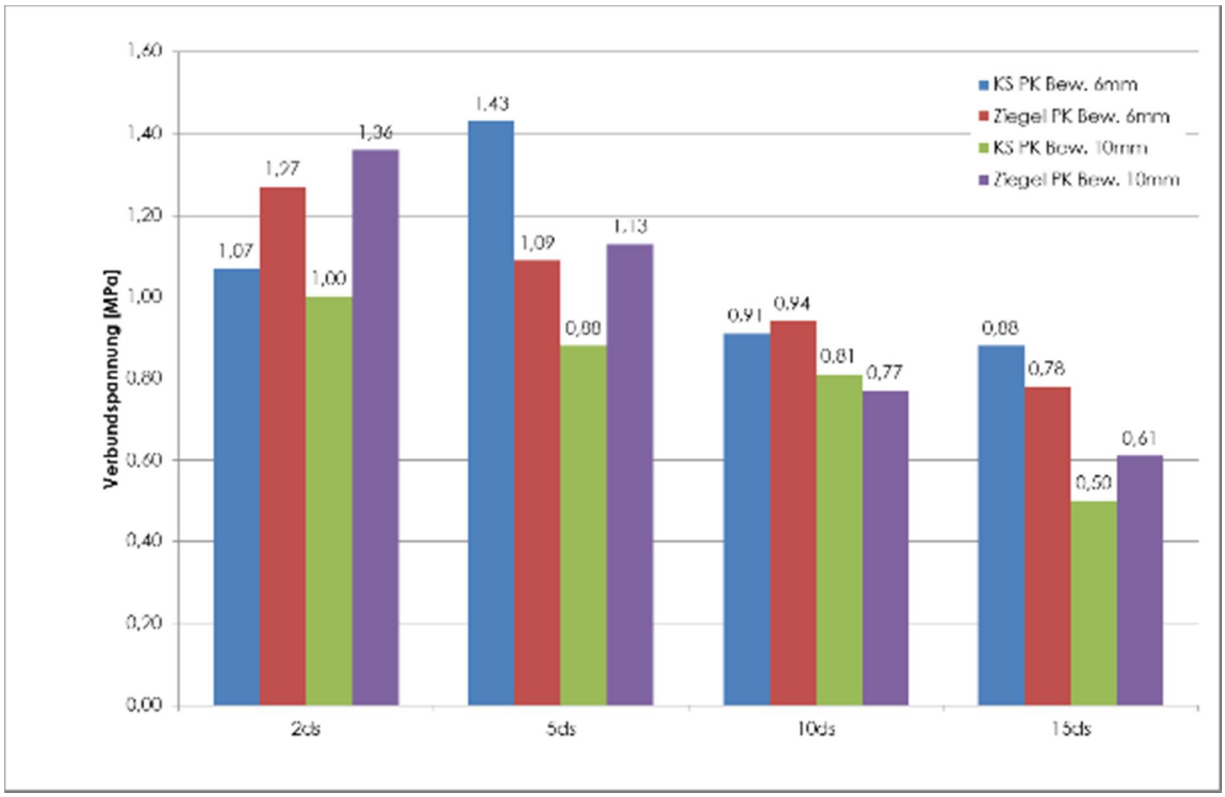


Bild 47 *Ermittelte Verbundspannungen für die unterschiedlichen Mauerwerks- und Bewehrungssysteme hergestellt mit MG IIa*

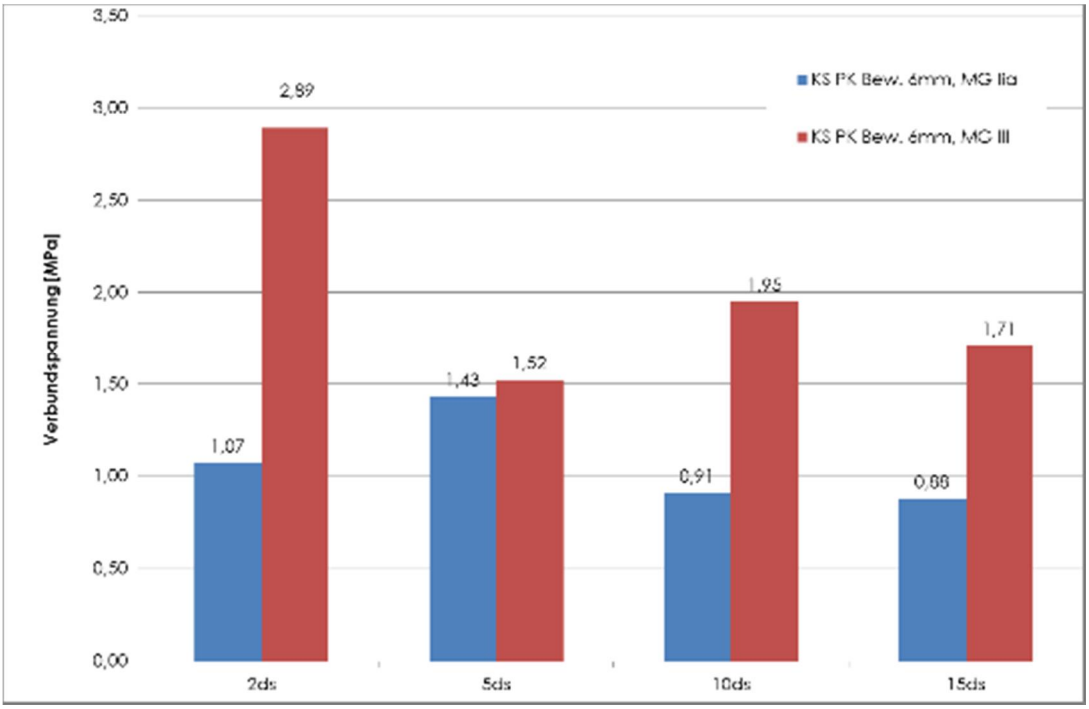


Bild 48 *Ermittelte Verbundspannungen für die mit KS hergestellten Probekörper im Vergleich MG IIa und MG III*

Die hier erzielten Ergebnisse bestätigen i.W. im Gegensatz zu [59], dass die Verbundspannungen auf der Grundlage der Erkenntnisse von *Rehm* an Verbundkörpern mit einer Verbundlänge von 2 d_s bis maximal 5 d_s durchzuführen sind. Die hier erzielten Ergebnisse stimmen damit mit der allgemeinen Fachmeinung in Europa überein, die bisher aber in Deutschland angezweifelt worden ist. Die hier angestellten Untersuchungen sollten nicht zur Beweisführung allgemein für das bewehrte Mauerwerk dienen, sondern der Untersetzung der Richtigkeit der eingangs zu Grunde gelegten Hypothese, mit kleinen Verbundlängen zu arbeiten.

5.2 Experimentelle Untersuchungen -Faserverbundwerkstoffe

5.2.1 Versuche zum Verbundverhalten mit kleiner Verbundlänge

5.2.1.1 Allgemeines

Die experimentellen Untersuchungen zum Verbundverhalten wurden anhand von Nadel/Anker Ausziehversuchen durchgeführt. Dabei konnte das komplexe Verbundsystem zwischen Naturstein, Verpressmörtel und Bewehrungsstab mit unterschiedlichem Prüfkörperaufbau untersucht werden. Mit der Wahl einer geringen Verbundlänge von 2 ds bzw. 5 ds zwischen den Verbundkomponenten wurden Verbundspannungen ermittelt, die eine nahezu konstante Verbundspannungsverteilung über die Verbundlänge wiedergeben.

Die Ergebnisse aus den experimentellen Versuchen schaffen eine Datenbasis für die weitere ingenieurtechnische Analyse des Verbundes bei der Vernadelung bzw. Verankerung von historischem Mauerwerk mit Bewehrungsstäben aus Faserverbundwerkstoffen.

Dafür wurden Prüfkörper aus den Komponenten Natursandstein, Verpressmörtel und GFK-, bzw. CFK Anker/Nadel hergestellt. Untersucht wurde das Verbundverhalten zwischen den einzelnen Komponenten unter Variation des Faserverbundwerkstoffes, der Verpressmörtelsorte und der Verbundlänge.

Ziel ist die Sondierung eines geeigneten Verpressmörtels für die Anwendung im gipshaltigen, historischen Mauerwerk und eine ingenieurtechnische Analyse der Verbundspannungen.

5.2.1.2 Materialeigenschaften

5.2.1.2.1 Natursandstein

Die Versuche wurden mit Natursandstein durchgeführt. Markant ist die gelbe Farbe der Sandsteinquader.

Die Prüfkörper aus Sandstein haben Kantenlängen von l/b/h 160/160/160 mm.

Die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Steine werden an entsprechenden Prüfkörperprismen, nach DIN EN 771-6 [5] und DIN EN 771-1[3] bestimmt.

Als Ergebnis der Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften des verwendeten Natursandsteines sind folgende Materialkennwerte zu verwenden:

Biegezugfestigkeit	f_{BZ} = 9,96	N/mm²
Druckfestigkeit	f_c = 38,4	N/mm²
Elastizitätsmodul	E = 21589	N/mm²

Bild 49 *Ermittlung der Biegezugfestigkeit*

Bild 50 *Ermittlung der Druckfestigkeit*

Bild 51 *Ermittlung des E-Moduls*

Für die Ausziehversuche wurde ebenfalls die Wasseraufnahmefähigkeit unter atmosphärischem Druck nach DIN EN 13755[1] bestimmt. Dazu wurde die Wasseraufnahmefähigkeit von zylindrischen Sandsteinprüfkörpern über einen entsprechenden Zeitraum untersucht.

[1] DIN EN 13755- Prüfverfahren für Naturstein, Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit unter atmosphärischem Druck

Bild 52 *Lagerung und Abkühlung der Probekörper in Exsikkator*

Bild 53 *Untersuchung der Wasseraufnahme bei Natursandstein, Versuchsbeginn mit Wasserhöhe auf der Hälfte des Versuchskörper*

Prüfkörper	Ermittlung der Masse m_i zum Zeitpunkt t				
	t_0	t_0 + 48 h	t_0 + 72 h	t_0 + 96 h	t_0 +120 h
	Masse m_d [g]	Masse m_1 [g]	Masse m_2 [g]	Masse m_3 [g]	Masse m_4 [g]
PK1	252,51	272,23	272,83	273,12	273,69
PK2	253,23	272,74	273,41	273,49	273,88
PK3	253,99	272,82	273,43	274,05	274,23
PK4	245,42	266,59	267,05	267,50	267,50
PK5	246,71	268,25	269,23	269,33	269,30
PK6	254,96	273,45	273,78	274,59	274,65

Tabelle 4 *Versuchsergebnisse der Wasseraufnahmeuntersuchungen nach DIN EN 13755*

Wasseraufnahme bei atmosphärischem Druck A_b

$A_b = ((m_s-m_d)/m_d)*100$

A_s Wasseraufnahme bei atmosphärischem Druck [%]

m_s Masse des gesättigten PK in [g]

m_d Masse des getrockneten PK in [g]

Prüfkörper	Masse des getrockneten PK in [g]	Masse des gesättigten PK in [g]	Wasseraufnahme bei atmosphärischem Druck in M.-%]
	m_d in [g]	m_s in [g]	A_s in [%]
PK1	252,51	273,69	8,39
PK2	253,23	273,88	8,16
PK3	253,99	274,23	7,97
PK4	245,42	267,50	9,00
PK5	246,71	269,30	9,16
PK6	254,96	274,65	7,72
		Mittelwert	8,40

Tabelle 5 *Ermittlung der Wasseraufnahme bei atmosphärischem Druck aus Versuchsergebnissen*

Der verwendete Sandstein hat eine hohe Wasseraufnahme unter atmosphärischem Druck. Sandstein-Wasseraufnahmefähigkeit von 0,2 - 9,0 M.-% (Mauerwerk Kalender 2018, Tabelle 22). Für den verwendeten Natursandstein konnte eine Wasseraufnahme von 8,4 M.-% ermittelt werden.

Mit den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchung lässt sich der Natursandstein als Sandstein mit hoher Wasseraufnahmefähigkeit klassifizieren.

5.2.1.2.2 Verpressgut/Mörtel

An Verpressgut kommen sowohl standardmäßige Produkte als auch spezifische Mischungen zum Einsatz. Folgende Mörtelsorten wurden für die experimentellen Untersuchungen verwendet:

a) Mörtel für Mauerwerksverfüllung und – verpressung, Trass-Verpressmörtel HS, (HSTV-P01 von TUBAG)[2]

Körnung:	0-2 mm, 0-4 mm
Druckfestigkeit[3]:	≥ 20 N/mm²
Verarbeitungszeit:	ca. 2 Stunden
Wasserbedarf:	je nach Konsistenz ca. 30 M.-% Wasser
Anwendung:	zur Herstellung von Verpress- und Injektionsmörtel zur Riss- und Hohlraumverpressung
	Mauerwerkssanierung an historischen Gebäuden mit hoher Sulfatbeständigkeit

b) Mörtel für Mauerwerksverfüllung und – verpressung für gipshaltiges Mauerwerk (HSV-P01 von TUBAG)[4]

Körnung:	0-1 mm, 0-2 mm, 0-4 mm
Druckfestigkeit[5]:	≥ 5,0 N/mm²
Verarbeitungszeit:	ca. 60 Minuten
Wasserbedarf:	je nach Konsistenz ca. 30 M.-% Wasser
Zusammensetzung:	Spezialbindemittel
	Trass, als natürliches Puzzolan
	Abgestufte Gesteinskörnung
	Zusatzmittel
Anwendung:	zur Herstellung von Verpress- und Injektionsmörtel zur Riss- und Hohlraumverpressung
	Mauerwerkssanierung an historischen Gebäuden mit gipshaltigem Mauerwerk, sulfatbeständig

[2] Siehe Anlage Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
[3] Nach technischem Merkblatt
[4] Siehe Anlage Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
[5] Siehe technisches Merkblatt Anlage

c) Mörtel für Mauerwerksverfüllung und – verpressung, Kalkmörtel (NHLV-g01 von TUBAG)

Körnung:	0-1 mm, 0-2 mm
Druckfestigkeit:	ca. 2,0 N/mm²
Verarbeitungszeit:	ca. 60 Minuten
Wasserbedarf:	je nach Konsistenz ca. 35 M.-% Wasser
Zusammensetzung:	NHL 5 natürliche hydraulischer Kalk
	abgestufte Gesteinskörnung
	Zusatzmittel
Anwendung:	zur Herstellung von Verfüllmörtel zur Hohlraumverfüllung
	zur Restaurierung und Instandsetzung von historischem Mauerwerk

c) Historischer Gipsestrich von CASEA[6] (casusan HGE

Körnung:	0-2 mm
Druckfestigkeit:	≥ 30,0 N/mm²
Verarbeitungszeit:	ca. 45 - 60 Minuten
Wasserbedarf:	je nach Konsistenz ca. 20 M.-% Wasser
Zusammensetzung:	Calciumsulfatbinder auf Naturanhydritbasis
	spezielle Gipsphasen
	Anhydritkörnungen
	Zusatzmittel
Anwendung:	Vergussmörtel zur Verfüllung von Hohlräumen in stark gipshaltigem Mauerwerk

Die mechanischen Eigenschaften des verwendeten Mauer- und Verpressmörtels wird experimentell nach DIN EN 1015-11 [4] untersucht.

5.2.1.2.3 Anker/Nadel

Für die statischen Nadel-/Anker-Ausziehversuche kommen Bewehrungsstäbe aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) und kohlenstoffverstärktem Kunststoff (CFK) zur Anwendung. Für die experimentellen Untersuchungen mit kurzer Verbundlänge wurden folgende Nadeln/Anker verwendet:

[6] Siehe Anlage Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung

Nadel/Anker	Nenndurchmesser	Eigenschaften
Schöck ComBAR Bewehrungsstab aus glasfaserverstärktem Kunststoff	16 mm 8 mm	Dauerzugfestigkeit: f_{fk} = 580 N/mm2 Effektive Zugfestigkeit: σ_{eff} = 1000N/mm² - 1500 N/mm² Bruchdehnung: ε_F = 2,2 % Zug – E-Modul: E_{eff} = 151 000 N/mm²
ThyssenKrupp Carbon4ReBAR Bewehrungsstab aus kohlenstoffverstärktem Kunststoff	8 mm	Effektive Zugfestigkeit: σ_{eff} = 1650 N/mm² Bruchdehnung: ε_F = 1,1 % Zug - E-Modul: E_{eff} = 151 000 N/mm²

Tabelle 6 *Verwendete Nadeln/Anker aus faserverstärkten Kunststoff für die Versuche mit kurzer Verbundlänge*

			Schöck ComBAR	Schöck ComBAR	Carbon 4ReBAR
Nenn-durchmesser	D_n	[mm]	8	16	8,5
Außen-durchmesser	D_0	[mm]	9	18	10
Rippensteigung	a	[mm]	8,5	8,5	12
Rippenhöhe	h_m	[mm]	0,45	0,9	1,45
Nennquerschnitt	A_f	[mm²]	50,3	201,1	56,7

Tabelle 7 *Geometrische Angaben der Stabprofilierung*

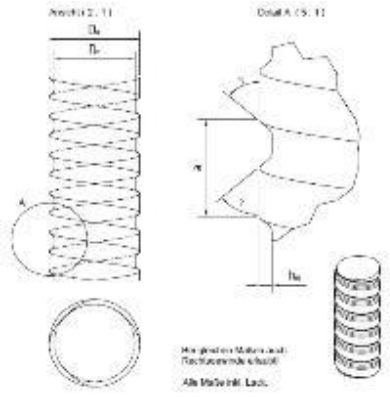


Bild 54 *Detailzeichnung Stabprofilierung*[7]

SCHÖCK ComBAR[8]

Der glasfaserverstärkte Kunststoff gehört zu den Faserverbundwerkstoffen und besteht aus einer Vielzahl von Glasfasern, sowie aus einer Matrix aus Kunstharz, Füller und Zusatzstoffen. Die Eigenschaften der GFK- Bewehrungsstäbe werden durch die einzelnen Komponenten und des Herstellungsprozesses bestimmt. Die Bewehrungsstäbe ComBAR des Herstellers Schöck sind aus unidirektionalem textilglasverstärktem Reaktionsharz gefertigt. Die GFK Bewehrungsstäbe bestehen aus E-CR Glasfasern (E-Glass Corrosion Resistant) mit

[7] Siehe Anlage: Schöck ComBAR Zulassung
[8] Siehe Anlage: Datenblatt Schöck ComBAR

besonders hoher chemischer und thermischer Beständigkeit. Das Zusammenführen der einzelnen Glasfasern erfolgt im Strang-Bündelungsverfahren mit einer anschließenden Vinylesterharz-Imprägnierung. Zum Ende des Herstellungsprozesses werden die Profilierung und eine Beschichtung aufgebracht. Die GFK- Bewehrungsstäbe besitzen ein Trapezgewinde als Profilierung. Die profilierten Stäbe gewährleistet, im kraftschlüssig eingebauten Zustand, eine sichere Verzahnung mit dem Verpressmörtel.

Thyssen Krupp CFK Carbon4ReBAR (C4R)[9]

Die Bewehrungsstäbe des Herstellers Thyssen-Krupp sind als Prototyp gefertigt und bestehen aus hochfesten Kohlenstofffasern, sowie aus einer Matrix aus hochtemperaturbeständigen Epoxidharz. Die Profilierung des Stabes ist mit einem speziellen Nut-Helix-Design hergestellt. Die Profilierung ist als Trapezgewinde ausgeführt.

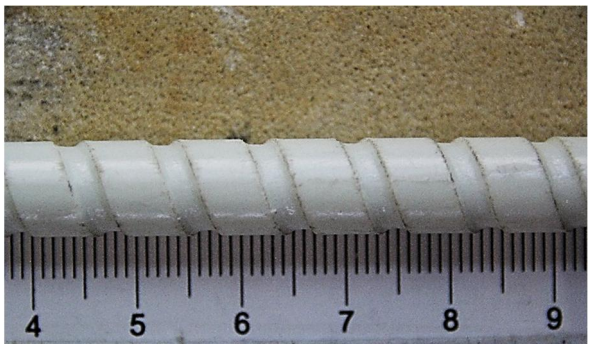


Bild 55 *Schöck ComBAR GFK-Bewehrungsstab, Durchmesser 8 mm*

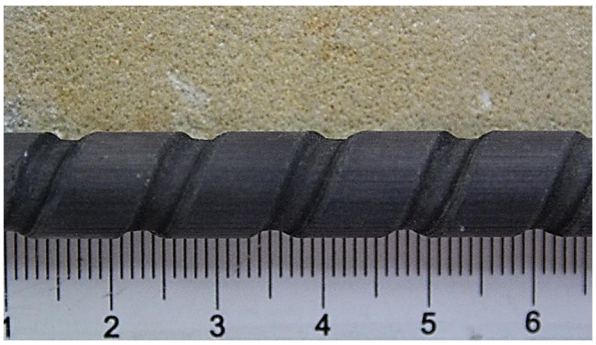


Bild 56 *Thyssen Krupp Carbon4ReBAR(C4R) CFK-Bewehrungsstab, Durchmesser 8 mm*

5.2.1.3 Prüfkörperherstellung

Der Versuchskörper wird in Anlehnung an die Verfahrensweise im Stahlbetonbau unter den Erkenntnissen von REHM [1] für die statischen Ausziehversuche aufgebaut. Der Versuchskörper wird aus einem gleichseitigen Natursandsteinquader mit einer Kantenlänge von ca. 160 mm hergestellt. Der Versuchskörper aus Natursandstein besitzt Bruchkanten und gesägte Kanten. Für die experimentelle Untersuchung der Verbundspannungen wird in den Versuchskörper aus Natursandstein eine mittige Bohrung mit einem Bohrdurchmesser von 56 mm eingebracht. In die Bohrung wird der Anker bzw. Nadel mit der entsprechenden Verpressmörtelsorte kraftschlüssig verpresst. Bei der Herstellung der Versuchskörper wird der Verbund Bewehrungsstab-Verpressmörtel und Verpressmörtel-Natursandstein durch konstruktiv unterschiedliche Herstellungsmethoden betrachtet.

[9] Siehe Anlage: Datenblatt Thyssen Krupp C4R

Bild 57 *Herstellung der Prüfkörper für die Versuche mit kurzer Verbundlänge*

Für die Untersuchung der Verbundfestigkeiten müssen unterschiedliche Verbundbereiche im Herstellungsprozess des Versuchskörpers beachtet werden:

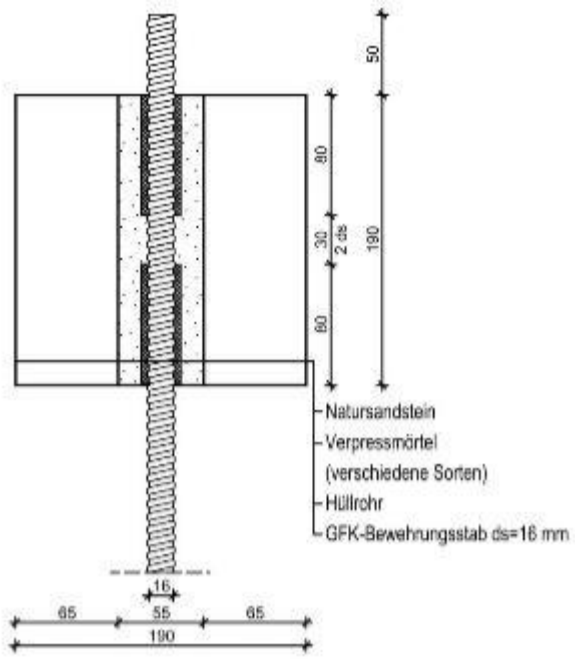


Bild 58 *(1) Verbund zwischen Nadel aus glasfaserverstärktem Kunststoff und Verpressmörtel, am Bsp. GFK-Schöck ComBAR, Durchmesser 16 mm*

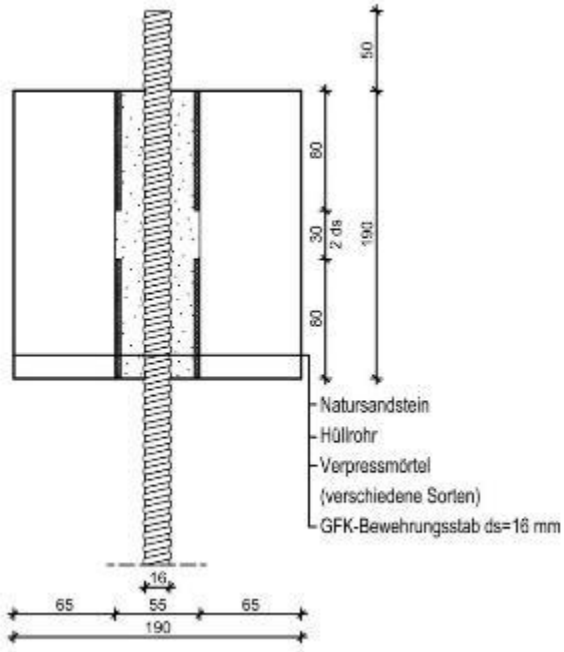


Bild 59 *(2) Verbund zwischen Verpressmörtel und Bohrlochoberfläche (Natursandstein), am Bsp. GFK-Schöck ComBAR, Durchmesser 16 mm*

Bild 60 *Glasfaseranker/-nadeln, vorbereitet für eine Variante der Versuche mit unterschiedlichen Verbundlängen*

Der Verbund zwischen Bewehrungsstab und Verpressmörtel (1) wird mit einer definierten Verbundlänge (2 ds bzw. 5 ds) und einer vollen Verbundlänge, d.h. über die gesamte Höhe der Bohrung zwischen Verpressmörtel – Natursandstein, hergestellt. Das Verbundversagen tritt im Verbundsystem (1) an der geringen Verbundlänge von 2 ds bzw. 5ds ein.

Für die Sicherstellung der definierten Verbundlänge werden zwei Umhüllungen an den verbundfreien Bereichen des Bewehrungsstabes lagesicher fixiert, um die definierte Verbundlänge zwischen (1) zu gewährleisten.

Der Verbund wird zentrisch im Bohrloch, in der Mitte des Versuchskörpers geprüft.

Die Herstellung der Prüfkörper mit Verbundversagen zwischen Verpressmörtel und Natursandstein (2) erfolgt durch eine definierte Verbundlänge (2 ds bzw. 5 ds) und einer vollen Verbundlänge zwischen Bewehrungsstab und Verpressmörtel über die gesamte Höhe des Versuchskörpers. Hierbei wird das Verbundversagen am Verbundsystem (2) an der geringen Verbundlänge auftreten.

Die definierte Verbundlänge zwischen Verpressmörtel und Natursandstein wird durch die Verwendung von Rohren in den verbundfreien Bereichen des zu prüfenden Verbundes sichergestellt.

Neben den Versuchsvarianten mit unterschiedlicher Verbundlänge wird ebenfalls die Verpressmörtelsorte variiert. Das Verpressgut besteht sowohl aus standardmäßigen Produkten als auch aus speziellen Mischungen.

Folgende Verpressmörtel mit dem jeweiligen Wasser/Bindemittel Wert wurden für die Prüfkörper nach Abschnitt 5.2.1.2 verwendet:

Verpressmörtel	Wasser/Bindemittel Wert (w/b)
Trass-Verpressmörtel HS HSTV-P01	0,3
Verpressmörtel für gipshaltiges Mauerwerk HSV-P01	0,2
Kalkmörtel NHLV-g01	0,3
Estrichmörtel von CASEA	0,18 (0,22 Anpassung)

Tabelle 8 *Wasser/Bindemittel-Werte für die geprüften Mörtelsorten*

Das Zusammenführen der Komponenten zum Versuchskörper erfolgte im Otto-Mohr Laboratorium der Technischen Universität Dresden. Dabei wurden die Nadeln/Anker senkrecht und mittig in die Sandsteinwürfel eingebracht, sodass die zu prüfende Verbundlänge von 2 ds bzw. 5 ds, jeweils zentrisch im Versuchskörper lag. Der Verpressmörtel wurde in die Bohrung des Natursandsteines gegossen. Die Nadeln/Anker mussten dabei in ihrer Lage gesichert werden.

Bild 61 *Prüfkörper vor dem Verfüllen mit Verpressmörtel, Versuch zum Verbund zwischen Anker/Nadel und Verpressmörtel*

Bild 62 *Prüfkörper vor dem Verfüllen mit Verpressmörtel, Versuch zum Verbund zwischen Naturstein und Verpressmörtel*

Nach der Herstellung der Versuchskörper konnten die Ausziehversuche durchgeführt werden. Dafür wurden folgende Versuchskörperserien mit unterschiedlichen Verbundlängen und Mörtelsorten hergestellt:

Serie	Anker/ Nadel	Durchmesser [mm]	Verbund	Verbund-länge	Mörtelsorte	Anzahl
1	Schöck ComBAR	16	Anker-Verp.Mörtel	2d	HSTV-P01	8
2	Schöck ComBAR	16	Stein-Verp.Mörtel	2d		8
3	Schöck ComBAR	16	Anker-Verp.Mörtel	5d		8
4	Schöck ComBAR	16	Stein-Verp.Mörtel	5d		8
5	Schöck ComBAR	16	Anker-Verp.Mörtel	2d	HSV-P01	8
6	Schöck ComBAR	16	Stein-Verp.Mörtel	2d		8
7	Schöck ComBAR	16	Anker-Verp.Mörtel	2d	NHLV-g01	8
8	Schöck ComBAR	16	Stein-Verp.Mörtel	2d		8
9	Schöck ComBAR	16	Anker-Verp.Mörtel	2d	Estrich-mörtel von Casea	8
10	Schöck ComBAR	16	Stein-Verp.Mörtel	2d		16
11	Schöck ComBAR	16	Stein-Verp.Mörtel	5d		8
					Anzahl der Versuche	92
1	Schöck ComBAR	8	Anker-Verp.Mörtel	2d	HSTV-P01	5
2	Schöck ComBAR	8	Anker-Verp.Mörtel	5d		5
3	Thyssen-krupp	8	Anker-Verp.Mörtel	2d	HSTV-P01	5
4	Thyssen-krupp	8	Anker-Verp.Mörtel	5d		5
					Anzahl der Versuche	20

Tabelle 9 *Versuchsumfang der statischen Ausziehversuche mit kurzer Verbundlänge*

5.2.1.4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Versuchsaufbau

Der Versuchskörper wird mit dem langen Stabende des Ankers bzw. der Nadel nach unten in die Prüfmaschine eingebracht. Der Anker/ die Nadel wird mit Hilfe eines Ausgleichsringes zwischen Prüfmaschine und Versuchskörper exakt senkrecht ausgerichtet. Danach wird der Anker/ die Nadel in die Prüfmaschine eingespannt. Der Einspanndruck muss so gewählt werden, dass die Haltekraft der Prüfmaschinenbacken einen Schlupf zwischen Einspannung der Prüfmaschine und Stab verhindert.

Am kurzen, nicht eingespannten Ende der Nadel/des Ankers wird ein induktiver Wegaufnehmer für die Messung der Relativverschiebung zwischen Stab und Prüfkörper angebracht.

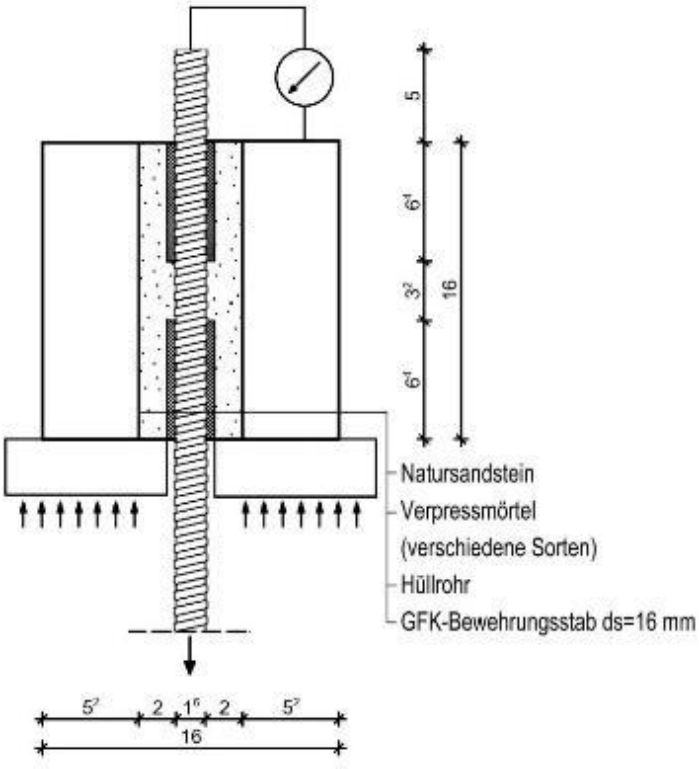


Bild 63 *Versuchsaufbau nach G. Rehm am Beispiel des Prüfkörpers mit Schöck ComBAR GFK-Nadel, Durchmesser 16mm, Verbund: Nadel-Verpressmörtel*

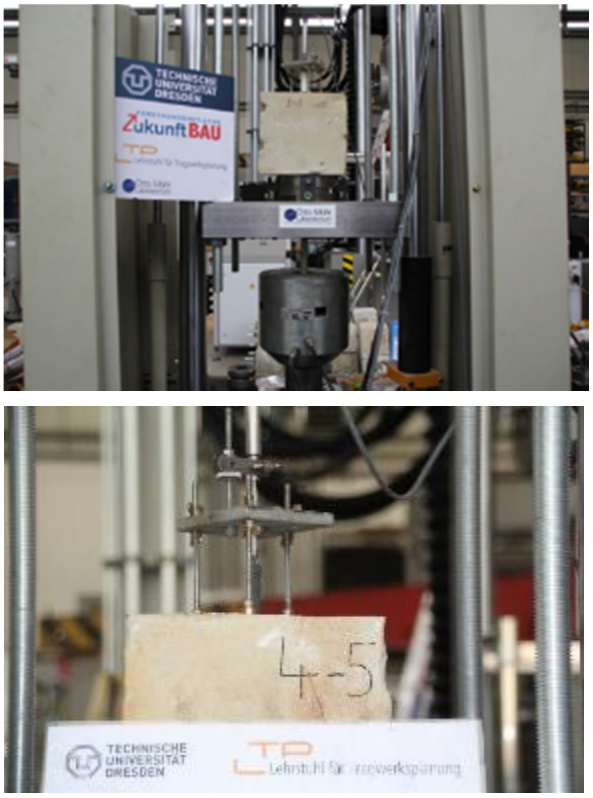


Bild 64 *Versuchsaufbau Otto Mohr Laboratorium TU Dresden, statische Nadel Ausziehversuche mit kleiner Verbundlänge in Hydropul-Prüfmaschine (02.11.2017)*

Versuchsdurchführung:

Die baumechanische Untersuchung des Verbundverhaltens mit kleiner Verbundlänge wurde im Otto-Mohr Laboratorium an der Technischen Universität Dresden als statischer Ausziehversuch durchgeführt. Dabei wurde der Versuchskörper in der Prüfmaschine (Hydropuls-Prüfmaschine) lagesicher eingebaut und die Bewehrungsstäbe aus Faserverbundwerkstoffen senkrecht ausgerichtet. Für die Ausziehversuche wurde das

lange, nach unter gerichtete Ende der Nadel in die Prüfmaschine eingespannt. Der Einspanndruck musste so gewählt werden, dass die Haltekraft der Spannbacken der Prüfmaschine einen Schlupf zwischen Einspannung der Maschine und Glasfaserstab verhindert. Die Durchführung der Ausziehversuche erfolgte durch eine eingeleitete Zugkraft über die GFK-Nadel in den Versuchskörper. Die eintretende Relativverschiebung zwischen Nadel und Versuchskörper wurde dabei mit einem induktiven Wegaufnehmer am unbelasteten Stabende ermittelt. Für die Bestimmung der Verbundfestigkeit wurde der Versuchskörper bis zum Erreichen einer Relativverschiebung zwischen Nadel und Versuchskörper von 3 mm bis 5 mm beansprucht. Das folgende Belastungs- und Messprogramm wurde durchgeführt:

Belastungsart:	weggesteuert
Belastungsgeschwindigkeit:	0,01 mm/s
Messprogramm:	Kraft-Weg Ausgaben mit einer Messrate von 1/20s

Nach den statischen Ausziehversuchen wurden die geprüften Versuchskörper auf Höhe der Nadeln aufgespalten. Die Spaltung der Versuchskörper ermöglichte eine Analyse zum Verbundverhalten und Verbundversagen des Prüfkörpers.

Bild 65 *Aufspaltung eines Versuchskörpers mit (1)Verbund zwischen GFK-Bewehrungsstab und Verpressmörtel, Verbundlänge 5 ds*

Bild 66 *Aufspaltung eines Versuchskörpers mit (2) Verbund zwischen Verpressmörtel und Natursandstein, Verbundlänge 2 ds*

Parallel zu den statischen Ausziehversuchen wurden die verwendeten Verpressmörtel als Mörtelprismen auf ihre mechanischen Eigenschaften unter gleichen Laborbedingungen nach Versuchsprogramm geprüft und die Wasseraufnahmefähigkeit des Natursandsteines unter atmosphärischem Druck nach DIN EN 13755 bestimmt.

5.2.1.5 Ergebnisse der Versuche mit GFK-Stäben Combar der Fa. Schöck, Durchmesser 16mm, variierenden Verpressmörtelsorten, Verbundlänge 2 ds und 5 ds

5.2.1.5.1 Versuch-Serie 1

Verbund	Stab-Verpressmörtel	
Verbundlänge	2 d_s	
Verpressmörtelsorte	HSTV- P01,	Trass-Verpressmörtel HS
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 4,05 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 28,5 MPa

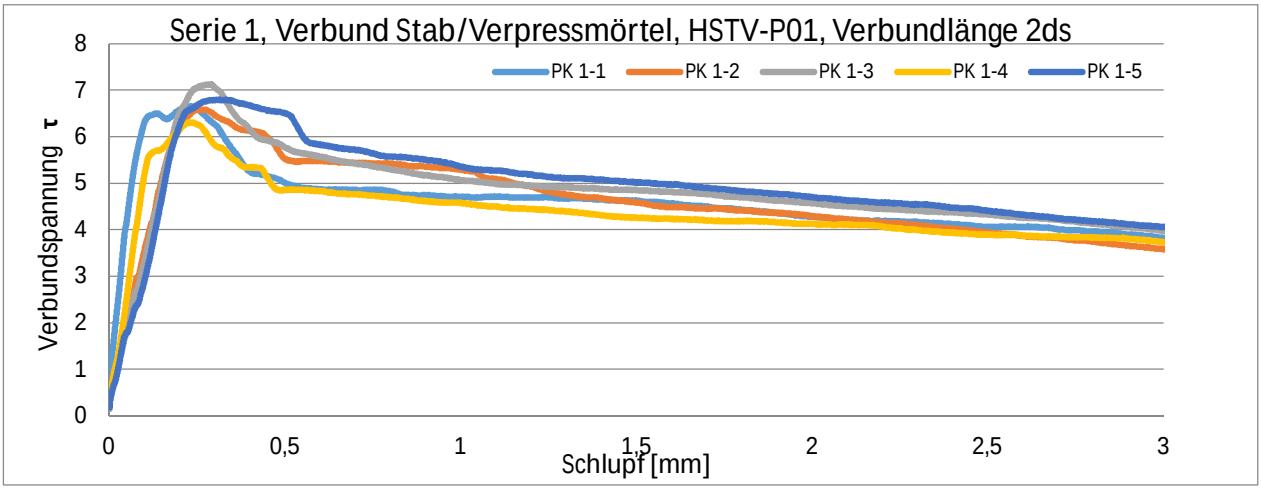


Diagramm 6 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen Stab und Verpressmörtel

Auswertung Versuchsergebnisse

Im Diagramm 6 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 1 dargestellt. Der Verbund zwischen der Bewehrung aus glasfaserverstärktem Kunststoff und dem Trass-Verpressmörtel (HSTV-P01) wurde in der Serie 1 mit einer Verbundlänge vom 32 mm geprüft. Zu Beginn wächst die Verbundspannung etwa proportional zum Schlupf bis zu einem Grenzwert von 6,2 MPa bis 7,2 MPa bei einer kleinen Relativverschiebung des Bewehrungsstabes bis 0,2 mm. Dieser Prüfbereich beschreibt den Scherverbund. Nach dem Versagen des Mörtels auf Abscherung der Mörtelkonsole am Peak der Kurven erfolgt der Abbau der Reibungskräfte zwischen der Bewehrung und des Verpressmörtels. Die Serie 1 wurde erfolgreich auf den Verbund zwischen Bewehrungsstab und Verpressmörtel im Ausziehversuch geprüft. Die Aufspaltung der Prüfkörper bestätigte das Verbundversagen.

Bild 67 *Geprüfter und aufgespaltener Versuchskörper 1-1*

Bild 68 *Verbundversagen, Ablösung der Mörtelkonsolen, Reibungsverbund des Bewehrungsstabes Versuchskörper1-1*

5.2.1.5.2 Versuch-Serie 2

Verbund	Natursandstein-Verpressmörtel	
Verbundlänge	2 ds	
Verpressmörtelsorte	HSTV- P01	Trass-Verpressmörtel HS
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 4,05 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 28,5 MPa

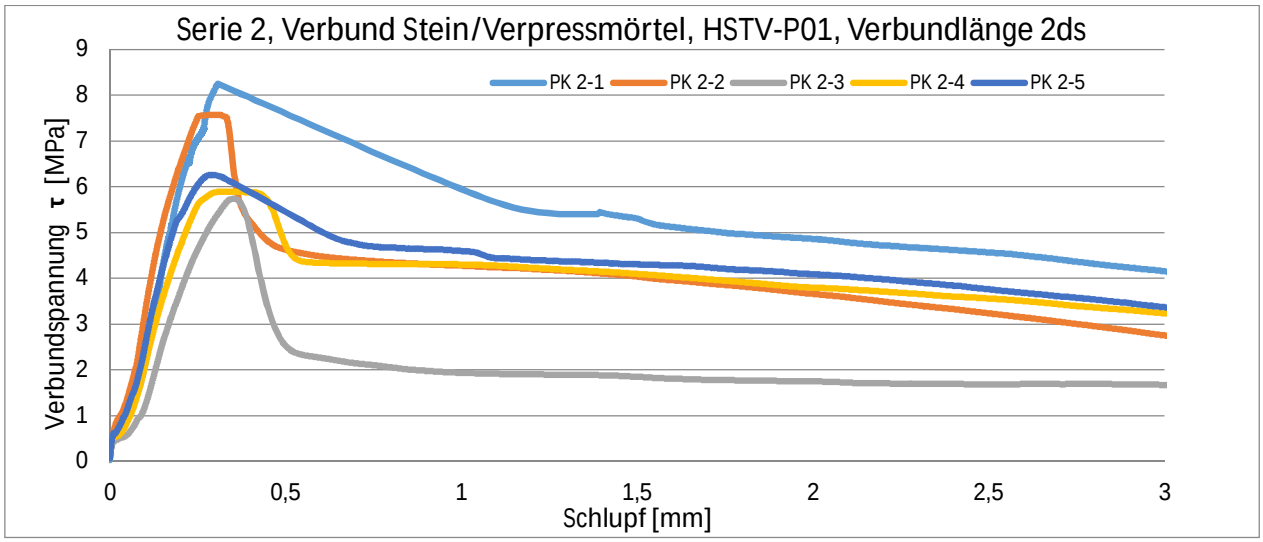


Diagramm 7 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen Nadel und Verpressmörtel

Auswertung Versuchsergebnisse

Im Diagramm 7 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 2 dargestellt. Der Verbund zwischen Natursandstein und Verpressmörtel (HSTV-P01) wurde in der Serie 2 mit einer Verbundlänge vom 32 mm geprüft. Zu Beginn steigt die Verbundspannung auf etwa 0,7 MPa, ohne eintretenden Schlupf (Haftverbund). Danach erfolgt ein etwa proportionaler Anstieg des Schlupfes bis zu einem Grenzwert von 3,0 MPa bis 3,6 MPa bei einer kleinen Relativverschiebung des Verpresskörpers bis 0,2 mm. Dieser Prüfbereich beschreibt den Scherverbund. Nach dem Peak der Kurven erfolgt der Abbau der Reibungskräfte. Mit der Untersuchung der Prüfkörpers (Bild 69) und Aufspaltung (Bild 70) des Prüfkörpers 2-3 nach dem Ausziehversuch konnte nachgewiesen werden, dass der zu prüfende Verbund Naturstein/Verpressmörtel nicht versagt hat. Die Serie 2 wurde damit erfolgreich auf den Verbund zwischen Naturstein und Verpressmörtel im statischen Ausziehversuch geprüft.

Bild 69 *Prüfkörper 2-3, Verschiebung des Verpresskörpers nach dem Versuch*

Bild 70 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 2-3, Verbundversagen zwischen Verpressmörtel und Naturstein*

5.2.1.5.3 Versuch-Serie 3

Verbund	Stab-Verpressmörtel	
Verbundlänge	5 ds	
Verpressmörtelsorte	HSTV- P01	
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 4,05 MPa
	Druckfestigkeit	R_c= 28,5 MPa

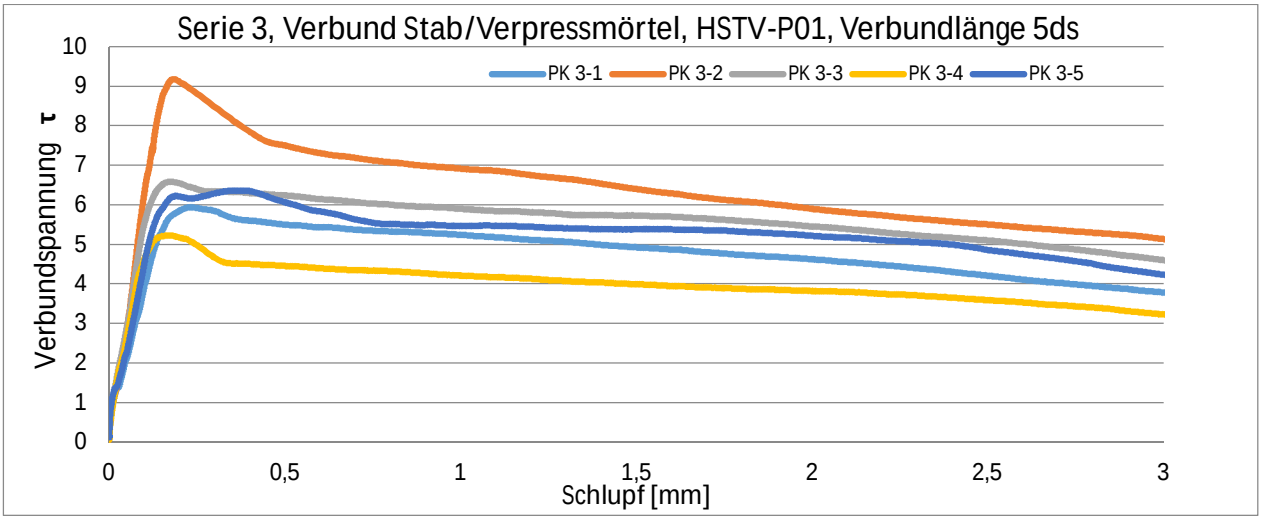


Diagramm 8 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen Stab und Verpressmörtel

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 8 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 3 dargestellt. Der Verbund zwischen der Bewehrung aus glasfaserverstärktem Kunststoff und dem Verpressmörtel (HSTV-P01) wurde in der Serie 3 mit einer Verbundlänge vom 80 mm (5d_s) geprüft. Zu Beginn steigt die Verbundspannung auf etwa 1 N/mm², ohne eintretenden Schlupf des Bewehrungsstabes (Haftverbund). Danach erfolgt ein proportionaler Anstieg zum Schlupf bis zu einem Grenzwert von 5,2 MPa bis 6,6 MPa bei einer kleinen Relativverschiebung des Bewehrungsstabes bis 0,15 mm. Dieser Prüfbereich beschreibt den Scherverbund. Nach dem Versagen des Mörtels auf Abscherung der Mörtelkonsole am Peak der Kurven erfolgt der Abbau der Reibungskräfte zwischen der Bewehrung und des Verpressmörtels. Die Serie 3 wurde erfolgreich auf den Verbund zwischen Nadel und Verpressmörtel im statischen Ausziehversuch geprüft. Die Aufspaltung der Prüfkörper bestätigte dieses Verbundversagen.

Bild 71 *Prüfkörper 3-4 nach dem Versuch*

Bild 72 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 3-1, Verbundversagen zwischen Verpressmörtel und Nadel 3-1*

5.2.1.5.4 Versuch-Serie 4

Verbund	Natursandstein-Verpressmörtel	
Verbundlänge	5 d_s	
Verpressmörtelsorte	HSTV- P01	
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 4,05 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 28,5 MPa

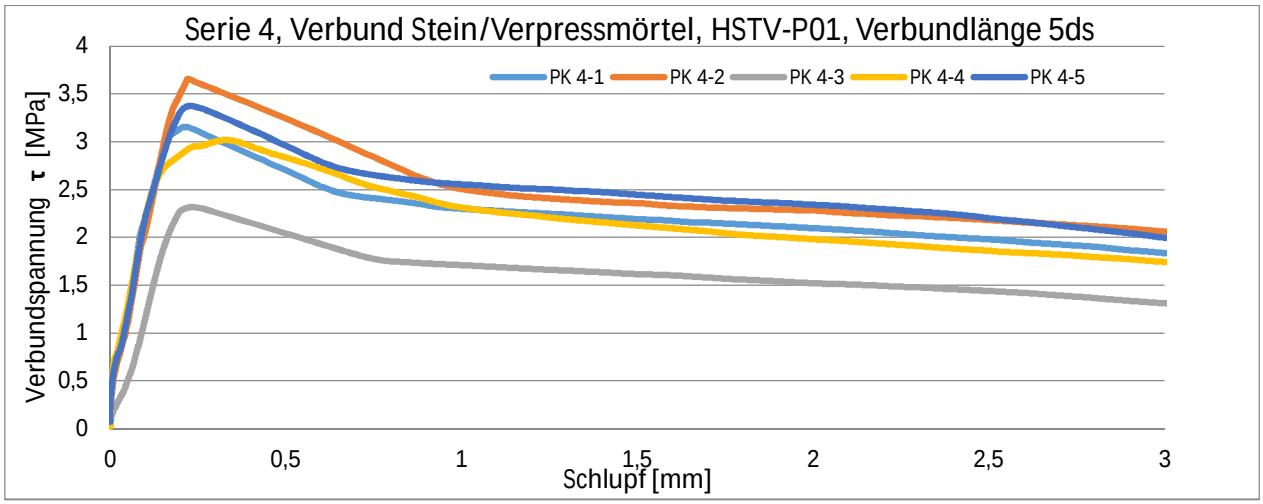


Diagramm 9 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen Stab und Verpressmörtel

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 9 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 4 dargestellt. Der Verbund zwischen Natursandstein und Verpressmörtel (HSTV-P01) wurde in der Serie 4 mit einer Verbundlänge vom 80 mm (5d_s) geprüft. Zu Beginn steigt die Verbundspannung auf etwa 0,5 MPa, ohne eintretenden Schlupf. Danach erfolgt ein proportionaler Anstieg zum Schlupf bis zu einem Grenzwert von 3,0 MPa bis 3,6 MPa bei einer kleinen Relativverschiebung des Verpresskörpers bis 0,2 mm. Dieser Prüfbereich beschreibt den Scherverbund. Nach dem Peak der Kurven erfolgt der Abbau der Reibungskräfte zwischen Naturstein und Verpressmörtel. Mit der Aufspaltung des Prüfkörpers konnte nachgewiesen werden, dass der zu prüfende Verbund nicht versagt hat. Die geprüften Ergebnisse beziehen sich auf den Verbund zwischen Bewehrungsstab und Verpressmörtel. Die Serie 4 konnte nicht auf den Verbund zwischen Naturstein und Verpressmörtel im statischen Ausziehversuch geprüft (Bild 73 und Bild 74) werden, da dieser größer war, als der zwischen Stab und umgebendem Verpressgut.

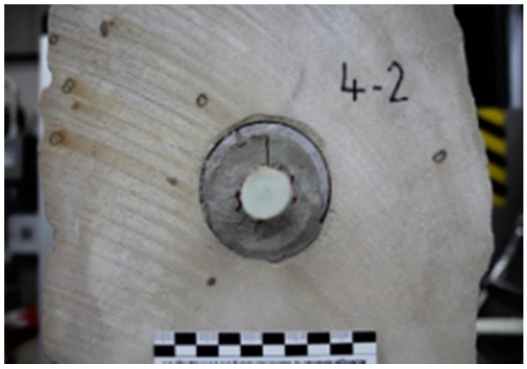


Bild 73 *Prüfkörper 4-2, Bruchbild: radiale Risse im Verpresskörper*

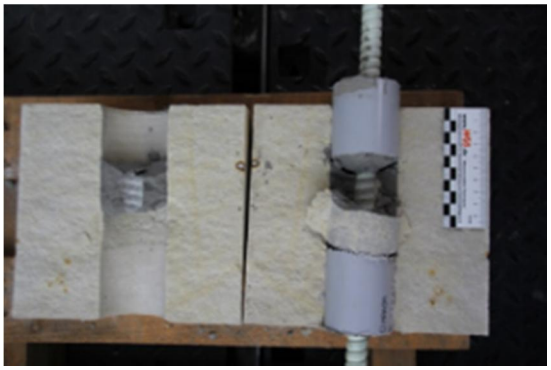


Bild 74 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 4-2, Verbundversagen zwischen Verpressmörtel und Nadel*

5.2.1.5.5 Versuch-Serie 5

Verbund	Stab-Verpressmörtel	
Verbundlänge	2 d_s	
Verpressmörtelsorte	HSV-P01	
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 1,89 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 8,00 MPa

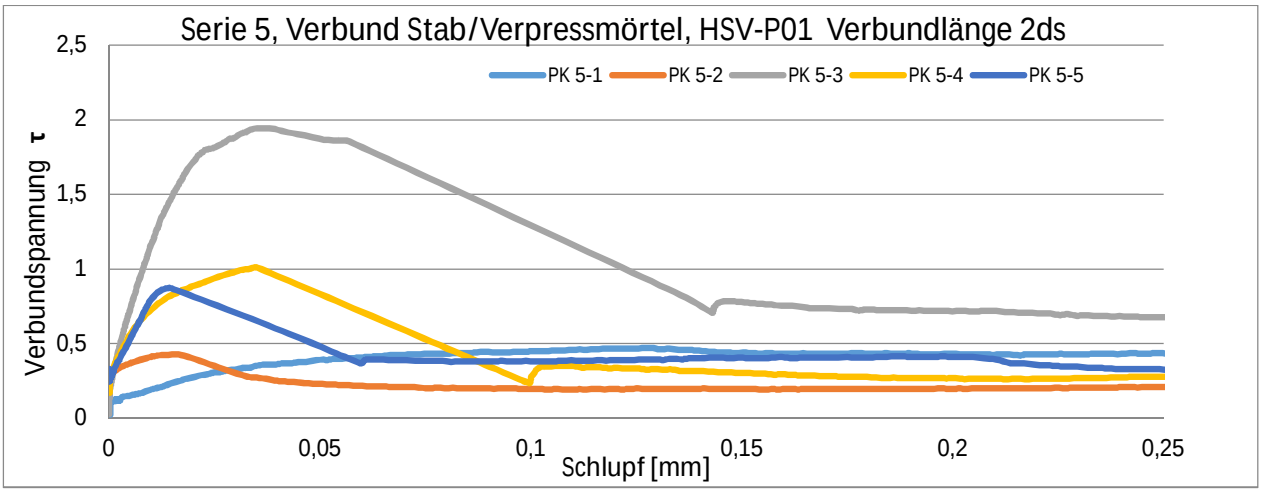


Diagramm 10 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen Stab und Verpressmörtel

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 10 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 5 dargestellt. Der Verbund zwischen der Bewehrung aus glasfaserverstärktem Kunststoff und dem Verpressmörtel (HSV-P01) wurde in der Serie 5 mit einer Verbundlänge vom 32 mm (2ds) geprüft. Zu Beginn steigt die Verbundspannung auf etwa 0,25 MPa, ohne eintretenden Schlupf des Bewehrungsstabes (Haftverbund). Die Prüfkörper 5-3, 5-4 und 5-5 besitzen einen etwa proportionalen Anstieg der Verbundspannung zum Schlupf bis zu einem Grenzwert von 0,8 MPa bis 1,9 MPa bei einer minimalen Relativverschiebung des Bewehrungsstabes bis 0,04 mm. Der Ausziehversuch der Prüfkörper 5-1 und 5-2 ergibt sehr geringe Verbundspannungen von 0,5 MPa. Mit der Aufspaltung des Prüfkörpers nach dem Ausziehversuch konnte nachgewiesen werden, dass der zu prüfende Verbund nicht versagt hat. Die geprüften Ergebnisse beziehen sich auf den Verbund zwischen Natursandstein und Verpressmörtel. Bei der Serie 5 konnte damit nicht der Verbund zwischen Nadel und Verpressmörtel im statischen Ausziehversuch nachgewiesen werden (Bild 75 und Bild 76).

Bild 75 *Prüfkörper 5-4, Verschiebung des gesamten Verpresskörpers während des Versuches*

Bild 76 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 5-4, Verbundversagen zwischen Verpressmörtel und Naturstein*

5.2.1.5.6 Versuch-Serie 6

Verbund	Natursandstein-Verpressmörtel	
Verbundlänge	2 d_s	
Verpressmörtelsorte	HSV-P01	
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 1,89 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 8,00 MPa

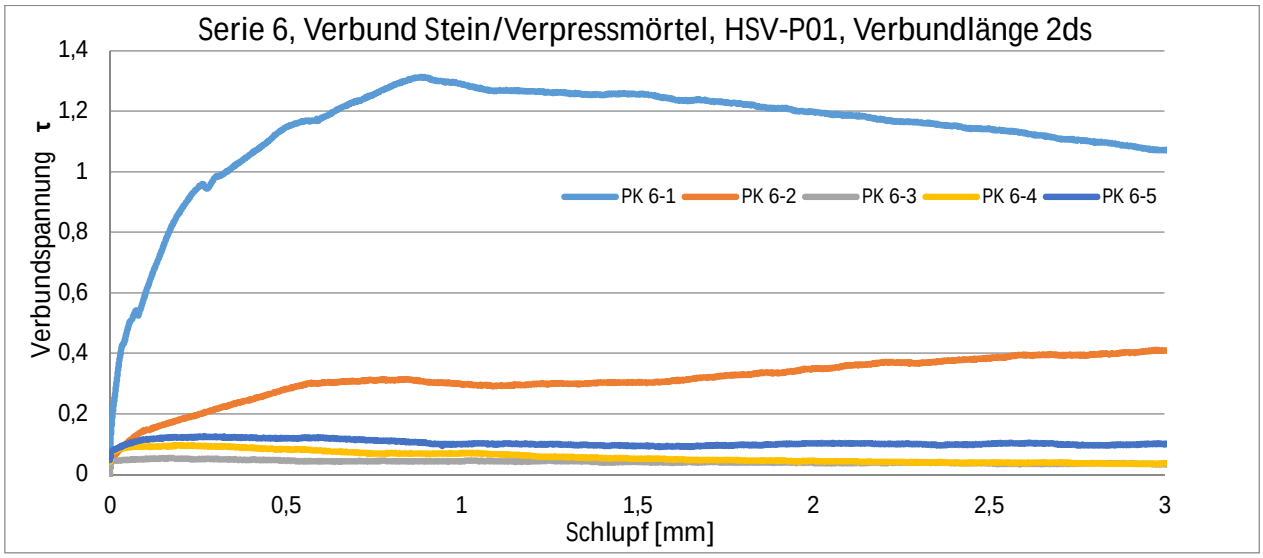


Diagramm 11 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen Natursandstein und

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 11 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 6 dargestellt. Der Verbund zwischen Natursandstein und Verpressmörtel (HSV-P01) wurde in der Serie 6 mit einer Verbundlänge vom 32 mm (2ds) geprüft. Der Prüfkörper 6-1 hat einen Anstieg der Verbundspannung bis auf 1,3 MPa bei einer Relativverschiebung von 0,9 mm (Scherverbund). Nach dem Peak der Kurve erfolgt der Abbau der Reibungskräfte zwischen Naturstein und Verpressmörtel. Die weiteren Prüfkörper weisen geringe Verbundspannungen auf, der Reibungsverbund ist bei der Versuchsdurchführung maßgebend. Die Serie 6 wurde erfolgreich auf den Verbund zwischen Natursandstein und Verpressmörtel im statischen Ausziehversuch mit jedoch geringen Verbundspannungen geprüft. Die Aufspaltung der Prüfkörper bestätigte dieses Verbundversagen (Bild 77 und Bild 78).

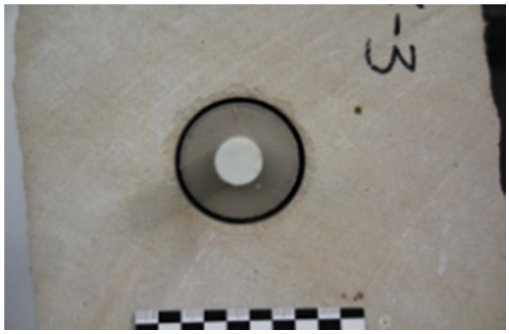


Bild 77 *Prüfkörper 6-3, Verschiebung des gesamten Verpresskörpers während des Versuches*

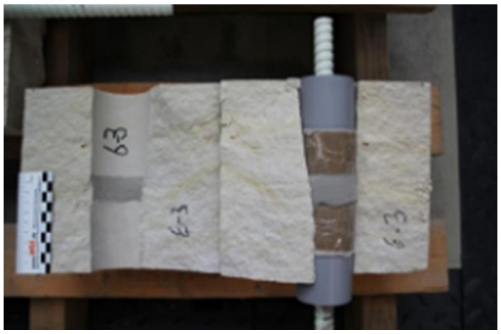


Bild 78 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 6-3, Verbundversagen zwischen Verpressmörtel und Naturstein*

5.2.1.5.7 Versuch-Serie 7

Verbund	Stab-Verpressmörtel	
Verbundlänge	2 d_s	
Verpressmörtelsorte	NHLV-g01	
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 1,47 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 10,50 MPa

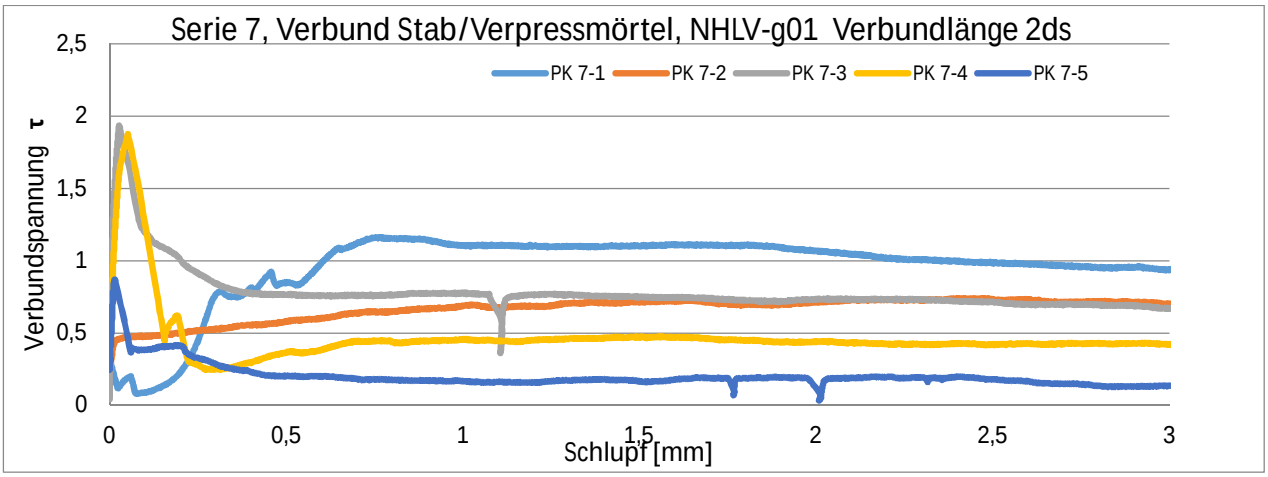


Diagramm 12 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen Stab und Verpressmörtel

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 12 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 7 dargestellt. Der Verbund zwischen der Nadel aus glasfaserverstärktem Kunststoff und dem Verpressmörtel (NHLV-g01) wurde in der Serie 7 mit einer Verbundlänge vom 32 mm (2ds) geprüft. Die erreichten, maximalen Verbundspannungen streuen stark. Die Prüfkörper 7-3 und 7-4 weisen zu Beginn einen linearen Anstieg der Verbundspannung bis maximal 1,7 MPa auf, bei einer minimalen Relativverschiebung der Nadeln von 0,05 mm. Die weiteren Prüfkörper erreichen am Peak eine maximale Verbundspannung von 0,85 MPa. Nach dem Peak der Verbundspannungen erfolgt der Abbau der Reibungskräfte, dabei zeigen die Prüfkörper 7-1 und 7-2 einen Anstieg der Verbundspannung bis zu einen Schlupf von 0,80 mm. Mit der Untersuchung des Verpresskörpers (Bild 79) und Aufspaltung Bild 80 des Prüfkörpers 5-4 nach dem Ausziehversuch konnte nachgewiesen werden, dass der zu prüfende Verbund Nadel/Verpressmörtel nicht versagt hat. Die geprüften Ergebnisse beziehen sich auf den Verbund zwischen Naturstein und Verpressmörtel. Die Ergebnisse der Serie 7 sind zu inhomogen, sodass festgestellt werden muss, dass kein ausreichend abgesicherter Verbund zwischen Nadel und Verpressmörtel im statischen Ausziehversuch nachgewiesen werden konnte.

Bild 79 *Prüfkörper 7-2, Verschiebung des gesamten Verpresskörpers während des Versuches*

Bild 80 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 7-3, Verbundversagen zwischen Verpressmörtel und Naturstein*

5.2.1.5.8 Versuch-Serie 8

Verbund	Natursandstein-Verpressmörtel	
Verbundlänge	2 d_s	
Verpressmörtelsorte	NHLV-g01	
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 1,47 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 10,50 MPa

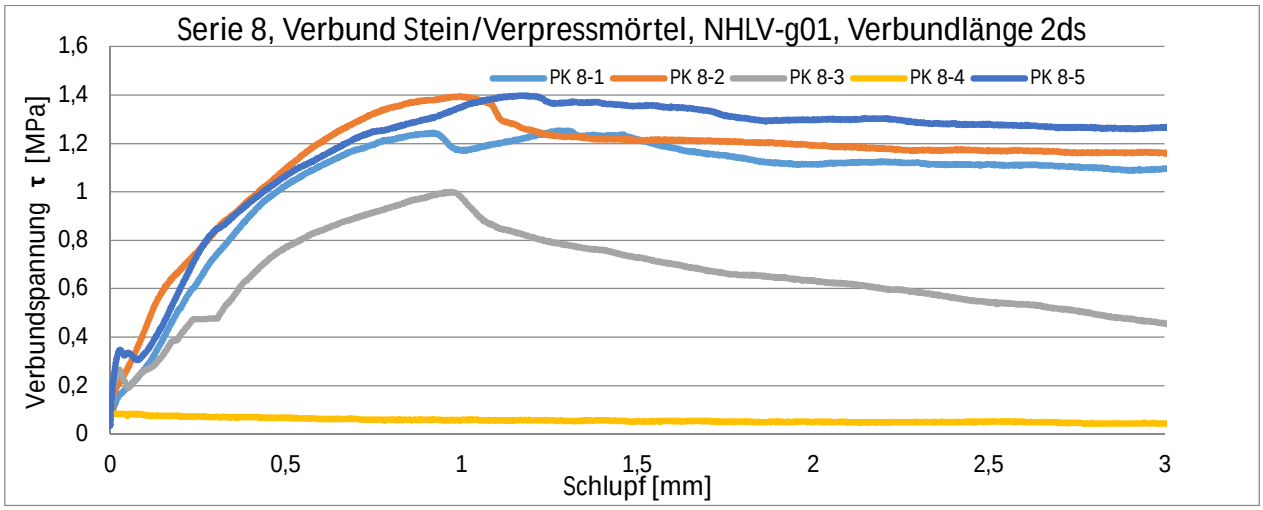


Diagramm 13 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen Stab und Verpressmörtel

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 13 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 8 dargestellt. Der Verbund zwischen dem Naturstein und dem Verpressmörtel (NHLV-g01) wurde in der Serie 8 mit einer Verbundlänge vom 32 mm (2ds) geprüft. Die Verbundspannungen steigen zunächst linear an bis auf 0,35 MPa bei einer minimalen Relativverschiebung. Anschließend steigt die Verbundspannung erneut an, bis auf 1,25 MPa bzw. 1,40 MPa. Danach erfolgt der Abbau der Reibungskräfte. Der Prüfkörper 8-1 liefert keine auswertbaren Ergebnisse, da die Verbundspannungen sehr gering sind. Der Prüfkörper kann als Ausreißer betrachtet werden. Mit der Untersuchung des Verpresskörpers (Bild 81) und Aufspaltung (Bild 83 des Prüfkörpers 8-1 nach dem Ausziehversuch konnte nachgewiesen werden, dass der zu prüfende Verbund Naturstein/Verpressmörtel versagt hat.

Die Serie 8 wurde erfolgreich auf den Verbund zwischen Naturstein und Verpressmörtel im statischen Ausziehversuch geprüft.

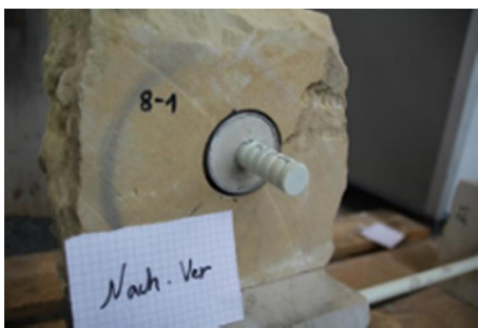


Bild 81 *Prüfkörper 8-1 nach dem Versuch*

Bild 82 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 8-1, Verbundversagen zwischen Verpressmörtel und Naturstein*

5.2.1.5.9 Versuch-Serie 9

Verbund	Stab-Verpressmörtel
Verbundlänge	2 d_s
Verpressmörtelsorte	Casea – casusan HGE
	Biegezugfestigkeit: R_f = 7,52 MPa
	Druckfestigkeit R_c = 37,10 MPa

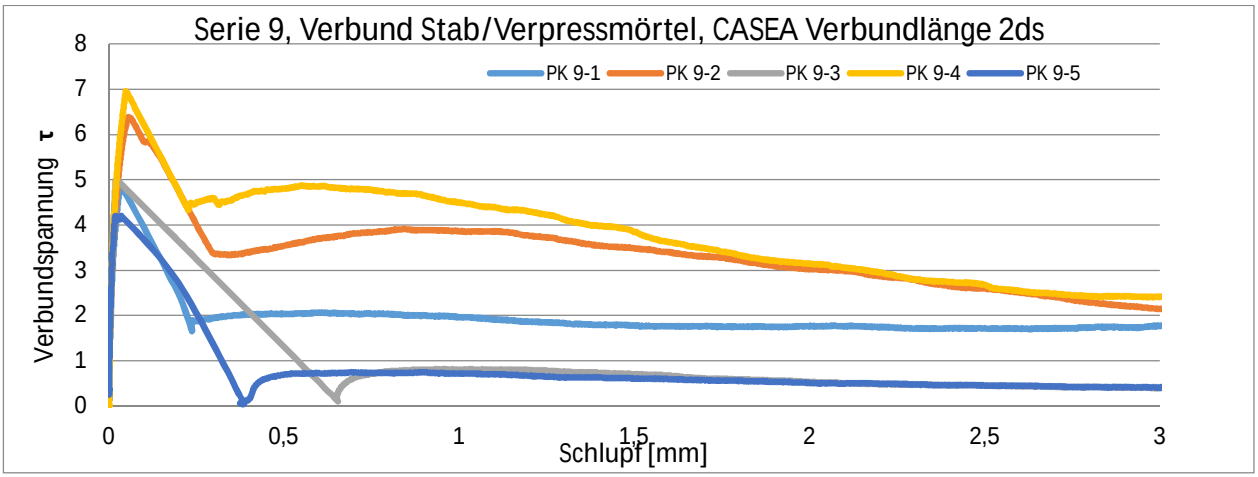


Diagramm 14 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen Stab und Verpressmörtel

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 14 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 9 dargestellt. Der Verbund zwischen der Nadel aus glasfaserverstärktem Kunststoff und dem Verpressmörtel (casusan HGE) wurde in der Serie 9 mit einer Verbundlänge vom 32 mm (2ds) geprüft. Die erreichten, maximalen Verbundspannungen streuen stark. Die Prüfkörper weisen zu Beginn einen linearen Anstieg der Verbundspannung bis zum Peak bei maximal 6,4 MPa und 7,0 MPa (9-2, 9-4) auf, bei einer minimalen Relativverschiebung der Nadeln von 0,2 mm. Die weiteren Prüfkörper erreichen am Peak eine maximale Verbundspannung von 4,2 MPa bis 5 MPa. Nach dem Peak erfolgt ein schneller Rückgang der Verbundspannungen bis der Reibungsverbund einsetzt. Mit der Untersuchung des Verpresskörpers (Bild 83) und Aufspaltung Bild 84 des Prüfkörpers 9-1, nach dem Ausziehversuch, konnte nachgewiesen werden, dass der zu prüfende Verbund Stab/Verpressmörtel an den Prüfkörpern 9-2, 9-3, 9-4 versagt hat.

Die Serie 9 wurde erfolgreich auf den Verbund zwischen Nadel und Verpressmörtel im statischen Ausziehversuch geprüft.

Bild 83 *Prüfkörper 9-5 nach dem Versuch*

Bild 84 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 9-1, Verbundversagen zwischen Verpressmörtel und Naturstein*

5.2.1.5.10 Versuch-Serie 10

Verbund	Natursandstein-Verpressmörtel
Verbundlänge	2 d_s
Verpressmörtelsorte	Casea – casusan HGE
	Biegezugfestigkeit: R_f = 7,52 MPa
	Druckfestigkeit R_c=37,10 MPa

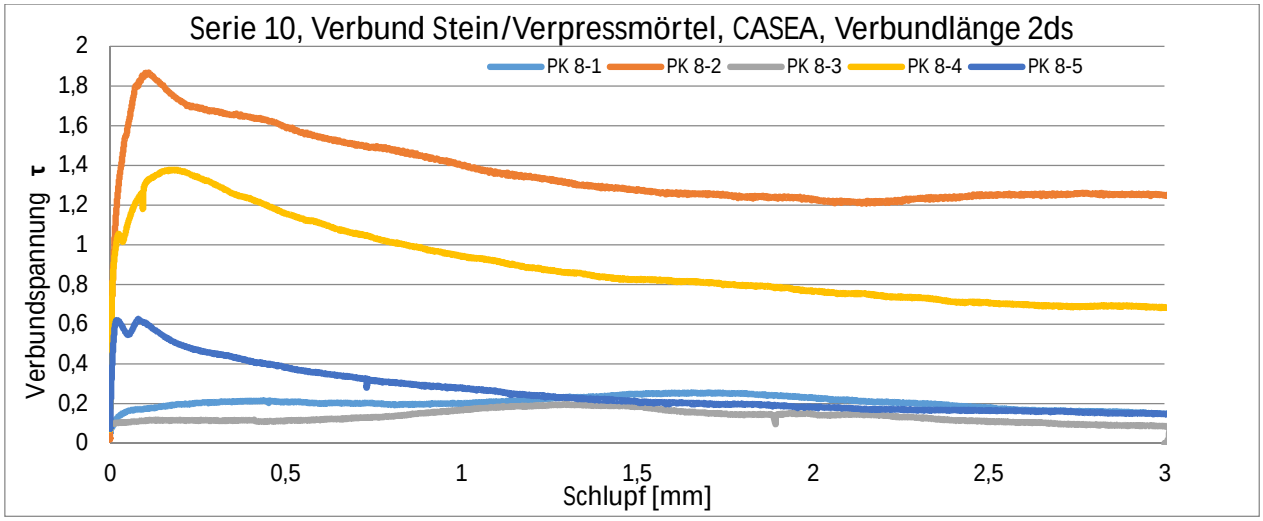


Diagramm 15 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen und Verpressmörtel

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 15 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 10 dargestellt. Der Verbund zwischen dem Naturstein und dem Verpressmörtel (casusan HGE) wurde in der Serie 10 mit einer Verbundlänge vom 32 mm (2ds) geprüft. Die Ergebnisse der Ausziehversuche streuen stark. Die Prüfkörper 10-2, 10-4, 10-5 zeigen einen etwa proportionalen Anstieg der Verbundspannungen bei minimaler Relativverschiebung. Die Prüfkörper 10-1, 10-3 weisen sehr geringe Verbundspannungen ausschließlich aus dem Reibungsverbund auf.

Mit der Untersuchung des Verpresskörpers (Bild 85) und Aufspaltung(Bild 86) des Prüfkörpers 10-1 nach dem Ausziehversuch konnte nachgewiesen werden, dass der zu prüfende Verbund Naturstein/Verpressmörtel versagt hat. Jedoch bei sehr geringen Verbundspannungen.

Mit der Serie 10 konnte im statischen Ausziehversuch kein ausreichender Verbund zwischen Naturstein und Verpressmörtel erreicht werden. Die Ergebnisse streuen zu stark und bei den Prüfkörpern 10-1 und 10-3 sind die Verbundspannungen nicht akzeptabel.

Bild 85 *Prüfkörper 10-1, Verschiebung des gesamten Verpresskörpers während des Versuches*

Bild 86 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 10-1 Verbundversagen zwischen Verpressmörtel und Naturstein*

5.2.1.5.11 Nachversuche Casea casusan HGE

Verbund	Naturstein-Verpressmörtel	
Verbundlänge	2 d_s	
Verpressmörtelsorte	Casea – casusan HGE	
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 5,88 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 31,7 MPa

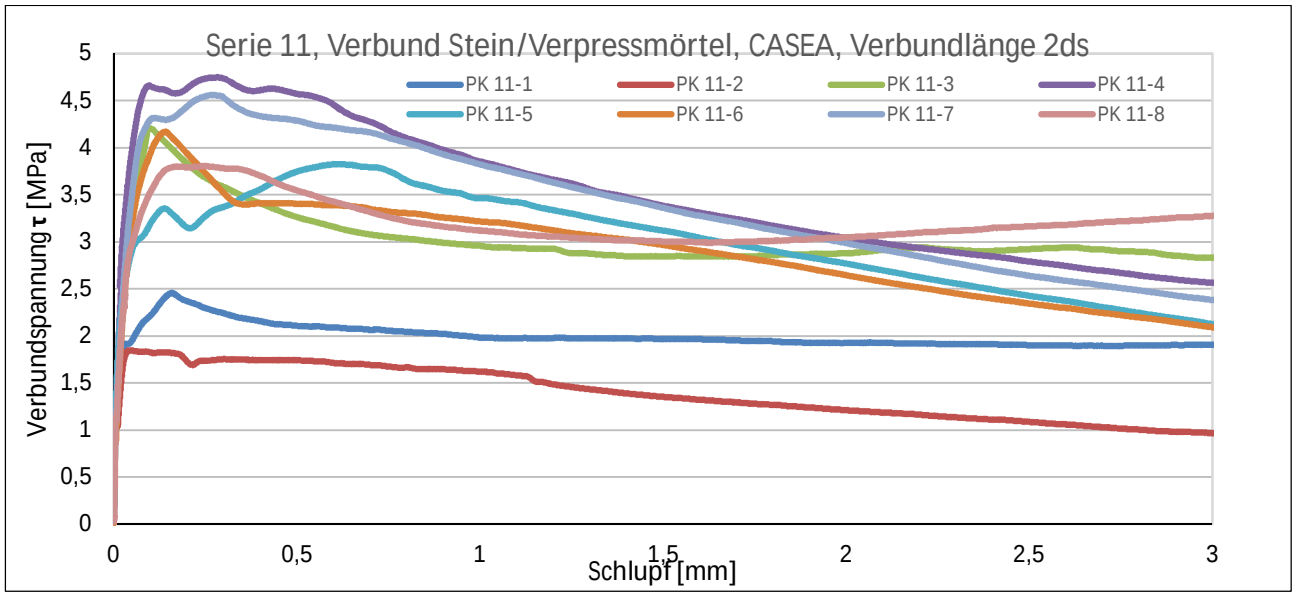


Diagramm 16 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen Stab und Verpressmörtel

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 16 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der nachträglich durchgeführten Versuche der Serie 11 dargestellt. Der Verbund zwischen dem Naturstein und dem Verpressmörtel (casusan HGE) wurde in der Serie 11 mit einer Verbundlänge vom 32 mm (2ds) geprüft. Die Verbundspannung-Schlupf Kurven zeigen einen etwa proportionalen Anstieg der Verbundspannungen bei minimaler Relativverschiebung. Die Prüfkörper 11-1, 11-2 weisen geringe Verbundspannungen auf.

Mit der Untersuchung des Verpresskörpers (Bild 87) und Aufspaltung (Bild 88) der Prüfkörper 11-1und11-4 nach dem Ausziehversuch konnte nachgewiesen werden, dass der Verbund zwischen Naturstein und Verpressmörtel nicht versagt hat. Die Verbundspannungen waren höher als die Zugfestigkeit des Mörtels. Bei allen Versuchen tritt Ringzugversagen ein.

Mit der Serie 11 konnte im statischen Ausziehversuch die Mindestverbundspannung ermittelt werden

Bild 87 *Prüfkörper 11-1*

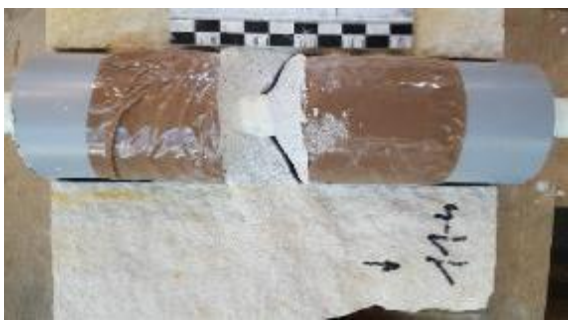


Bild 88 *Prüfkörper 11-4*

Verbund	Naturstein-Verpressmörtel	
Verbundlänge	5 d_s	
Verpressmörtelsorte	Casea – casusan HGE	
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 5,88 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 31,7 MPa

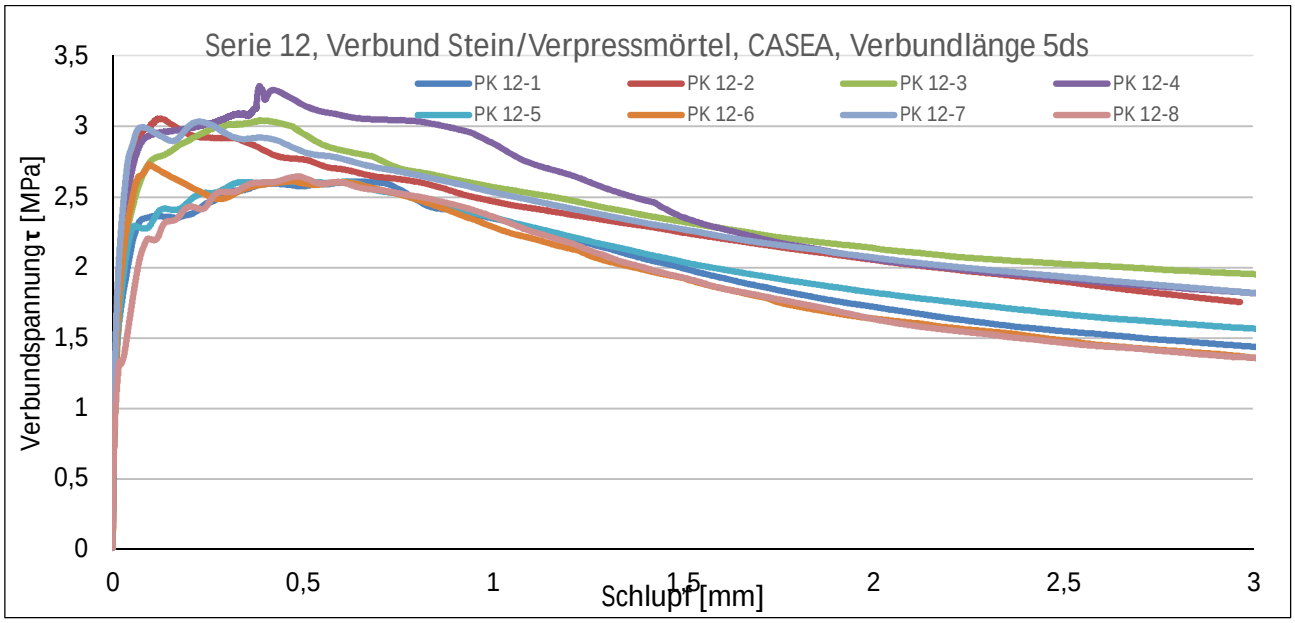


Diagramm 17 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen Stab und Verpressmörtel

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 17 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der nachträglich durchgeführten Versuche der Serie 12 dargestellt. Der Verbund zwischen dem Naturstein und dem Verpressmörtel (casusan HGE) wurde in der Serie 12 mit einer Verbundlänge vom 80 mm (5ds) geprüft. Die Verbundspannung-Schlupf Kurven zeigen einen etwa proportionalen Anstieg der Verbundspannungen bei minimaler Relativverschiebung.

Mit der Untersuchung des Verpresskörpers (Bild 87) und Aufspaltung (Bild 88) der Prüfkörper 12-1und12-2 nach dem Ausziehversuch konnte nachgewiesen werden, dass der Verbund zwischen Naturstein und Verpressmörtel nicht versagt hat. Die Verbundspannungen waren höher als die Zugfestigkeit des Mörtels. Bei allen Versuchen tritt Ringzugversagen ein.

Mit der Serie 12 konnte im statischen Ausziehversuch die Mindestverbundspannung ermittelt werden

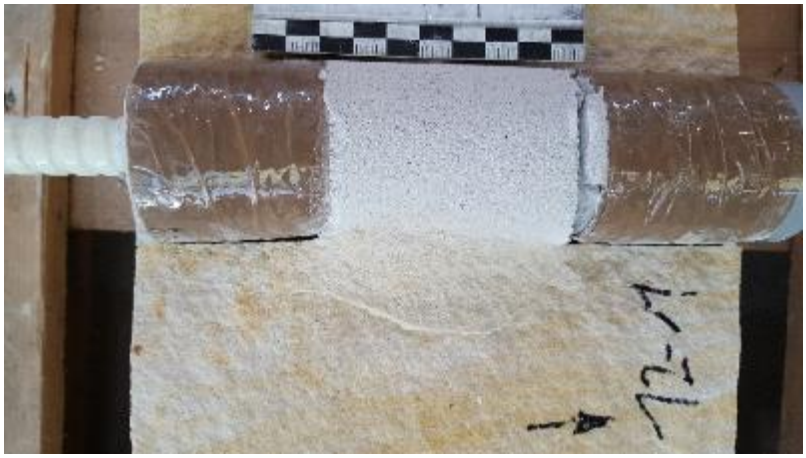


Bild 89 *Prüfkörper 12-1*

Bild 90 *Prüfkörper 12-2*

5.2.1.6 Eignung der Mörtelsorten

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse:

	HSTV-P 01		HSV -P01	NHLV-g01	Casea casusan HGE w/b=0,18	Casea casusan HGE w/b=0,22	
	2ds	5ds	2ds	2ds	2ds	2ds	5ds
Anker / Verpressmörtel	7,2	6,8	2,8	1,9	5,9		
Naturstein / Verpressmörtel	7,6	4,6	0,8	1,3	1,3	3,1	2,9

Tabelle 10 *Ergebnisse der Versuche mit GFK-Stäben Schöck ComBAR, Durchmesser 16mm, variierenden Verpressmörtelsorten, Verbundlänge 2 ds und 5 ds*

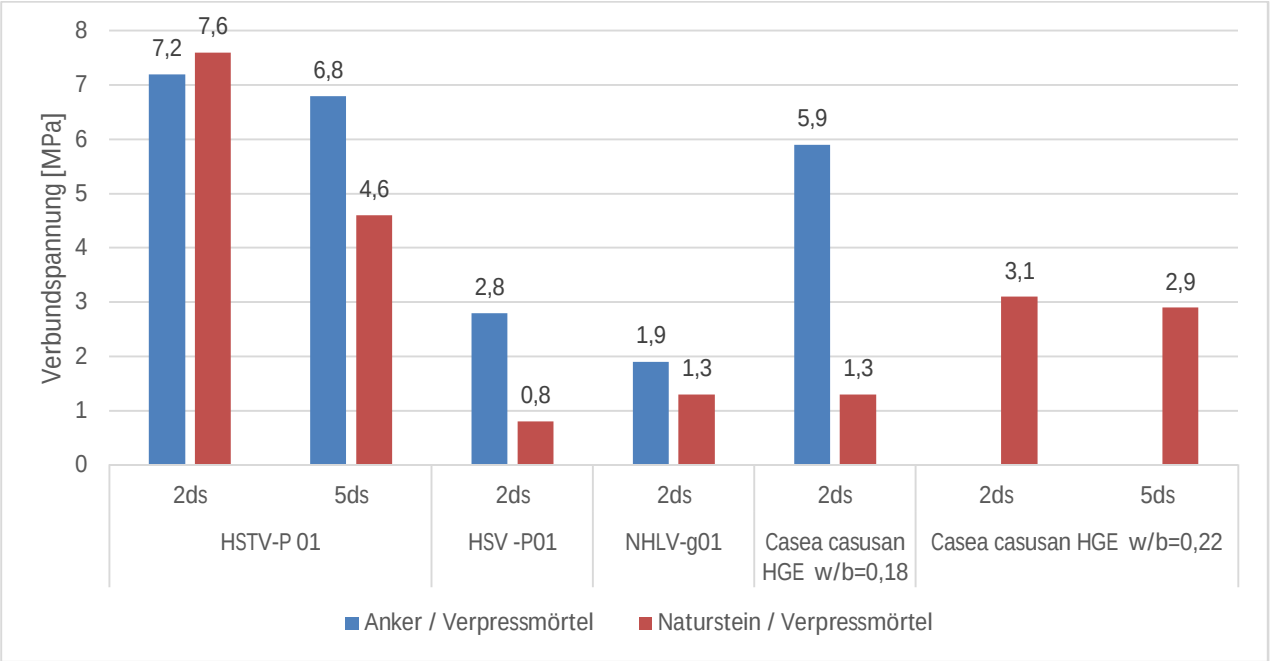


Diagramm 18 Ergebnisse der Versuche mit GFK-Stäben Schöck ComBAR, Durchmesser 16mm, variierenden Verpressmörtelsorten, Verbundlänge 2 ds und 5 ds

Eignung der geprüften Mörtelsorten

geprüfte Verpressmörtelsorte	Verbund zwischen Anker und Verpressmörtel	Verbund zwischen Naturstein und Verpressmörtel
HSTV-P01	+ + + +	+ + + +
HSV-P01	(+)	+
NHLV-g01	n.a.a.	+
Casea – casusan HGE	+ + + +	n.a. (NV++)

Tabelle 11 *Eignung der geprüften Mörtelsorten nach derzeitigem Forschungsstand (n.a.a. … nicht ausreichend abgesichert; n.a. … nicht ausreichend; NV…Nachversuche (w/b=0,22))*

HSTV-P01 Mörtel für Mauerwerksverfüllung und – verpressung

In den Versuchen der Serie 1 und Serie 2 wurden die Verbundspannungen zwischen Natursandstein/ Verpressmörtel und Verpressmörtel/ Bewehrungsstab im statischen Ausziehversuch ermittelt. Der verwendete Verpressmörtel HSTV-P01 weist einen guten Verbund zum Naturstein auf. Der Versuchsaufbau berücksichtigte je nach Versuchsserie den Verbund Naturstein/ Verpressmörtel bzw. Verpressmörtel/ Nadel. Bei der Verwendung des HSTV-P01 und kurzer Verbundlänge von 2 d_s konnten das Versagen zwischen Bewehrungsstab und Verpressmörtel und das Versagen zwischen Verpressmörtel und Stein separiert werden Dieses Versagen erfolgte in beiden Fällen unter hohen Verbundspannungen.

Der Verpressmörtel HSTV-P01 ist für die Verwendung bei der Vernadelung/Verankerung von historischem Mauerwerk in Bezug auf sein Verbundtragverhalten als sehr geeignet einzustufen. Ein Einsatz im stark sulfathaltigen Mauerwerk ist auf Grund seiner chemischen Zusammensetzung jedoch nicht zu empfehlen.

Die Ergebnisse sind auf Mörtel mit etwa gleicher Druckfestigkeit übertragbar.

HSV-P01 Mörtel für Mauerwerksverfüllung und – verpressung als Vertreter eines gering festen Injektionsmörtels

Die statischen Ausziehversuche haben gezeigt, dass der verwendete Verpressmörtel HSV-P01 einen geringen Verbund mit dem Natursandstein eingeht. Die experimentellen Versuche beinhalteten die Untersuchung der Verbundspannungen zwischen Verpressmörtel und Natursandstein und zwischen Verpressmörtel und GFK-Stab. In beiden Versuchsserien (Serie 5 und Serie 6) wurden sehr geringe Verbundspannungen erzielt. Die Verbundspannungen konnten aufgrund des geringen Verbundes zwischen Verpressmörtel und Naturstein nicht ermittelt werden.

Dieser Mörtel ist auf Grund seiner mineralogischen Zusammensetzung für gipshaltiges Mauerwerk geeignet. Auf Grund der schlechten Ergebnisse beim Verbund zwischen Verpresskörper und umgebendem Stein konnte der Verbund zwischen Bewehrungsstab und umgebendem Injektionsmörtel nicht einwandfrei nachgewiesen werden.

Es kann damit geschlussfolgert werden, dass der verwendtete Injektionsmörtel mit einer mittleren Druckfestigkeit von < 8,5 MPa nicht für die Verankerung auf Verbund und damit nicht für einen statisch wirksamen Einsatz geeignet sind.

NHLV-g01 Mörtel für Mauerwerksverfüllung und – verpressung

Die Versuchsserie 7 und 8 wurde unter Anwendung des Verpressmörtels NHLV-g01 hergestellt und im statischen Ausziehversuch auf die Verbundtragfähigkeit überprüft. Bei der Verwendung des NHLV-g01 und des beschriebenen Versuchsaufbaus ist ausschließlich ein Versagen des Verbundes zwischen Natursandstein und Verpressmörtel aufgetreten, jedoch streuen die einzelnen Versuche erheblich. Der Verbund zwischen Natursandstein und Verpressmörtel hat sich in den durchgeführten Versuchen als schwacher Verbund im Verbundsystemerwiesen. Auf Grund seiner mineralogischen Zusammensetzung ist dieser Mörtel nicht für sulfathaltiges Mauerwerk geeignet.

casusan HGE historischer Gipsestrich
Der Mörtel casusan HGE weist in seiner Verbundtragfähigkeit hohe Verbundspannungen im Nadel/Verpressmörtel-Verbund auf. Die Verbundspannungen für die Verbundprüfung sind mit 7 MPa mit den guten Ergebnissen des HSTV-P01 Verpressmörtels vergleichbar. Der geprüfte Verbund zwischen Verpressmörtel und Natursandstein weist eine große Streuung

der Verbundspannung auf. Bei den durchgeführten Versuchen hat sich dieser Verbund als schwacher Verbund im Verbundsystem erwiesen.
Eine Verbesserung des Verbundes zwischen Casea casusan HGE und Natursandstein wurde in den Nachversuchen durch die Erhöhung des W/B-Wertes erzielt. Aufgrund des sehr frühen, nicht ausreichenden Versagens des Verbundes wurden weitere Untersuchungen zur Ursachenuntersuchung durchgeführt. Dieser Problematik musste weitere Bedeutung beigemessen werden, da hier bessere Ergebnisse erstrebenswert sind. Hierfür wurden der Mörtel selbst auf sein Abbindeverhalten und der Sandstein auf seine Wasseraufnahmefähigkeit untersucht.
Der Casea casusan HGE Mörtel ist ein an die historischen Hochbrandgipse angelehnter Mörtel. Die Hauptbindemittel sind Calciumsulfatbinder auf Naturanhydritbasis und speziell eingestellte Gipsphasen. Er hat i.d.R. eine Körnung mit gröberen Bestandteilen, die abgesiebt werden müssen, wenn er zum Verpressen eingesetzt werden soll.
Folgende Ursachen für den schlechten Verbund zwischen umgebendem Stein wurden nacheiner ersten Analyse postuliert:

a) Der Injektionsmörtel schwindet, sodass kein ausreichender Haftverbund zwischen Injektionskörper und umliegendem Mauerwerk mehr vorhanden ist.
b) Ggf. zu geringer w/b- Faktor des Mörtels (er wurde bewusst niedrig gehalten, da bei zu hohem Wasserangebot an das umgebende gipshaltige Mauerwerk dieses schnell expandieren kann).
c) In der Randzone zwischen Verpresskörper und umgebendem Mauerwerk wird zu viel Feuchtigkeit vom anliegenden Mauerwerk absorbiert, sodass der Gipsmörtel nicht ausreichend Wasser bekommt, um regulär abbinden zu können.

Zu a)
Die Ergebnisse zu a) sollen im Folgenden angeführt werden. Dazu wurden Schwinduntersuchungen an Prismen 4 x 4 x 16 cm³ durchgeführt ([89]).

a)

b)

Bild 91 *a) Prisma mit Messzäpfchen am Ende im Messgerät (digitales Schwindmessgerät), b) Digitale Messuhr*

Bei einer Lagerung mit einem ausreichenden Feuchteangebot konnten keine Schwinderscheinungen festgestellt werden (Bild 92). Eher ist mit einem leichten Quellen zu rechen. Dies würde das Verbundverhalten eher positiv beeinflussen. Calciumsulafthaltige Baustoffe verlieren unter einem erhöhten Feuchteeinfluss ihre Festigkeit. Infolgedessen wurde zum Ausschluss eines derartigen Festigkeitsverlustes der HGE unter feuchten Bedingungen geprüft. Dabei konnten relativ hohe Festigkeiten nachgewiesen werden (Bild 93).

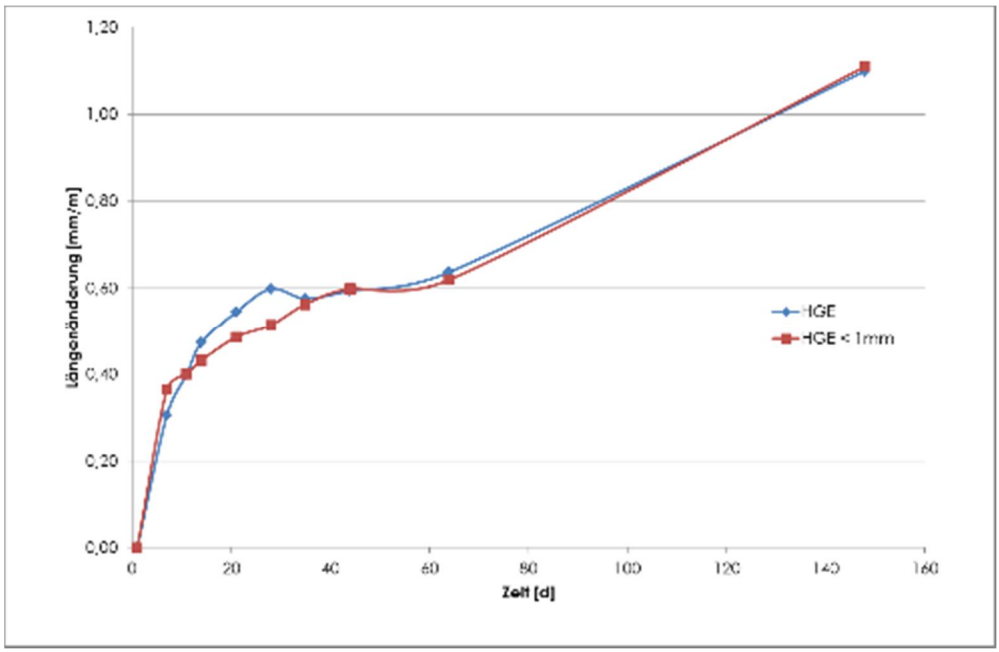


Bild 92 *Längenänderungsverhalten eines HGE-Mörtels und eines Mörtels mit HGE-Bestandteilen <1 mm bei Lagerung über Wasser*

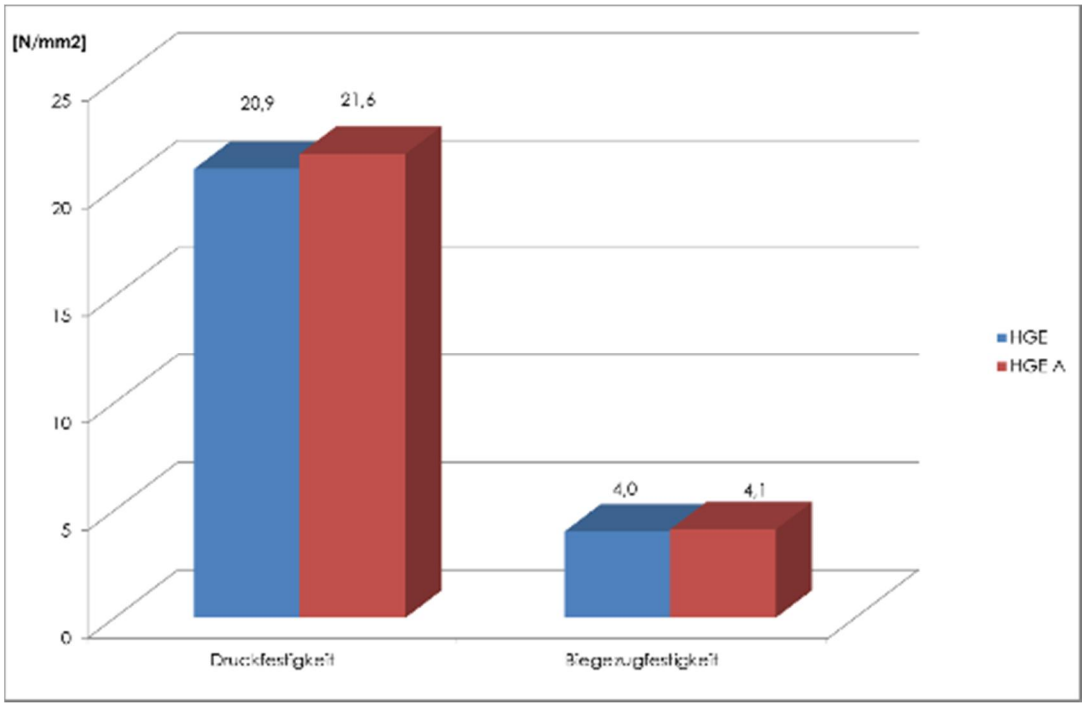


Bild 93 *Längenänderungsverhalten eines HGE-Mörtels und eines Mörtels mit HGE-Bestandteilen <1 mm bei Lagerung über Wasser*

Schwinduntersuchungen bei nicht ausreichendem Wasserangebot sind bisher noch nicht durchgeführt worden. Eine Tastserie, die bestätigt, dass auch dabei kein Schwinden eintritt, wird noch angesetzt.

Zu b)
Rein chemisch wird für Calciumsufathalbhydrat ein Wasser/Bindemittel Wert von 0,19 benötigt. Bei Anhydrit beträgt der Wasser/Bindemittel Wert 0,27.
Dazu kommt noch eine durch die Oberfläche bestimmte physikalische Komponente, die herstellungsabhängig ist.
Bei den Versuchen ist der w/b-Wert etwas knapp auf 0,18 eingestellt worden (vgl. Tabelle 8).
Hierzu werden nonchmals Prüfkörper nach Abschn. 5.2.1 mit verändertem w/b-Wert angesetzt, um das Verbundverhalten zwischen Verpresskörper und umgebendem Steinmaterial und den Einfluss des w/b-Wertes prüfen zu können.

Zu c)
Zur Klärung dieses Phänomens gehört ebenfalls, dass die Wasseraufnahmefähigkeit des verwendeten Natursandsteines untersucht wird. Diese Versuche wurden durchgeführt. (siehe 5.2.1.2 Materialeigenschaften).

Der verwendete Sandstein zeigte eine Wasseraufnahme 8,40 M.-% und kann damit als stark saugender Sandstein eingeschätzt werden. Die Herkunft und die mineralogische Zusammensetzung sind nicht bekannt.

Als Trockenmörtel wurde ein HGE –Historischer Gipsestrich von CASEA verwendet. Vom Hersteller wird eine zu erwartende Druckfestigkeit von größer als 30 N/mm2 und eine Biegezugfestigkeit von größer 6,0 N/mm2 angegeben. Der Wasserbedarf (Wasser/Trockenmörtelwert) wird mit 0,18 bis 0,20 angegeben. Die Körnung beträgt 0-2 mm. Das Material besteht aus Hochbrandgips und wenig Portlandzement sowie sulfathaltigem Zuschlag (Anhydritkörnungen).

Zunächst wurde der Trockenmörtel auf eine Korngröße < 1 mm abgesiebt, da eine Verpressung nur bis zu einer Korngröße von maximal 1 mm möglich ist (Limitierung durch Gerätetechnik). Im Vorfeld der Untersuchungen wurde vermutet, dass der sehr saugende Sandstein dem Frischmörtel zu viel Wasser entzieht und dass sich auf Grund dessen in der Kontaktzone Gipsmörtel-Sandstein keine ausreichende Festigkeit ausbilden kann. Deshalb wurden Versuche mit den Wasser/Trockenmörtel-Werten 0,18; 0,20 und 0,22 vorgenommen. Dafür wurden die Frischmörtel in eine Prismenform mit Sandsteinplättchen gegeben (Bild 94undBild 95).

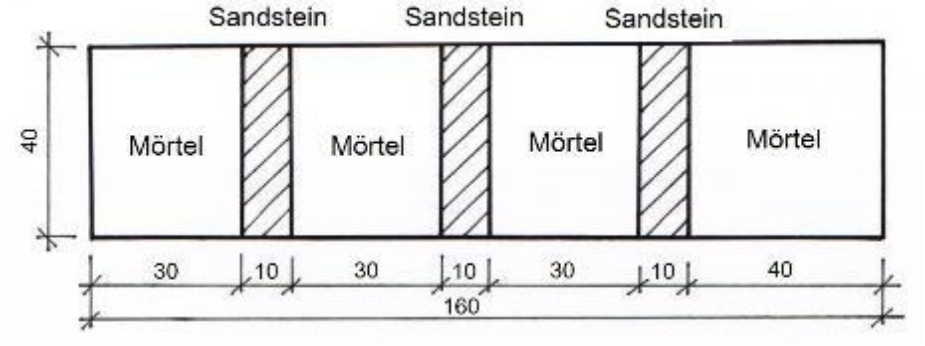


Bild 94 *Schema eines Versuchskörpers*

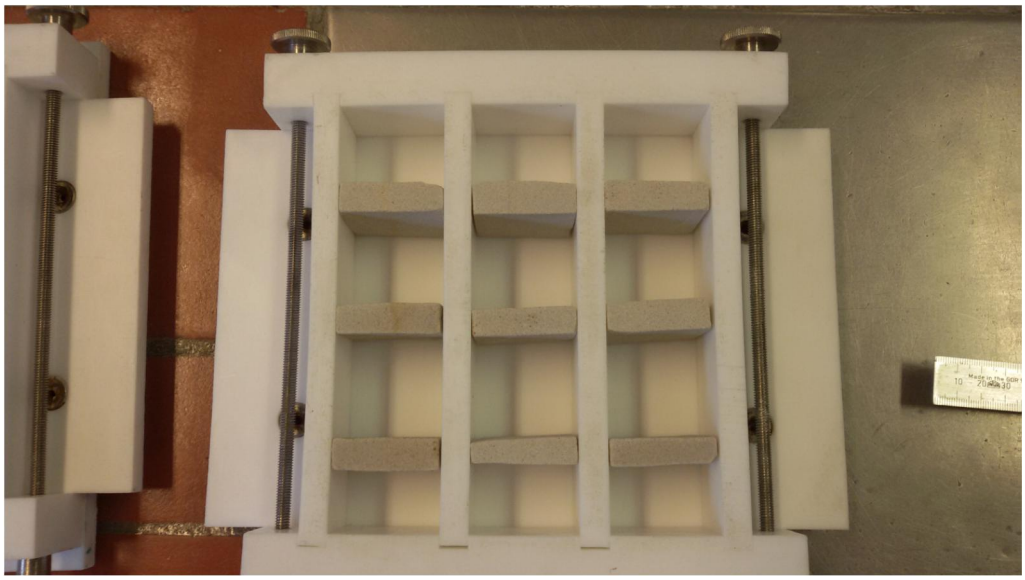


Bild 95 *Mörtelform mit eingefügten Sandsteinplättchen*

Direkt nach dem Einfüllen des Frischmörtels in die Form wird ein extremer Wasserentzug im Frischmörtel deutlich (Bild 96und Bild 97). Bei einem höheren Wasser/Trockenmörtel-Wert ist keine gerissene Front direkt in der Grenzfläche Sandstein-Mörtel sichtbar. Auch hier zeigt sich ein Bereich mit Wasserentzug bis ca. 3 mm von der Sandsteinoberfläche.

Bild 96 *Mörtel kurz nach dem Einfüllen; an der Grenzfläche zum Sandstein wird dem Mörtel sofort das Wasser entzogen*

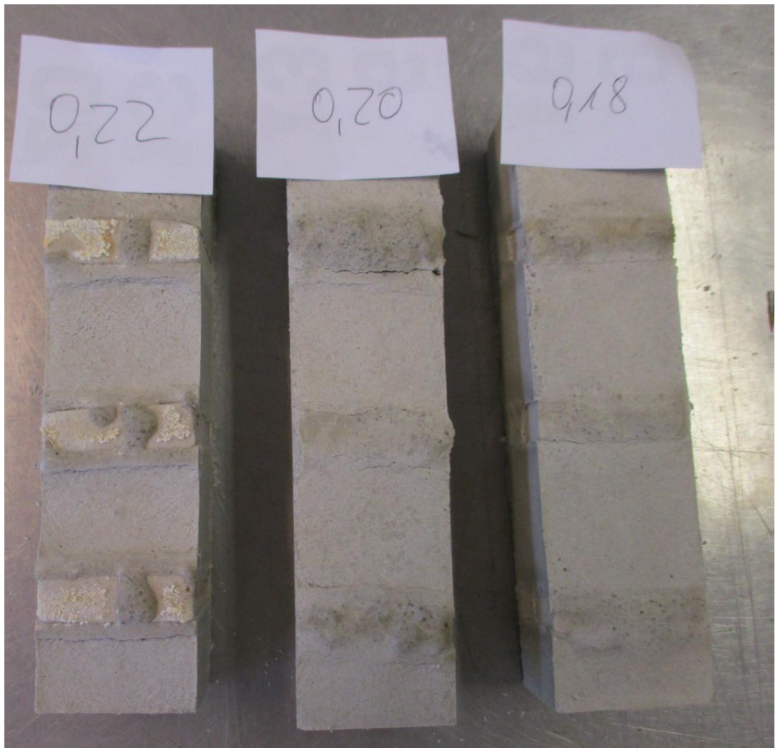


Bild 97 *Risse in der Grenzfläche Sandstein-Mörtel nach ca. 18 Stunden Reaktionszeit, durch das*

Nach 18 Stunden Reaktionszeit wird deutlich, dass sich bei den Mörteln mit Wasser-Trockenmörtel-Wert von 0,18 und 0,20 direkt an der Grenzfläche Schwachstellen zeigen, bei einem Wert von 0,22 ist es nach einem Übergangsbereich von ca. 3 mm (Wasserentzug und schnelleres Erstarren) zu einer Absenkung der Mörteloberfläche gekommen ist (Bild 97). Infolgedessen liegt die Schwachstelle hier im Übergangsbereich von Mörtel mit wenig Wasserangebot und Mörtel mit ausreichend Wasserangebot. Eine mechanische Belastung der Prismen bestätigt dies. Die Proben mit 0,18 und 0,20 versagen an der Grenzfläche Sandstein- Mörtel, die Probe mit 0,22 versagt bei Belastung im Mörtel (Bild 98).

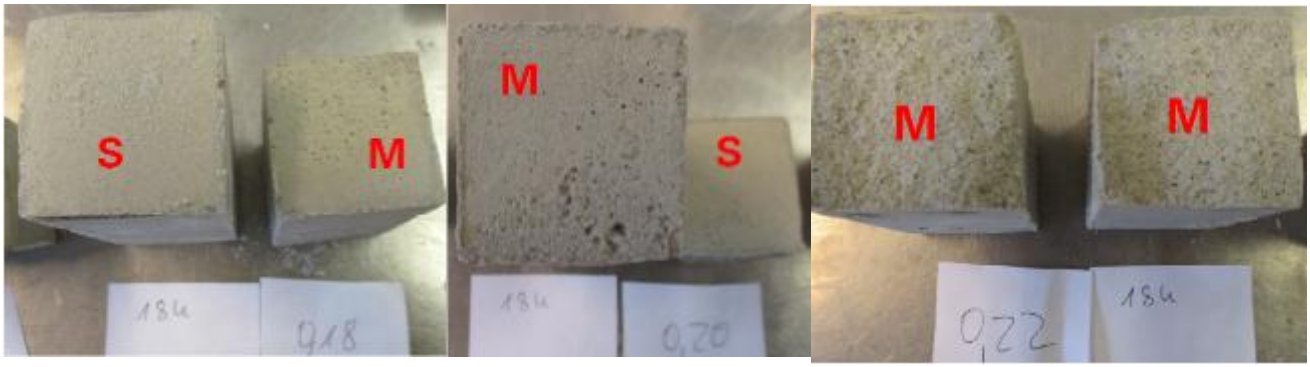


Bild 100 *Versagen in der Grenzfläche Sandstein-Mörtel bei Wasser-Trockenmörtel-Wert 0,18 und 0,20 nach ca. 18 Stunden Reaktionszeit, bei einem Wasser-Trockenmörtel-Wert von 0,22 Versagen im Mörtel (S-Sandstein, M-Mörtel) „Bluten“ beim Wasser-Trockenmörtel-Wert von 0,22 ist es zu einer Absenken der Oberfläche gekommen*

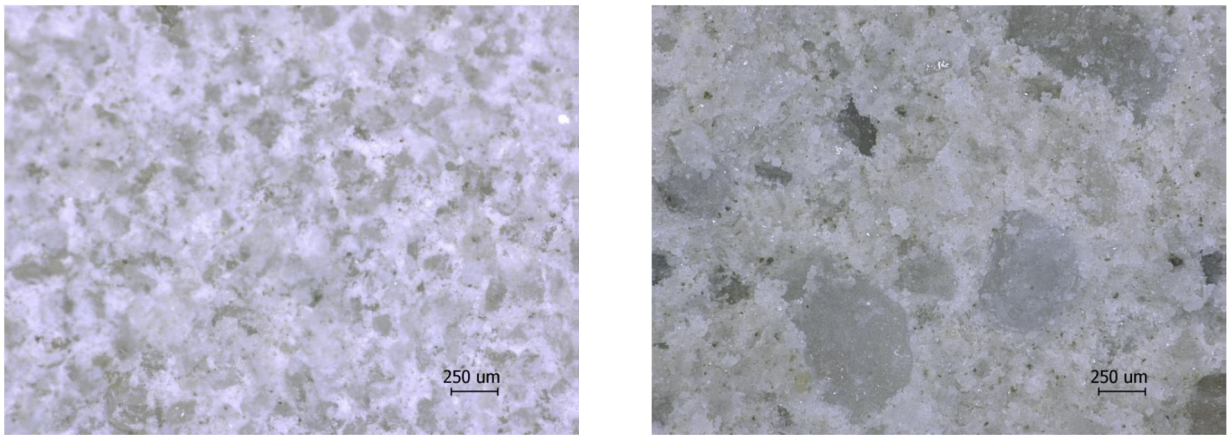


Bild 101 *Links Bruchfläche der Probe mit Wasser-Trockenmörtel-Wert von 0,18, Sandsteinoberfläche mit Mörtelanhaftungen; rechts Bruchfläche der Probe mit Wasser-Trockenmörtel-Wert von 0,22; Mörtelgefüge*

Die mikroskopischen Aufnahmen der Bruchflächen zeigen, dass auf der Sandsteinoberfläche der Probe mit einem Wasser-Trockenmörtel-Wert von 0,18 nur wenig Mörtelanhaftungen mit einem feinen krümeligen Gefüge zu finden sind. Die Bruchfläche der Probe mit einem Wasser-Trockenmörtel-Wert von 0,22 zeigt auf der Bruchfläche einen gut ausgebildetes Mörtelgefüge (Bruchfläche im Mörtel, Bild 101.

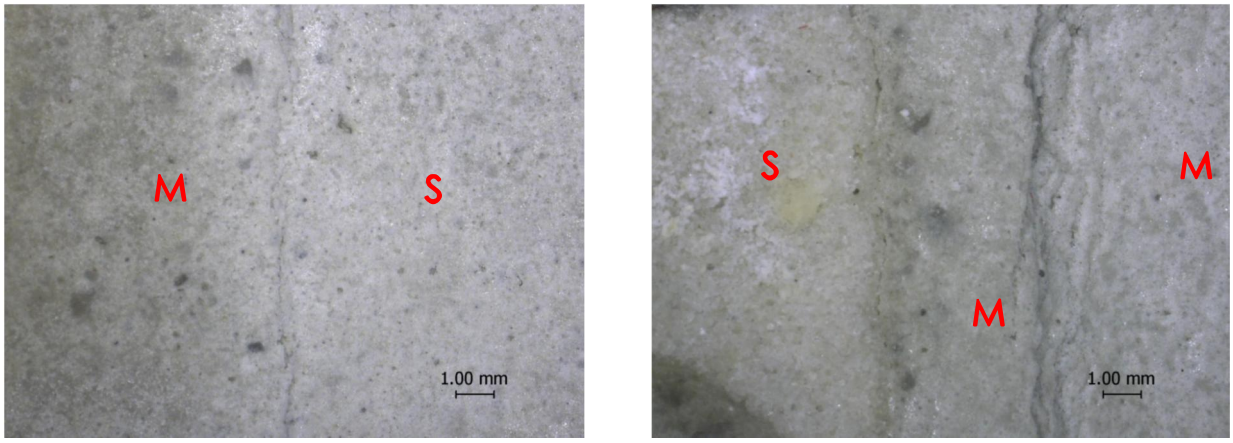


Bild 102 *Blick von oben auf die Grenzflächen; links Grenzfläche der Probe mit Wasser-Trockenmörtel-Wert von 0,18,*

rechts Grenzfläche der Probe mit Wasser-Trockenmörtel- Wert von 0,22, in der Grenzfläche liegt eine separate Mörtelschicht

Durch den stark saugenden Sandstein wird bei niedrigen Wasser-Trockenmörtel-Werten kein gutes hydratisiertes Mörtelgefüge auf der Sandsteinoberfläche ausgebildet. Infolgedessen findet bei mechanischer Belastung das Versagen direkt an der Grenzfläche statt. Bei Verwendung höherer Wasser-Trockenmörtel-Werte kann dieser Effekt in das Mörtelgefüge verlagert werden. Allerdings muss bei Verwendung höherer Wasser-Trockenmörtel-Werte ausgeschlossen werden, dass es nicht zu negativen Effekten infolge von „Bluten“ kommt.

Mit den Untersuchungsergebnissen kann folgender Lösungsansatz gefunden werden.

i) Anpassung des w/b-Wertes an das umgebende Mauerwerk

Bild 103 *Vorschlag „Nachverpressen von Wasser“ mit Schaumschlauch bzw. Schlauch mit Öffnungen*

ii) Durchführung einer intelligenten Nachbehandlung. Bei Nadeln werden dünne PVC-Schläuche als Abstandshalter und zur Entlüftung eingesetzt. Über diese kann dezidiert Wasser zugeführt, und ein vollständiges Abbinden auch im Übergangsbereich ermöglicht werden. Da bei Einsatz eines gipsgebundenen Mörtels die Verbundeigenschaften zwischen Stab und umgebendem Verpressgut ohnehin gut sind, kann mit einem definierten Abschlag in diesem Falle gearbeitet werden.

Vergleich der Verbundspannungen im Naturstein-Verpressmörtel-Verbund mit der Anpassung des W/B-Wertes von Casea casusan HGE

Materialien	Verbundart	W/B-Wert	Verbundspannungen [MPa]	
			2 ds	5 ds
GFK-Anker Schöck ComBar ds = 16 mm Casea casusan HGE	Naturstein / Verpressmörtel	0,18	1,30	
GFK-Anker Schöck ComBar ds = 16 mm Casea casusan HGE	Naturstein / Verpressmörtel	0,22	3,1	2,9

Tabelle 12 *Vergleich der Verbundspannungen bei verändertem W/B-Wert mit unterschiedlichen Verbundlängen*

Durch die materialtechnischen Untersuchungen der Verpressmörteleigenschaften des Casea casusal HGE Mörtels konnten die Verbundspannungen im Verbund Naturstein / Verpressmörtel deutlich gesteigert werden.

5.2.1.7 Ergebnisse der Versuche mit variierenden Faserverbundwerkstoffen, Durchmesser 8 mm, Verbundlänge 2 ds und 5 ds

5.2.1.7.1 Versuchsserie 1

Verbund	GFK Nadel - Verpressmörtel	
Verbundlänge	2 d_s	
Verpressmörtelsorte	HSTV-P01	
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 3,87 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 34,1 MPa

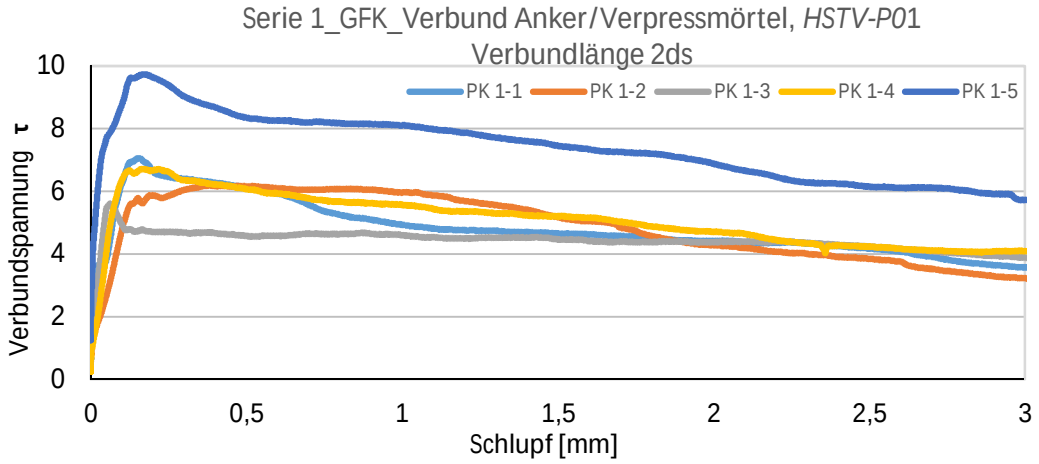


Diagramm 19 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen GFK-Nadel und Verpressmörtel

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 19 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 1 mit GFK-Nadeln dargestellt. Der Verbund zwischen der GFK-Nadel und dem Verpressmörtel (HSTV-P01) wurde in der Serie 1 mit einer Verbundlänge vom 16 mm (2ds) geprüft. Die Ergebnisse der Ausziehversuche zeigen zusammenliegende Verbundspannungs-Schlupf Kurven. Die Kurvenverläufe haben einen proportionalen Anstieg der Verbundspannungen bei minimaler Relativverschiebung. Der Prüfkörper 1-1 wies eine höhere Verbundspannung auf.

Mit der Untersuchung des Verpresskörpers und Aufspaltung des Prüfkörpers 1-4 nach dem Ausziehversuch konnte nachgewiesen werden, dass der zu prüfende Verbund GFK-Nadel/Verpressmörtel versagt hat (Bild 104 und Bild 105).

Die Serie 1 wurde erfolgreich auf den Verbund zwischen GFK-Nadel und Verpressmörtel im statischen Ausziehversuch geprüft.

Bild 104 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 1-4*

Bild 105 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 1-4*

5.2.1.7.2 Versuchsserie 2

Verbund	CFK Nadel - Verpressmörtel	
Verbundlänge	2 d_s	
Verpressmörtelsorte	HSTV-P01	
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 3,87 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 34,1 MPa

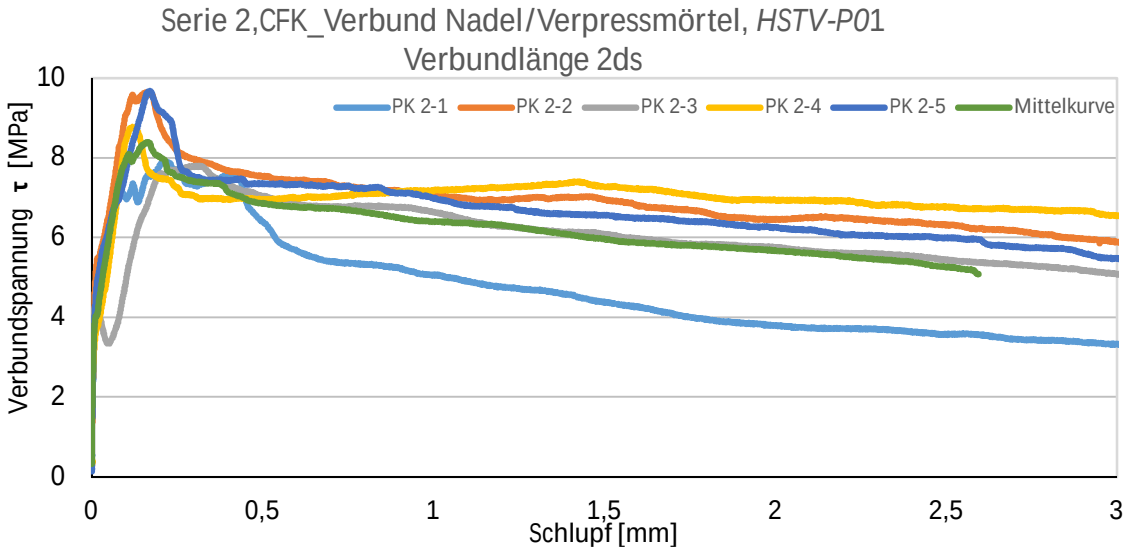


Diagramm 20 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen CFK-Nadel und Verpressmörtel

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 20 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 2 mit CFK-Nadeln dargestellt. Der Verbund zwischen der CFK-Nadel und dem Verpressmörtel (HSTV-P01) wurde in der Serie 2 mit einer Verbundlänge vom 16 mm (2ds) geprüft. Die Ergebnisse der Ausziehversuche zeigen zusammenliegende Verbundspannungs-Schlupf Kurven. Die Kurvenverläufe haben einen proportionalen Anstieg der Verbundspannungen bei minimaler Relativverschiebung.

Mit der Untersuchung des Verpresskörpers und Aufspaltung des Prüfkörpers 2-2 nach dem Ausziehversuch konnte nachgewiesen werden, dass der zu prüfende Verbund CFK-Nadel/Verpressmörtel versagt hat (Bild 106 und Bild 107).

Die Serie 2 wurde erfolgreich auf den Verbund zwischen GFK-Nadel und Verpressmörtel im statischen Ausziehversuch geprüft.

Bild 106 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 2-2*

Bild 107 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 2-2*

5.2.1.7.3 Versuchsserie 3

Verbund	CFK Nadel - Verpressmörtel	
Verbundlänge	5 d_s	
Verpressmörtelsorte	HSTV-P01	
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 3,87 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 34,1 MPa

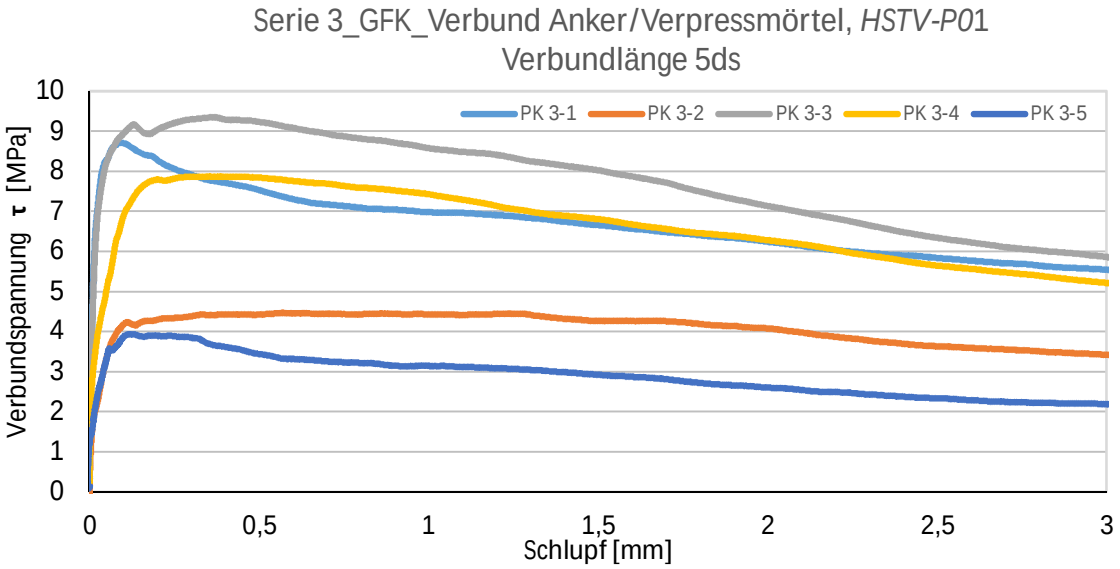


Diagramm 21 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen GFK-Nadel und Verpressmörtel

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 21 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 3 mit GFK-Nadeln dargestellt. Der Verbund zwischen der GFK-Nadel und dem Verpressmörtel (HSTV-P01) wurde in der Serie 1 mit einer Verbundlänge vom 40 mm (5ds) geprüft. Die Ergebnisse der Ausziehversuche zeigen zusammenliegende Verbundspannungs-Schlupf Kurven. Die Ergebnisse streuen sehr stark. Die Kurvenverläufe haben einen proportionalen Anstieg der Verbundspannungen bei minimaler Relativverschiebung. Die Prüfkörper 3-1, 3-3 und 3-4 weisen eine höhere Verbundspannung auf.

Mit der Untersuchung des Verpresskörpers und Aufspaltung des Prüfkörpers 3-5 nach dem Ausziehversuch konnte nachgewiesen werden, dass der Verpressmörtel auf Zug versagt hat (Bild 108 und Bild 109).

Bei den Versuchen wurden die PK 3-1, 3-3 und 3-4 erfolgreich auf den Verbund zwischen GFK-Nadel und Verpressmörtel im statischen Ausziehversuch geprüft.

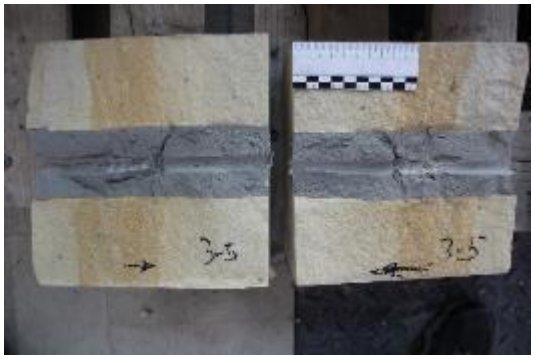


Bild 108 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 3-5*

Bild 109 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 3-5*

Versuchsserie 4

Verbund	CFK Nadel - Verpressmörtel	
Verbundlänge	5 d_s	
Verpressmörtelsorte	HSTV-P01	
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 3,87 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 34,1 MPa

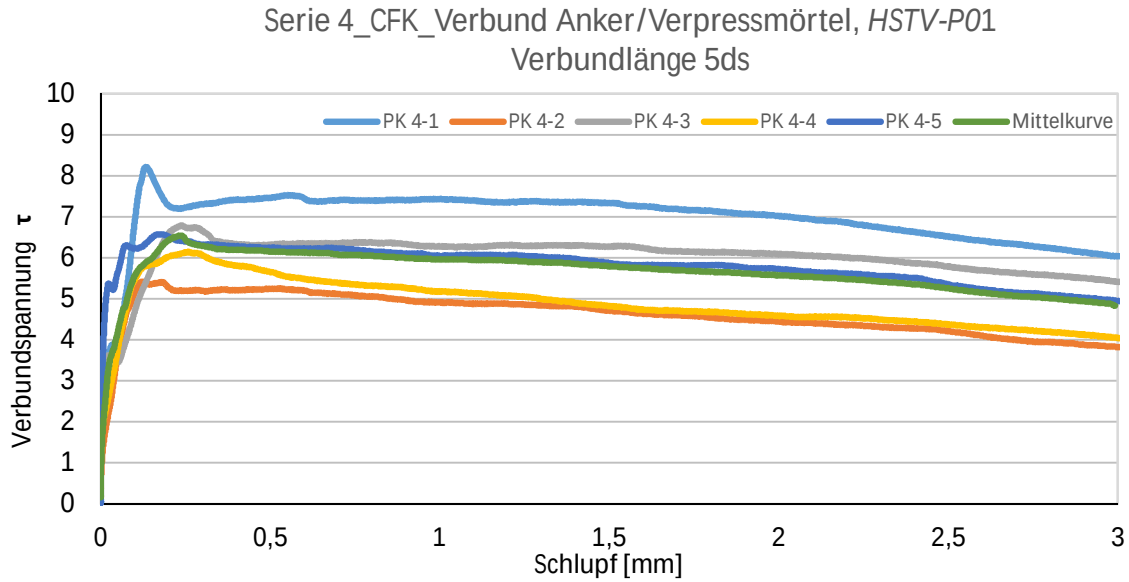


Diagramm 22 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen CFK-Nadel und Verpressmörtel

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 22 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche der Serie 4 mit CFK-Nadeln dargestellt. Der Verbund zwischen der CFK-Nadel und dem Verpressmörtel (HSTV-P01) wurde in der Serie 4 mit einer Verbundlänge vom 40 mm (5ds) geprüft. Die Ergebnisse der Ausziehversuche zeigen zusammenliegende Verbundspannungs-Schlupf Kurven. Die Kurvenverläufe haben einen proportionalen Anstieg der Verbundspannungen bei minimaler Relativverschiebung.

Mit der Untersuchung des Verpresskörpers und Aufspaltung des Prüfkörpers 4-2 nach dem Ausziehversuch konnte nachgewiesen werden, dass der zu prüfende Verbund CFK-Nadel/Verpressmörtel versagt hat (Bild 110 und Bild 111).

Die Serie 4 wurde erfolgreich auf den Verbund zwischen GFK-Nadel und Verpressmörtel im statischen Ausziehversuch geprüft.

Bild 110 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 4-2*

Bild 111 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 4-2*

5.2.2 Versuche zum Verbundverhalten mit großer Verbundlänge

5.2.2.1 Beschreibung

Zur Untersuchung des Verbundverhaltens bei der Vernadelung bzw. Verankerung in Natursteinmauerwerk wurden experimentelle Versuche mit großer Verbundlänge durchgeführt. Dabei wird der Verbund zwischen Naturstein/Verpressmörtel und GFK Nadel bzw. Anker/ Verpressmörtel untersucht. Der Versuch mit großer Verbundlänge wurde ergänzend zu den Versuchen mit kleiner Verbundlänge gewählt, da mit diesen Versuchen das tatsächliche Tragverhalten im Natursteinmauerwerk realitätsnah untersucht werden kann. Für die Versuche wurden GFK-Nadeln (ComBAR) des Herstellers Schöck mit einem Durchmesser von 16 m und GFK-Anker des Herstellers FiReP mit einem Durchmesser von 27 mm verwendet. Die beiden Produkte unterscheiden sich neben den Stabdurchmesser auch in der Ausbildung der Profilierung. Die Schöck GFK Nadeln sind stark profiliert, die FiReP GFK- Anker weisen eine schwache Profilierung auf. Um die Lasteinleitung und die Verbundspannungsverteilung bei großer Verbundlänge analysieren zu können wurden Dehnmessstreifen zur Messung der Dehnung in den GFK-Bewehrungsstäben kraftschlüssig eingebracht. Nach dem Verpressen mit Verpressmörtel wurde der Versuchskörper im statischen Ausziehversuch geprüft und die zulässigen Verbundspannungen im Verbundsystem ermittelt.

5.2.2.2 Materialeigenschaften

5.2.2.2.1 Natursandstein

Die Versuche werden mit Natursandstein durchgeführt. Markant ist die gelbe Farbe der Sandsteinquader.

Die Prüfkörper aus Sandstein haben Kantenlängen von l/b/h 160/160/160 mm.

Die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Steine werden an entsprechenden Prüfkörperprismen, nach DIN EN 771-6 [5] und DIN EN 771-1[3] bestimmt.

5.2.2.2.2 Verpressmörtel

Für die Untersuchung des Verbundtragverhaltens mit großen Verbundlängen wurde folgender Verpressmörtel verwendet:

Mörtel für Mauerwerksverfüllung und – verpressung, Trass-Verpressmörtel HS, (HSTV-P01 von TUBAG)

Körnung:	0-2 mm, 0-4 mm
Druckfestigkeit:	≥ 20 N/mm²
Verarbeitungszeit:	ca. 2 Stunden
Wasserbedarf:	je nach Konsistenz ca. 30 M.-% Wasser
Anwendung:	zur Herstellung von Verpress- und Injektionsmörtel zur Riss- und Hohlraumverpressung
	Mauerwerkssanierung an historischen Gebäuden mit hoher Sulfatbeständigkeit

Für das Verpressen des GFK-Ankers mit dem Trass-Verpressmörtel HSTV-P01 wurde ein Wasser/Bindemittelwert von 0,3 angewendet.

4.1.1.2.3 Anker/Nadel

Für die statischen Nadel-/Anker-Ausziehversuche mit großer Verbundlänge kamen Bewehrungsstäbe aus glasfaserverstärktem Kunststoff zur Anwendung. Untersucht wurden unterschiedliche Stabdurchmesser und Bewehrungsstabprodukte.

Die stark profilierten GFK-Bewehrungsstäbe ComBAR des Herstellers Schöck wurden mit einem Nenndurchmesser von 16 mm im Verbundsystem geprüft (Bild 113).

Als weitere Untersuchungsvariante kamen Bewehrungsstäbe mit einem Außendurchmesser von 27 mm (Innendurchmesser von 23 mm) des Herstellers FiReP zur Anwendung. Diese Anker weisen eine eher schwache Profilierung auf (Bild 114).

Nadel/Anker	Nenndurchmesser	Eigenschaften
Schöck ComBAR Bewehrungsstab aus glasfaserverstärktem Kunststoff	16 mm	Dauerzugfestigkeit: f_{fk} = 580 N/mm2 Effektive Zugfestigkeit: σ_{eff} = 1000N/mm² - 1500 N/mm² Bruchdehnung: ε_F = 2,2 % Zug – E-Modul: E_{eff} = 151 000 N/mm²
FiReP GFK-Anker Powerthread K60-27 Bewehrungsstab aus glasfaserverstärktem Kunststoff	27 mm	Effektive Zugfestigkeit: σ_{eff} = 1000N/mm² Bruchdehnung: ε_F = 2,1 % E-Modul: E_{eff} = 40 000 N/mm²

Tabelle 13 *Geprüfte Anker/Nadeln für die Versuche mit großer Verbundlänge*

			Schöck ComBAR	Powerthread K60-27
Nenndurchmesser	D_n	[mm]	16	24
Außendurchmesser	D_0	[mm]	18	27
Rippensteigung	a	[mm]	8,5	9
Rippenhöhe	h_m	[mm]	0,9	1,5
Nennquerschnitt	A_f	[mm²]	201,1	452,4

Tabelle 14 *Geometrische Angaben der Stabprofilierung*

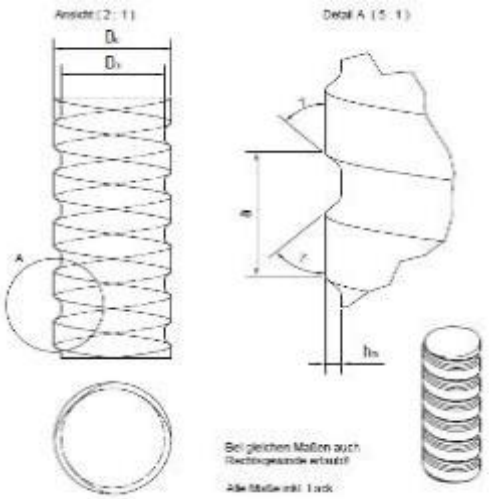


Bild 112 *Detailzeichnung Stabprofilierung*[10]

Bild 113 *Schöck ComBAR GFK-Stab, Nenndurchmesser 16 mm*

Bild 114 *FiReP Powerthread K60-27 GFK-Stab Nenndurchmesser 27 mm*

5.2.2.3 Prüfkörperherstellung

Für die Prüfung des Verbundes mit großer Verbundlänge mussten zunächst jeweils 4 Sandsteinquader vermauert werden. Als Mörtel für die 1,5 cm dicken Lager-und Stoßfugen wurde ein HSTV-P01 in entsprechender Konsistenz verwendet (Bild 115). Nach Aushärtung des Mörtels (28 Tage) wurde im Kernbohrverfahren ein vertikales Loch mit 58 mm Durchmesser durch den Versuchskörper gebohrt (Bild 116). Der GFK-Bewehrungsstab wurde danach zentrisch im Bohrloch mit dem Verpressmörtel HSTV-P01(in entsprechender fließfähigen Konsistenz) vergossen. Die Verbundlänge im Prüfkörper betrug etwa 400 mm. An die GFK-Nadeln/Anker wurden im entsprechenden Abstand Dehnmessstreifen (DMS)angebracht. Diese wurden in den Stab eingeschlitzt und kraftschlüssig mit dem Stab verklebt (siehe Bild 117 und Bild 118).

[10] Siehe Anlage: Schöck ComBAR Zulassung

Bild 115 *Aufgemauerter Prüfkörper*

Bild 116 *Kernbohrung in Prüfkörper*

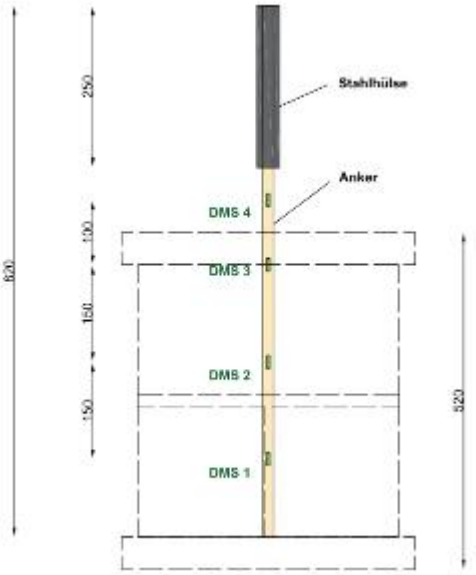


Bild 117 *Anordnung der DMS am Stab, Prüfkörper für Ausziehversuche, Schöck ComBAR GFK-Anker D_n=16 mm, Verbundlänge = 400 mm*

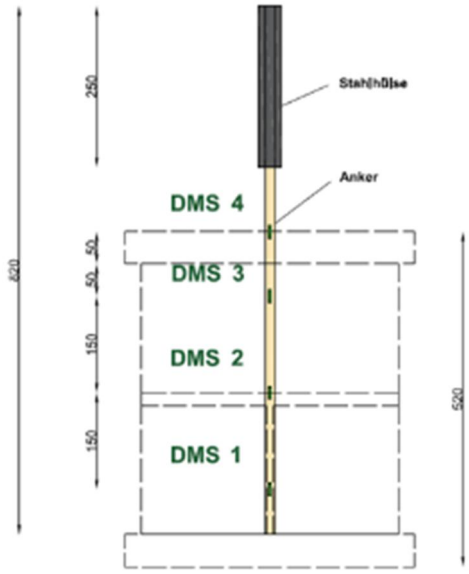


Bild 118 *Anordnung der DMS am Stab, Prüfkörper für Ausziehversuche, FiReP Powerthread K60-27, D_n= 24 mm, Verbundlänge = 400mm*

5.2.2.4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Versuchsaufbau

Der Versuchskörper wurde mit dem langen Stabende der Glasfasernadel nach oben in die Prüfmaschine eingebracht. Der Glasfaserbewehrungsstab wurde zur besseren Verteilung der Haltekräfte in eine Stahlhülse, mittels Epoxidharz eingeklebt und. exakt senkrecht ausgerichtet. Danach wurde die Glasfasernadel mit der umhüllenden Stahlhülse in die Prüfmaschine eingespannt. Der Einspanndruck musste so gewählt werden, dass die Haltekraft der Prüfmaschinenbacken einen Schlupf zwischen Einspannung der Prüfmaschine und Stahlhülse verhindert.

Am kurzen, nicht eingespannten, unterem Ende der Glasfasernadel wurde ein induktiver Wegaufnehmer für die Messung der Relativverschiebung zwischen Glasfasernadel und

Prüfkörper angebracht. Die Kabel der, in die Nadel integrierten Dehnmessstreifen, wurden entsprechend mit der Maschinensteuerung verbunden.

Im Rahmen der Versuchsvorbereitung für große Verbundlängen wurde ein Tastversuch zum Verbundverhalten zwischen GFK-Bewehrungsstab und Metallhülsen durchgeführt. Für die Versuche mit großen Verbundlängen ist eine höhere Ausziehkraft notwendig. Um Schlupf im Einspannungsbereich zu verhindern, musste die Einspannkraft entsprechend hoch gewählt werden. Die kraftschlüssige Verbindung zwischen Metallhülse und GFK-Bewehrungsstab erfolgte unter der Verwendung von Epoxidharz. Die Metallhülsen gewährleisten einen intakten Bewehrungsstab im Bereich der Maschineneinspannung. Das Zugversagen des GFK- Bewehrungsstabes erfolgte bei 1242 MPa. Die Verbindung zwischen Metallhülsen, Epoxidharz und GFK-Stab erwies sich als tragfähig.

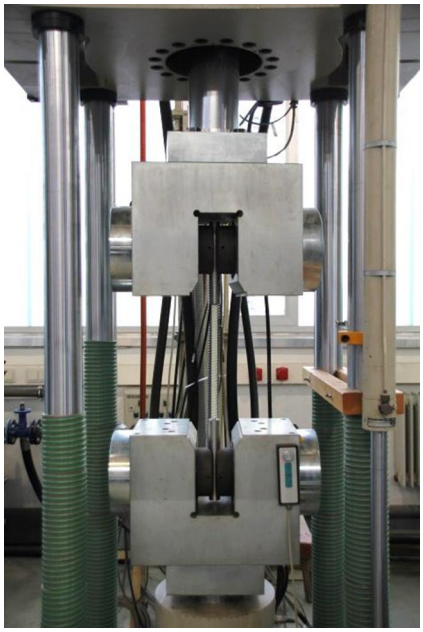


Bild 119 *Zugversuch zur Überprüfung der Verankerung in Stahlhülse*

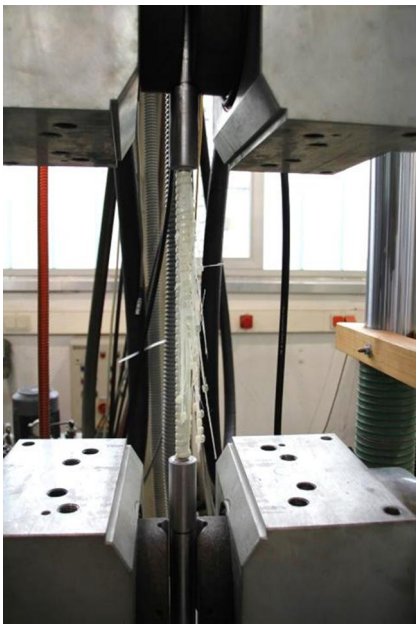


Bild 120 *Zugversuch bis zum Versagen des GFK-Bewehrungsstabes*

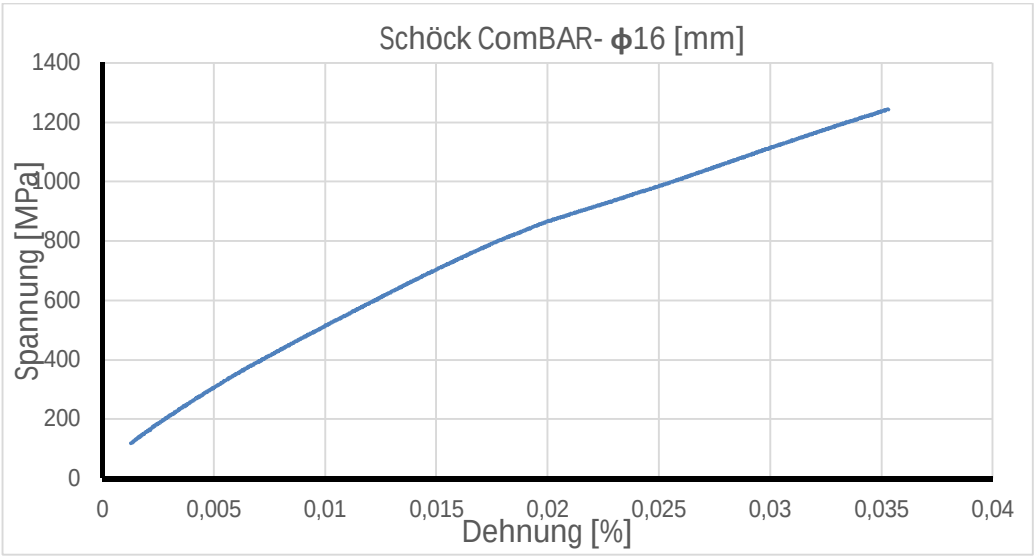


Diagramm 23 Spannungs-Dehnungs-Diagramm aus Zugversuch Schöck ComBAR, Durchmesser: 16mm

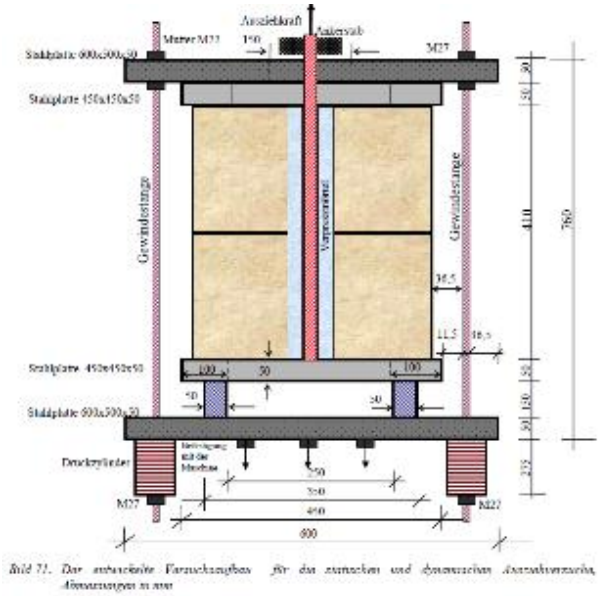


Bild 71. Der entwickelte Versuchsaufbau für die statischen und dynamischen Ausziehversuche, Abmessungen in mm

Bild 121 *Versuchsaufbau für statische Ausziehversuche nach Hamdan [25]*

Bild 122 *Versuchsaufbau Otto Mohr Laboratorium TU Dresden, statische Nadel-Ausziehversuche mit großer Verbundlänge 04.01.2018*

5.2.2.5 Auswertung der Versuche

Durch die verwendeten Dehnmessstreifen-DMS an den GFK-Ankern konnte das Dehnungsverhalten des GFK-Ankers während des Versuches ermittelt werden. Die Versuchskörper wurden bis zum Versagen des Verbundsystems getestet. Die Messwerte der DMS wurden bei einer Ausziehkraft von 100 kN in Betracht genommen (Diagramm 25). Sie beschreiben die Stabdehnung im Verpressmörtel auf der gesamten Stablänge (Diagramm 26).

Aus den gemessenen Dehnungen kann die Verbundspannungsverteilung ermittelt werden. In der Grafik ist die Dehnung über die Stablänge dargestellt mit den daraus ermittelten Verbundspannungen und relativen Verschiebungen. Hierbei wurde die Verbundspannung zwischen den Messstellen der DMS als konstant angenommen. Die hergeleitete Kurve der Stabdehnung über die Verbundlänge konnte empirisch durch eine Funktion beschrieben werden.

Die mittleren gemessenen Dehnungswerte der DMS an jeder Stelle auf den Stab lassen sich aus einer empirischen Beziehung der Änderung der Stabdehnung herleiten. Wenn man die Beziehung als exponentielle Funktion betrachtet, ergibt sich folgende Ausgangsgleichung:

$$\epsilon_s(x) = ax^2 + bx + c \qquad (38)$$

Mit $\epsilon_S(x)$kann der Verlauf der Verbundspannungen hergeleitet werden:

$$\tau_i(x) = \frac{\epsilon_s(x_{i+1}) - \varepsilon_s(x_i)}{\Delta x_i * E * \frac{d}{4}} \qquad (39)$$

sowie die relative Verschiebung:

$$s_i = s_{i-1} + 0{,}5 * (\epsilon_s(x_i) + \epsilon_s(x_{i-1}) * \Delta x_i \qquad (40)$$

5.2.2.5.1 Versuche – Schöck ComBAR, Stabdurchmesser: 16 mm

Verbund	Naturstein-Verpressmörtel, Verpressmörtel- Nadel	
Verbundlänge	400 mm	
Verpressmörtelsorte	HSTV-P01	Trass-Verpressmörtel HS
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 4,05 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 28,5 MPa

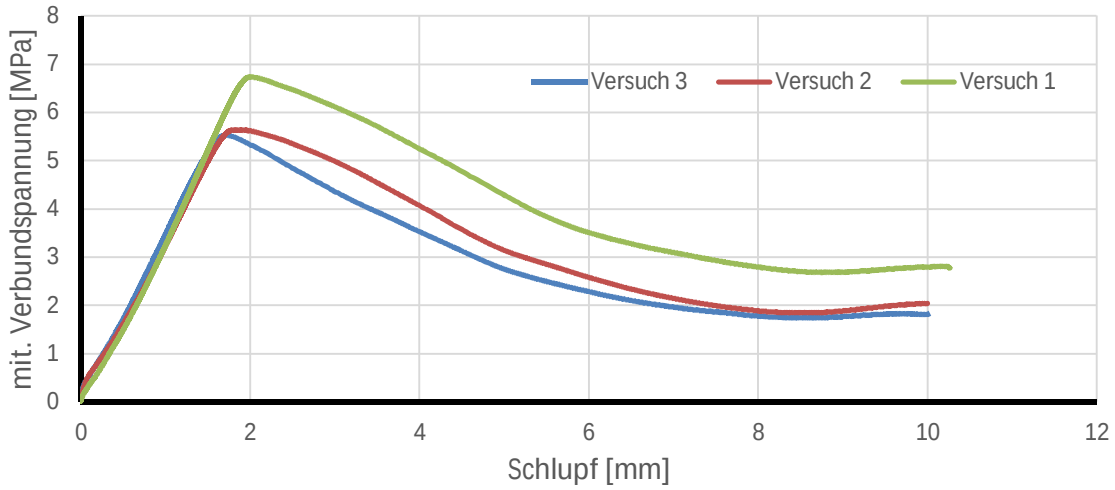


Diagramm 24 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen Natursandstein und Verpressmörtel

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 24 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche mit 16 mm Stabdurchmesser dargestellt. Der Verbund wurde mit einer großen Verbundlänge von 400 mm geprüft. Die Ergebnisse zeigen einen etwa proportionalen Anstieg der Verbundspannungen bis auf 5,5 MPa, bzw.6,8 MPa, bei einem Schlupf von 1,8 bis 1,9 mm (Scherverbund). Nach dem Erreichen des Peaks nehmen, bei zunehmender Verschiebung, die Verbundspannungen ab (Reibungsverbund). Mit den durchgeführten Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass das Verbundsystem bei dem verwendeten Versuchsaufbau und Materialkomponenten am Verbund Nadel/ Verpressmörtel versagte. Die Ergebnisse zeigen eine gute Verbundtragfähigkeit auf.

Bild 123 *geprüfter Versuchskörper 1-3*

Bild 124 *geprüfter Versuchskörper 1-3, Verbundversagen zwischen Verpressmörtel und Bewehrungsnadel*

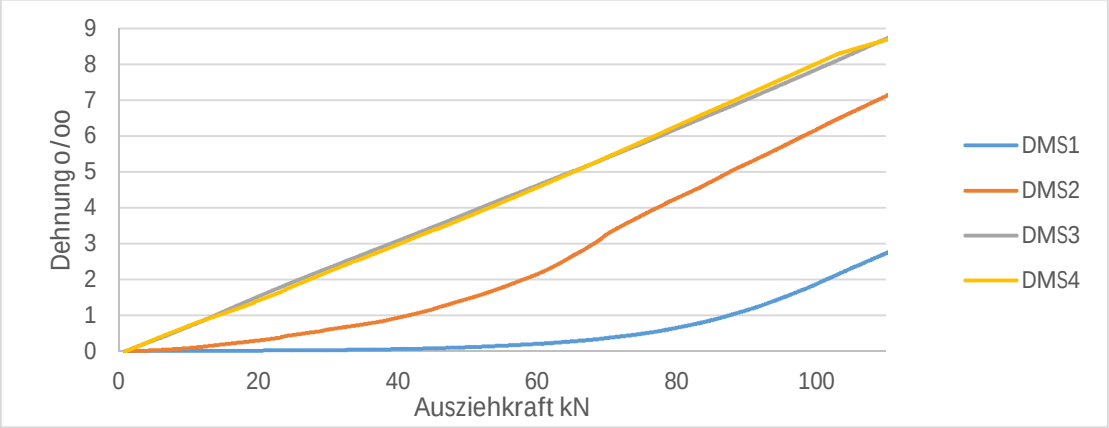


Diagramm 25 Auswertung der mittleren Stabdehnung bei entsprechender Ausziehkraft je DMS; Prüfserie GFK-Anker, Schöck ComBAR, Verbundlänge 400 mm, Verpressmörtel: HSTV-P01; Versuch 1 und Versuch 2

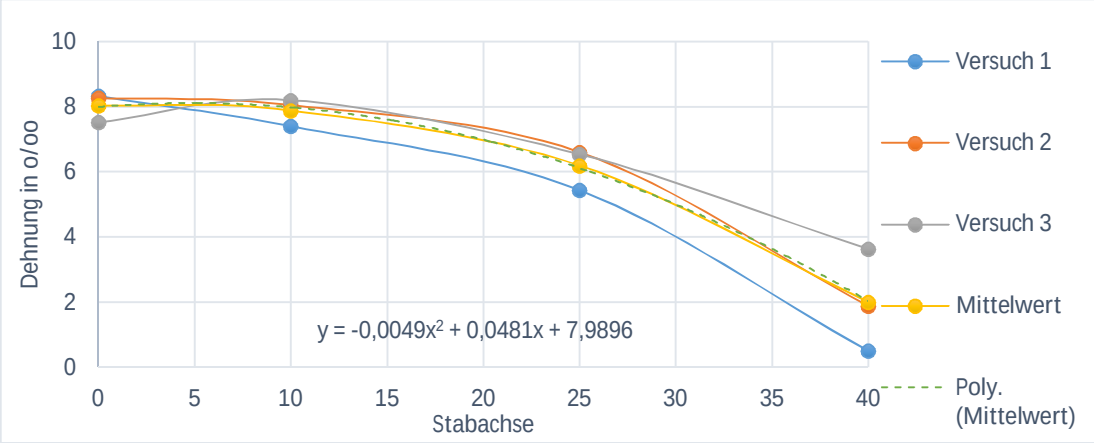


Diagramm 26 Änderung der Stabdehnung über die Verbundlänge; Prüfserie GFK-Anker, Schöck ComBAR 16mm, Verbundlänge 400 mm, Verpressmörtel: HSTV-P01; Versuchsserie 1mit 3 Versuchen

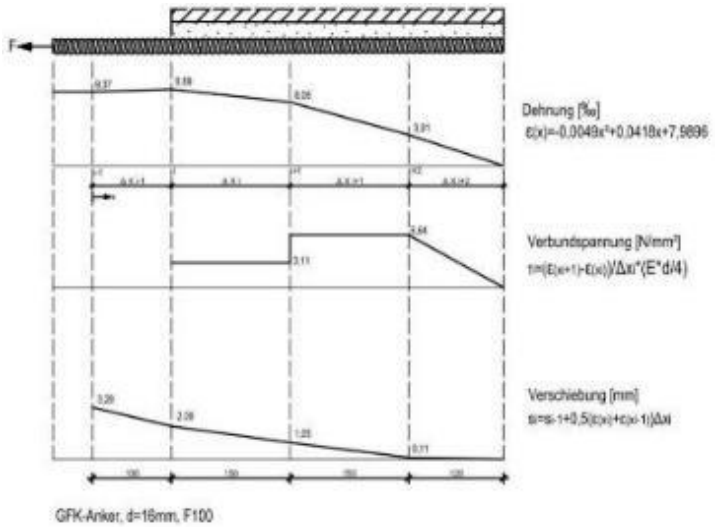


Bild 125 *Ermittlung von Verbundspannung und Verschiebung aus gemessener Stabdehnung nach Hankers [77]*

5.2.2.5.2 FiReP Powerthread K60-27 – Anker, Stabaußendurchmesser 27 mm

Verbund	Naturstein-Verpressmörtel, Verpressmörtel- Nadel	
Verbundlänge	400 mm	
Verpressmörtelsorte	HSTV-P01	Trass-Verpressmörtel HS
	Biegezugfestigkeit:	R_f = 4,05 MPa
	Druckfestigkeit	R_c = 28,5 MPa

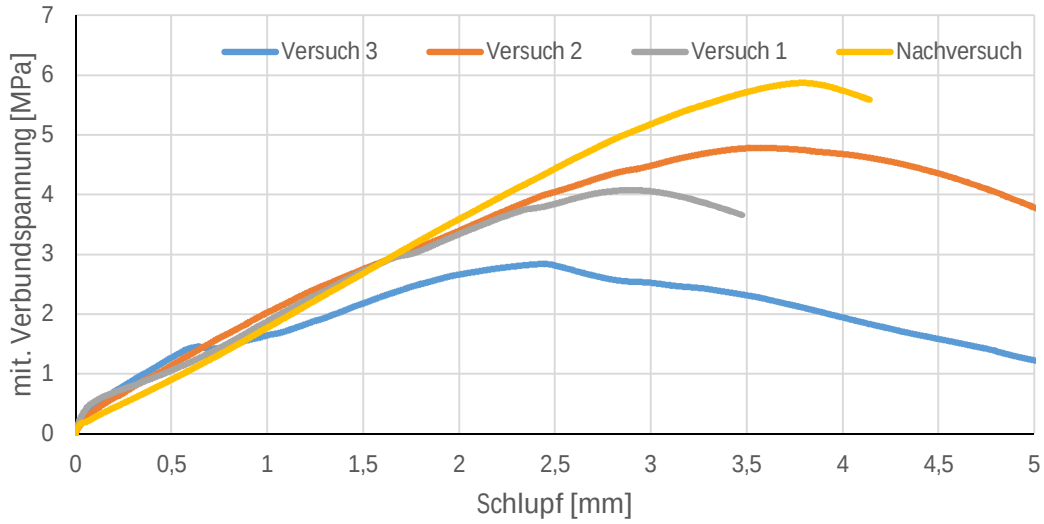


Diagramm 27 Verbundspannung-Schlupf Beziehung zwischen Natursandstein und

Bewertung des Versuchsergebnisses

Im Diagramm 27 sind die Verbundspannungs-Verschiebungs-Kurven der durchgeführten Versuche mit 27 mm Stabdurchmesser dargestellt. Der Verbund wurde mit einer großen Verbundlänge von 425 mm geprüft. Dabei zeigt der Versuch 3 deutlich geringere Verbundspannungen auf, als die Versuche 1, Versuch 2 und der Nachversuch. Die Ergebnisse zeigen einen etwa proportionalen Anstieg der Verbundspannungen bis auf 4,0 MPa, bzw. 2,5 MPa, bei einem Schlupf von 2,1 bzw. 1,8 mm (Scherverbund). Nach dem Erreichen des Peaks nehmen, bei zunehmender Verschiebung, die Verbundspannungen ab (Reibungsverbund). Mit den durchgeführten Versuchen, unter Verwendung der GFK-Bewehrungsstäbe von Firep, konnte nachgewiesen werden, dass das Verbundsystem bei dem verwendeten Versuchsaufbau und Materialkomponenten am Verbund Nadel/Verpressmörtel versagt hat (Bild 126 und Bild 127).

Bild 126 *Geprüfter Versuchskörper 2-2*

Bild 127 *Geprüfter und anschließend gespaltener Prüfkörper 2-3*

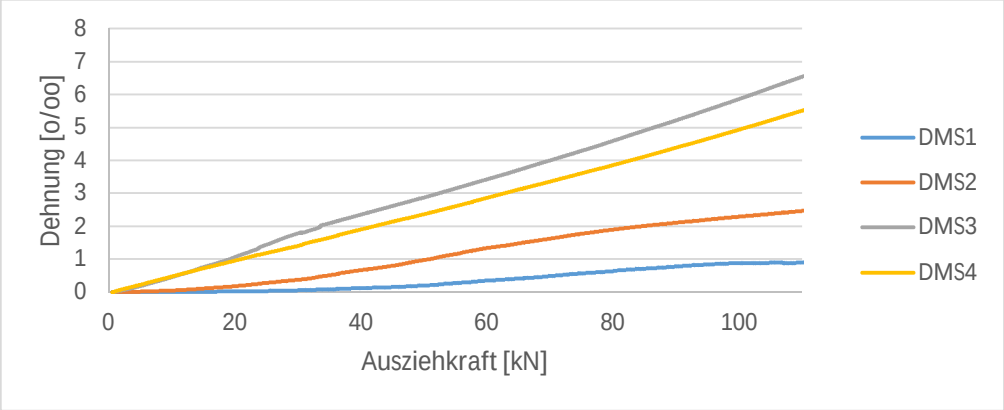


Diagramm 28 Auswertung der Stabdehnung bei entsprechender Ausziehkraft; Prüfserie GFK-Anker, FiReP Powerthread K60-27; d = 27mm, Verbundlänge 425 mm, Verpressmörtel: HSTV-P01; Versuch 1undVersuch 2

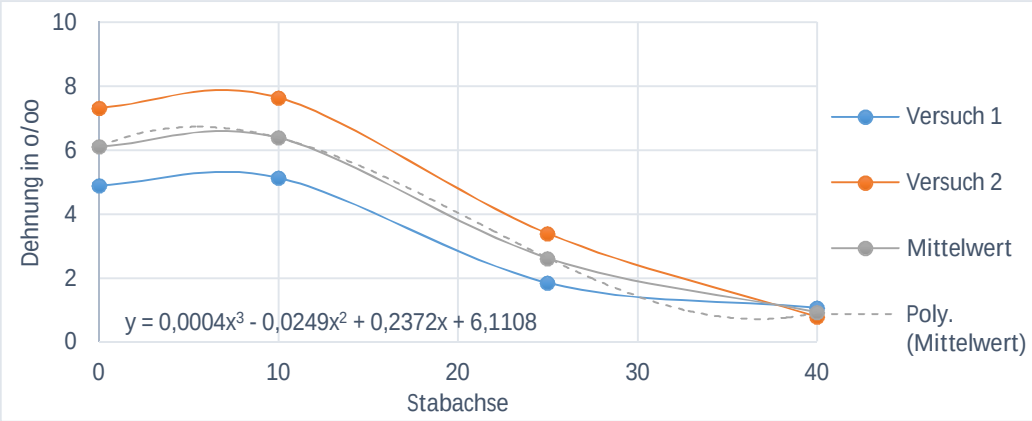


Diagramm 29 Änderung der Stabdehnung über die Verbundlänge, Prüfserie GFK-Anker, FiReP Powerthread K60-27, d=27mm; Verbundlänge 400 mm, Verpressmörtel: HSTV-P01

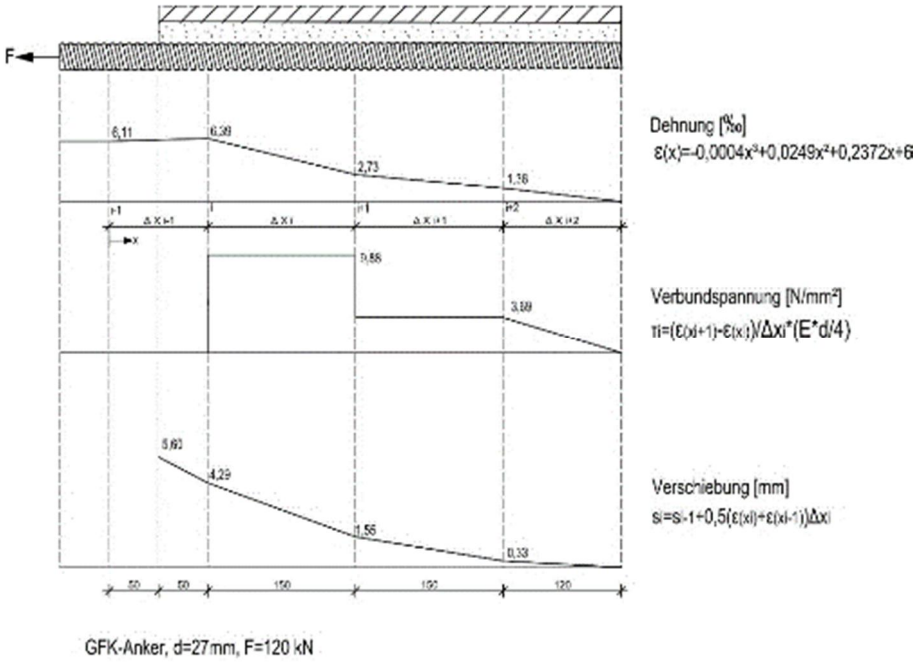


Bild 128 *Ermittlung von Verbundspannung und Verschiebung aus gemessener Stabdehnung nach Hankers [77]*

5.2.3 Auswertung der experimentellen Untersuchungen

5.2.3.1 Mittlere Verbundspannung

Die Ermittlung der mittleren Verbundspannung erfolgt über die experimentell ermittelte Verbundspannungs-Schlupf Beziehung. Der experimentell ermittelte Kurvenverlauf wird mit folgender Ersatzfunktion angenähert:

$$\tau_v(s) = a * s^b * e^{c*s} \qquad (41)$$

Die Anwendung der Ersatzfunktion ermöglicht die Integration der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung bis zum Peak der Kurve.

$$\tau_m = \int_{s_{0,001}}^{s_{max}} \tau_v(s) d_s \qquad (42)$$

Die in Barlet [68] aufgeführten Verfahren nach Rüsch/Leonhardt/Mönnig [69] und Martin [70] beinhalten das Festsetzen der charakteristischen Verbundspannung bei definierten Schlupf-Werten. Die Untersuchungsergebnisse der statischen Ausziehversuche im Natursandstein zeigen einen geringeren Anstieg der Verbundspannungs-Schlupf Kurve als die Versuche in Barlet [68]. Dies begründet sich unter anderem auch an der Art der Ausziehversuche, da Barlet [68] ausschließlich Versuche in der Lagerfuge des Mauerwerkes durchgeführt hat. Für die durchgeführten Ausziehversuche mit unterschiedlichen Verbundversagen und Verpressmörtelsorten bei kurzer Verbundlänge sind folgende mittlere Verbundspannungen τ_m ermittelt worden:

Serie	Materialien	Verbundlänge [mm]	max Verbundspannung [MPa]	t_m [Mpa]	Zul. **T**1 nach Martin (**T**0.2/2) [Mpa]	Zul.T1 nach Brameshuber (2,5)
1	GFK Anker (16 mm) HSTV-P01 Natursandstein	2ds=32 (Anker/Ver. Mör)	6,26	5,28	2,5	2,1
2	GFK Anker (16 mm) HSTV-P01 Natursandstein	2ds=32 (Stein/Ver. Mör)	5,77	4,50	2,1	1,8
3	GFK Anker (16 mm) HSTV-P01 Natursandstein	5ds=80 (Anker/Ver. Mör)	6,15	5,28	2,5	2,1
4	GFK Anker (16 mm) HSTV-p01, Natursandstein	5ds=80 (Stein/Ver. Mör)	4,55	3,10	1,5	1,24
5	GFK Anker (16 mm) HSV-p01 Natursandstein	2ds=32 (Anker/Ver. Mör)	1,72	0,97	0,5	0,68
6	GFK Anker (16 mm) HSV-p01 Natursandstein	2ds=32 (Stein/Ver. Mör)	0,1	0,8	0,0	0,32
7	GFK Anker (16 mm) NHL-g01 Natursandstein	2ds=32 (Anker/Ver. Mör)	1,37	0,13	0,1	0,05
8	GFK Anker (16 mm) NHL-g01, Natursandstein	2ds=32 (Stein/Ver. Mör)	1,19	0,84	0,4	0,33
9	GFK Anker (16 mm) CASEA Natursandstein	2ds=32 (Anker/Ver. Mör)	5,82	4,34	2,1	1,73
10	GFK Anker (16 mm) CASEA Natursandstein	2ds=32 (Stein/Ver. Mör)	3,1	2,23	1,1	0,89

Tabelle 15 *Vergleich der Ergebnisse aus unterschiedlichen Untersuchungen*

5.2.3.2 Schrittweise Integration mittels Verbundgrundgesetzen

Die schrittweise Integration auf Grundlage von Martin ermöglicht die Ermittlung der Stabspannungs-, Verbundspannungs- und Verschiebungsverläufe entlang des Bewehrungsstabes unter Anwendung der Verbundgrundgesetze. Mit den Ergebnissen der durchgeführten Ausziehversuche konnte die Verbundspannungs-Schlupf Beziehung dargestellt werden. Mit der in Barlet [1] beschriebenen Vorgehensweise der schrittweisen Integration kann die mittlere Verbundspannung ermittelt werden. Zunächst wurde eine Ersatzfunktion zur vorhandenen Verbundspannungs-Schlupfkurve festgelegt. Folgender Regressionsansatz (Gl. (40)) wurde angewendet:

$$\tau(s) = a * s^b * e^{c*s} \qquad (40)$$

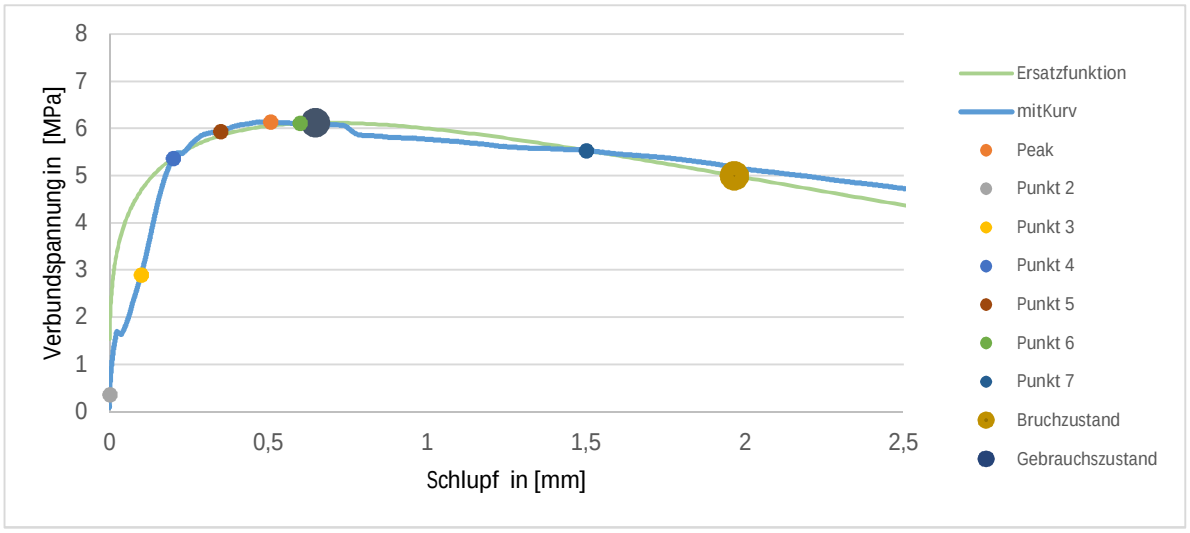


Diagramm 30 Verbundspannungs-Schlupf-Kurve und Ersatzfunktion der Versuchsserie 3, HSV-P01, 5 ds

Die Festlegung von Kriterien für den Gebrauchszustand und den Bruchzustand der Bewehrungsstäbe wurde nach Brameshuber [13] wie folgt festgelegt:

Gebrauchszustand:	Verschiebung am unbelasteten Stabende:	s=0,001mm
	Stabspannung am belasteten Ende:	σ= 0 N/mm²
	Stabspannung am belasteten Stabende:	$\sigma_{s,u}=\frac{f_{yk}}{\gamma_{GZG}}$N/mm²
		$\sigma_{s,s}$=331N/mm²
Bruchzustand:	Verschiebung am unbelasteten Stabende:	s= 0,1 mm
	Stabspannung am belasteten Ende:	σ= 0 N/mm²
	Stabspannung am belasteten Stabende:	$\sigma_{s,u}$= f_{yk}
		$\sigma_{s,u}$= 580N/mm²

Der in Barlet [68] beschriebene Algorithmus wird für die hier durchgeführten Ausziehversuche wie folgt verwendet:

$$\tau_i = \tau(s_i) \qquad (43)$$

$$\sigma_i = \sigma_{B,i-1} + d_{\sigma i}$$
$$\sigma_i = \sigma_{i-1} + (\sigma_{B,i-1} + 4 * \Delta x * \frac{\tau_{i-1}+\tau_i}{2} / d_B) \qquad (44)$$

$$s_i = s_{i-1} + d_{si}$$
$$s_i = s_{i-1} + \left(\sigma_{B,i-1} + \sigma_i\right) * \Delta x / (2 * E_{B)} \qquad (45)$$

Die Ermittlung der Verbundspannung und der mittleren Verbundspannung erfolgt auf Grundlage der in DIN EN 1996 [2] :

$$l_b = \frac{max\sigma_B * d_B}{4 * \tau_m} \qquad (46)$$

$$\tau_m = \frac{\sigma_{B,s} * d_B}{4 * l_{b,maßg.}} \qquad (47)$$
$$mit\ l_{b,maßg.} = max\{l_{b,s}, l_{b,u}\}$$

Die Vorgehensweise der schrittweisen Integration ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

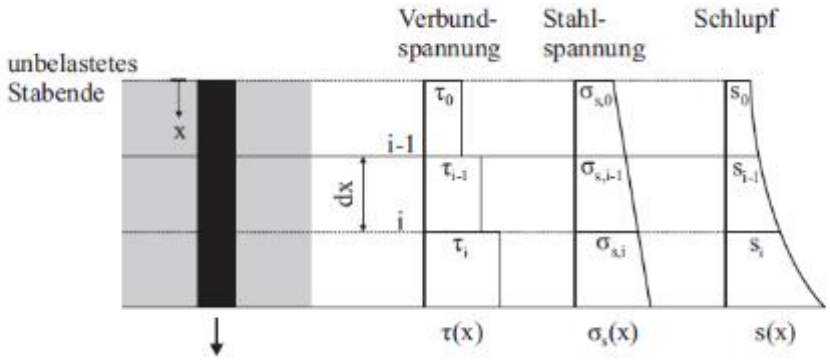


Bild 129 *Schrittweise Integration entlang der Verbundlänge nach Martin [67]*

5.2.3.3 Zusammenfassung

Im Rahmen der durchgeführten Versuche wurde das Verbundverhalten im Verbundsystem unter variierenden Parametern untersucht.

Folgende Parameter wurden untersucht:

- unterschiedlichen Verbundarten
  (Anker/Nadel – Verpressmörtel; Verpressmörtel – Natursandstein)
- variierende Verbundlängen
  (2ds, 5ds, 25 ds)
- variierende Stabdurchmesser
  (Ø 8 mm, Ø 16 mm, Ø 27 mm)
- variierende Faserverbundwerkstoffen
  (Anker/Nadeln aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) und kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK))
- variierende Profilierung der Stäbe
- variierende Verpressmörtel mit unterschiedlichen Druckfestigkeiten
  (HSTV–P01, HSV –P01, NHLV-g01, casusan HGE)

Die durchgeführten Ausziehversuche mit variierenden Parametern ermöglichen eine genaue Betrachtung des komplexen Verbundverhaltens zwischen Natursandstein, Verpressmörtel und Anker aus Faserverbundwerkstoffen.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Ausziehversuche mit den GFK-Anker Schöck ComBAR, Durchmesser 16 mm, variierenden Verpressmörtelsorten und Natursandstein mit unterschiedlichen Verbundlängen dargestellt.

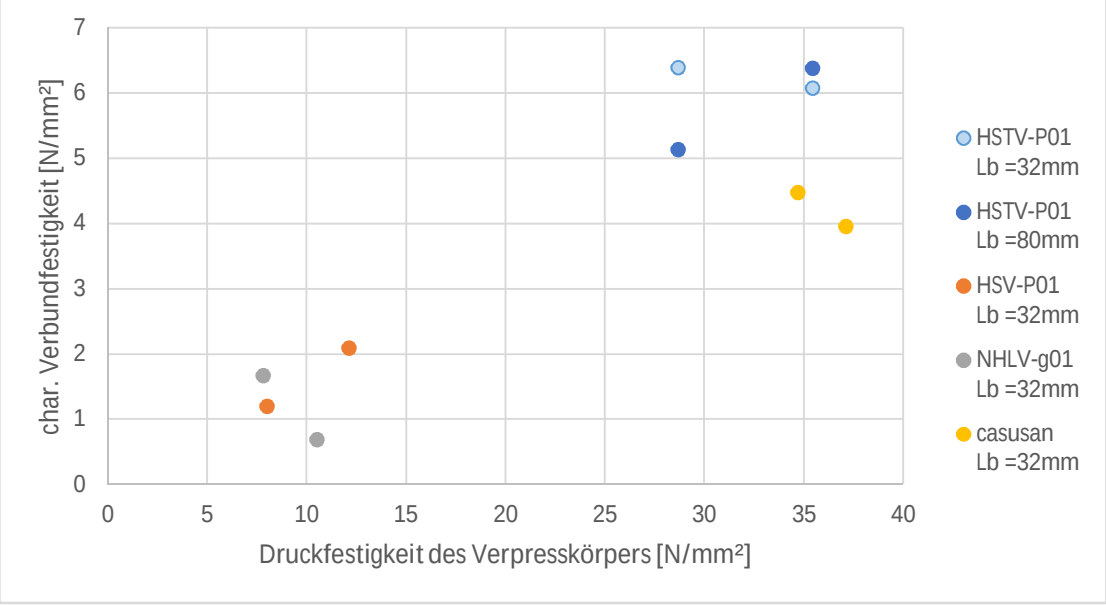


Tabelle 16 *charakteristische Verbundfestigkeiten im Verbund Stab/Verpressmörtel in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des Verpresskörpers und der Verbundlänge für die untersuchten GFK-Stäbe, Durchmesser 16mm*

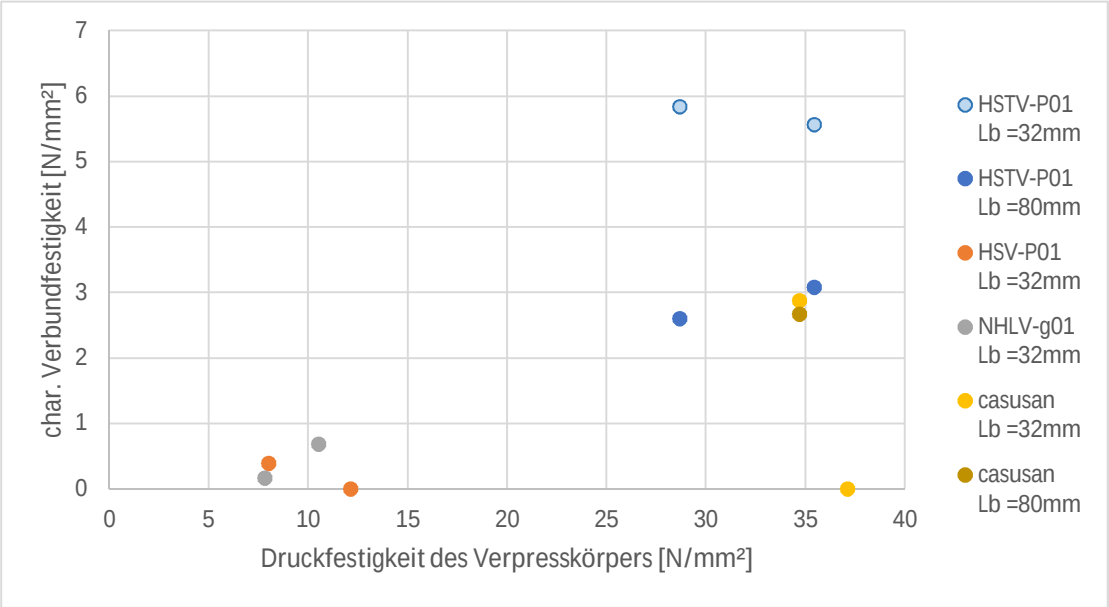


Tabelle 17 *charakteristische Verbundfestigkeiten im Verbund Stein/Verpressmörtel in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des Verpresskörpers und der Verbundlänge für die untersuchten GFK-Stäbe, Durchmesser 16mm*

Die Ergebnisse der statischen Stab-Ausziehversuchen zeigen, dass die charakteristische Verbundfestigkeit bei den verwendeten Mörtelsorten mit hoher Druckfestigkeit einen höheren Wert annimmt als bei den Mörtelsorten mit geringer Druckfestigkeit. Dies gilt sowohl für den Verbund Stab/Verpressmörtel als auch für den Verbund Natursandstein/Verpressmörtel. Jedoch sind die erzielten Verbundspannungen im Verbund Stein/Verpressmörtel deutlich geringer. Der Einfluss der Verbundlänge auf die Verbundspannungen ist im Verbund Stab/Verpressmörtel gering. Im Verbund Natursandstein/Verpressmörtel hingegen lässt sich ein Zusammenhang von Verbundlänge und Verbundfestigkeit feststellen.

Weiterhin konnte das Verbundverhalten zwischen Nadeln aus unterschiedlichen Faserverbundwerkstoffen und unterschiedlicher Profilierung analysiert werden. Zu Vergleichen sind GFK Nadeln Schöck ComBAR mit Durchmesser 8 mm und CFK Nadeln Carbon4ReBAR des Herstellers Thyssen Krupp, Durchmesser 8 mm mit unterschiedlicher Profilierung bei einem zu prüfenden Verbund von Anker-Verpressmörtel.

Die verwendeten Nadeln aus unterschiedlichen Material und Profilierung weisen ähnliche Verbundeigenschaften auf. Die Verbundspannungen der geprüften Verbundlängen sind ähnlich. Bei einer Verbundlänge von 5 ds sind die Verbundspannungen geringer.

Materialien	Verbundart	charak. Verbundspannungen [MPa]	
		2ds	5ds
GFK-Nadel 8 mm Durchmesser, HSTV-P01 Verpressmörtel, Natursandstein	Anker/Verpressmörtel	5,45	3,93
CFK-Nadel 8 mm Durchmesser, HSTV-P01 Verpressmörtel, Natursandstein	Anker/Verpressmörtel	7,85	5,71

Tabelle 18 *Vergleich der charak. Verbundspannungen bei variierenden Faserverbundwerkstoffen*

5.3 Zwischenfazit

Das Verbundverhalten im Verbundsystem unter variierenden Parametern wurde anhand der durchgeführten Versuche untersucht. Zunächst wurde die Mauerwerkbewehrung betrachtet. Hier wurde der Einfluss der Verbundlänge auf die entstehende Verbundspannung zwischen horizontal angeordneter Stahlbewehrung und dem Mörtel im Mauerwerk festgestellt. Die hier erzielten Ergebnisse bestätigen i.W. im Gegensatz zu [59], dass die Verbundspannungen auf der Grundlage der Erkenntnisse von Rehm an Verbundkörpern mit einer Verbundlänge von 2 ds bis maximal 5 ds durchzuführen sind.

Die Untersuchung des Verbundverhaltens im Natursteinmauerwerk unter Variation der Mörtelsorten, Faserverbundbewehrung und Verbundlänge wurde ebenfalls im statischen Stab-Ausziehversuch durchgeführt.

Die Ergebnisse müssen vor allem in Bezug auf die Mörtelsorte differenziert betrachtet werden. Hier konnte nur der Trass-Kalk-Mörtel (HSTV-P01) stabile Ergebnisse vorweisen. Der Abgleich mit früheren Untersuchungen von Gigla [63] zeigt vergleichbare Ergebnisse.

Der verwendete Gipsmörtel casea casusan HGE weist ebenfalls gute Ergebnisse der Verbundspannungen zwischen Stab und Verpressmörtel auf. Der maßgebende Verbund zwischen Naturstein und Verpressmörtel zeigt instabile Ergebnisse der Verbundspannung. Dieser Problematik muss weitere Bedeutung beigemessen werden, da hier bessere Ergebnisse erstrebenswert sind. Durch die Anpassung des W/B-Wertes in Bezug auf das tatsächliche Saugverhalten des Natursandsteins konnten die Verbundspannungen im geringen Maß stabilisiert und verbessert werden, jedoch konnten auf Grundlage dieser, in geringer Anzahl durchgeführten Versuche, keine präzise Vorgehensweise zur Bemessung der Verbundspannungen mit Gipsmörtel erfolgen.

6 Untersuchung des Vorspannverhaltens von Ankern aus Faserverbundwerkstoffen

6.1 Allgemeines

Das Vorspannen von Mauerwerk als technologische Methode ist für die ingenieurmäßige Sicherung von Bestandsmauerwerk, aber auch im Neubau anwendbar. Durch das Spannen von Zugglieder, in diesem Fall Stabanker aus faserverstärktem Kunststoff, werden Druckkräfte in das Mauerwerk eingeleitet. Aufgrund der geringen Zugfestigkeit des Mauerwerkes werden Druckspannungen unter der Anwendung der Vorspannung in das nicht zugfeste Material eingeleitet, sodass vorhandene Risse geschlossen werden können

6.2 Stand der Forschung

Die Vorspannung von Bauteilen mittels Stahlbewehrung ist ein bereits Stand der Technik. Im Massivbau, vor allem im Bereich des Brückenbaus werden Stahllitzen mittels Hohlzylinderpressen vorgespannt. Das Halten der Vorspannkraft erfolgt über entsprechende Endverankerungen ohne Verbund bzw. mit Verbund über die gesamte Länge der Stahllitze. Nun ist die Übertragung der ingenieurtechnischen Erfahrungen auf die Anwendung von Faserverbundwerkstoffe, speziell im Mauerwerksbau notwendig. Faserverbundwerkstoffe, z.B. glasfaserverstärkte Kunststoffe bzw. kohlefaserverstärkte Kunststoffe, besitzen aufgrund ihrer Materialeigenschaften ein gutes Tragverhalten bei Zugbeanspruchung und benötigen kein alkalisches Milieu zum Korrosionsschutz. Durch die hohe Korrosionsbeständigkeit der Faserverbundwerkstoffe gegenüber Feuchtigkeit ist die Anwendung von zementhaltigen Verpressmörtels bzw. aufwendigen Korrosionsschutz nicht erforderlich. Dies ermöglicht die Anwendung im sulfathaltigen Bestandsmauerwerk.

Die Untersuchung des technologischen Verfahrens beinhaltet zunächst das Verhalten des Materials unter Vorspannung.

6.3 Technologie des Vorspannens

6.3.1 Vorspanntechnik

Die Einleitung der Vorspannkraft kann mit unterschiedlichen Spannwerkzeugen erfolgen. Für das Spannverfahren werden neben dem Spannglied auch ein Fest- bzw. ein Losanker ggf. auch Kopplungen benötigt.

Als Spannvorrichtung werden im Allgemeinen Hohlkolbenzylinder mit Stromanschluss aber auch mit Handbetrieb verwendet. Alternativ dazu ist vorrichtungsfreie Einleitung der Spannkraft mittels Drehmomentenschlüssel möglich, wozu aber die Problematik der Auflösung des inneren Verbundes der Anker infolge des eingetragenen Drehmomentes zu beantworten ist. Sollte das negativ ausgehen, ist eine Gewindestange oder -hülse an dem Spannende zu applizieren [siehe Mauerwerksertüchtigung durch Vorspannung mit Aramidstäben, Mauerwerk-Kalender], deren Ende sich frei um die Achse drehen kann.

6.3.2 Vorspannen mit Verbund

Das Vorspannen mit Verbund ermöglicht die Einleitung großer Vorspannkräfte in das umliegende Mauerwerk, über eine entsprechende Verbundlänge zwischen Anker und Verpressmörtel, bzw. zwischen Verpressmörtel und Mauerwerk. Die Vorspannung wird zunächst in den Anker eingeleitet und durch den nachträglichen Verbund kraftschlüssig in das umliegende Mauerwerk eingebracht. Durch den Verbund über die gesamte Spanngliedlänge wird das Mitwirken des Mauerwerkes beim Lastabtrag verbessert. Der konzentrierte Lasteintrag der Vorspannung über Ankerplatten entfällt.

6.3.3 Vorspannen ohne Verbund

Bei der Methode des Vorspannes ohne Verbund wird zunächst die entsprechende Ankerkraft durch eine mechanische Spannvorrichtung eingebracht. Die Endverankerungen werden durch Ankerplatten realisiert. Der Vorteil des Vorspannens ohne Verbund besteht in der Möglichkeit, dass die Spannglieder nachgespannt werden können.

6.4 Experimentelle Untersuchungen zum Vorspannverhalten von Faserverbundwerkstoffen

6.4.1 Vorspannsystem

Die experimentellen Untersuchungen wurden unter Verwendung von GFK-Ankern mit Endverankerung durchgeführt. Ziel war es, eine gewisse Vorspannung in das Mauerwerk zu leiten, um die Anker sofort bei Beanspruchung wirksam zu haben. Ist der Anker nicht vorgespannt, treten Verformungen in einer Größenordnung auf, die zu neuen Rissen im Mauerwerk führen. Um die Technologie kostenmäßig und praxisnah zu beherrschen, kann die Vorspannung über einen Drehmomentschlüssel eingetragen werden.

Die Vorspannversuche werden mit Felsankern aus glasfaserverstärktem Kunststoff des Herstellers FiReP International AG durchgeführt. Die GFK Anker Spinbolt K61-32 weisen eine hohe Torsionsfestigkeit der inneren Matrix auf.

Produkt	Außendurchmesser	mechanische Eigenschaften
FiReP GFK-Anker Spinbolt K61-32(R) Felsanker aus glasfaserverstärktem Kunststoff	32 mm	Effektive Zugfestigkeit: σ_{eff} = 300 kN Torsionsfestigkeit: M_T = 320 Nm
FiReP GFK-Mutter GFRP Nut for K61-32 (R)	SW 46 mm	Bruchlast: mind. 100kN Überdrehungsschutz: M_T = 200 Nm
FiReP GFK-Ankerplatte GFRP Plate for K61-32 (R)	200 mm	Bruchlast: mind. 100 kN

Bild 130 *Spinbolt K61-32(R)*

Bild 131 *GFRP Nut for K61-32 (R) und GFRP Plate for K61-32 (R)*

6.4.2 Dauerstandversuche

6.4.2.1 Ziel der Versuche

Im Rahmen der Untersuchungen zum Vorspannverhalten von Faserverbundwerkstoffen im Mauerwerk wurden Dauerstandversuche durchgeführt. Für die Untersuchung der Dauerfestigkeit wurden die Anker unter konstanter, ruhender Belastung im Mauerwerk gestellt. Dabei treten Dehnungen im Werkstoff auf, die im Laufe der Zeit einen sehr geringen Betrag annehmen. Als Ergebnis der Untersuchungen zum Dauerstandverhalten konnte die Stabdehnung in Abhängigkeit der Zeit ermittelt werden. Die Schwierigkeit im Mauerwerkbau besteht darin, dass Kriechen und Schwinden im Mauerwerk die aufgebrachte Vorspannung auf den Anker reduziert. Zur Sicherstellung einer annähernd konstanten Vorspannkraft im Anker wurde diese mittels elektronischen Drehmomentschlüssels in kurzen Abständen über die Versuchsdauer kontrolliert und gegebenenfalls angepasst. Dabei können die Einflüsse aus Kriechen und Schwinden im Mauerwerk für den Versuch reduziert werden.

Die Dehnungen im Anker, infolge der aufgebrachten Vorspannkraft, wurden durch Dehnungsmessstreifen (DMS) im Anker erfasst.

Mit dem durchgeführten Messprogramm konnte die Dauerstandfestigkeit der Anker im Mauerwerk untersucht werden. Das Nachstellen der Anker für eine konstante Ankerkraft garantierte eine nahezu konstante Vorspannkraft für die Ermittlung der Dauerstandfestigkeit.

6.4.2.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Mit den durchgeführten Dauerstandversuchen wurde sowohl das Dauerstandverhalten der GFK-Anker, als auch die technologische Umsetzung des Vorspannens mittels Drehmomentschlüssel untersucht. Für die Untersuchung des Dauerstandverhaltens wurden 3 Versuchskörper aus Natursandstein hergestellt.

Jeder Versuchskörper besteht aus drei Lagen Sandsteinquader. Jede Lage wurde separat im Kernbohrverfahren, ohne Mörtel, mittig gebohrt. Dieser Arbeitsschritt musste aufgrund der Versuchskörpergeometrie durchgeführt werden. Die Anwendung des Kernbohrverfahrens nach der Herstellung der Versuchskörper hätte eine eventuelle Schädigung des Mauerverbandes durch Vibrationen im Bohrvorgang zur Folge gehabt.

Mit den hergestellten Versuchskörpern konnte eine freie Länge der GFK- Anker von 630 mm sichergestellt werden.

Als Mauermörtel wurde Trass-Kalk-Mörtel verwendet. Im Lasteinleitungsbereich der Ankerplatten wurde eine 1-2 cm dicke Ausgleichslage aus Mörtel hergestellt. Die GFK-Anker wurden ohne Verbund in die Bohrlöcher eingebracht.

Bild 132 *Gesägte Natursandquader für Dauerstandversuche*

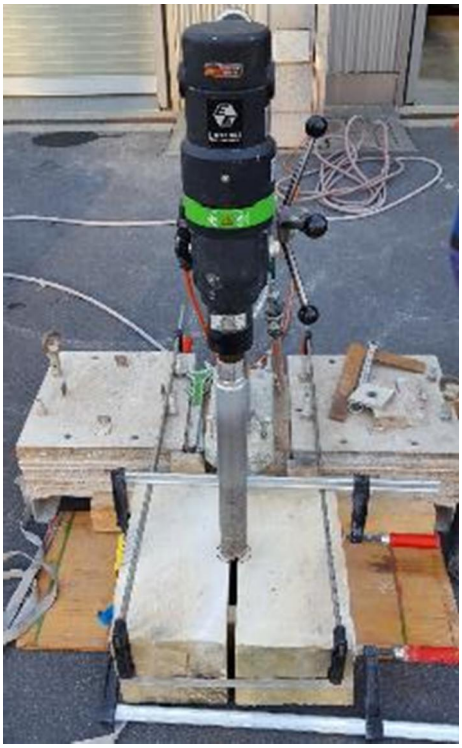


Bild 133 *Darstellung des Kernbohrverfahrens für die verwendeten Natursandsteine bei Dauerstandversuchen*

Bild 134 *aufgemauerte Versuchskörper für die Dauerstandversuche*

Die Vorspannkraft wurde über die GFK-Muttern und die lastverteilenden Ankerplatten in den Mauerwerksprüfkörper geleitet.

Vorspannkraft

Die Vorspannkraft wird dabei über die GFK-Mutter und einem Drehmomentschlüssel sukzessive in die Anker eingetragen. Über den Versuchszeitraum wird eine konstante Vorspannkraft vorausgesetzt. Mittels elektronischen Drehmomentschlüssels kann in einem entsprechenden Überwachungsintervall das Drehmoment, somit die Vorspannkraft, überprüft werden und gegebenenfalls nachgestellt werden.

Für die untersuchten GFK-Anker ist die Überdrehungsgrenze der GFK-Muttern aktuell maßgebend. Im Tastversuch lag diese Grenze bei M_a= 300 Nm. Damit können große Verformungen und Risse im Mauerwerk verhindert werden. In den Dauerstandversuchen wird ein Drehmoment M_a von 250 Nm mittels Drehmomentschlüssel aufgebracht.

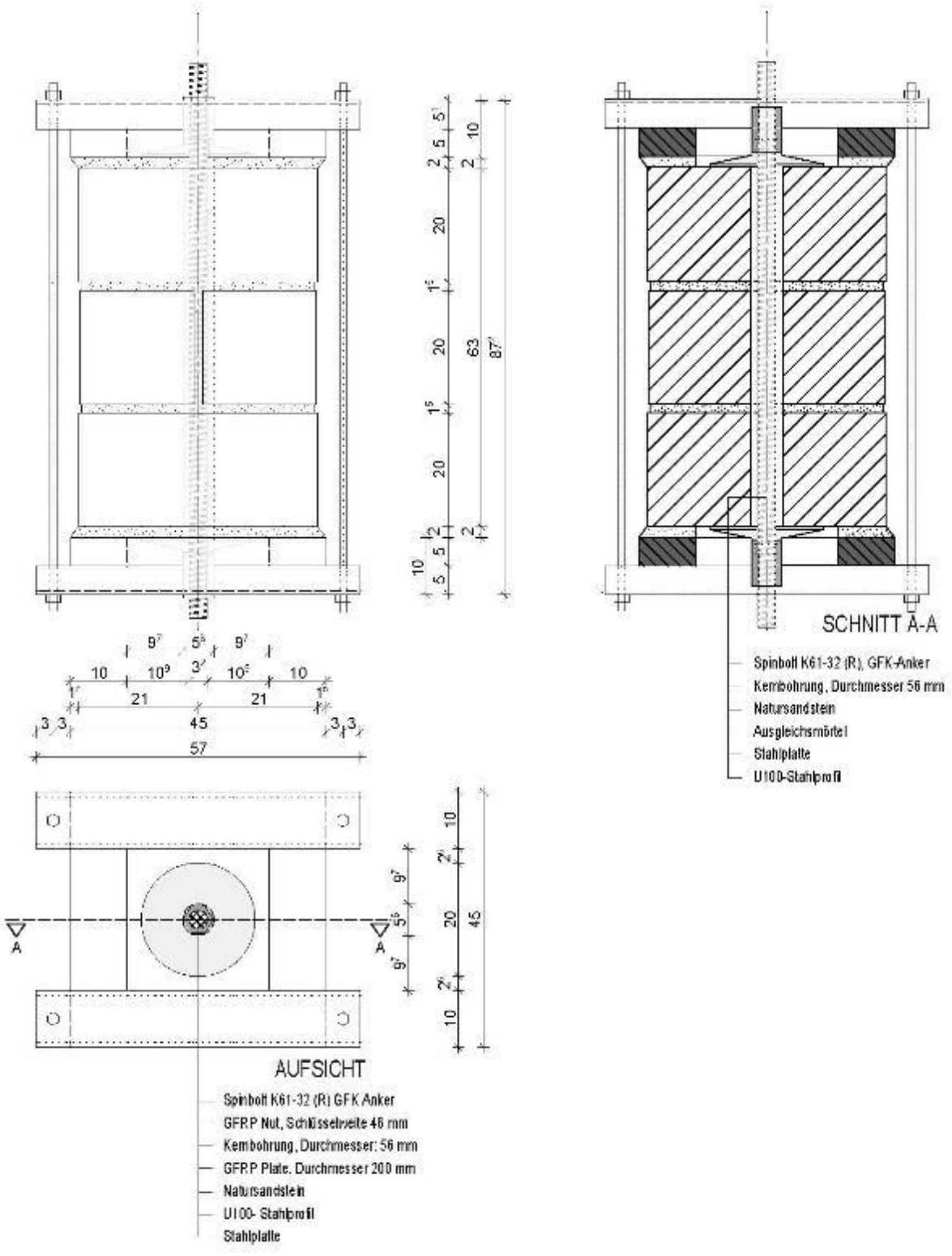


Bild 135 *Skizze des Versuchsaufbaues der Dauerstandversuche*

6.4.2.3 Messtechnik

Elektronischer Drehmomentschlüssel:

Für das Aufbringen der Vorspannkraft mittels Drehmoment wird ein elektronischer Drehmomentschlüssel mit einer Anzeigegenauigkeit von 0,1 Nm verwendet. Die zeitgenaue Anzeige des Drehmomentes ermöglicht ebenfalls das Überprüfen der Vorspannkraft über den Versuchszeitraum. Bei Abweichungen des aufgebrachten Drehmomentes kann gegebenenfalls eine Anpassung vorgenommen werden, sodass eine konstante Vorspannkraft garantiert werden kann.

Verwendet wurde folgender Drehmomentschlüssel:

Elektronischer Drehmomentschlüssel

TORCTRONIC III – TT3KH, Gedore [80]

Umschaltknarre: ½ Zoll

Drehmoment: 70-350 Nm

Messgenauigkeit: +/- 1%

Bild 136 *Elektronischer Drehmomentschlüssel*

Dehnmessstreifen:

Zur Ermittlung der Dehnung im Anker wurden Dehnmessstreifen in Stabmitte eingeklebt. Während des Versuches werden die Messergebnisse der Dehnmessstreifen auf einen Datenlogger überspielt. Für die Versuche wurden folgende Dehnmessstreifen verwendet:

DMS FLK-2-11. [81]

Bild 137 *Eingeklebter Dehnungsmessstreifen in GFK-Anker*

Setzdehnungsmesser:

Um ein ggf. eintretendes Zugkriechen der Anker und den damit verbundenen Verlust an Vorspannkraft vom Kriechen des Mauerwerks separieren zu können, werden vor

Lasteintragung, d.h. also vor Anspannen der Anker Setzdehnungspunkte über die Fugen geklebt, um dann den Kriecheinfluss des Mauerwerks feststellen zu können. Bei den Steinen, die für die Herstellung der Versuchskörper verwendet wurden, handelt es sich um kieselig gebundenen Schlesischen Sandstein, der mit dem Sächsischen Sandstein Postaer Varietät vergleichbar ist. Auf Grund der Vorbelastung in der Lagerstätte kriecht dieser Stein nicht mehr. Entsprechende Untersuchungen zum Kriechverhalten wurden am Lehrstuhl Tragwerksplanung in Vorbereitung des Wiederaufbaus der Frauenkirche in Dresden durchgeführt, die für dieses Vorhaben herangezogen werden können (vgl. *Jäger/Pohle* [79])

Bild 138 *Setzdehnungsmesser zur Messung der Dehnungen einer Fuge im Einsatz*

6.4.2.4 Auswertung der Dauerstandversuche

Die Grundlage für die Ermittlung der Dauerstandfestigkeit nach diesem Verfahren bildet die Aufnahme von Zeit-Dehnungs-Schaulinien. Die Schwierigkeit im Mauerwerkbau bestand darin, dass Kriechen und Schwinden im Mauerwerk die aufgebrachte Vorspannung auf den Anker reduziert. Die Einflüsse aus dem Schwinden der Mauerwerkskörper konnte durch intervallmäßige Messungen der Höhe erfasst werden. Der Ausgleich der Vorspannverluste im Versuch erfolgte durch regelmäßiges Überprüfen und Nachziehen der GFK Mutter mit einem elektronischen Drehmomentschlüssel, sodass über den Versuchszeitraum eine konstante Vorspannkraft angenommen werden kann.

Bild 139 *Eingebautes Ankersystem-Dauerstand-versuch-PK1*

Bild 140 *Eingebautes Ankersystem-Dauerstand-versuch-PK2*

Bild 141 *Eingebautes Ankersystem-Dauerstand-versuch-PK3*

Die Versuchskörper bleiben noch ein Jahr stehen. Sofern sich dann noch Veränderungen ergeben, werden die Messungen weitergeführt oder abgebrochen. Die Ergebnisse werden der Fachöffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

6.4.3 Torsionsfestigkeit

Wenn die Anker mit dem Drehmomentschlüssel angezogen werden sollen, müssen sie torsionsfest sein. Für bisher im Einsatz gewesene Faserprodukte konnte diese Torsionsfestigkeit nicht garantiert werden. Es bestand die Gefahr, dass die Matrix der Stäbe entfestigt und somit die Vorspannung nachlässt, wobei das Ganze bis zur völligen Zerstörung der Ankerstäbe führen kann. Die jetzt für diesen Zweck entwickelten und verfügbaren Ankerstäbe weisen dieses Phänomen nicht mehr auf. Jedoch geht es darum, diesen Fakt durch eigene Überprüfungen zu bestätigen.

6.4.3.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Ermittlung der Torsionsfestigkeit erfolgte unter Verwendung einer Tension-Torsion Prüfmaschine. Dabei wurde der Prüfkörper Torsion beansprucht.

Mit dem ausgewählten Prüfverfahren kann die Belastung der Anker aus glasfaserverstärktem Kunststoff beim Aufbringen einer Vorspannkraft mittels Drehmomentschlüssel simuliert werde. Für die Einleitung der Torsions Beanspruchung wurden die Stabenden mit Stahlhülsen (D x H = 50 mm x 100 mm) kraftschlüssig verbunden. Dies erfolgte unter Verwendung eines Epoxidharzklebstoffes. Die freie Stablänge wurde im Versuch mit 800 mm festgelegt.

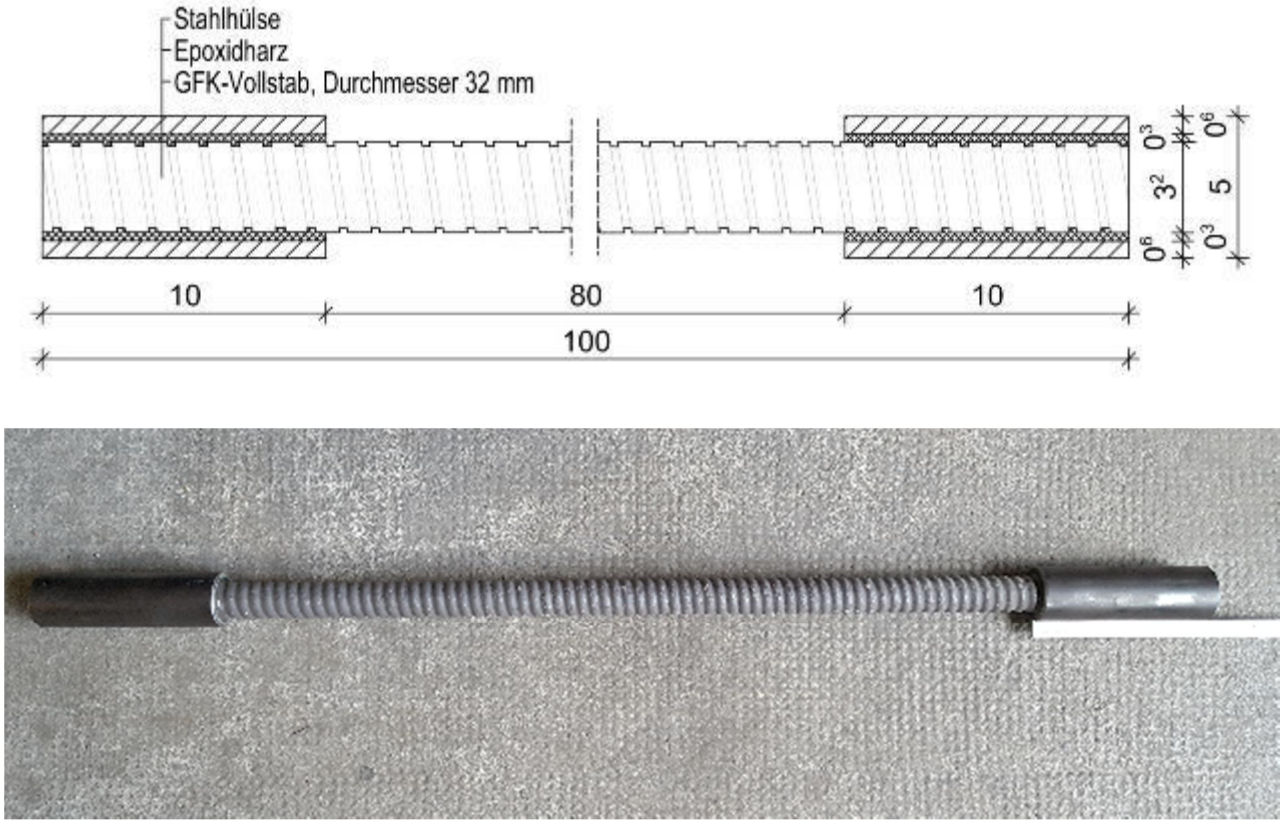


Bild 142 *Prüfkörper: Anker mit beidseitig, kraftschlüssig angebrachten Stahlhülsen*

Die Versuche wurden in Kooperation mit der Fakultät Maschinenbau, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik an der Technischen Universität Dresden durchgeführt. Die vorbereiteten Anker werden beidseitig in de Tension-Torsion Prüfmaschine eingespannt.

Folgende Prüfserie wurde unter Beachtung der tatsächlichen Beanspruchungsmechanismen der Vorspanntechnik überprüft:

Versuchsserie 6 x Torsion

Bild 143 *Mehraxialprüfmaschine Instron TT 8800 mit servohydraulischen Längs-und Drehzylindern*

6.4.3.2 Auswertung der experimentellen Untersuchung der Torsionsfestigkeit

Die Auswertung der experimentellen Untersuchung der Torsionsfestigkeit erfolgt auf Grundlage der Versuchsergebnisse. Die Ergebnisse stellen eine maximale Beanspruchung der GFK-Anker mit Belastungen bis zum Bruch dar.

Der vertikal eingespannte GFK-Anker wurde einseitig mit einem Drehmoment belastet. Das unbelastete Stabende wurde fest eingespannt. Entstehende Zugkräfte durch Verdrehung des Stabes wurden durch einen Kraftaufnehmer in der Mehraxialprüfmaschine aufgenommen, aber durch die geringe Kraft zunächst nicht weiter in der Auswertung beachtet.

Mit den durchgeführten Stab-Torsionsversuchen konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

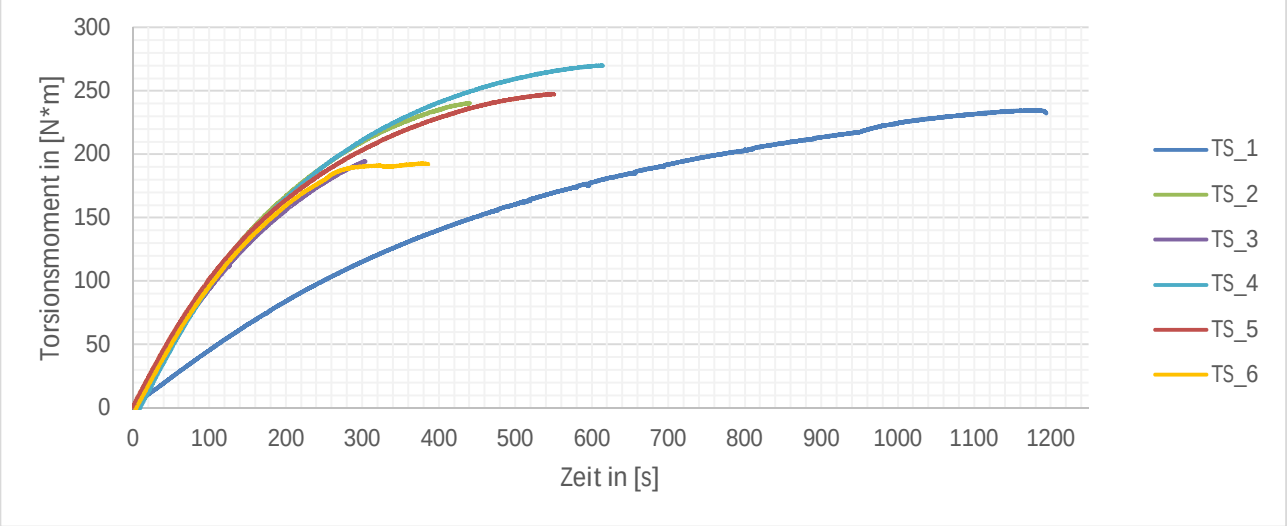


Diagramm 31 Drehmoment - Zeit - Diagramm

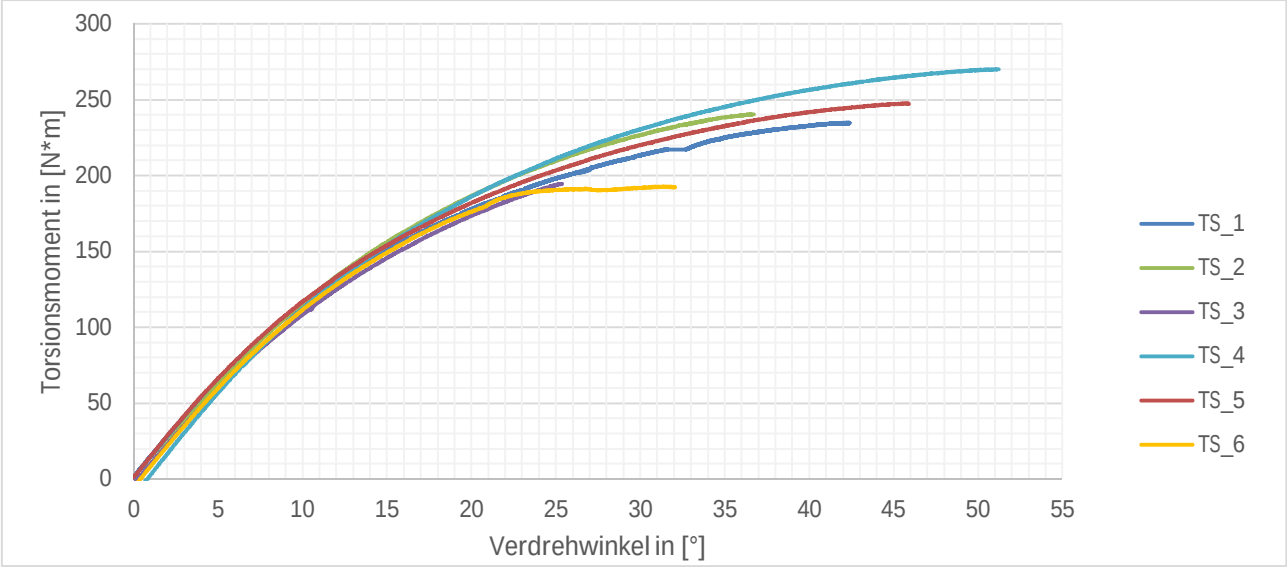
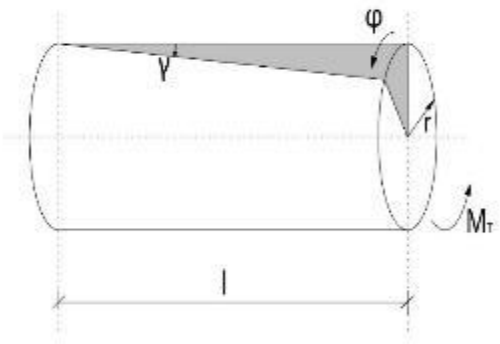


Diagramm 32 Torsionsmoment – Drehwinkel – Diagramm

Versuchsstab	max. Torsionsmoment $M_{T,max}$ [N*m]	Verdrehwinkel φ bei $M_{t,max}$ [°]	Scherwinkel γ bei $M_{t,max}$ [°]
TS_1	234,91	42,40	1,70
TS_2	240,44	36,74	1,47
TS_3	194,75	25,40	1,02
TS_4	270,27	51,24	2,05
TS_5	247,62	45,92	1,84
TS_6	192,91	31,39	1,26

Tabelle 19 *Ergebnisse der Torsionsversuche*



l =Stablänge

r =Radius Stab

φ =Verdrehwinkel

γ =Scherwinkel

M_T =Torsionsmoment

Bild 144 *Messgrößen der Torsionsversuche*

Das Torsionsmoment- Zeit Diagramm (Diagramm 32) zeigt, das sich alle untersuchten Prüfkörper bis zu einem Torsionsmoment von M_T= 190 Nm und einer Prüfzeit von t=270 s gleich verhalten. Auch die Torsionsmomente in Abhängigkeit des Verdrehwinkels zeigen bis zu einer Verdrehung der Stäbe von φ =30 ° ein gleiches Verhalten.

Die Versuche mit alleiniger Torsionsbeanspruchung haben gezeigt, dass die verwendeten GFK-Anker SPINBOLT für das Vorspannen mittels Drehmomentschlüssel geeignet sind. Das aufgebrachte Torsionsmoment und vor allem der Verdrehwinkel sind durch die durchgeführten Versuche in ihren Messwerten positiv. Bei der zu untersuchenden Vorspanntechnologie ist das aufgebrachte Drehmoment mittels Drehmomentschlüssel und das Torsionsmoment im Stab zu unterscheiden. Das Torsionsmoment wird über die Reibungskräfte, beim Aufbringen der Vorspannkraft, zwischen Stabgewinde und GFK Mutter eingetragen. Diese Reibungskräfte bewirken eine Verdrehung des Stabes um seine Achse (Bild 144).

Mit dem verwendeten GFK-Vorspannsystem SPINBOLT lassen sich zum aktuellen Zeitpunkt die GFK Muttern bis maximal 300 Nm anziehen(Bild 145). Danach wird der Überdrehungsschutz der Mutter aktiviert.

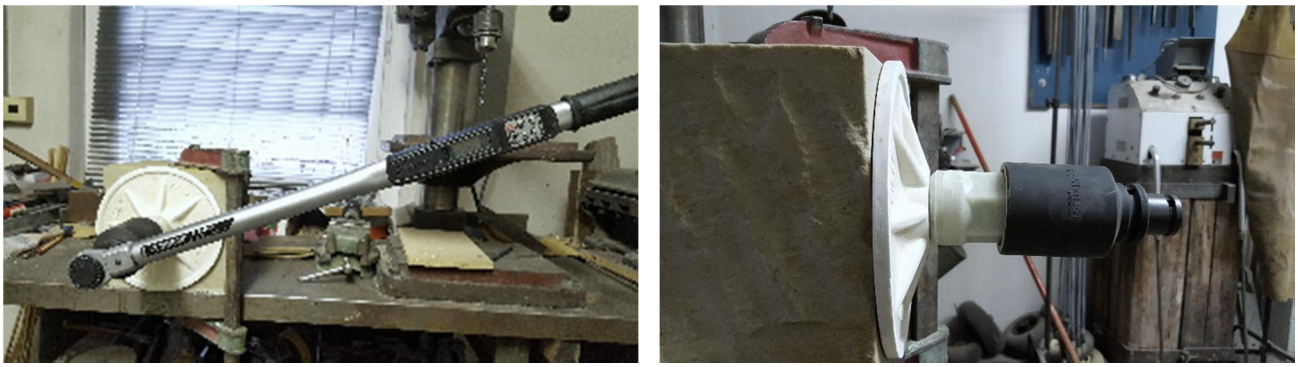


Bild 145 *Tastversuch – Ermittlung der Überdrehungsgrenze der GFK-Mutter*

Bei einem aufgebrachten Drehmoment von M_a = 300 Nm in die GFK Mutter mittels Drehmomentschlüssel ist die Reibung zwischen Stabgewinde und Mutter gering, sodass der maximale Verdrehwinkel von φ = 30 ° nicht erreicht wird.

6.5 Zwischenfazit

Die Untersuchung des Vorspannverhaltens des ausgewählten Ankersystems erfolgte anhand von Torsionsversuchen und Dauerstandversuchen. Mit dem Aufbringen der Vorspannkraft über einen Drehmomentschlüssel wird ein Torsionsmoment in den Stab eingeleitet. Ziel war die Untersuchung des Torsionswiderstandes und der Verdrillbarkeit der verwendeten GFK-Stäbe. Die Ergebnisse aus den Torsionsversuchen können positiv bewertet werden. Das eingeleitete Torsionsmoment und die Verdrillung des Stabens bis zum Bruch sind deutlich über den angezielten Werten. Die verwendeten GFK Stäbe sind für das Vorspannen mittels Drehmomentschlüssel geeignet.

Im Versuchsprogramm wurden auch Dauerstandversuche integriert. Unter konstanter, ruhender Zugbelastung treten Dehnungen im Werkstoff auf, die im Laufe der Zeit einen geringen Betrag annehmen können. Dehnmessstreifen in den GFK Ankern, Setz-Dehnungsmessungen am Mauerwerk und ein digitaler Drehmomentschlüssel stellen ein zielführendes Messprogramm für die Untersuchung des Dauerstandverhaltens dar. Momentan liegen noch keine aussagekräftigen Versuchsergebnisse zum Dauerstandversuch vor.

7 Praxistest

Auf dem Versuchsgelände des Lehrstuhls für Tragwerksplanung auf der Stadtgutstr. in Dresden wurden Probemauern aus verschiedenem Material errichtet, an denen die Ergebnisse des Forschungsvorhabens demonstriert und abschließend verifiziert wurden.

Mit derartigen Probemauern, die auf das jeweils vorzufindende Mauerwerksmaterial am Objekt speziell eingehen, konnten bei dem Projekt Takht-e Soleyman im Iran [85] sehr positive Erfahrungen auch im Hinblick auf eine Feinabstimmung gemacht werden.

a) b)

Bild 146 *Positive Erfahrungen mit Probemauern auf Tahkt-e Soleyman im Iran 2016/2017 [85] (a) Probemauer Ansicht b) Beim Öffnen und Freilegen des Ankers)*

Beim Aufschneiden von Teilen einer solchen Probemauer können wichtige Erkenntnisse zur Wirksamkeit und zur Kompatibilität der Materialien gewonnen werden.

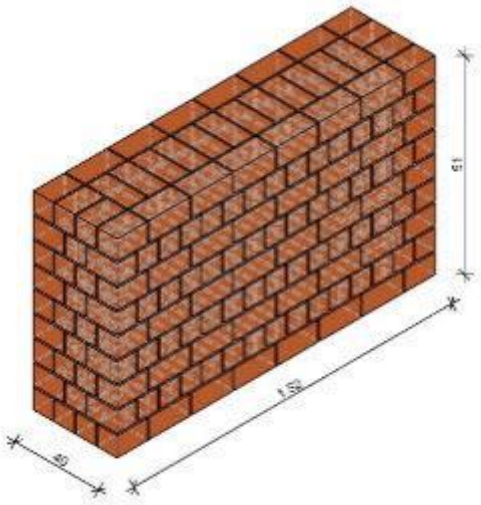
Bild 147 *Freigelegter Anker (a) und Nahaufnahme der Trennfläche zwischen Anker und umgebendem Mauerwerk (Hier jedoch: Anker mit Endplatten verankert und nicht auf Verbund) (b)und Verbund zwischen Mauerwerk und Verfüllmaterial im Hohlraum*

An Materialien sind dafür vorgesehen Sandstein, Ziegel, Kalkstein und ggf. noch Porphyr/Granit. Die Mauermörtel sollen zwischen MG I und MG II liegen. Mindestens eine Probemauer davon wird mit gipshaltigem Mauermörtel errichtet, um auch dieses wichtige Einsatzgebiet zu bestreichen.

Probemauer: einschalige Ziegelmauer mit Rissen

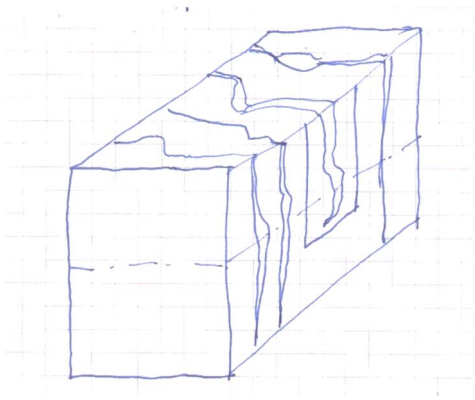
a)

b)

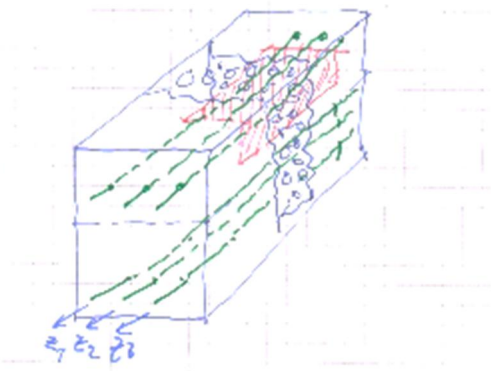


c)

Bild 148 *a) und b) Aus historischen Ziegeln (Barock) aufgebaute Probemauer im Gelände Stadtgutstr.; c) Abmessungen (a= 0,40 m; b=1,52 m; c =0,91 m)*



a)



b)

Bild 149 *a) Probemauer mit Rissen, die mittels Nadeln kraftschlüssig zu überbrücken sind b) Zweischalige Wand, bei der die beiden Schalen mit Nadeln zu verbinden sind*

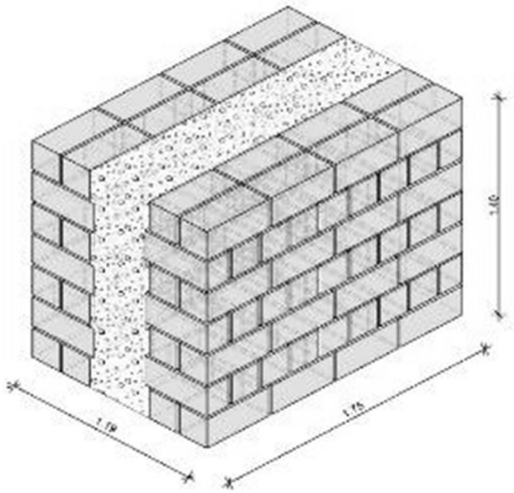
Für das einschalige Ziegelmauerwerk wurden folgende Materialien verwendet:

Mauerziegel:	barocke Mauerziegel
Mauermörtel:	Maxit MUR 950 Kalk-Zement Mörtel
Verpressmörtel Schüttung:	Casea casusan HGE, abgesiebt auf 1 mm Größtkorn
Verpressmörtel GFK- Stäbe:	Casea casusan HGE, abgesiebt auf 1 mm Größtkorn
GFK-Stäbe:	Schöck ComBAR, Stäbe aus glasfaserverstärktem Kunststoff, Durchmesser 16 mm

Probemauer: zweischaliges Sandsteinmauerwerk:

a)

b)



c)

Bild 150 *a) Bauzustand zweischaliges Sandsteinmauerwerk b) Ansicht Sandstein Mauerwerk aufgebaute Probemauer im Gelände Stadtgutstr.; c) Abmessungen (a= 1,19 m; b=1,75 m; c =1,40 m)*

Für das zweischalige Sandsteinmauerwerk wurden folgende Materialien verwendet:

Sandstein:	kieselig gebundenen Schlesischen Sandstein
Mauermörtel:	Maxit MUR 950 Kalk-Zement Mörtel
Schüttung:	Ziegelreste

Verpressmörtel Schüttung:	Casea casusan HGE, abgesiebt auf 1 mm Größtkorn
	Stuckgips
Verpressmörtel GFK- Stäbe:	Casea casusan HGE, abgesiebt auf 1 mm Größtkorn
GFK-Stäbe:	Schöck ComBAR, Stäbe aus glasfaserverstärktem Kunststoff, Durchmesser 16 mm

An der hergestellten Versuchsmauer aus Sandstein sollen Stabausziehversuche durchgeführt werden. Dafür wurde die lose Ziegelschüttung zunächst mit einem pumpfähigen Mörtel (Casea casusan HGE) verpresst. Zur Gewährleistung eines erfolgreichen Verpressvorganges die Sedimentationsstabilität durch die Zugabe von Stuckgips erhöht.

Im Anschluss sollen horizontale Kernbohrungen durchgeführt werden, sodass beide Sandsteinschalen beim der späteren Montage der GFK-Stäbe miteinander verbunden sind. Diese GFK-Stäbe werden wiederum mit einem Verpressmörtel (Casea casusan HGE) verpresst.

Nach dem Abbinden des Mörtels können diese Stäbe mittels Hydraulikzylinder aus dem Mauerwerk gezogen werden. Die benötigte Ausziehkraft wird mit einer Kraftmessdose gemessen.

Mit den Ergebnissen aus den Stab- Auszugsversuchen im zweischaligen Mauerwerk kann sowohl das technologische Vorgehen, wie auch die Verbundverhalten zwischen den einzelnen Mauerwerkbestandteilen mit der Ertüchtigung durch GFK-Stäbe erprobt werden.

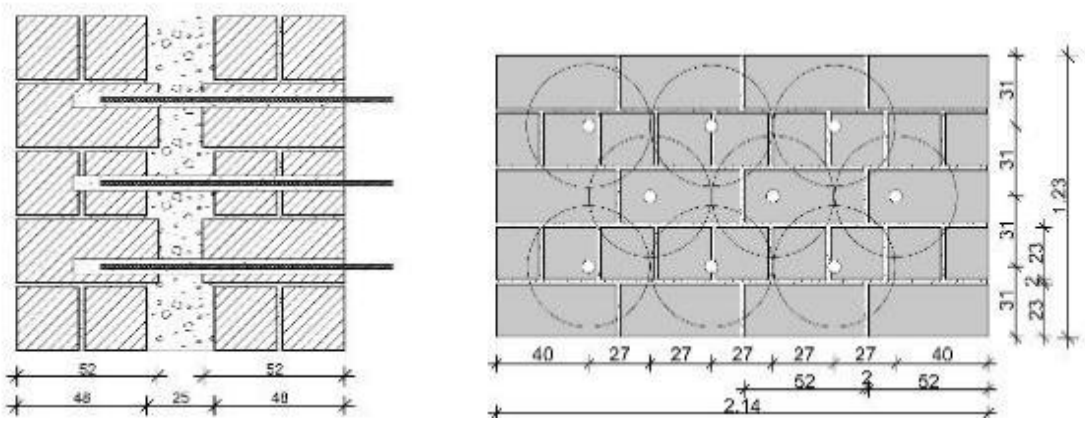


Bild 151 *Versuchsaufbau Stab-Ausziehversuche im zweischaligem Mauerwerk*

Probemauer: zweischaliges Bruchsteinmauerwerk

Bild 152 *Bauzustand zweischaliges Bruchsteinmauerwerk (a= 1,19 m; b=1,75 m; c =1,40 m)*

Bild 153 *Verpressen des Bruchsteinmauerwerks mit gipshaltigen Schaummörtel*

Für das zweischalige Bruchsteinmauerwerk wurden folgende Materialien verwendet:

Bruchstein:	Granit
Mauermörtel:	Hochbrand-Gips „Keuper“
Schüttung:	Ziegelreste

8 Zusammenfassung der Ergebnisse für die Praxis

Die Forschungsarbeit zur Ertüchtigung von historischem Mauerwerk mittels Faserverbundwerkstoffen wurde mit dem Ziel der Entwicklung einer ingenieurmäßig, praxisbezogenen Lösung zur Sicherung von Mauerwerk durchgeführt. Mit den Untersuchungen zum Verbundverhalten und zur Vorspannung von Ankern konnten signifikante Ergebnisse und Lösungen zur Anwendung von gipshaltigen Verpressmörtel im historischen Mauerwerk entwickelt werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Laborversuchen und der Vernadelung eines zweischaligen Versuchs-Sandsteinmauerwerks in eine Handlungsempfehlung für die Baupraxis zusammengefasst. Dies ermöglicht die Anwendung von Faserverbundwerkstoffen und gipshaltigen Verpressmörtel im konkreten Fall eines ertüchtigungsfähigen, sulfathaltigen historischen Mauerwerks. Die durchgeführten materialtechnischen und ingenieurtechnischen Untersuchungen stellen damit einen wichtigen Beitrag zur denkmalgerechten Erhaltung und Ertüchtigung von historischem Mauerwerk dar.

Untersuchung	Versuchsergebnisse	Fazit für die Praxis
Verbund Die experimentellen Untersuchungen zum Verbundverhalten wurden anhand von Stab- Ausziehversuchen durchgeführt. Dabei konnte das komplexe Verbundsystem zwischen Naturstein, Verpressmörtel und Faserverbund-Stab analysiert werden. Untersucht wurde das Verbundverhalten zwischen den einzelnen Komponenten unter Variation des Faserverbundwerkstoffes, der Verpressmörtelsorte und der Verbundlänge.		
Ankerstab	Zur Untersuchung des Verbundverhaltens wurden profilierte Stäbe aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) und kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) untersucht. Verbundfestigkeiten konnten aus den Ergebnissen der Stab-Ausziehversuche mit variierendem Stabdurchmesser (16mm und 8 mm) ermittelt werden. Die verwendeten Stäbe aus unterschiedlichen Material und Profilierung weisen ähnliche Verbundeigenschaften auf.	Material Die untersuchten stabförmigen Faserverbundwerkstoffe aus GFK und CFK eignen sich für die Verankerung im historischen Mauerwerk. Profilierte CFK-Stäbe standen zum Untersuchungszeitpunkt nur von einem Hersteller und in wenig Varianten zur Verfügung. Das Angebot an profilierten GFK-Stäben ist deutlich vielfältiger, die Materialkosten auch geringer. Profilierung Mit der Profilierung des Stabes werden die Verbundeigenschaften zwischen Stab und Verpressmörtel maßgeblich beeinflusst. Zu beachten ist die z.T. herstellerbezogene Ausbildung der Profilierung. Die untersuchten Stäbe aus glasfaserverstärktem Kunststoff bzw. kohlefaserverstärkten Kunststoff wurden mit einem Trapezgewinde bzw. Rundgewinde hergestellt.

Verpress-mörtel	Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden verschiedene Verpressmörtel auf ihre Verbundeigenschaften und zugleich auf ihre Eignung für den Verpressvorgang untersucht. Hierzu musste der Mörtel auf ein Größtkorn <1mm abgesiebt werden. Die Verbundspannungen wurden im statischen Ausziehversuch ermittelt. Der verwendete Gipsmörtel casea casusan HGE weist gute Ergebnisse der Verbundspannungen zwischen Stab und Verpressmörtel auf. Der maßgebende Verbund zwischen Naturstein und Verpressmörtel zeigt instabile Ergebnisse der Verbundspannung. Dieser Problematik muss weitere Bedeutung beigemessen werden, da hier bessere Ergebnisse erstrebenswert sind. Die technologische Eignung für den Verpressvorgang konnte an einer zweischaligen Natursandsteinmauer erprobt werden. Die Verarbeitungseigen-schaften wurden mit der Zugabe von Stuckgips optimiert. Die zugefügten Feinstanteile verbesserten die Sedimentations-stabilität des Verpressguts.	Größtkorn Das Größtkorn des Mörtels ist für die Pumpfähigkeit auf < 1mm zu begrenzen W/B-Wert Der Wasser/Bindemittelwert muss jeweils für das entsprechende Mauerwerk eingestellt werden. Im untersuchten, Sandsteinmauerwerk wurde ein W/B Wert von 0,4 für die Anwendung des Casea casusan HGE ermittelt. In der Praxis ist die Wahl eines richtigen W/B Wertes eine schwierige Aufgabe und muss von Fachpersonal, unterstützt durch Laborversuche, für das jeweilige Mauerwerk vorgenommen werden. Zusatzstoffe Der verwendete Gipsmörtel Casea casusan HGE konnte auf Grundlage variierender Verpressversuche in seinen Verarbeitungseigenschaften für den Verpressvorgang verbessert werden. Die Zugabe von 10 % Stuckgips ermöglichte eine deutliche und notwendige Erhöhung der Verarbeitungszeit auf 20 Minuten. Mit den zugefügten Feinstanteilen des Stuckgipses konnte eine verbesserte Sedimentationsstabilität erzielt werden. Zusatzmittel Die Verwendung von Zusatzmitteln ist zu vermeiden, solange ihre Verträglichkeit mit der vorhanden historischen Bausubstanz nicht nachgewiesen ist. Es wird empfohlen, die Pumpbarkeit des Verpressmörtels vor dem tatsächlichen Verpressvorganges zu prüfen.
Ausführung der	Auf der Grundlage der durchgeführten Laborversuche wurde	Mauerwerkuntersuchung Vor den Ertüchtigungsmaßnahmen ist

Verankerung	eine zweischalige Natursandsteinmauer errichtet und durch Einbringen von horizontalen Verpressankern ertüchtigt. Das Verpressen erfolgte über mehrere Bohrlöcher von unten nach oben. Danach konnten horizontale Kernbohrungen mit einem Durchmesser von 56 mm in das Mauerwerk eingebracht werden und die GFK Anker (Durchmesser 27mm) zentrisch im Bohrloch mit dem Verpressmörtel Casea casusan HGE verpresst werden.	zunächst die Konstruktion des Mauerwerkes zu untersuchen und ein Konzept zu entwickeln. Zur Sicherstellung eines tragfähigen Verbundes ist die Wasseraufnahmefähigkeit des anzutreffenden Mauersteins nach DIN EN 13755 für Naturstein zu prüfen. Bei stark saugenden Mauerwerk ist der W/B Wert des Verpressmörtels durch fachkundiges Personal anzupassen. Bohrung Die Bohrungen im Mauerwerk werden im Kernbohrverfahren hergestellt. Im gipshaltigen Mauerwerk ist die Trockenkernbohrung mit Druckluftspülung anzuwenden. Nach dem Bohrvorgang sind die Bohrlöcher zu reinigen (ggf. mit Druckluft). Einbau der Anker Der Einbau der Anker erfolgt zentrisch im Bohrloch. Zur Lagesicherung sind entsprechende Abstandshalter zu wählen. Verpressvorgang Das Verpressen einer Mauer erfolgt von unten nach oben, von Wandmitte zum äußeren Rand der Wand. Das Befüllen des Bohrlochs erfolgt von der rückwärtigen Seite nach vorn, sodass keine Hohlräume entstehen. Die einzelnen Bohrlöcher werden nach dem Verpressen z.B. mit gerissenem Jutewerg oder Lehm verschlossen. Während des Verpressvorganges ist eine kontinuierliche Zufuhr von Verpressmörtel zu gewährleisten. Verzögerungen im Ablauf können zu Lufteinschlüssen im Verpressstrom führen und sind zu vermeiden.
Vorspanntechnologie: Die experimentellen Untersuchungen wurden unter Verwendung von GFK-Ankern mit Endverankerung durchgeführt. Ziel war es, eine gewisse Vorspannung in das Mauerwerk zu leiten, um die Anker sofort bei Beanspruchung wirksam zu haben. Ist der Anker nicht vorgespannt, treten Verformungen in einer Größenordnung auf, die zu neuen Rissen im Mauerwerk führen. Um die Technologie kostenmäßig und praxisnah zu beherrschen, kann die Vorspannung über einen Drehmomentschlüssel und einer entsprechenden Anker-Mutter in den Anker eingetragen werden.		

Ankerstab	Torsionsversuche Zur Untersuchung des Vorspannverhaltens von GFK-Ankern mittels Drehmomentschlüssel wurden Torsionsversuche durchgeführt. Mit den Ergebnissen konnten das bisher unbekannte aufnehmbare Torsionsmoment und der Verdrehwinkel des Stabes bis zum Bruch ermittelt werden.	Material Für die Untersuchung des Vorspannverhaltens wurden GFK-Stäbe mit einem Durchmesser von 27 mm verwendet. Die Glasfasern im speziellen Bündelungsverfahren hergestellt, sodass höhere Torsionsmomente aufgenommen werden können. Profilierung Die Vollgewindeanker haben ein leichtgängiges Rundgewinde für die Baustellenanwendung mit hoher Gewindebruchlast. Torsionsverhalten Mit dem verwendeten GFK-Spannsystem SPINBOLT lassen sich zum aktuellen Zeitpunkt die GFK Muttern bis maximal 300 Nm anziehen. Danach wird der Überdrehungsschutz der Mutter aktiviert. Bei einem aufgebrachten Drehmoment von M_a = 300 Nm in die GFK Mutter mittels Drehmomentschlüssel wird der maximale Verdrehwinkel von φ = 30 ° nicht erreicht. Somit ist das Vorspannen mittels Drehmomentschlüssel für die praxisnahe Anwendung geeignet. Das Vorspannsystem kann mittels Drehmomentschlüssel bis zu einem Drehmoment von M_a = 300 Nm ausgenutzt werden.
	Dauerstandversuche Für die Untersuchung der Dauerfestigkeit wurden die Anker unter konstanter, ruhender Belastung im Mauerwerk gestellt. Dabei treten Dehnungen im Werkstoff auf, die im Laufe der Zeit einen sehr geringen Betrag annehmen. Als Ergebnis der Untersuchungen zum Dauerstandverhalten konnte die Stabdehnung in Abhängigkeit der Zeit	Material Für die Untersuchung des Dauerstandverhaltens wurden GFK-Stäbe mit einem Durchmesser von 27 mm verwendet. Die Glasfasern, im speziellen Bündelungsverfahren hergestellt, weisen eine höhere Torsionsfestigkeit auf. Profilierung Die Vollgewindeanker haben ein leichtgängiges Rundgewinde für das Einbringen der Vorspannkraft über ein Drehmoment an der Anker-Mutter. Dauerstandverhalten Aus den Ergebnissen der

	ermittelt werden. Die Schwierigkeit im Mauerwerkbau besteht darin, dass Kriechen und Schwinden im Mauerwerk die aufgebrachte Vorspannung auf den Anker reduziert.	Dauerstandversuche lässt sich das Vorspannverhalten für eine dauerhafte Ertüchtigungsmaßnahme ermittelt. Daraus können entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen am vorgespannten Ankersystem entwickelt werden.
Ankersystem	Ein Ankersystem aus glasfaserverstärktem Kunststoff mit Vollgewindeankerstab, Ankerplatten und Ankermutter wurde für die Vorspannungsversuche verwendet.	Das Ankersystem zeichnet sich durch hohe Torsionsfestigkeit und hohen Widerstand gegen Korrosion aus. Die gewählte Vorspannkraft lässt sich einfach und baustellentauglich mittels digitalen Drehmomentschlüssel, zum direktem Ablesen des Drehmomentes, aufbringen. Bei der Anwendung des Ankersystems bei der Verankerung von Mauerwerk sind die Ankerköpfe vor direkter UV-Strahlung zu schützen, um die Dauerhaftigkeit des Materials zu gewährleisten.
Ausführung der Verankerung	Für das Vorspannen des Mauerwerks wurde zunächst die Vorspannung ohne Verbund untersucht. Die durchgeführten Dauerstandversuche mit einem Versuchskörper aus Natursandstein und die Anwendung des Ankersystems aus glasfaserverstärktem Kunststoff stellen den technologischen Ablauf der Vorspannung ohne Verbund dar.	Zunächst muss das vorzuspannende Mauerwerk auf Materialität und Schäden in der Struktur untersucht werden. Für das Vorspannen wird an entsprechender Stelle eine Kernbohrung über die gesamte Länge der Mauer durchgeführt. Das Ankersystem, bestehend aus Ankerstab, Ankerplatte und Anker- Mutter, wird im Kernbohrungsloch installiert und zunächst einseitig mit einer Ankerplatte und einer Anker-Mutter fixiert. Es ist zu empfehlen, eine Ausgleichslage zwischen Mauerwerk und Ankerplatte herzustellen, um einen gleichmäßigen, flächigen Lasteintrag in das Mauerwerk zu gewährleisten. Das Vorspannen des Mauerwerks erfolgt über die Einleitung eines Drehmomentes in die Anker-Mutter mittels Drehmomentschlüssel. Für diese bautechnologische Methode muss das Gewinde an der Kontaktstelle zur Anker-Mutter von Verschmutzungen befreit werden. Das untersuchte Ankersystem aus glasfaserbewehrten Kunststoff ist bis zu einem maximalen Drehmoment von

		300 Nm zu verwenden. Danach wird die Überdrehungsgrenze der Anker-Mutter erreicht. Ein nachträgliches Verpressen des Ankerstabes mit Verpressmörtel (nach Abs. Verbund) ist zu Prüfen. Dabei ist die Entlüftung des Bohrlochs und eine mittige Lage des Ankerstabes zu gewährleisten.

Mit der vorgelegten Forschungsarbeit werden die Algorithmen zur Auswertung von Auszugsversuchen offen gelegt und stehen für eine objektkonkrete Anwendung zur Verfügung.

9 Anwendungsbeispiel

Gegenwärtig werden zur besseren Praxisüberführung Anwendungsbeispiele aus realen Sanierungsobjekten vorbereitet, die die Überführung in die Praxis erleichtern sollen (analog [42], [43], [84] und [39], [40] sowie [85]).

Als Anwendungsbeispiel zum Einsatz von Faserverbundwerkstoffen zur Sicherung von historischen Mauerwerk mittels gipshaltigen Verpressmörtels sind hier insbesondere die statisch- konstruktiven Sicherungsmaßnahmen am westlichen Iwan der UNESCO-Weltkulturerbestätte Takht-e Soleyman im Iran (Bild 154) aufzuführen [90].

Das Heiligtum befindet sich etwa 600 km westlich von Teheran in den Gebirgen der Provinz West-Aserbaidschan. Der westliche Iwan ist heute nur noch als Ruine erhalten. Die erhaltene Nordwand des Iwans überragt das Heiligtum noch heute mit einer Höhe von 17,50m. Die Nordwand war in ihrer Standsicherheit gefährdet, sodass 1977 eine unzureichende Gerüstkonstruktion unterstützend angebracht wurde.

Bild 154 *Blick auf die Ruine des Westiwans aus südlicher Richtung*

Das Mauerwerk unterscheidet sich in seiner Konstruktion und Materialität. Der Sockelbereich wurde mit einer Mauerwerkschale aus großformatigen Kalksteinblöcken und einer dahinterliegenden Bruchsteinschüttung errichtet (Bild 156). Das aufgehende Mauerwerk stammt aus verschiedenen Bauphasen und unterscheidet sich in seiner Materialität. Sowohl Backstein als auch Bruchsteinmauerwerk sind vorzufinden (Bild 155). Als Mörtel wurde ein lokal gebrannter Hochbrandgipsmörtel verwendet.

Bild 155 *starke Schalenbildung im Bereich des westlichen Wandabschnitts der Nordwand.*

Bild 156 *Sockelbereich aus großformatigen Kalksteinen, aufgehendes Ziegelmauerwerk*

Das Mauerwerk ist teilweise stark geschädigt. Konstruktive Risse und Schalenbildung sind die häufigsten Schadensbilder. Die Schalenbildung resultiert meist aus einer unzureichenden Verzahnung der Mauerschalen aus verschiedenen Bauphasen (Bild 155).

Auf Grundlage der Bestands- und Schadensaufnahme wurden für die jeweiligen Bereiche entsprechende Sicherungsmaßnahmen entwickelt. Die Standsicherheit der Nordwand sollte sichergestellt werden und den Abbau der vorhandenen Notabstützung ermöglichen.

Die entwickelten Sicherungsmaßnahmen (Bild 157) beinhalteten die Sicherung der durch Schalenbildung gefährdeten Bereiche durch eine entsprechende Verankerung.

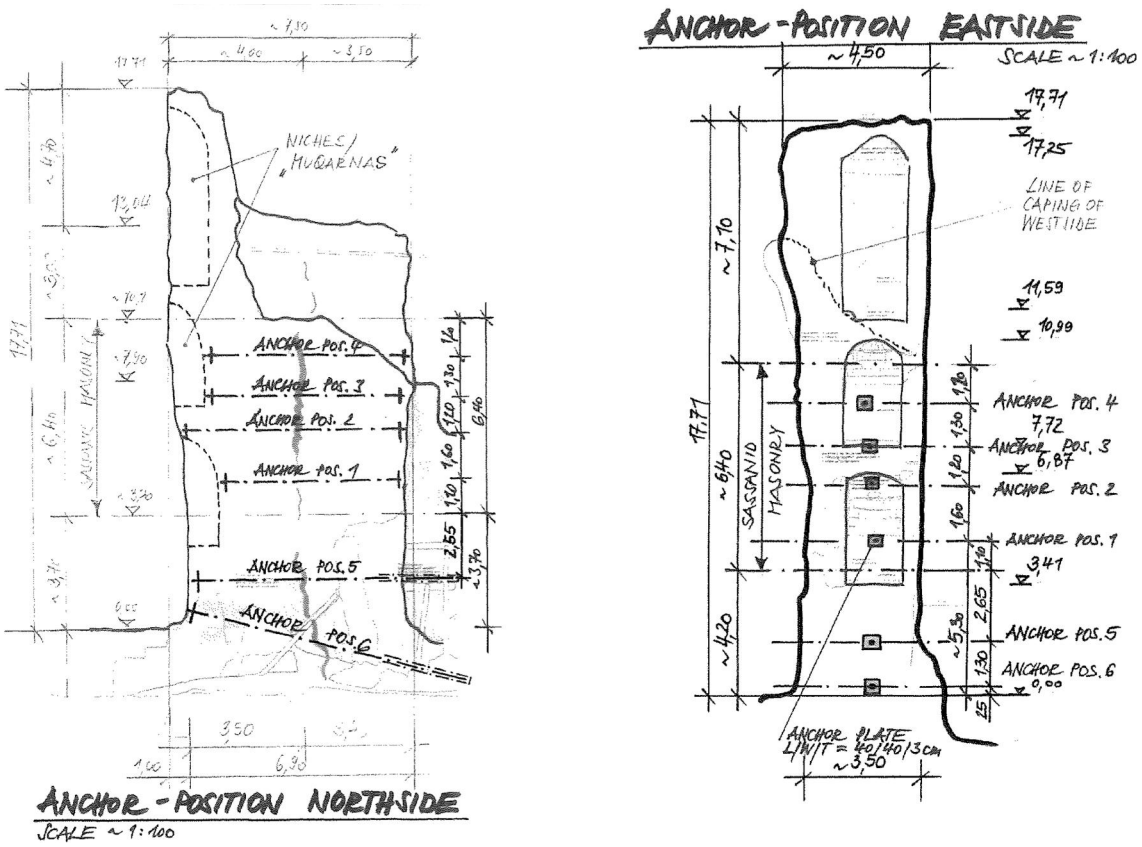


Bild 157 *Auszug aus der Statik zur Sanierungsplanung, Ankerpositionen am Westiwan [90]*

Das gipshaltige Mauerwerk wurde mit einen speziell angepassten, auf Grundlage des lokalen Gipses entwickelten, Injektionsmörtel verpresst.

Als Anker wurden profilierte Stäbe aus glasfaserverstärktem Kunststoff verwendet. Die Verwendung von Edelstahl wurde aufgrund von Qualitätsmängeln und Kosten ausgeschlossen. Die Verankerung des Ziegelmauerwerks und des Bruchsteinmauerwerks wurden mit GFK-Ankern, Orica Powertread K60-32 mit einem Durchmesser von 32mm ausgeführt. Die Profilierung der Stäbe ist als Rundgewinde ausgeführt.

Mit der Entwicklung eines speziell angepassten, auf Grundlage von lokalen Gipsen hergestellten Injektionsmörtels konnte die Verträglichkeit der Baustoffe und Materialien im Bestandsmauerwerk gewährleistet werden. Neben den Materialeigenschaften wie Rohdichte, Druck-und Biegezugfestigkeit wurden auch die Verarbeitbarkeit in Bezug auf Verarbeitungszeit, Fließ- und Erhärtungsverhalten untersucht. Weiterhin wurde der Wasserbedarf durch Hochleistungsfließmittel und Verzögerer reduziert, sodass das freie Wasser im gipshaltigen Mauerwerk reduziert wurde.

Zur Erprobung der Technologie und der Materialien wurden vor Ort Testmauern aus Mauerziegeln und Bruchstein mit eingemauerten Rissen erstellt. Neben der Überprüfung der Baustellentauglichkeit des Verpressmörtels und der Injektionstechnik wurde auch die Bohrtechnik, insbesondere für das Bohren ohne Spülung mit Erfolg getestet.

Die Ausführung der Sicherungsmaßnahmen an der Nordwand des westlichen Iwans erfolgten Mitte 2018 bis Anfang 2019.

Die erforderliche Gipsmenge wurde vor Ort von einem benachbarten Feldofen produziert. Das Absieben des Hochbrandgipses auf ein Größtkorn von < 1mm erfolgte ebenfalls vor den Sicherungsmaßnahmen.

Als weiterer Arbeitsschritt, vor dem Verankern, wurde das Mauerwerk durch ein flächiges Injektionsraster vergütet, um einen kraftschlüssigen Verbund des mehrschaligen Mauerwerkes zu gewährleisten, auch Risse im Mauerwerk wurden in diesem Schritt verpresst.

Auf Grundlage der Bauaufnahme und der statischen Berechnungen wurden im Ostteil der Nordwand 6 Glasfaseranker Powerthread K60-32 mit einem Durchmesser von 32mm eingebaut (Bild 157). Die Bohrungen erfolgten ohne Wasserspülung, um eine Schädigung des gipshaltigen Mauerwerks zu vermeiden (Bild 158). Die Kernbohrungen wurden mit einem Durchmesser von 100mm und einer Länge von bis zu 7,30m ausgeführt. Die entstandenen Bohrkerne konnten ebenfalls Aufschluss über die innere Struktur des Mauerwerks geben (Bild 159).

Bild 158 *Kernbohrung im historischen Mauerwerk*

Bild 159 *Bohrkerne aus Sockelbereich*

Nach dem Ausblasen der Bohrlöcher mit Druckluft konnten die Anker inklusive Abstandshalter und fixierten Entlüftungsschlauch für den Verpressvorgang eingelegt werden.

Der Verpressmörtel, bestehend aus dem abgesiebten Hochbrandgips, Wasser und einem Verzögerer für gipsbasierte Bindemittelsysteme, wurde mit einem W/B Wert von 0,6 hergestellt und verpresst. Wichtig hierbei, keine Schleier auf der Oberfläche der Fassade hinterlassen. Die Verarbeitbarkeit konnte durch die Verwendung des Verzögerers auf 20 min gebracht werden.

Bild 160 *Ankerköpfe in Ziegelmauerwerk*

Bild 161 *vermauerte Ankertasche*

Die Verankerung der Ankerwurde als Endverankerung mit Ankerplatte ausgeführt (Bild 160) (Bild 162) (Bild 163). Auf einer Ausgleichsmörtelschicht aus Hochbrandgips folgten zwei Ankerplatten. Eine Fixierung der Anker/ Ankerplatten (Bild 162)(Bild 163)wurde mit einer Ankermutter aus GFK sichergestellt. Die Ankermutter wurde kraftschlüssig angezogen, danach konnte die Ankertasche (Bild 161) vermauert werden.

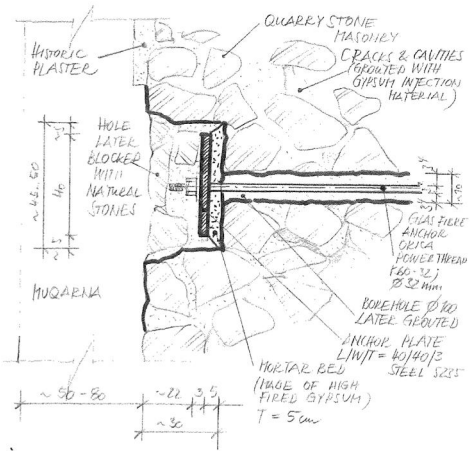


Bild 162 *Detailzeichnung Ankerkopf in Bruchsteinmauerwerk [90]*

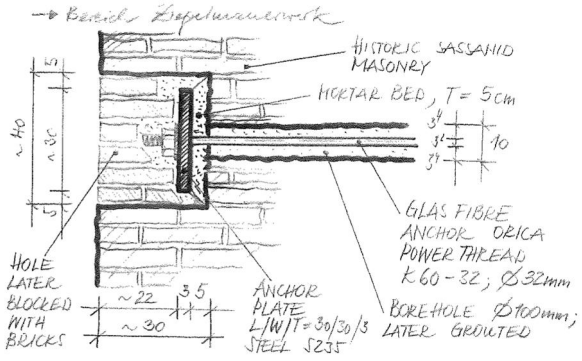


Bild 163 *Detailzeichnung Ankerkopf in Ziegelmauerwerk [90]*

Die durchgeführten Maßnahmen am Westiwan dokumentieren die Anwendung von stabförmigen Faserverbundwerkstoffen und gipshaltigen Verpressmörtel zur Sicherung von historischem Mauerwerk. Die Notwendigkeit der Entwicklung und Anwendung spezieller Mörtel und neuen Werkstoffen zum Erhalt historischer Substanz wird deutlich. Durch gezielte und minimale Eingriffe in die Substanz kann die Nordwand an der UNESCO-Weltkulturerbestätte Takht-e Soleyman gesichert werden, ohne das Erscheinungsbild zu beeinträchtigen.

10 Ausblick

Der Erhalt und die Ertüchtigung von historischem Mauerwerk bedarf die Anwendung neuer Technologien und Materialien.

Im Forschungsprojekt wurde die Vernadelung bzw. Verankerung von Mauerwerk mittels profilierten Faserverbundstäben und vornehmlich gipshaltigen Mörtel untersucht.

Insbesondere GFK-Stäbe werden bereits in der Praxis für verschiedene Anwendungen verwendet. Neben Anwendungen im Hochbau findet man im Bergbau ein breites Anwendungsfeld von GFK-Ankern. Die im Bergbau entwickelten GFK-Anker sind speziell für die Anwendung mit Ankerplatte und Ankermutter konzipiert. Eine Schädigung der Matrix durch das anwendungsbedingte Verdrillen der Stäbe kann auf Grundlage der durchgeführten Versuche ausgeschlossen werden.

Eine Anwendung von stabförmigen kohlefaserverstärkten Kunststoffen in der Praxis besteht noch nicht. Die verwendeten CFK-Nadeln wurden auf Anfrage für die Forschung produziert.

Die für die Anwendung auf dem Markt zur Verfügung stehenden GFK-Stäbe sind in ihrer Profilierung und in den vorhandenen Durchmessern vielfältig. Vollständige Ankersysteme aus dem Bergbau können für die Sicherung von historischem Mauerwerk gezielt angewendet werden.

Die Herstellung von kohlefaserverstärkten Kunststoffen fokussiert sich auf die Anwendung von CFK-Lamellen und CFK-Gelege. Stabförmige Verbindungsmittel werden aktuell nur in der Forschung untersucht. Eine ausreichende Vielfalt an CFK-Stäben für die praktische Anwendung besteht nicht.

Die Verwendung von Gipsmörtel für den kraftschlüssigen Verbund von Bewehrungsstab und Mauerwerk stellt einen wichtigen und zugleich schwierigen Punkt dar.

Insbesondere Natursteinmauerwerk, mit seinem unterschiedlichen Saugverhalten, erschwert die Entwicklung eines zuverlässigen Bemessungsansatzes.

Die durchgeführten statischen Stab- Ausziehversuche im Natursandstein zeigten für den Standardmörtel stabile Ergebnisse der Verbundspannungen sowohl im Verbund Verpressmörtel/Stab als auch im Verbund Verpressmörtel/Natursandstein.

Der verwendete Gipsmörtel zeigte bei der Ermittlung der Materialeigenschaften gute Werte. Die Ergebnisse des Gipsmörtels in Bezug auf die Verbundfestigkeiten variierten. Der Verbund zwischen Bewehrungsstab und Verpressmörtel brachte gute Verbundspannungen hervor. Hingegen zeigte der Verbund zwischen Naturstein und Verpressmörtel geringe Verbundspannungen. Dieses Phänomen ist jedoch bhängig von der Saugfähigkeit des umgebenden Mauerwerks.

Neben der Untersuchung des Verbundes im statischen Stab-Ausziehversuch wurde die Verpressfähigkeit des gipshaltigen Mörtels an einer zweischaligen Versuchswand erprobt. Der Verpressvorgang konnte im Versuchsmaßstab erfolgreich umgesetzt werden, jedoch war der Verpressmörtel für große Mischungen nicht ausreichend stabil. Das gebrochene Korn des verwendeten Gipsmörtels führt auf Dauer zu einem erheblichen Verschleiß der Verpress-Schneckenpumpe im Bereich des Stators. Empfehlungen aus diesem Phänomen sind, die Größe der Chargen zur reduzieren und die Mahlfeinheit des Mörtel zu erhöhen.

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen lässt sich schlussfolgern, dass die Standardmörtel sich durch gute Verarbeitbarkeit und guten Verbund auszeichnen. Der untersuchte Gipsmörtel weist im Verbund zum Natursandstein geringe Verbundfestigkeiten

auf. Dieser Problematik muss weitere Bedeutung beigemessen werden, da hier bessere Ergebnisse erstrebenswert sind. Des Weiteren hat sich im Forschungsprojekt gezeigt, dass der verwendete Casea casusan HGE beim Verpressen nicht ausreichend stabil in der Suspension ist.

Der Optimierung des Gipsmörtels für die Ertüchtigung von historischen, sulfathaltigen Mauerwerk steht im Focus der weiteren Arbeit und vorgesehene Objektanwendungen.

Zur Validierung und zur Erweiterung der Datenbasis müssen weitere Versuche, insbesondere unter Verwendung von Gipsmörteln, durchgeführt werden. Hierzu ist eine Variation geeigneter Natursteine zu empfehlen, um an bestehende Forschungsergebnisse u.a. aus Gigla [63] anzuknüpfen und den Vergleich zu Trass-Kalk-Mörtel beizubehalten.

11 Literatur- und Quellenverzeichnis

[1] DIN EN 1996-1-1: 2013-02: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten. Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. Deutsche Fassung EN 1996-1-1:2005. NABau im DIN, Berlin 2013

[2] DIN EN 1996-1-1/NA: 2012-05: Nationaler Anhang. National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für unbewehrtes Mauerwerk. NABau im DIN, Berlin 2012

[3] DIN EN 1996-3: 2010-12: Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrtes Mauerwerk; Dt. Fassung EN 1996-3:2006+AC:2009. NABau im DIN, Berlin 2010

[4] DIN EN 1996-3/NA: 2012-01: Nationaler Anhang. National festgelegte Parameter – Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 3: Vereinfachte Berechnungsmethoden für unbewehrte Mauerwerksbauten. NABau im DIN, Berlin 2012

[5] DIN EN 1992-1-1: 2011-01: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau

[6] Wang, X. T.; Bauer, J.; Brücki, J.; Wu, W.: Vorauseilende Sicherung mit GFK-Ankern in einem innerstädtischen Tunnel: 3D numerische Berechnung. In: Bauen in Boden und Fels. 7. Kolloquium 26./27.01.2010. CD-ROM. Technische Akademie Esslingen, Ostfildern 2010.

[7] Manchini, G.; Tondolo, F.: Effect of bond degradation due to corrosion – a literature survey. Structural Concrete (2014) 3, 408–418.

[8] Cervenka, V.; Ganz, H. R.: Validation of post-tensioning anchorage zones by laboratory testing and numerical simulation. Structural Concrete (2014) 2, 258–268.

[9] Lorenz, E.; Schütze, E.; Schladitz, F.; Curbach, M.: Textilbeton – Grundlegende Untersuchungen im Überblick. Beton und Stahlbetonbau (2013) 10, S. 711–722.

[10] Betzold, R.: Sanierung der unteren historischen Stadtmauer in Hildburghausen – Statische Sicherung und Steinrestaurierung. Mauerwerk (2013) 4, S. 220–226.

[11] Vorwagner, A.; Burtscher, St.; Grass, G.: Effizientes Vorspannen von CFK-Lamellen. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 3, S. 188–197.

[12] Zanuy, C.; Curbach, M.; Lindorf, A.: Finite element study of bond strength between concrete and reinforcement under uneven confinement conditions. Structural Concrete (2013) 3, 260–270.

[13] Brameshuber, W.; Saenger, D.: Untersuchungen zum Verbund von Bewehrung in Lagerfugen und Aussparungen. Mauerwerk (2013) 1, S. 8–18.

[14] Blaschko, M. A.: Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit in Schlitze eingeklebten CFK-Lamellen. Berichte aus dem konstruktiven Ingenieurbau. TU München. 8/2001.

[15] Griffith, M.; Dizhur, D.; Ingham, J.: Out-of-plane strengthening of unreinforced masonry walls using near surface mounted fibre reinforced polymer strips. Engineering Structures 59 (2014) 2, 330–343.

[16] Stoll, V.: The Soil Condition, the Foundation and the Basement of the Frauenkirche in Dresden. In: Proceedings of the workshop for the Reconstruction of the Cathedral of Noto and the Dresden Frauenkirche (Seminario internazionale su: Ricostruendo la cattedrale di Noto e la Frauenkirche di Dresda)., Kapitel 13. Noto 2000.

[17] Stoll, V.; Dornacher, S.: Mäßige Vorspannung des Kuppelmauerwerks. Mauerwerk (Themenheft zum Aufsetzen der Turmhaube 2004 beim Wiederaufbau der Frauenkirche Dresden) (2004) 3, S. 127–130.

[18] Jäger, W.; Stoll, V.: Die Laterne als krönender Abschluss. Mauerwerk (Themenheft zum Aufsetzen der Turmhaube 2004 beim Wiederaufbau der Frauenkirche Dresden) (2004) 3, S. 131–133.

[19] Jäger, W. u.a.: Sanierung der Alltagskirche Torgau. Nachträglicher Einbau eines Ringankers im Chor aus schwarzem Stahl. Projektunterlagen. Unveröffentlichtes Manuskript. 1993/94. Archiviert bei Jäger Ingenieure GmbH, Radebeul.

[20] Burkert, T.: The application of carbon fibre reinforced plastic for strengthening of historic masonry structures. In: Traditional and innovative structures in architecture. From research to practice in construction. Schriftenreihe des Lehrstuhls Tragwerksplanung der TU Dresden. Band 2. Dresden, 2003.

[21] Janik, M.: Die Anwendung von CFK-Lamellen bei der Sanierung historischer Mauerwerkskonstruktionen. Lehrstuhl Tragwerksplanung der TU Dresden. Dresden 2004.

[22] Jäger, W.; Baier, G.; Schöps, P.: Bewehrtes Mauerwerk nach dem überarbeiteten Eurocode 6, Teil 1-1. Mauerwerk 8 (2004) 1, S. 11–18.

[23] Jäger, W.; Baier, G.: Zur Biegebemessung (von bewehrtem Mauerwerk) nach Eurocode 6. Mauerwerk 8 (2004) 2, S. 65–71.

[24] Füllsack-Köditz, R.: Verbundverhalten von GFK-Bewehrungsstäben und Rissentwicklung in GFK-stabbewehrten Betonbauteilen. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar. Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Weimar 2004.

[25] Hamdan, A.: Ertüchtigung von historischem Mauerwerk mit Verpressankern in erdbebengefährdeten Gebieten. Dissertation. In: Bauforschung und Baupraxis, Schriftenreihe des Lehrstuhls Tragwerksplanung der TU Dresden. Band 9. Dresden 2011.

[26] Hamdan, A.; Jäger, W.: Experimental investigation of grouting anchor to strengthen the natural stone historical masonry walls under seismic actions. In: MASONRY (11) Proceedings of the Eighth International Masonry Conference, Volume 2, pp. 1541–1550. Eds. W. Jäger, B. Haseltine and A. Fried. Dresden, Germany, 4-7 July 2010.

[27] Braun, J.: Beitrag zur Sanierung von erdbebengeschädigtem Lehmmauerwerk. In: Bauforschung und Baupraxis, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Tragwerksplanung der TU Dresden. Band 11. Dresden, 2012.

[28] Jäger, W.; Fuchs, C.: Reconstruction of the Sistani House at Bam Citadel after the collapse due to the earthquake 2003. In: Proceedings of the 6th International Conference on Structural Analysis of Historic Construction: Bath 2008, S. 1181–1187.

[29] Jäger, W.; Fuchs, Chr.: Restoring Adobe Masonry in a World Cultural Heritage Site: The Sistani House in Bam, Iran. In: Proceedings of the 8th International Seminar on structural masonry, pp. 475–482. Istanbul 05-07 November 2008.

[30] Braun, J.; Burkert, T.: Einsatz von Glasfaserbewehrung in historischem Mauerwerk – dargestellt am Beispiel des Wiederaufbaus des erdbebengeschädigten Sistani Hauses in Arg-e-Bam (Iran). In: Mauerwerk-Kalender (2014), S. 269–322. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin.

[31] Breit, K.: Simader, J.; Kardel, J.: Vorgespannte Aramidstäbe und Vernadelungen in denkmalgeschützten Objekten. In: Wie wollen wir in Zukunft bauen? Wissenschaftliches Kolloquium am Lehrstuhl Tragwerksplanung 2011. Bauforschung – Baupraxis. Schriftenreihe des Lehrstuhls Tragwerksplanung der TU Dresden, Band 10, Dresden 2011. S. 175–178.

[32] Jäger, W.; Bakeer, T.: Collapse Simulation for Adobe Masonry Structures and Strengthening Measures Rely on Collapse Analysis. In: Proceedings of the ANSYS Conference & 25. CADFEM users meeting. CADFEM GmbH, Dresden 2007.

[33] Jäger, W.; Bakeer, T.: The collapse analysis as a tool for verification of earthquake vulnerability of heritage buildings. In: Assessment and strengthening of historical stone masonry structures subjected to seismic actions. Proceedings of the Iscarsah Symposium Mostar-09, 12th July 2009, Mostar, Bosnia and Herzegovina, Mostar 2010, S. 43–52.

[34] Bakeer, T.; Fuchs, C.; Jäger, W.; Schöps, P.: Neue Wege zur seismischen Ertüchtigung von Weltkulturerbe im Lehmbau: Das Beispiel der Zitadelle von Bam, Iran. Bautechnik 86 (2009) 11, S. 695–703.

[35] Wenzel, F.: Historisches Mauerwerk. Empfehlungen für die Praxis. Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe 2001 (sowie weitergehende Literatur zum Thema aus dem SFB 315).

[36] Müller, H. S.; Franken, St.: Historische Mörtel und Reparaturmörtel. Untersuchen, Bewerten, Einsetzen. Empfehlungen für die Praxis. Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe 2001 (sowie weitergehende Literatur zum Thema aus dem SFB 315).

[37] Kühn, M.; Opitz, H.: Sanierungsmaßnahmen am Dom zu St. Marien in Zwickau. Bautechnik 81 (2004) 6, S. 423–430.

[38] Gastmeyer, R.; Knöfel, R.; Nolte, T.: Sicherung von historischem Natursteinmauerwerk mit kohlefaserverstärktem Kunststoff. Bautechnik 85 (2008) 4, S. 294–299.

[39] Jäger, W:, Boekhoff; B. Burkert, T.: Sicherung des Nordwestturmes von Schloss Steinort in Polen (ehem. Ostpreußen) mittels GFK-Ankern und –Nadeln. In: Zwischenbericht zum DBU-Vorhaben „Schloss Steinort – Modellvorhaben zur Beseitigung von anthropogen verursachten Gründungsschäden und Adaption an die veränderten Umweltbedingungen“. Zwischenbericht. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung: Dresden 31.07.2014.

[40] Burkert, T.; Jäger, W.: Statischer Nachweis zur Notsicherung des NW-Turmes von Schloss Steinort. Projektunterlagen. Unveröffentlichtes Manuskript. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung: Dresden 14.04.2014.

[41] Jäger, W.; Boekhoff, B.: Fotodokumentation zum Einbau der Anker und Nadeln in den NW-Turm des Schlosses Steinort als Notsicherungsmaßnahme. Unveröffentlicht. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung: Dresden 26.07.2014.

[42] Wenzel, F.; Gigla, B.: Instandsetzung von denkmalgeschützten Bauwerken – Verpressanker im Mauerwerk. In: Mauerwerk-Kalender 27 (2002), S. 265–287. Hrsg. H.-J. Irmschler u. P. Schubert. Ernst & Sohn, Berlin.

[43] Wenzel, F.; Gigla, B.: Instandsetzung von denkmalgeschützten Bauwerken – Verpressanker im Mauerwerk. Teil 2: Ausführungsbeispiele. In: Mauerwerk-Kalender 28 (2003), S. 297–306. Hrsg. H.-J. Irmschler, P. Schubert u. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin.

[44] Jäger, H.-J.; Jäger, W.: Bautechnische Instandsetzungen der Dresdner Frauenkirche in den ersten Jahren des 20. Jahrhunderts. Teil 1: 1918–1932. In: Jahrbuch „Die Dresdner Frauenkirche“. Hrsg. H. Magirius i.A. der Gesellschaft zur Förderung der Frauenkirche Dresden e.V. Schnell & Steiner, München 2014 (im Druck).

[45] Middendorf, B.: Mörtel für die nachhaltige Instandsetzung historischer Bauwerke. In: Baustoff und Konstruktion. Festschrift zum 60. Geburtstag von Harald Budelmann. Springer-Verlag, Wiesbaden 2013, S. 213–220.

[46] Egloffstein, M.: Historisches Mauerwerk – Mineralogische Untersuchungen und Empfehlungen zur Sanierung. In: Mauerwerk im Bestand. Hrsg. WTA Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. München Pfaffenhofen. WTA Publications 2013, S. 37–53 (WTA Schriftenreihe 38)

[47] Jütte, B.; Venter, W.: Glasfaserbewehrung im Mauerwerksbau. In: Mauerwerk-Kalender 39 (2014), S. 69–88. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin.

[48] Gigla, B.: Instandsetzen und Ertüchtigung von Mauerwerk. Teil 5: Vernadeln, Verankern (Berechnung). In: Mauerwerk-Kalender 39 (2014), S. 199–230. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin.

[49] Ortlepp, S.: Nutzung von Verpressankern zur Ertüchtigung von historischem Mauerwerk. In: Mauerwerk-Kalender 39 (2014), S. 231–268. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin.

[50] Ebert, K.: Bemessungstabellen für Rechteckquerschnitte aus bewehrtem Mauerwerk mit Anwendungsbeispiel. In: Mauerwerk-Kalender 24 (1999), S. 85–91. Hrsg. P. Funk. Ernst & Sohn, Berlin.

[51] Zelger, C.: Bewehrtes Mauerwerk nach DIN 1053, T. 3, Entwurf 1987. In: Mauerwerk-Kalender 13 (1988), S. 31. Hrsg. P. Funk. Ernst & Sohn, Berlin.

[52] Rehm, G.: Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 138, Ernst & Sohn: Berlin 1961

[53] Martin, H.; Noakowski, P.: Verbundverhalten von Betonstählen. Untersuchungen auf der Grundlage von Ausziehversuchen. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 319, Ernst & Sohn: Berlin 1961, S. 100 – 175

[54] Lindorf, A.: Woher kommen die Bemessungswerte der Verbundspannung. Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010) 1, S. 53 – 59

[55] RILEM/CEB/FIP Recommendations on reinforcement steel for reinforced concrete. Bond test for reinforcement steel: 2.Pull-Out Test. CEB: St-Saphorin, Switzerland 1983

[56] Burkert, T.; Fuchs, Ch.; Jäger, W.: Wiederaufbau des Sistani Hauses in Bam, Iran. Projektunterlagen, TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung (2006 - 2016). S. auch Braun, J.; Burkert, T.: Einsatz von Glasfaserbewehrung in historischem Mauerwerk – dargestellt am Beispiel des Wiederaufbaus des erdbebengeschädigten Sistani Hauses in Arg-e-Bam (Iran). In: Mauerwerk-Kalender 39 (2014), S. 269–322. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin 2014

[57] Hegger, J.; Empelmann, M.; Schnell, J.: Weiterentwicklung der Bemessungs- und Konstriktionsregeln bei großen Stabdurchmessern (<d=32 mm, B500). Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben. RWTH Aachen/TU Braunschweig/TU Kaiserslautern. O.J.

[58] Ritter, L.: Der Einfluss von Querzug auf den Verbund zwischen Beton und Betonstahl. Diss., Fak. Bauingenieurwesen der TU Dresden, Dresden 2013

[59] Brameshuber, W.; Saenger, D.: Überprüfung der ansetzbaren Verbundspannungen für die Verankerung der Bewehrungsstäbe in Mauerwerk nach DIN 1053-3 und DIN EN 1996-1-1. Abschlussbericht F 7074 v. 23.03.2011. RWTH Aachen ibac: Aachen 2011

[60] DIN 488-1:2009-08: Betonstahl - Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung. NABau im DIN, Berlin 2009.

[61] Tepfers, R.: A Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars. Doctor thesis. Work No 723, Division of Concrete Structures, Publication 73: No. 2, Chalmers University of Technology Göteborg, 1973.

[62] Noakowski, P.: Verbundorientierte, kontinuierliche Theorie zur Ermittlung der Rissbreite. Beton- und Stahlbetonbau 80, Heft 7, S. 185-190 und Heft 8, S. 215-221

[63] Gigla, B.: Verbundfestigkeit von Verpressankern im Mauerwerk. Dissertation, Fakultät für Architektur, Universität Karlsruhe (TH) 1999

[64] Jäger, W., Boekhoff, B.; Burkert, T.; Salehi, H.: Schloss Steinort – Modellvorhaben zur Beseitigung von anthropogen verursachten Gründungsschäden und Adaption an die veränderten Umweltbedingungen. Abschlussbericht. Forschungsprojekt gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt. TU Dresden, 18.02.2016

[65] Jäger, W.; Boekhoff, B.; Köberle, T.; Hohl, M.: Verpressen von historischem Mauerwerk. In: Mauerwerk-Kalender 41 (2016), S. 163–209. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin

[66] Jäger, W.; Fuchs, Chr.: Restoring Adobe Masonry in a World Cultural Heritage Site: The Sistani House in Bam, Iran. In: Proceedings of the 8th International Seminar on structural masonry, pp. 475–482. Istanbul 05-07 November 2008.

[67] Martin, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungsstählen unter Kurzzeitbelastung

[68] Barlet, U.: Verbund zwischen Stahl und Mörtel im bewehrten Mauerwerk, Diss., Fak. Bauingenieur- und Vermessungswesen der TU München, München 1989

[69] Rüsch, H.: Stahlbeton- Spannbeton, Band 1: Werkstofteigenschaften und Bemessungsverfahren. Werner-Verlag, Düsseldorf, 1972

[70] Martin, H.: Einfluß der Betonzusammensetzung auf das Verbundverhalten von Bewehrungsstählen. Festschrift Rehm; Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und techn. Wissenschaften Berlin, 1984

[71] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 138, Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton, Berlin 1961, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn

[72] DIN 1053-3:1990-02: Mauerwerk. Bewehrtes Mauerwerk. Berechnung und Ausführung. NABau im DIN: Berlin 1990

[73] DIN EN 1015-11: Mörteldruckfestigkeit

[74] DIN V 18580:2007-03: Mauermörtel mit besonderen Eigenschaften

[75] DIN 488-1:2009-08: Betonstahl - Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung

[76] Comite Euro-International du Beton; CEB; RILEM; FIP: RILEM/CEB/FIP Recommendations on Reinforcement Steel for Reinforced Concrete. Revides Edition of: RC 6: Bond Test for Reinforcement steel: 2. Pull-Out-Test. (Rev.Ed., May'83) Final Draft of: Measuring the Rib Pattern of Re-Bars (May 1983) In: CEB-News (1983), Nr. 73

[77] Hankers, C.: Zum Verbundtragverhalten laschenverstärkter Betonbauteile unter nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung. In: DAfStb Heft 473, 1997, Beuth Verlag GmbH.

[78] Ritter, L: Dissertation: Der Einfluss von Querzug auf den Verbund zwischen Beton und Betonstahl, 2013, TU Dresden

[79] Jäger, W.; Pohle, F.: Einsatz von hochfestem Natursteinmauerwerk beim Wiederaufbau der Frauenkirche Dresden. In: *Mauerwerk-Kalender 24 (1999)*. Hrsg. P. Funk, Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1999, S. 729–755

[80] Gedore, Elektronischer Drehmomentenschlüssel. https://de.gedore-shop.com/GEDORE/Drehmomentwerkzeuge/Elektronische-Drehmomentschluessel/Elektronischer-Drehmomentschluessel-TorcoTronic-III-10-350-N-m-7-4-258-2-lbf-ft.html, Aufruf:04-08-2018

[81] Dehmeßstreifen, Preusser Meßtechnik: https://dms-technik.de/index.php?option=com_content&view=article&id=820&Itemid=843, Aufruf, 21.08.2018

[82] Tension/Torsion Prüfmaschine, Zwick/Roell: https://www.zwick.de/de-de/servohydraulische-pruefmaschinen/hbt-hct-torsionsschwingung, Aufruf 21.08.2018

[83] Binda, L.; Schueremans, L.; Verstrynge, E. et al: Long term compressive testing of masonry – test procedure and practical experience. SAHC 2008, proceedings und https://bwk.kuleuven.be/mat/.../2008-binda-longterm-sahc.pdf*, Aufruf 10.09.2018*

[84] Haller, J.: Untersuchungen zum Vorspannen von Mauerwerk. Diss. Universität Karlsruhe, Institut für Tragkonstruktionen, 1982

[85] Burkert, T.¸Fuchs, Ch. Schweinfurth, J.: Safeguarding and retrofitting works at the UNESCO World Heritage Site Takht-e Soleyman, Iran / Sicherungsarbeiten am UNESCO-Welterbe Takht-e Soleyman, Iran. Mauerwerk (2018), H. 2, S.91-102

[86] Produktdatenblatt Casea casusan HGE – historischer Gipsestrich. Calciumsulfat-Fließestrich. CA-C30-F6 nach DIN EN 13813. https://www.ais-online.de/media/4739402/pdf/20030356px595x842.pdf. Aufruf: 17.07.2018

[87] Produktdatenblatt HSTV-p Trass-Verpressmörtel HS von TUBAG. https://www.ais-online.de/media/60686/pdf/20409480px595x842.pdf. Aufruf 19.08.2018

[88] Produktdatenblatt NHLV-g Mörtel für das Verfüllen von Mauerwerk von TUBAG. https://media2.heinze.de/media/60686/pdf/20409184px595x842.pdf, Aufruf 01.08.2018

[89] DIN 52450: 1985: Prüfung anorganischer nichtmineralischer Baustoffe – Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Prüfkörpern – Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin 1985

[90] Burkert, T.¸Fuchs, Ch. Sobott, R.: Statisch-konstruktive Sanierungsarbeiten am westlichen Iwan der UNESCO- Weltkulturerbestätte Takht-eSoleyman, Iran. Mauerwerk (2019), S.295-331

12 Anhang-Fotodokumentation und Messwerte der Versuche

12.1 Versuche der Mauerwerksbewehrung

12.1.1 Verwendete Steinformate

a) Kalksandstein, KS 2DF (l/b/h 240/115/113, mit NMIIa+MGIII

b) Hochlochziegel, HLz 2DF (l/b/h 240/115/113, mit NM IIa

Bild 164 *Verwendete Steinformate*

12.1.2 Verwendete Mörtelsorten

a) Verwendeter Normalmörtel NMIIa

b) Verwendeter Mörtel NMIII

Bild 165 *Verwendete Mörtelsorten*

a) Betonstahl in Ringen B500 A mit drei Rippenreihen, ds = 6 mm

b) Betonstabstahl B500 B mit vier Rippenreihen, ds = 10 mm

Bild 166 *Verwendete Bewehrungsstäbe*

12.1.3 Geprüfte Verbundlänge der Mauerbewehrung

Bild 167 *Geprüfte Verbundlängen der Bewehrung [2ds, 5ds, 10ds und 15ds]*

12.1.4 Aufmauern der Prüfkörper

Bild 168 *Herstellung des Mauerwerksprüfkörpers aus Hochlochziegeln*

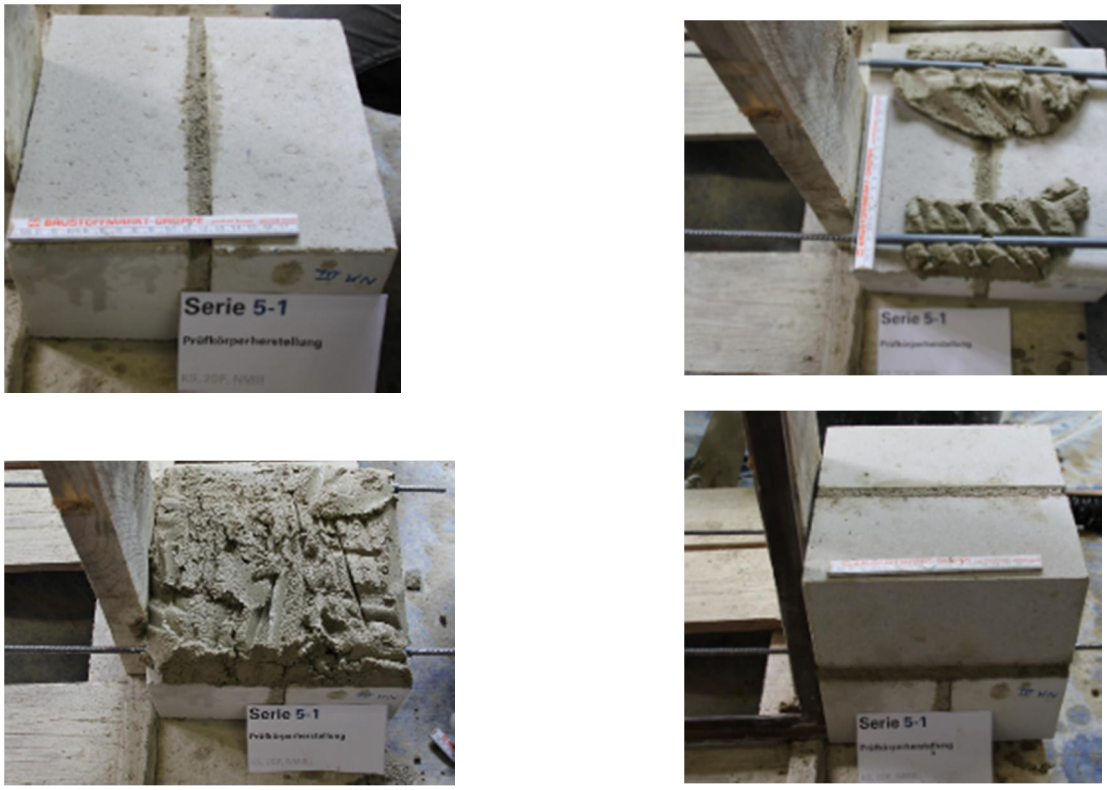


Bild 169 *Herstellung des Mauerwerksprüfkörpers aus Kalksandstein*

12.1.5 Versuchsbegleitende Materialprüfungen-Mörtelprüfungen

Bild 170 *Prüfen der Druckfestigkeit des Mauermörtels*

Bild 171 *Druckfestigkeitsversuch-Prismenversagen*

											Biegezugfestigkeit		Druckfestigkeit	
lfd. Nr.	Name	Material	erstellt	geprüft	Alter	Breite	Höhe	Länge	Masse	Dichte	Bruchkraft	f_BZ	Bruchkraft	f_m
					[d]	[mm]	[mm]	[mm]	[Kg]	[kg/m³]	[kN]	[N/mm²]	[kN]	[N/mm²]
1	Biegezug MBz, NM IIa	maxit 920, NM IIa	22.03.2017	26.04.2017	35	40,1	40,7	159,7	0,433	1661	0,76	1,72		
2						40,0	40,7	160,0	0,431	1655	0,87	1,97		
3						39,9	40,4	159,8	0,430	1669	0,74	1,70		
1	Druck MD-NM IIa	maxit 920, NM IIa	22.03.2017	26.04.2017	35	40,0	40,0						10,27	6,42
2						40,0	40,0						9,85	6,16
3						40,0	40,0						8,64	5,40
4						40,0	40,0						8,56	5,35
						39,9	40,0						10,13	6,35
5						39,9	40,0						10,34	6,48
										1662	**0,79**	**1,80**	**9,63**	**6,03**

Bild 172 *Mechanische Eigenschaften der verwendeten Mörtelsorten/NMIIa Prüfserien 1+3*

											Biegezugfestigkeit		Druckfestigkeit	
lfd. Nr.	Name	Material	erstellt	geprüft	Alter	Breite	Höhe	Länge	Masse	Dichte	Bruchkraft	f_BZ	Bruchkraft	f_m
					[d]	[mm]	[mm]	[mm]	[Kg]	[kg/m³]	[kN]	[N/mm²]	[kN]	[N/mm²]
1	Biegezug MBz, NM IIa	maxit 920, NM IIa	22.03.2017	26.04.2017	35	40,7	39,8	160,0	0,430	1659	0,96	2,23		
2						40,4	39,9	159,9	0,429	1664	0,97	2,26		
3						40,5	40,1	159,7	0,431	1662	0,93	2,14		
4						40,5	39,9	160,0	0,430	1663	0,91	2,12		
5						40,4	40,1	160,1	0,427	1646	0,83	1,92		
6						40,7	39,9	160,0	0,425	1636	0,75	1,74		
1	Druck MD-NM IIa	maxit 920, NM IIa	22.03.2017	26.04.2017	35	40,0	39,8						11,82	7,42
2						40,0	39,8						11,78	7,40
3						40,0	39,9						12,82	8,03
4						40,0	39,9						10,96	6,87
5						40,0	40,0						11,80	7,38
6						40,0	40,0						12,32	7,70
7						40,0	39,9						12,46	7,81
8						40,0	39,9						12,29	7,70
9						40,0	40,0						12,08	7,55
10						40,0	40,0						11,64	7,28
11						40,0	39,9						12,15	7,61
12						40,0	39,9						12,07	7,56
										1655	**0,89**	**2,07**	**12,02**	**7,53**

Bild 173 *Mechanische Eigenschaften der verwendeten Mörtelsorten/NMIIa Prüfserien 2+4*

											Biegezugfestigkeit		Druckfestigkeit	
lfd. Nr.	Name	Material	erstellt	geprüft	Alter	Breite	Höhe	Länge	Masse	Dichte	Bruchkraft	f_BZ	Bruchkraft	f_m
					[d]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg/m³]	[kN]	[N/mm²]	[kN]	[N/mm²]
1	Biegezug MBz, NM III	maxit 950, NM III	06.04.2017	11.05.2017	35	39,8	40,4	161,1	0,462	1784	1,34	3,09		
2						40,5	39,8	159,5	0,451	1754	1,61	3,76		
3						40,0	39,5	160,3	0,449	1773	1,39	3,34		
4						40,0	39,5	160,3	0,450	1777	1,21	2,91		
5						40,0	39,3	160,5	0,444	1760	1,39	3,37		
6						39,9	39,9	159,6	0,452	1779	0,78	1,84		
1	Druck MD-NM III	maxit 950, NM III	06.04.2017	11.05.2017	35	39,8	40,0						24,20	15,10
2						39,8	40,0						21,16	13,20
3						40,0	39,8						26,09	16,30
4						40,0	39,8						24,02	15,00
5						40,0	39,5						24,13	15,10
6						40,0	39,5						21,52	13,50
7						40,0	39,5						19,59	12,20
8						40,0	39,5						23,59	14,70
9						40,0	39,3						24,81	15,50
10						40,0	39,3						22,99	14,40
11						40,0	39,9						21,76	13,60
12						40,0	39,9						19,88	12,40
										1771	**1,29**	**3,05**	**22,81**	**14,25**

Bild 174 *Mechanische Eigenschaften der verwendeten Mörtelsorten/NMII Prüfserie 5*

12.1.6 Versuchsbegleitende Materialprüfungen-Fugendruckfestigkeit

Bild 175 *Prüfen der Fugendruckfestigkeit des Mauermörtels*

Bild 176 *Fugendruckfestigkeitsversuch-Prismenversagen*

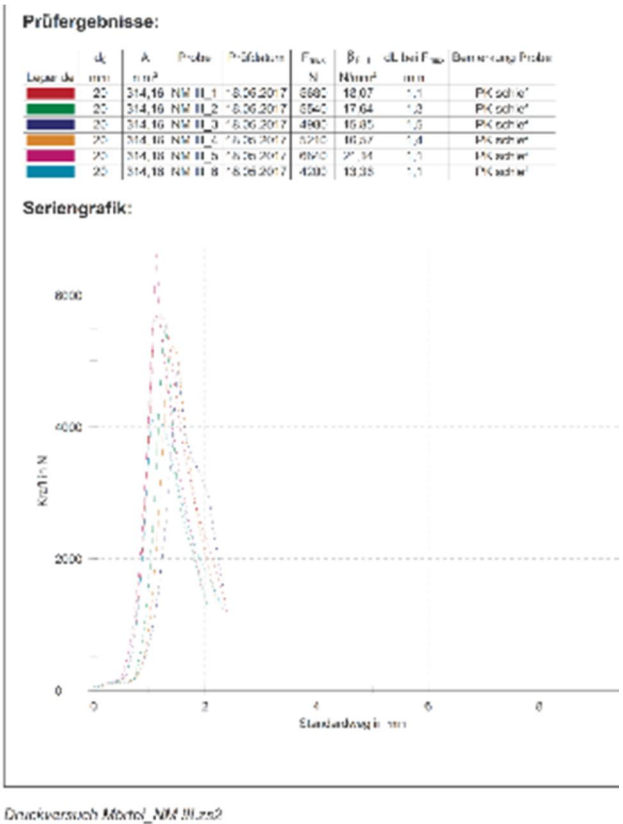


Bild 177 *Fugendruckfestigkeit-NMIII*

Prüfergebnisse:

Legende	d_0 mm	A mm²	Probe	Prüfdatum	F_{max} N	$\beta_{F,II}$ N/mm²	dL bei F_{max} mm	Bemerkung Probe
	20	314,16	NM IIa_1	18.05.2017	3060	9,75	1,3	PK schief
	20	314,16	NM IIa_2	18.05.2017	3230	10,28	1,1	PK schief
	20	314,16	NM IIa_3	18.05.2017	7800	24,84	1,4	
	20	314,16	NM IIa_4	18.05.2017	2620	8,35	1,1	
	20	314,16	NM IIa_5	18.05.2017	2760	8,78	1,0	PK schief
	20	314,16	NM IIa_6	18.05.2017	2230	7,11	1,1	PK schief
	20	314,16	NM IIa_7	18.05.2017	2720	8,67	0,9	PK schief

Seriengrafik:

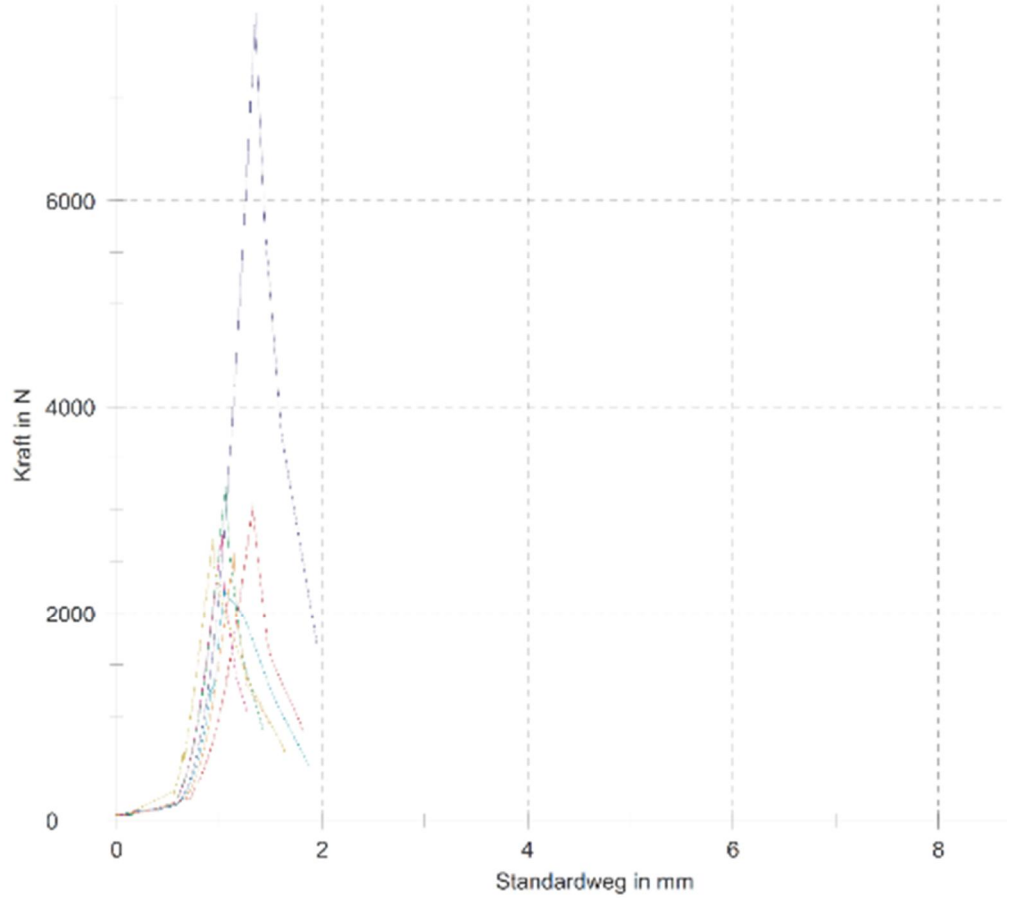


Bild 178 *Fugendruckfestigkeit-NMIII*

12.1.7 Versuchsbegleitende Materialprüfungen-Stahlzug

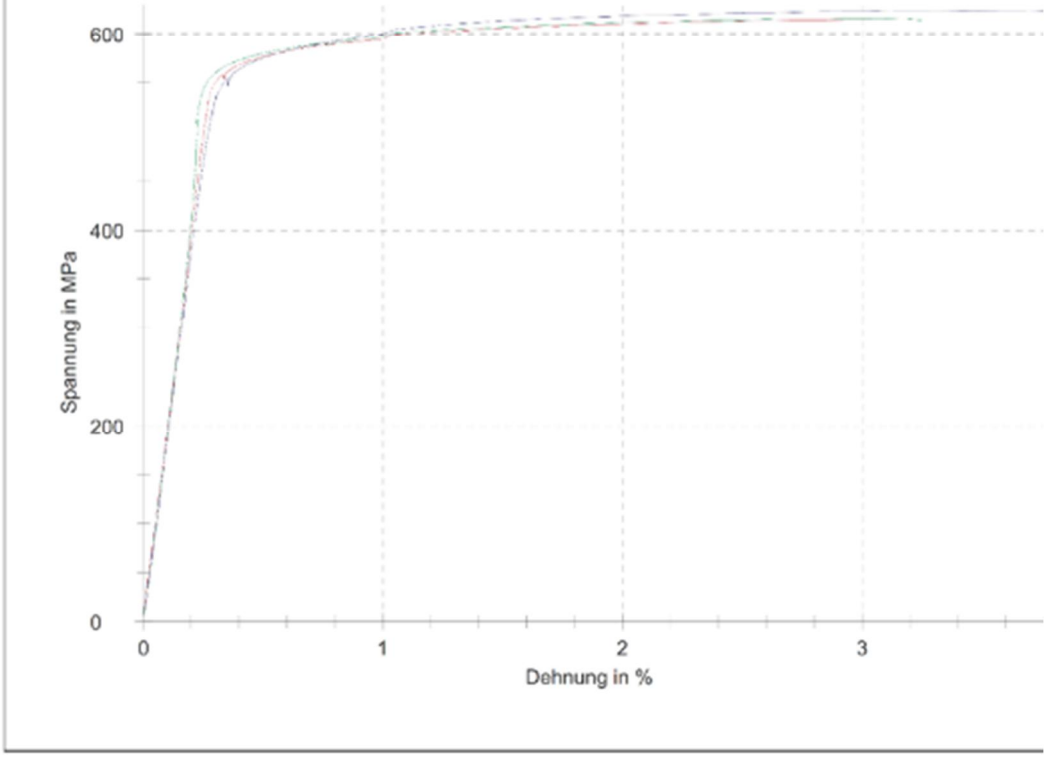
OML-Projektnummer	:	2016_379
Projektname	:	Ankerauszug Mauerwerksfuge_FaAnNa
Auftraggeber	:	H. Youssef
Prüfdatum	:	04.05.2017
Serienbezeichnung	:	Stahl 6 mm
Werkstoff	:	Bewehrungsstahl
Prüfnorm	:	DIN EN 6892-1
Prüfer	:	M. Liebe

Prüfergebnisse:

Legende	Probe	d_0 mm	S_0 mm²	L_c mm	L_0 mm	L_u mm	$R_{p0.2}$ MPa	R_{eH} MPa	R_m MPa	A_{gt} %	$A_{manuell}$ %
	PK1	6	28,3	100,3	30,1	34,4	576	-	615	3,1	14,7
	PK2	6	28,3	100,3	30,1	34,1	580	-	616	3,0	13,7
	PK3	6	28,3	100,3	30,1	34,5	576	-	624	3,5	15,0

Legende	Bemerkung Probe
	Bruch über MultiXtens
	Bruch über Klemmung unten
	Bruch über Klemmung unten

Seriengrafik:



Stahlzug 6mm.zs2

Bild 179 *Stahlzugversuch/6 mm*

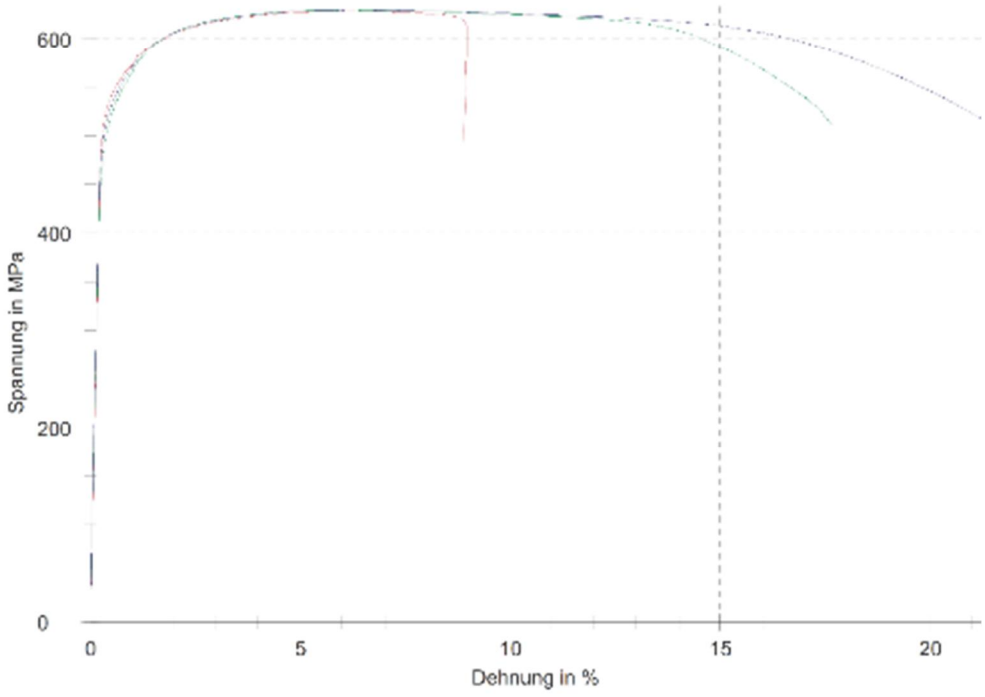
OML-Projektnummer	:	2016_379
Projektname	:	Ankerauszug Mauerwerksfuge_FaAnNa
Auftraggeber	:	H. Youssef
Prüfdatum	:	05.05.2017
Serienbezeichnung	:	Stahl 10 mm
Werkstoff	:	Bewehrungsstahl
Prüfnorm	:	DIN EN 6892-1
Prüfer	:	M. Liebe

Prüfergebnisse:

Legende	Probe	d_0 mm	S_c mm²	L_c mm	L_0 mm	L_u mm	$R_{p0.2}$ MPa	R_{aH} MPa	R_m MPa	A_{gt} %	$A_{mm,all}$ %
	PK1	10	78,5	120,3	50,1	60,2	537	-	628	6,1	20,4
	PK2	10	78,5	120,3	50,1	60,7	513	-	630	6,2	21,4
	PK3	10	78,5	120,3	50,1	61,8	521	-	630	6,3	23,6

Legende	Bemerkung Probe
	Bruch über MultiXtens
	Bruch an MultiXtensschneiden unten

Seriengrafik:



Stahlzug 10mm.zs2

Bild 180 *Stahlzugversuch/10 mm*

12.1.8 Ausziehversuche

Bild 181 *Ausziehversuche- Serie 1 KS-2DF/Bewehrung 6 mm/NMIIa/ Verbundlänge 2ds,5ds,10ds und 15ds*

Bild 182 *Ausziehversuche- Serie 2 HLz-2DF/Bewehrung 6 mm/ NMIIa/Verbundlänge 2ds,5ds,10ds und 15 ds*

Bild 183 *Ausziehversuche- Serie 3 KS-2DF/Bewehrung10 mm/NMIIa/ Verbundlänge 2ds,5ds,10ds und 15 ds*

Bild 184 *Ausziehversuche- Serie 4 HLz-2DF/Bewehrung 10 mm/ NMIIa/Verbundlänge 2ds,5ds,10ds und 15 ds*

Bild 185 *Ausziehversuche- Serie 5 KS-2DF/Bewehrung 6 mm/ NMIII/Verbundlänge 2ds,5ds,10ds und 15 ds*

12.2 Versuche zum Verbundverhalten im Naturstein

12.2.1 Verwendete Faserverbundwerkstoffe

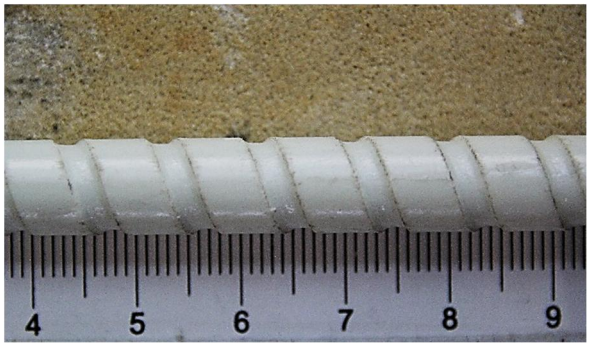


Bild 186 *Schöck ComBAR GFK-Bewehrungsstab, Durchmesser 8 mm*

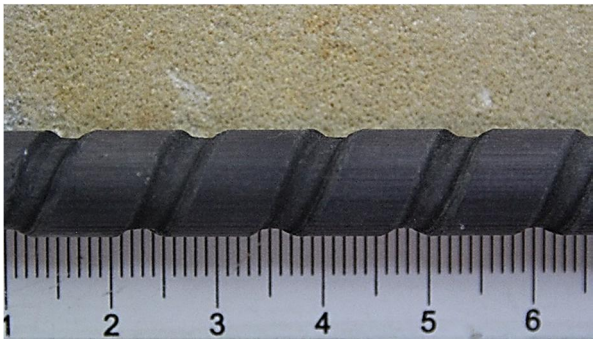


Bild 187 *Thyssen Krupp Carbon4ReBAR(C4R) CFK-Bewehrungsstab, Durchmesser 8 mm*

Bild 188 *Spinbolt K61-32(R)*

Bild 189 *Schöck ComBAR GFK-Bewehrungsstab, Durchmesser 16 mm*

12.2.2 Versuchsbegleitende Materialprüfung – Natursandstein

Bild 190 *Ermittlung der Druckfestigkeit*

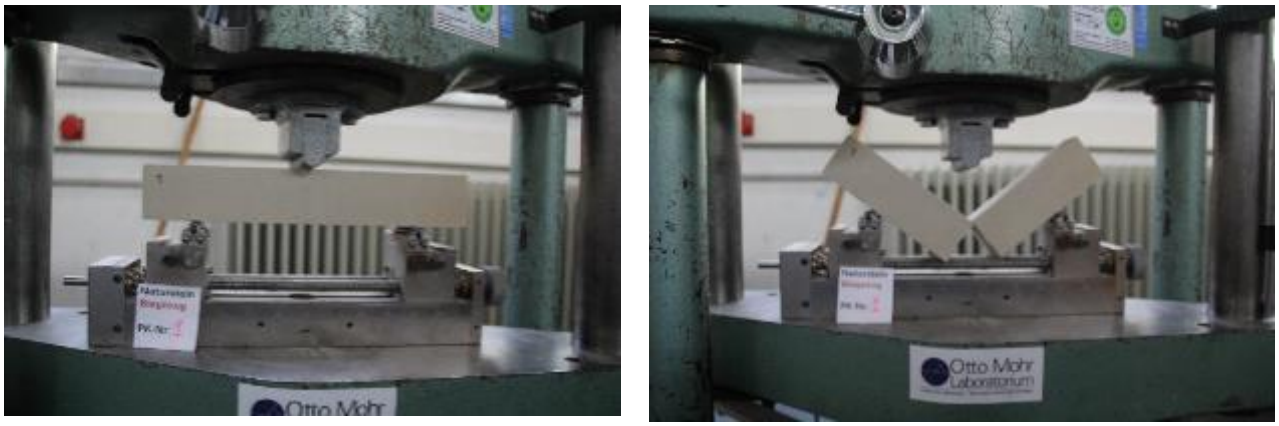


Bild 191 *Ermittlung der Biegezugfestigkeit*

Bild 192 *Ermittlung des E-Moduls*

12.2.3 Versuchsbegleitende Materialprüfung – Saugfähigkeit Natursandstein

Bild 193 *Getrocknete Prüfkörper aus Natursandstein*

Bild 194 *Untersuchung der Saugfähigkeit der Natursandsteinprüfkörper*

12.2.4 Versuchsbegleitende Materialprüfung – GFK-Stäbe

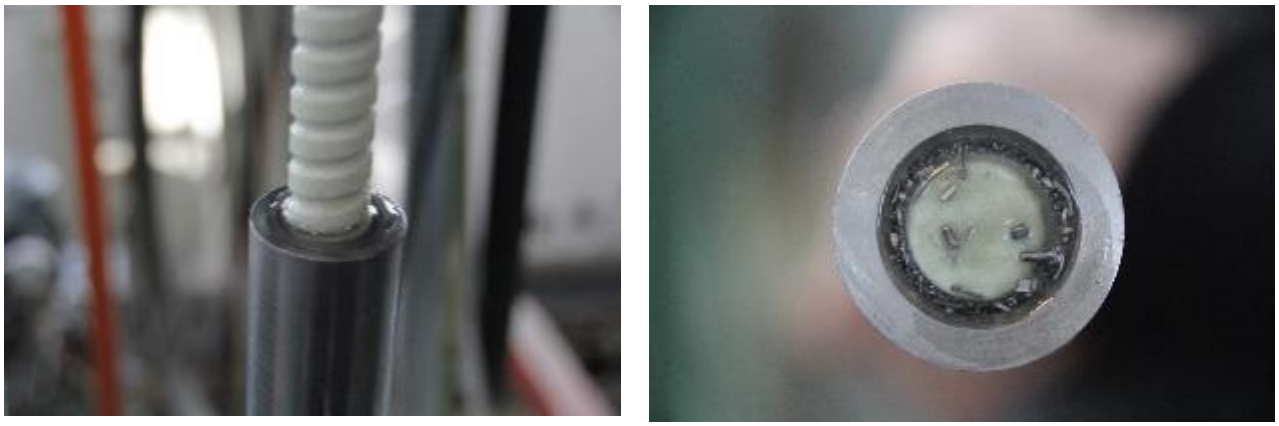


Bild 195 *Zugversuche GFK-Stab, Durchmesser 16mm, Verankerung in Stahlhülsen*

Bild 196 *Zugversuch GFK-Stab, Durchmesser 16mm*

12.2.5 Prüfkörperherstellung- kurze Verbundlänge

Bild 197 *GFK-Stäbe in Natursandsteinprüfkörper*

Bild 198 *Verfüllen des Mörtels, variierende Mörtelsorten und Verbundarten unter Verwendung von GFK-Stäben, Durchmesser 16mm*

Bild 199 *Verfüllte Prüfkörper; kurze Verbundlänge, variierende Mörtelsorten und Verbundarten unter Verwendung von GFK-Stäben, Durchmesser 16mm*

12.2.6 Prüfkörperherstellung große Verbundlänge

Bild 200 *Aufmauern des Prüfkörpers auf Stahlrahmen*

Bild 201 *Aufgemauerter Prüfkörper auf Stahlrahmen*

Bild 202 *Kernbohrung, Durchmesser 56mm*

12.2.7 Ausziehversuche mit kurzer Verbundlänge

12.2.7.1 Ausziehversuche mit 16mm GFK Stab

Bild 203 *Statische Ausziehversuche, Versuchsserie 2, GFK-Stab 16mm, HSTV-P01*

Bild 204 *Prüfkörper nach statischem Ausziehversuch, Versuchsserie 2, GFK-Stab 16mm, HSTV-P01*

Bild 205 *Spaltung des Prüfkörpers nach statischem Ausziehversuch, Versuchsserie 2, GFK-Stab 16mm, HSTV-P01*

12.2.7.2 Ausziehversuche mit 8mm GFK-Stab

Bild 206 *Statische Ausziehversuche, Versuchsserie 1, GFK-Stab 8mm, HSTV-P01*

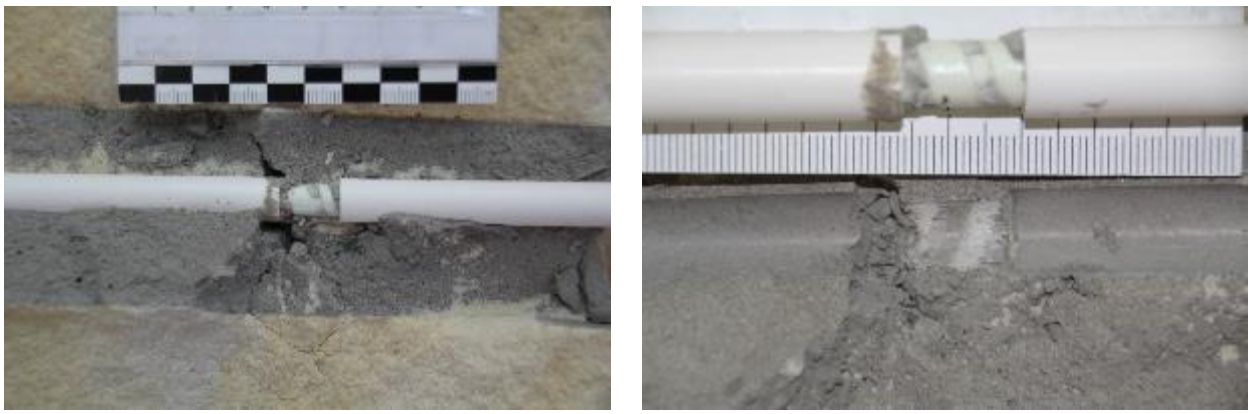


Bild 207 *Spaltung des Prüfkörpers nach statischem Ausziehversuch, Versuchsserie 1, GFK-Stab 8mm, HSTV-P01*

12.2.7.3 Ausziehversuche mit 8mm CFK-Stab

Bild 208 *Statische Ausziehversuche, Versuchsserie 4, CFK-Stab 8mm, HSTV-P01*

Bild 209 *Spaltung des Prüfkörpers nach statische Ausziehversuche, Versuchsserie 4, CFK-Stab 8mm, HSTV-P01*

Bild 210 *Spaltung des Prüfkörpers nach statische Ausziehversuche, Versuchsserie 4, GFK-Stab 8mm, HSTV-P01*

12.2.8 Ausziehversuche mit großer Verbundlänge

12.2.8.1 Ausziehversuch mit 16mm GFK-Stab

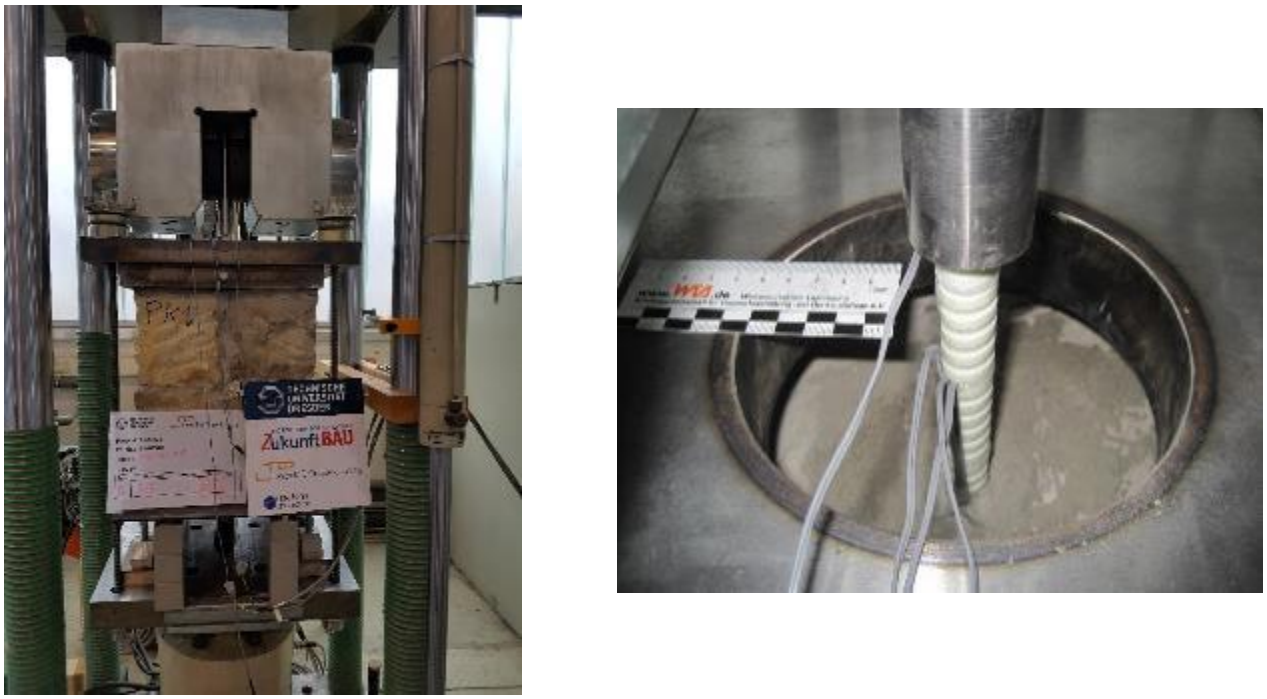


Bild 211 *Statische Ausziehversuche, Versuchsserie 1, GFK-Stab 16mm, HSTV-P01*

Bild 212

12.2.8.2 Ausziehversuch mit 27mm GFK-Stab

Bild 213 *Statische Ausziehversuche, Versuchsserie 2, GFK-Stab 27mm, HSTV-P01*

Bild 214

Bild 215

12.3 Torsionsversuche

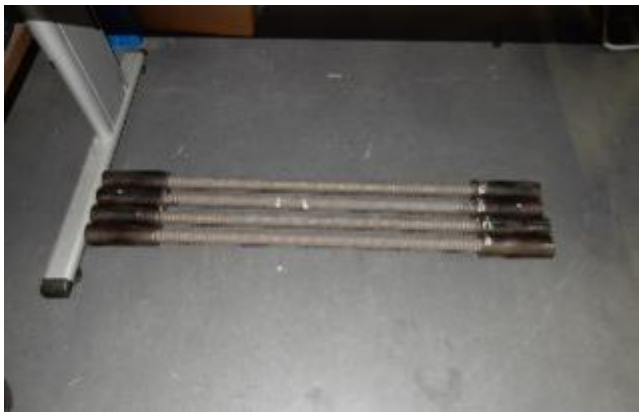


Bild 216 *Torsionsversuche, GFK-Anker, Durchmesser 27mm, Verankerung in Stahlhülse, Befestigung in Tension-Torsion-Prüfmaschine*

Bild 217 *Torsionsversuche, GFK-Anker, Durchmesser 27mm, Verankerung in Stahlhülse, Befestigung in Tension-Torsion-Prüfmaschine*

12.4 Dauerstandversuche

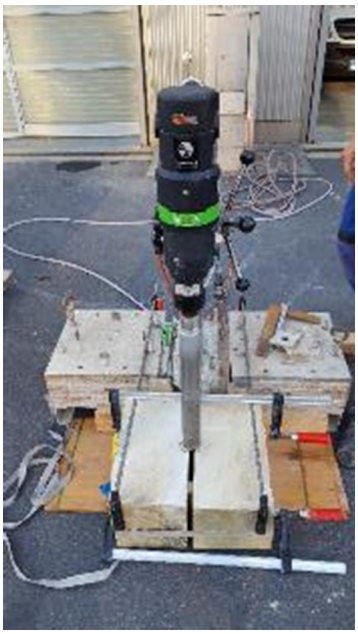


Bild 218 *Kernbohrung , fertiggestellter Versuchskörper*

Bild 219 *Ausgleichsmörtel für gleichmäßigen Lasteintrag durch Vorspannung*

Bild 220 *Ankersystem aus glasfaserverstärktem Kunststoff*

Bild 221 *Setzdehnungsmessung Mauerwerk*

Bild 222 *DMS mittig im GFK Stab*

12.5 Versuchsmauerwerk

Bild 223 *Versuchsmauer aus Mauerziegel mit integrierten Riss*

Bild 224 *Zweischaliges Bruchsteinmauerwerk aus Granit*

Bild 225 *Zweischaliges Natursandsteinmauerwerk*

Bild 226 *Zweischaliges Natursandsteinmauerwerk*