

Schriftenreihe Bauwerkserhaltung und Holzbau  
Heft 3

Uwe Pfeiffer

Experimentelle und theoretische Untersuchungen  
zum Klebeverbund zwischen  
Mauerwerk und Faserverbundwerkstoffen

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Werner Seim  
Weitere Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger, TU Dresden  
Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Fehling

Tag der mündlichen Prüfung

30. Juni 2009

Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2009  
ISBN print: 978-3-89958-780-7  
ISBN online: 978-3-89958-781-4  
URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-7814>

© 2009, kassel university press GmbH, Kassel  
[www.upress.uni-kassel.de](http://www.upress.uni-kassel.de)

Umschlaggestaltung: Bettina Brand Grafikdesign , München  
Druck und Verarbeitung: DigitalPrint, Erlangen  
Printed in Germany

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Werner Seim  
Universität Kassel  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau  
Kurt-Wolters-Straße 3  
34125 Kassel  
Tel. +49 (0) 561 804 2625  
Fax +49 (0) 561 804 7647  
[wseim@uni-kassel.de](mailto:wseim@uni-kassel.de)  
[www.uni-kassel.de/fb14/tragwerk/](http://www.uni-kassel.de/fb14/tragwerk/)

**In Gedenken  
an meine geliebte Frau  
Conny**

\* 06.09.1980    † 05.11.2008



# Vorwort des Herausgebers

Der weitaus überwiegende Anteil tragender und aussteifender Wände wurde und wird gemauert. Das gilt vor allem für den Wohnungsbau, aber auch - in abgeschwächter Form - für öffentliche Bauten sowie für Industrie- und Verwaltungsgebäude. Die Vielfalt unterschiedlicher Verbände und Steinoberflächen prägt ganze Stadtquartiere. Wie alle Bauwerke, so sind auch Mauerwerksbauten über die Zeit hinweg veränderten Nutzungsanforderungen unterworfen. In diesem Zusammenhang stellt sich für den verantwortlichen Ingenieur immer wieder die Frage, wie höhere Beanspruchungen von einem bestehenden Tragwerk aufgenommen werden können. Dass aufgeklebte Faserverbundwerkstoffe sinnvoll eingesetzt werden können, um Mauerwerkskonstruktionen nachträglich zu verstärken, ist seit längerem bekannt. Allerdings fehlte bisher eine systematische wissenschaftliche Untersuchung zum Verbundverhalten zwischen Faserverbundwerkstoff und Mauerwerksoberfläche. Hier setzt die Arbeit von Uwe Pfeiffer an. Er hat - aufbauend auf den „Stand der Forschung“ - ein Versuchsprogramm erarbeitet, das der Fülle möglicher Materialkombinationen und den unterschiedlichen Skalen der Modellbildung gleichermaßen gerecht wird. Im theoretischen Teil setzt Uwe Pfeiffer die „Theorie des verschieblichen Verbunds“ ein und er verwendet sogenannte „Spannungsfelder“, um die beobachteten Phänomene zu beschreiben. Neben den neuen und wertvollen wissenschaftlichen Erkenntnissen liefert die Dissertation wichtige Ansätze für weiterführende Forschungsarbeit. Auch aus diesem Grund wünsche ich der Arbeit von Uwe Pfeiffer eine gute Verbreitung in der Fachwelt.

Kassel,  
im August 2009  
Werner Seim



# Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau im Institut für konstruktiven Ingenieurbau (IKI) der Universität Kassel. Die Anregung zu diesem Forschungsvorhaben verdanke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Werner Seim. Ich möchte mich bei ihm für das entgegengebrachte Vertrauen, die stets konstruktive Arbeitsatmosphäre und die sehr guten Arbeitsbedingungen bedanken. Falls es mir gelungen sein sollte einen substanziellen Beitrag zur Frage der Verstärkung von Mauerwerksscheiben mit aufgeklebten Faserverbundwerkstoffen zu leisten, verdanke ich dies nicht zuletzt der Unterstützung meines Doktorvaters. Weiterhin bedanke ich mich herzlichst bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger (TU Dresden) und Herrn Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Fehling für die Übernahme der Korreferate.

Ein besonderer Dank gilt meinen Kollegen Dipl.-Ing. Heiko Koch, Dr.-Ing. Carsten Pörtner, Dipl.-Ing. Martin Schäfers, Dr.-Ing. Karsten Schilde und Dipl.-Ing. Wolfgang Römer, die in Diskussionen gern ihre Erfahrungen mit einbrachten, sowie Herrn Guido Osterbart, der durch seinen persönlichen Einsatz wesentlich zum Gelingen der experimentellen Untersuchungen beitrug. Mein Dank gilt zugleich unserer Sekretärin Frau Marianne Aschenbrenner für die Unterstützung bei den anfallenden Verwaltungsaufgaben. Ebenfalls möchte ich mich bei Matthias Hempel, Patricia Schönewald, Thorsten Seydel, Matthias Wehner, Alexander Vogt und Tobias Vogt für die Unterstützung bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen und der Aufbereitung der Messdaten bedanken.

Zürich (Schweiz),  
im Juli 2009

Uwe Pfeiffer



# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                           |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>                                                         | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivation und Zielsetzung . . . . .                                      | 1         |
| 1.2      | Stufen der Modellbildung . . . . .                                        | 2         |
| 1.3      | Methodik und Abgrenzung . . . . .                                         | 4         |
| <b>2</b> | <b>Stand der Forschung</b>                                                | <b>5</b>  |
| 2.1      | Überblick . . . . .                                                       | 5         |
| 2.2      | Verankerungsuntersuchungen am Mauerstein . . . . .                        | 8         |
| 2.2.1    | Vogel 2000 . . . . .                                                      | 8         |
| 2.2.2    | Aiello, Sciolti 2003-2006 . . . . .                                       | 10        |
| 2.2.3    | Wallner 2008 . . . . .                                                    | 12        |
| 2.3      | Untersuchungen an Mauerwerkskleinkörpern . . . . .                        | 15        |
| 2.3.1    | Schwegler 1994 . . . . .                                                  | 15        |
| 2.3.2    | Ehsani et al. 1997 . . . . .                                              | 16        |
| 2.3.3    | Casareto et al. 2003 . . . . .                                            | 17        |
| 2.3.4    | Wallner 2008 . . . . .                                                    | 18        |
| 2.4      | Tragfähigkeitsuntersuchungen an Mauerwerkskörpern und Bauteilen . . . . . | 19        |
| 2.4.1    | Schwegler 1994 . . . . .                                                  | 19        |
| 2.4.2    | Ehsani et al. 1995 - 2000 . . . . .                                       | 24        |
| 2.4.3    | Triantafyllou 1998 . . . . .                                              | 24        |
| 2.4.4    | Tumialan, Nanni, Galati et al. 1999 - 2005 . . . . .                      | 28        |
| 2.4.5    | Jai, Springer 2000 . . . . .                                              | 30        |
| 2.4.6    | Seim et al. 2002 - 2003 . . . . .                                         | 31        |
| 2.4.7    | ElGawady 2004 . . . . .                                                   | 33        |
| 2.4.8    | Maria et al. 2006 . . . . .                                               | 34        |
| 2.4.9    | Wallner 2008 . . . . .                                                    | 35        |
| 2.5      | Anwendungsempfehlungen und Normen . . . . .                               | 37        |
| 2.5.1    | CNR-DT 200/2004 . . . . .                                                 | 37        |
| 2.5.2    | SIA 166:2004 - Klebebewehrungen . . . . .                                 | 38        |
| 2.6      | Zwischenbilanz . . . . .                                                  | 40        |
| <b>3</b> | <b>Grundlagen der Modellbildung</b>                                       | <b>43</b> |
| 3.1      | Die Theorie der Spannungsfelder . . . . .                                 | 43        |
| 3.1.1    | Einführung in die Thematik . . . . .                                      | 43        |
| 3.1.2    | Die Plastizitätstheorie . . . . .                                         | 44        |

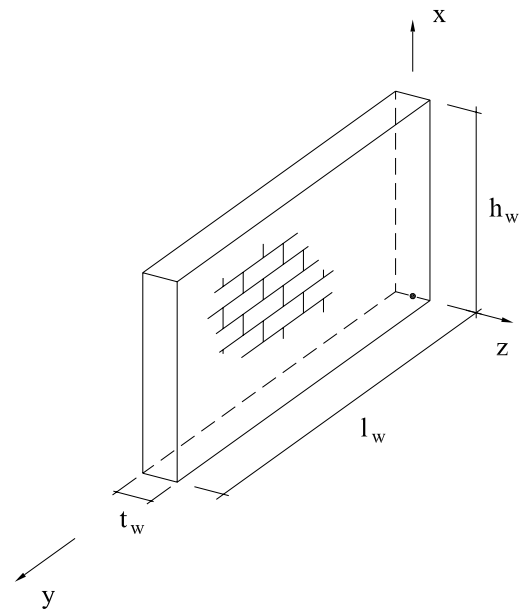
|          |                                                                  |            |
|----------|------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.1.3    | Bruchbedingung für Mauerwerk . . . . .                           | 45         |
| 3.1.4    | Unverstärkte Mauerwerkswände . . . . .                           | 49         |
| 3.1.5    | Verstärkte Mauerwerkswände . . . . .                             | 54         |
| 3.2      | Der Ansatz des verschieblichen Verbundes . . . . .               | 54         |
| 3.2.1    | Grundlagen . . . . .                                             | 56         |
| 3.2.2    | Herleitung . . . . .                                             | 57         |
| 3.2.3    | Lösung am Zwischenrisselement . . . . .                          | 59         |
| 3.2.4    | Lösung am Endverankerungselement . . . . .                       | 67         |
| 3.2.5    | Rechnergestützte Lösung für das Endverankerungselement . . . . . | 70         |
| <b>4</b> | <b>Verwendete Werkstoffe</b>                                     | <b>71</b>  |
| 4.1      | Wahl der Werkstoffe . . . . .                                    | 71         |
| 4.2      | Klebstoffe . . . . .                                             | 71         |
| 4.3      | Faserverbundwerkstoffe . . . . .                                 | 72         |
| 4.4      | Mauersteine . . . . .                                            | 77         |
| 4.4.1    | Druckfestigkeiten . . . . .                                      | 80         |
| 4.4.2    | Oberflächenzugfestigkeiten . . . . .                             | 81         |
| 4.5      | Mörtel . . . . .                                                 | 86         |
| 4.6      | Mauerwerk . . . . .                                              | 86         |
| <b>5</b> | <b>Endverankerungsversuche am Stein - Serien A und B</b>         | <b>89</b>  |
| 5.1      | Versuchskörper . . . . .                                         | 89         |
| 5.2      | Versuchsaufbau . . . . .                                         | 91         |
| 5.3      | Ergebnisse . . . . .                                             | 94         |
| 5.3.1    | Einfluss der Mauersteine . . . . .                               | 98         |
| 5.3.2    | Einfluss der Klebstoffe . . . . .                                | 100        |
| 5.3.3    | Einfluss der Faserverbundwerkstoffe . . . . .                    | 104        |
| 5.3.4    | Einfluss der Verbundlänge . . . . .                              | 104        |
| <b>6</b> | <b>Verankerungsversuche am Wandknoten - Serie C</b>              | <b>109</b> |
| 6.1      | Versuchskörper . . . . .                                         | 109        |
| 6.2      | Versuchsaufbau . . . . .                                         | 111        |
| 6.3      | Ergebnisse . . . . .                                             | 113        |
| 6.3.1    | Einfluss der Orientierung der FVW zur Lagerfuge . . . . .        | 116        |
| 6.3.2    | Einfluss der Verbundbreite . . . . .                             | 122        |
| <b>7</b> | <b>Rechenmodell für den Klebverbund</b>                          | <b>123</b> |
| 7.1      | Herleitung der Modellparameter . . . . .                         | 123        |
| 7.1.1    | Verbundbruchkräfte bei Entkoppelungsbeginn . . . . .             | 124        |
| 7.1.2    | Einführung eines Beiwerts . . . . .                              | 126        |
| 7.1.3    | Bestimmung der Bruchenergie . . . . .                            | 127        |
| 7.1.4    | Einflüsse der Verbundansätze . . . . .                           | 130        |
| 7.2      | Diskussion des Verbundmodells . . . . .                          | 133        |

|           |                                                                          |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.3       | Zusammenfassung des Verbundmodells . . . . .                             | 141        |
| <b>8</b>  | <b>Verifizierende Berechnungen</b>                                       | <b>145</b> |
| 8.1       | Anwendung des Modells auf die eigenen Versuche . . . . .                 | 145        |
| 8.1.1     | Serie A . . . . .                                                        | 145        |
| 8.1.2     | Serie B . . . . .                                                        | 147        |
| 8.1.3     | Serie C . . . . .                                                        | 151        |
| 8.2       | Anwendung des Modells auf einen Versuch von <i>Seim et al.</i> . . . . . | 173        |
| <b>9</b>  | <b>Hinweise für die Anwendung</b>                                        | <b>177</b> |
| 9.1       | Wahl der Werkstoffe . . . . .                                            | 177        |
| 9.2       | Ermittlung von Materialkennwerten . . . . .                              | 177        |
| 9.3       | Bemessung . . . . .                                                      | 178        |
| 9.4       | Kleben am Bau . . . . .                                                  | 183        |
| 9.5       | Dauerhaftigkeit . . . . .                                                | 183        |
| <b>10</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                      | <b>185</b> |
| <b>11</b> | <b>Summary and prospects</b>                                             | <b>189</b> |
|           | <b>Literaturverzeichnis</b>                                              | <b>191</b> |
|           | <b>Normative Verweise</b>                                                | <b>199</b> |
| <b>A</b>  | <b>Anhang</b>                                                            | <b>201</b> |
| A.1       | Kennwerte der Faserverbundwerkstoffe . . . . .                           | 201        |
| A.2       | Druckfestigkeiten - Serie A bis C . . . . .                              | 203        |
| A.3       | Oberflächenzugfestigkeiten - Serie A bis C . . . . .                     | 205        |
| A.3.1     | Ergebnisse mit Verwendung des Klebstoffs SD330 . . . . .                 | 205        |
| A.3.2     | Ergebnisse mit Verwendung des Klebstoffs SP55 . . . . .                  | 207        |
| A.4       | Mörtelfestigkeiten . . . . .                                             | 210        |
| A.5       | Ergebnisse - Serie A . . . . .                                           | 213        |
| A.6       | Ergebnisse - Serie B . . . . .                                           | 218        |
| A.7       | Ergebnisse - Serie C . . . . .                                           | 221        |
| A.8       | Rissbilder Serie C . . . . .                                             | 225        |



# Bezeichnungen

|      |                         |
|------|-------------------------|
| FVW  | Faserverbundwerkstoff   |
| EH   | Epoxidharzklebstoff     |
| K    | Kalkstein Vollstein     |
| KS   | Kalksandvollstein       |
| KSL  | Kalksandstein Lochstein |
| Mz   | Mauerziegel Vollstein   |
| Hlz  | Hochlochziegel          |
| Sa   | Sandstein               |
| T    | Tuffstein Vollstein     |
| Vn   | Betonvollstein          |
| Vnl  | Betonlochsteine         |
| ZM   | Zementmörtelmatrix      |
| NF   | Normalformat            |
| PPW  | Porenbeton Planstein    |
| vgl. | vergleiche              |
| ca.  | zirka                   |
| etc. | und weitere             |



## Geometrie

|              |                                                  |
|--------------|--------------------------------------------------|
| $b_{st}$     | Steinbreite                                      |
| $b_v$        | Verbundbreite                                    |
| $b_{v,sup.}$ | Breite des Verankerungskörpers                   |
| $l_{st}$     | Steinlänge                                       |
| $l_w$        | Wandlänge                                        |
| $l_v$        | Verbundlänge                                     |
| $l_{v,max.}$ | erforderliche Verbundlänge zur Verbundbruchkraft |
| $t_w$        | Wanddicke                                        |
| $t_f$        | Dicke des Faserverbundwerkstoffs                 |
| $h_{st}$     | Steinhöhe                                        |
| $h_w$        | Wandhöhe                                         |
| $d$          | statische Höhe                                   |

|          |                               |
|----------|-------------------------------|
| $x$      | Druckzonenhöhe, Koordinate    |
| $e$      | Exzentrizität der Normalkraft |
| $\alpha$ | Druckstrebenneigung           |

## Werkstoffe

|             |                                                                                                 |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $E_f$       | Elastizitätsmodul der Faserverbundwerkstoffe                                                    |
| $f_{mo}$    | Mörteldruckfestigkeit                                                                           |
| $f_{mo,bz}$ | Biegezugfestigkeit Mörtel                                                                       |
| $f_{st,x}$  | Steindruckfestigkeit senkrecht zur Lagerfugenfläche (2DF-Stein)                                 |
| $f_{st,z}$  | Steindruckfestigkeit parallel zur Lagerfugenfläche<br>(Bohrkern der Schlankheit $\lambda = 1$ ) |
| $f_{st,tz}$ | Oberflächenzugfestigkeit in z-Richtung                                                          |
| $f_x, f_y$  | Mauerwerksdruckfestigkeiten                                                                     |
| $f_\alpha$  | Mauerwerksdruckfestigkeit in Abh. des Winkels der Druckresultierenden                           |
| $f_y$       | Zugfestigkeit des Bewehrungsstahls                                                              |
| $f_v$       | Haftscherfestigkeit                                                                             |
| $\mu$       | Reibungsbeiwert der Lagerfuge                                                                   |
| $\varphi$   | innerer Reibungswinkel der Lagerfuge                                                            |

## Kraft- und Spannungsgrößen

|                      |                                                      |
|----------------------|------------------------------------------------------|
| $F_{u,exp.}$         | experimentelle Verbundbruchkraft                     |
| $F'_{u,exp.}$        | abgeminderte Verbundbruchkraft                       |
| $F_{u,rech.}$        | rechnerische Verbundbruchkraft                       |
| $F_{f,EVE}$          | maximale Verbundbruchkraft am Endverankerungselement |
| $F_{f,i}$            | Verbundkraft vor dem Verankerungselement „i“         |
| $\Delta F_{f,i}$     | Verbundkraft am Verankerungselement „i“              |
| $M_y, M_z$           | Biegemomente um die Achse y, z                       |
| $N_x$                | Normalkräfte in x-Richtung                           |
| $V_y$                | Schubkraft in y-Richtung                             |
| $\sigma_1, \sigma_2$ | Hauptnormalspannungen                                |
| $\tau_{v1}$          | maximale Verbundschubspannung                        |

## Indices

|       |                                            |
|-------|--------------------------------------------|
| $f_a$ | Faser                                      |
| $f$   | Faserverbundwerkstoff                      |
| $m$   | Klebstoffmatrix des Faserverbundwerkstoffs |
| $k$   | charakteristische Größe                    |
| $d$   | Bemesswert                                 |
| $v$   | Verbund                                    |
| $u$   | Bruchzustand                               |
| $mo$  | Mörtel                                     |
| $st$  | Stein                                      |

## Sonstige

|                                  |                                                           |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| $\gamma_f$                       | Teilsicherheitsbeiwert der Faserverbundwerkstoffe         |
| $\gamma_m$                       | Teilsicherheitsbeiwert Mauerwerk                          |
| $s_{\bar{x}}$                    | Standardabweichung                                        |
| $\omega_{f,lim}$                 | relativer Mindestbewehrungsgrad                           |
| $\rho_v, \rho_h$                 | absoluter Bewehrungsgrad vertikal, horizontal             |
| $G_v$                            | Verbundbruchenergie                                       |
| $c_v$                            | Kalibrierungsfaktor der Bruchenergie                      |
| $k_v$                            | Beiwert                                                   |
| $\zeta_v$                        | Abminderungsbeiwert der experimentellen Verbundbruchkraft |
| $\psi_v$                         | Stützwert nach dem vereinfachten Verfahren                |
| $\lambda_{inf.}, \lambda_{sup.}$ | unterer und oberer Stützwert für $\psi_v$                 |
| $\delta_v$                       | Relativverformung der Fügeteile                           |
| $\epsilon_f$                     | Dehnung des Faserverbundwerkstoffs                        |



# 1 Einführung

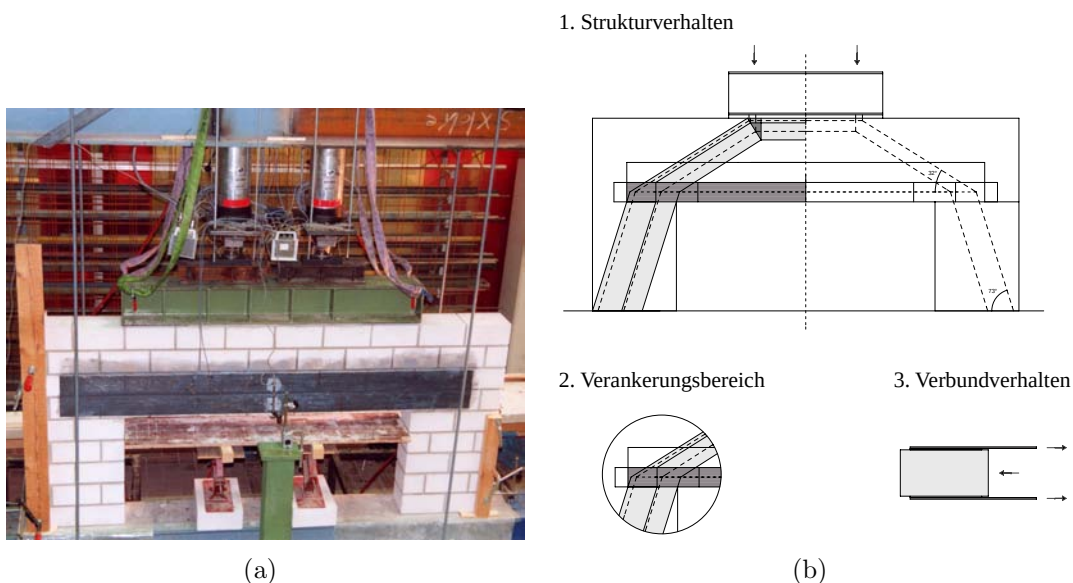
## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Der sich abzeichnende demographische Wandel und die damit einhergehende Alterung sowie prognostizierte Abnahme der deutschen Bevölkerung auf unter 70 Millionen Bundesbürger im Jahr 2050 [Grü08] erfordern zukünftig eine flexible Nutzung der bestehenden Bausubstanz. Hierzu zählt der Umbau zu altersgerechten Wohneinheiten ebenso wie der Ausbau ungenutzter Bereiche. Gerade in Deutschland ist der Anteil der Mauerwerksbauten im Wohnungsbaubereich gemessen am Gesamtbauvolumen traditionell hoch. Auf Grundlage einer Bautätigkeitsstatistik von 2006 gibt die Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau (DGfM) den Anteil am Gesamtbauvolumen mit ca. 80% [DGf06] an. Somit werden nach Auffassung des Autors gerade im Mauerwerksbestand zukünftig diejenigen Verfahren an Bedeutung gewinnen, die einen substanzschonenden, effizienten und kostengünstigen Eingriff in das Tragwerk ermöglichen. Faserverstärkte Kunststoffe lassen sich schnell und einfach auf das Mauerwerk aufkleben. Aus diesem Grund wurden in den vergangenen Jahren bereits verschiedene experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten gemauerter und nachträglich mit aufgeklebten Faserverbundwerkstoffen verstärkter Wandscheiben durchgeführt [Sch94, ElG04, Wal08]. Die Anwendung beschränkt sich bisher jedoch vorwiegend auf flächige Verstärkungen schubbeanspruchter Wände. Faserverbundwerkstoffe können jedoch auch effektiv für örtliche Verstärkungsmaßnahmen eingesetzt werden, wie sie zum Beispiel bei nachträglichen Durchbrüchen in Mauerwerkswänden [Sei03, Sei05] oder bei der Sicherung geschädigter Bauteile erforderlich sein können. Um hierfür eine Bemessung durchführen zu können bedarf es eines Verbund- und eines Strukturmodells. Für das Strukturmodell kann auf die Theorie der Spannungsfelder zurückgegriffen werden [Gan85]. Zur Verbundcharakteristik von auf Mauerwerk aufgeklebten Faserverbundwerkstoffen gibt es derzeit keine systematischen Untersuchungen. Ein wissenschaftlich abgesichertes und fundiertes Verbundmodell existiert nicht. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll und notwendig die mechanischen Grundlagen für die Bemessung nachträglich mit Faserverbundwerkstoffen verstärkter Mauerwerksscheiben aufzuarbeiten und zu ergänzen.

## 1.2 Stufen der Modellbildung

Grundsätzlich kann das Tragverhalten nachträglich mit Faserverbundwerkstoffen verstärkter Mauerwerksscheiben mit drei Modellierungsstufen erfasst werden (vgl. Abb. 1.1): Dem Tragverhalten der Struktur, der Einleitung und Umlenkung von Kräften in den Verankerungsbereichen sowie dem Verbundverhalten zwischen Faserverbundwerkstoffen und dem Mauerwerk. Somit ergeben sich im Zusammenhang mit der Verstärkung von Mauerwerksscheiben folgende drei Fragestellungen:

1. Wie lässt sich der Lastfluss verstärkter Wandscheiben zuverlässig erfassen ?
2. Wie gestaltet sich die Kraftein- und Kraftumleitung im Verankerungsbereich der Faserverbundwerkstoffe ?
3. Wie kann die Verbundcharakteristik von auf Mauerwerk aufgeklebten faserverstärkten Kunststoffen zuverlässig rechnerisch erfasst werden ?



**Abbildung 1.1:** (a) experimentelle Untersuchung von *Seim et al.* [Sei03] und (b) die drei Stufen der Modellbildung

Der Lastabtrag von Scheibentragwerken kann sehr anschaulich mit streben- und fächerförmigen Spannungsfeldern erfasst werden [Bac97]. Hierfür steht eine Versagensbedingung von *Ganz* [Gan85] zur Verfügung, die für eine Vielzahl von Stein-Mörtel-Kombinationen mit und ohne Lagerfugenbewehrung abgesichert wurde. Zur Modellierung der Einleitung und Umlenkung von Kräften in den Knotenbereichen

gilt es, den Besonderheiten des Mauerwerks Rechnung zu tragen. Sich öffnende Fugen im Verankerungsbereich der Faserverbundwerkstoffe führen zu einer gestaffelten Einleitung der Verbundkräfte im Wandquerschnitt. Die rechnerische Beschreibung der Verbundcharakteristik von auf Mauerwerk aufgeklebten faserverstärkten Kunststoffen kann unter Zuhilfenahme des *Ansatzes des verschieblichen Verbundes* erfolgen. Dieser wurde von *Volkersen* [Vol53a] für Schubkraftbeanspruchte genietete Laschenverbindungen hergeleitet und am differentiellen Verbundelement gelöst.

## 1.3 Methodik und Abgrenzung

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in fünf Teile. Im ersten Teil (Kap. 2) wird ein umfassender Überblick über den derzeitigen Stand der Forschung für den Bereich der Mauerwerksverstärkung mit Faserverbundwerkstoffen gegeben. Im darauf folgenden Kapitel werden die für die Arbeit erforderlichen Grundlagen erarbeitet. Das sind im Besonderen die *Theorie der Spannungsfelder* und der *Ansatz des verschieblichen Verbundes*. Im dritten Teil (Kap. 4, 5 und 6) werden die experimentellen Untersuchungen am Stein und am Wandknoten beschrieben. Die veranschaulichten Ergebnisse wurden dokumentiert, aufbereitet und die beobachteten Phänomene diskutiert. Im vierten Teil der Arbeit (Kap. 7) wurde das entwickelte Verbundmodell kalibriert und ausführlich diskutiert. Es folgen verifizierende Berechnungen (Kap. 8) zu den experimentellen Untersuchungen. Abgeschlossen wird die Arbeit mit Anwendungsempfehlungen und Hinweisen für die Baupraxis (Kap. 9).

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurde sich auf Vollsteine und unidirektionale faserverstärkte Kunststoffe in Form von Gelegen beschränkt. Diese wurden mit Epoxidharzklebstoffen und Mörteln oberflächlich auf die Mauersteine und Wandknoten aufgeklebt. Großformatige Steine, Lamellen aus faserverstärkten Kunststoffen oder in die zu verstärkende Struktur eingeschlitzte Faserverbundwerkstoffe kamen nicht zur Anwendung und waren auch nicht Gegenstand der Untersuchungen. Gleiches gilt für die Untersuchung des Brand-, Temperatur- und Langzeitverhaltens.

## 2 Stand der Forschung

### 2.1 Überblick

Die Ertüchtigung von Mauerwerksscheiben mit Faserverbundwerkstoffen (FVW) stellt ein relativ junges Forschungsfeld dar. Erste theoretische und experimentelle Untersuchungen wurden von *Schwegler* [Sch94] durchgeführt. Er untersuchte - wie auch später *ElGawady* [ElG04] und *Wallner* [Wal08] - die Tragfähigkeit nachträglich verstärkter und schubbeanspruchter Wandscheiben. Für die Bemessung erweiterte er ein von *Ganz* [Gan85] für bewehrte Mauerwerksscheiben hergeleitetes Modell auf die Anwendung von Faserverbundwerkstoffen. Weitere Bemessungsmodelle anderer Autoren [Tri98a, Tum99], teils mit Bezug zum Eurocode 6, folgten. Einen speziellen Anwendungsbereich der nachträglichen Verstärkung von Mauerwerksscheiben stellt die *örtliche* Verstärkung dar. *Seim et al.* [Sei03] konnten zeigen, dass sich nachträgliche Wandöffnungen mit über dem geplanten Wanddurchbruch aufgeklebten Faserverbundwerkstoffen vergleichsweise einfach herstellen lassen. Der Einbau eines Sturzes kann somit entfallen. Eine besondere Bedeutung bei der Bemessung nachträglich verstärkter Wandscheiben kommt der Verbundcharakteristik zwischen Faserverbundwerkstoff und Mauerwerk zu. Untersuchungen hierzu wurden bisher nur vereinzelt von *Vogel* [Vog00] und *Wallner* [Wal08] an künstlichen sowie *Aiello, Sciolti* [Aie03] an natürlichen Mauersteinen durchgeführt. Im Folgenden wird der derzeitige Stand der Forschung zur nachträglichen Verstärkung von in ihrer Ebene beanspruchten Mauerwerksscheiben nach Schwerpunkten geordnet und in chronologischer Reihenfolge aufgezeigt. Die in den jeweiligen Literaturquellen verwendeten Parameter und Indizes wurden vom Verfasser der vorliegenden Arbeit aus Gründen der Übersichtlichkeit und Vergleichbarkeit vereinheitlicht. Eine Übersicht zum Stand der Forschung wird in den Tabellen 2.1 und 2.2 gegeben.

| Autor           | Jahr | Quellen                       | Schwerpunkt<br>der Arbeit                                                      | Steine   | Matrix /<br>Klebstoff | Faser-<br>material                                                                    | Faser-<br>produkt                     |
|-----------------|------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Schwegler       | 1994 | [Sch94]                       | Schubtragfähigkeit<br>von Wandscheiben,<br><br>Verankerung vom<br>FVW am Stein | Hlz      | EH                    | Aramid<br>Glas<br>Polyester<br>Polyamid<br>Polypropylen<br>Polyethylen<br>Kohlenstoff | Gewebe<br><br><br><br><br><br>Lamelle |
| Ehsani et al.   | 1997 | [Ehs95]<br>[Ehs97]<br>[VD00a] | Scherfestigkeit<br>Biegetragfähigkeit<br>am Balken                             | Mz       | EH                    | Glas                                                                                  | Gewebe                                |
| Triantafillou   | 1998 | [Tri98a]<br>[Tri98b]          | Biegetragfähigkeit<br>am Balken                                                | Mz       | EH                    | Kohlenstoff                                                                           | Lamelle                               |
| Tumialan et al. | 1999 | [Tum99]<br>[Tum01]<br>[Gal02] | Schubtragfähigkeit<br>von Wandscheiben                                         | Vn<br>Mz | EH                    | Aramid<br>Glas<br>Kohlenstoff                                                         | Gelege                                |
| Vogel           | 2000 | [Vog00]                       | Verankerung vom<br>FVW am Stein                                                | Mz<br>KS | EH                    | Glas<br>Kohlenstoff                                                                   | Gelege                                |
| Jai, Springer   | 2000 | [Jai00a]<br>[Jai00b]          | Schubtragfähigkeit<br>von Wandscheiben                                         | Mz       | EH                    | Glas                                                                                  | Gewebe                                |

**Tabelle 2.1:** Übersicht zum Stand der Forschung 1/2

| Autor           | Jahr | Quellen            | Schwerpunkt<br>der Arbeit                                                                            | Steine   | Matrix /<br>Klebstoff | Faser-<br>material                              | Faser-<br>produkt  |
|-----------------|------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------|-------------------------------------------------|--------------------|
| Seim et al.     | 2002 | [Stü02]<br>[Sei03] | örtliche<br>Verstärkung                                                                              | KSL      | EH                    | Glas<br>Kohlenstoff                             | Gelege             |
| Casareto et al. | 2003 | [Cas03]            | Verankerung vom<br>FVW am Kleinkörper                                                                | Mz<br>Vn | EH                    | Aramid                                          | Gelege             |
| Aiello et. al.  | 2003 | [Aie03]<br>[Aie06] | Verankerung vom<br>FVW am Stein                                                                      | K<br>T   | EH                    | Kohlenstoff                                     | Gelege             |
| ElGawady        | 2004 | [ElG04]            | Schubtragfähigkeit<br>von Wandscheiben                                                               | Hlz      | EH                    | Glas<br>Aramid<br>Kohlenstoff                   | Gewebe<br>Lamellen |
| Maria et al.    | 2006 | [Mar06]            | Schubtragfähigkeit<br>von Wandscheiben                                                               | Hlz      | EH                    | Kohlenstoff                                     | Gewebe             |
| Wallner         | 2008 | [Wal08]            | Schubtragfähigkeit<br>von Wandscheiben<br><br>Scherfestigkeit<br><br>Verankerung vom<br>FVW am Stein | KS       | EH<br>ZM              | Glas<br>Kohlenstoff<br>Polyester<br>Polyethylen | Gewebe             |

**Tabelle 2.2:** Übersicht zum Stand der Forschung 2/2

## 2.2 Verankerungsuntersuchungen am Mauerstein

### 2.2.1 Vogel 2000

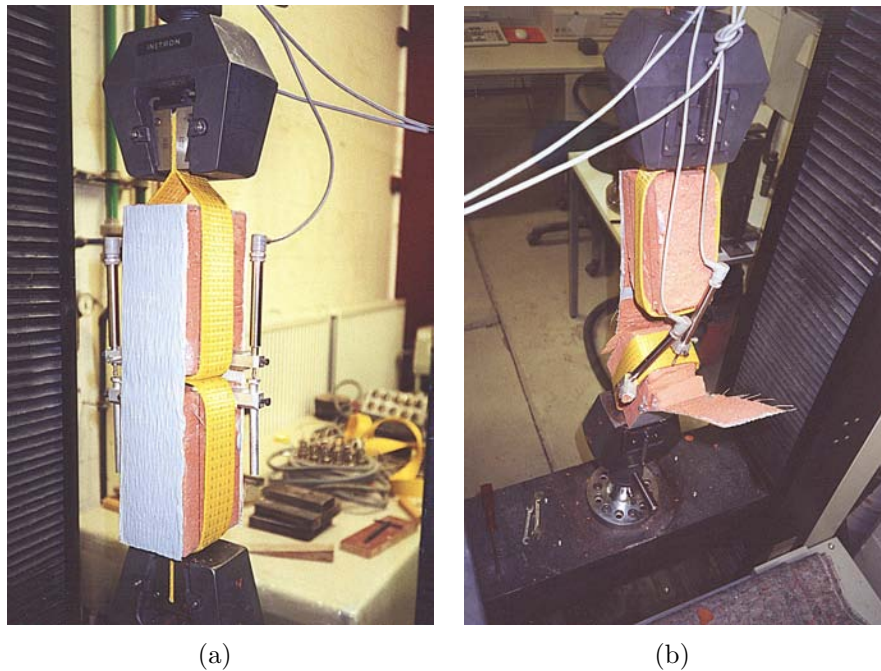
Vogel [Vog00] führte 36 Endverankerungsversuche an drei künstlichen Steinarten in Kombination mit zwei Klebstoffen sowie zwei Gelegearten (Tab. 2.3) durch. Insgesamt berücksichtigte er 12 unterschiedliche Materialkombinationen. Der Versuchsaufbau bestand aus jeweils zwei Mauersteinen mit auf den Steinlängsseiten aufgetragenen Gelegen (Abb. 2.1a). Die Breite der Faserverbundwerkstoffe variierte zwischen 71 mm (Ziegel und Kalksandstein) und 115 mm (Porenbeton). Die Verbundlänge betrug bei allen Versuchen 160 mm. Die Lasteinleitung erfolgte mittels zweier um die Steine geführter Polyestergurte. Die Steinlängsseiten wurden vor dem Aufbringen der Geleге mit einer Drahtbürste aufgeraut und anschließend mit Druckluft gesäubert. Die Versuchsdurchführung erfolgte einheitlich kraftgesteuert. Die Ver-

|   | Werkstoffe                          | Bezeichnungen    | Eigenschaften       | Kenngrößen                |
|---|-------------------------------------|------------------|---------------------|---------------------------|
| Z | Ziegel <sup>1</sup>                 | Mz20-2,0-NF      | Oberflächenzugfest. | 1,06 N/mm <sup>2</sup>    |
| K | Kalksandstein <sup>1</sup>          | KS20-1,8-NF      | Oberflächenzugfest. | 1,06 N/mm <sup>2</sup>    |
| P | Porenbeton <sup>1</sup>             | PPW 2/0,5        | Oberflächenzugfest. | 0,32 N/mm <sup>2</sup>    |
| G | Glasfasergelege <sup>2</sup>        | SikaWrap 430G    | Dicke               | 0,17 mm                   |
|   |                                     |                  | Flächengewicht      | 430 g/m <sup>2</sup>      |
|   |                                     |                  | Elastizitätsmodul   | 70.000 N/mm <sup>2</sup>  |
|   |                                     |                  | Bruchdehnung        | 31 ‰                      |
| C | Kohlenstofffasergelege <sup>2</sup> | SikaWrap 230C    | Dicke               | 0,13 mm                   |
|   |                                     |                  | Flächengewicht      | 225 g/m <sup>2</sup>      |
|   |                                     |                  | Elastizitätsmodul   | 230.000 N/mm <sup>2</sup> |
|   |                                     |                  | Bruchdehnung        | 15 ‰                      |
| S | Epoxidharz <sup>2</sup>             | SikaDur 330      | Viskosität          | hoch                      |
| R | Epoxidharz <sup>2</sup>             | Viscasid Bauharz | Viskosität          | niedrig                   |

<sup>1</sup> experimentell ermittelte Kenngrößen  
<sup>2</sup> Kenngrößen nach Herstellerangaben

**Tabelle 2.3:** Übersicht der verwendeten Materialien, nach [Vog00]

suche wurden kraftgesteuert mit einer Steigerung - der Verbundschubspannung bezogen auf die Verbundfläche - von 0,05 N/mm<sup>2</sup>s (Ziegel und Kalksandstein) sowie 0,025 N/mm<sup>2</sup>s (Porenbeton) durchgeführt. Im Ergebnis zeigte sich über alle Versuche hinweg ein *Sprödbbruchversagen*, wobei der Verbundbruch nahezu ausnahmslos

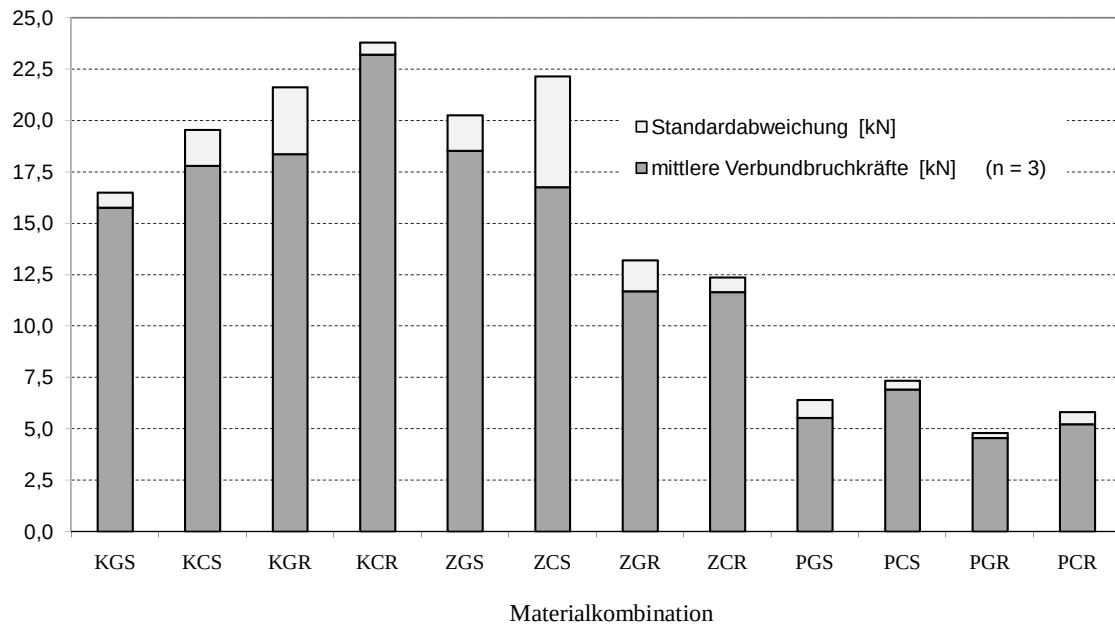


**Abbildung 2.1:** (a) Versuchsaufbau, (b) Verbundbruch mit vollständiger Entkoppelung, aus [Vog00]

als oberflächennaher *Kohäsionsbruch* in den Steinen eintrat. Adhäsionsbrüche zwischen den Steinen und den Klebstoffen oder kombinierte Verbundbrüche wurden nur vereinzelt beobachtet.

Die Verwendung der Kohlenstofffasergelege führte - im Vergleich zur Anwendung von Glasfasergelegen - zu einem steiferen Kraft-Relativverformungsverhalten der Füge-teile (Stein, FVW), bei gleichzeitiger Steigerung der Verbundbruchkräfte um bis zu 25 Prozent. Die Dehnungen der Kohlenstofffasergelege lagen bei Versagenseintritt bei ca. 5,3 ‰ (in Kombination mit den Ziegeln), dies entspricht ca. 35 Prozent der Faserbruchdehnung. Die zugehörige Verbundbruchkraft betrug 1,63 kN/cm Gelegebreite. Bei den Glasfaserverbundwerkstoffen wurden die größten Dehnungen mit ca. 10 ‰ gemessen (in Kombination mit den Kalksandsteinen). Dies entspricht etwa 32 Prozent der Faserbruchdehnung und einer Verbundbruchkraft von 1,29 kN/cm Gelegebreite.

Mit seinen Untersuchungen konnte Vogel zeigen, dass es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den Steinfestigkeiten und der erreichten Verbundbruchkraft gibt. Darüber hinaus wurden - im Vergleich zu den Glasfaserverbundwerkstoffen - mit den steiferen Kohlenstofffasergelegen ca. 25 % höhere Verbundbruchkräfte erreicht. Auch zeigte sich eine Steigerung der Verbundbruchkräfte mit der Verwendung eines niedrigviskosen Klebstoffs.



**Abbildung 2.2:** Versuchsergebnisse, aus [Vog00]

### 2.2.2 Aiello, Sciolti 2003-2006

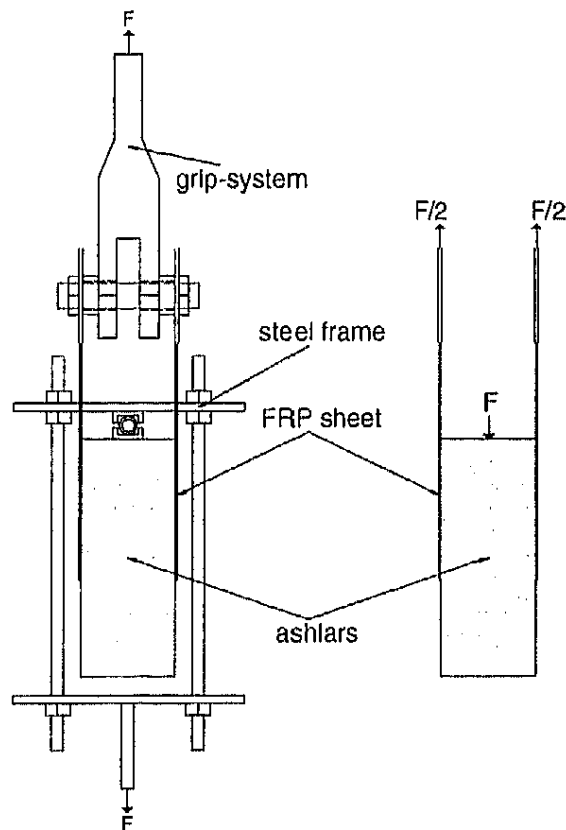
Aiello, Sciolti [Aie03] [Aie06] untersuchten das Verbundverhalten zwischen Natursteinen (Tuff- und Kalksteinen) und Kohlenstofffasergelegen. Die Steinlängsseiten der Probekörper wurden aufgeraut und mit Druckluft gesäubert. Die anschließende Verklebung der Gelege erfolgte mit Epoxidharzklebstoffen. Die Verbundbreite betrug einheitlich 80 mm (Abb. 2.3). Die Verbundlängen variierten zwischen 70 mm und 150 mm. Die Versuchsdurchführung erfolgte weggesteuert.

| Werkstoffe             | Bezeichnungen | Eigenschaften     | Kenngroßen                |
|------------------------|---------------|-------------------|---------------------------|
| Kalkstein              | Leccese Stone | Druckfestigkeit   | 26 N/mm <sup>2</sup>      |
| Tuffgestein            | Naples Tuff   | Druckfestigkeit   | 5 N/mm <sup>2</sup>       |
| Kohlenstofffasergelege | -             | Dicke             | 0,17 mm                   |
|                        |               | Elastizitätsmodul | 234.000 N/mm <sup>2</sup> |
|                        |               | Bruchdehnung      | 16 ‰                      |

**Tabelle 2.4:** Übersicht der verwendeten Materialien, nach [Aie03]

Im Ergebnis zeigte sich über alle Versuche ein oberflächennahes *Kohäsionsversagen* in den Steinen. Die Verbundbruchkräfte ergaben sich zwischen 6,28 kN (Tuffstein) und

13,20 kN (Kalkstein). Letzteres entspricht einer Verbundfestigkeit von 1,65 kN/cm Gelegebreite. Einen deutlichen Einfluss der berücksichtigten Verbundlängen (70 mm und 150 mm) auf die Verbundbruchkräfte konnten sie nicht feststellen. Hieraus schlussfolgern *Aiello, Sciolti*, dass es für die untersuchten Steinarten eine maximale Verbundbruchkraft mit dazugehöriger maximaler Verbundlänge gibt. Diese vermuten sie zwischen 70 mm und 130 mm.



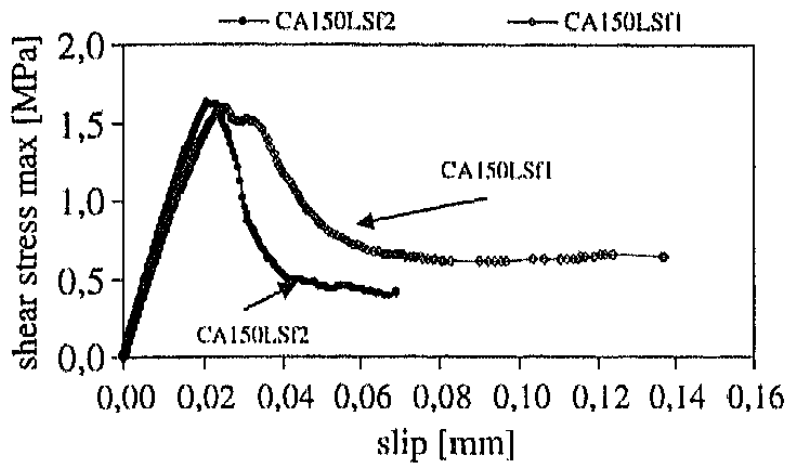
**Abbildung 2.3:** Versuchsaufbau mit Probekörper, aus [Aie03]

Da *Aiello, Sciolti* bei den durchgeführten Versuchen keine Verformungsmessungen vornahmen, beschränkt sich ihre Auswertung auf die Angabe der Verbundbruchkräfte und einiger weniger Dehnungsmessungen in Richtung der Verbundlänge. Hierzu wurden an sieben, im Abstand von 30 mm angeordneten Messstellen, die Dehnungen der Faserverbundwerkstoffe gemessen. Unter anderem berechnen sie sich hieraus mit den Gleichungen 2.1 und 2.2 Schubspannungs-Relativverformungsbeziehungen (Abb. 2.4). Entscheidend ist hierbei, dass sich nach einem verfestigendem Ast eine Entfestigung bis auf ein nahezu konstantes Schubspannungsplateau ergibt. Die Autoren bezeichnen dieses Plateau als „friction contribution“, also Reibungsanteil, welcher sich ausbildet wenn die Füge-teile nach dem Entkoppeln aneinanderreiben. Jedoch gehen die Autoren auf diese Beobachtung nicht näher ein.

$$\tau_v(x) = t_f \cdot E_f \cdot \frac{\epsilon_{f,i} - \epsilon_{f,i+1}}{x_i - x_{i+1}} \quad (2.1)$$

$$\delta_v = \sum \epsilon_{f,i} \cdot E_f \cdot (x_i - x_{i+1}) \quad (2.2)$$

|                  |                                        |
|------------------|----------------------------------------|
| $t_f$            | Dicke des Faserverbundwerkstoffs (FVW) |
| $E_f$            | Elastizitätsmodul des FVW              |
| $x_i$            | Messpunkt $i$ am Probekörper           |
| $\epsilon_{f,i}$ | Dehnung am Punkt $x_i$                 |
| $\delta_v$       | Relativverformung                      |



**Abbildung 2.4:** Verbundschubspannungs-Relativverformungskurven, aus [Aie03]

### 2.2.3 Wallner 2008

Wallner [Wal08] untersuchte das Tragverhalten nachträglich mit Faserverbundwerkstoffen verstärkter Wandscheiben. Hierzu führte er Endverankerungsversuche am Stein, Schubversuche am Drei-Stein-Körper (vgl. Abs. 2.3.4) sowie Bauteilversuche (Abs. 2.4.9) an zyklisch schubbeanspruchten Mauerwerkswänden durch.

Die Untersuchungen wurden mit 2DF und 3DF Kalksandvollsteinen der Festigkeitsklasse 12 in Kombination mit bidirektionalen Kohlenstofffaser-, Glasfaser-, Polyester- und Polyethylengeweben durchgeführt (Tab. 2.5). Aufgebracht wurden diese mit einem Epoxidharzklebstoff der Firma Sika (Produktbezeichnung: SikaDur 330) und einer eigens für die Versuche entwickelten epoxidharzvergüteten Zementmörtel-Matrix.

Insgesamt berücksichtigte er acht Materialkombinationen, wobei die Faserorientierungen der Gewebe zwischen  $0^\circ/90^\circ$  und  $45^\circ$  in Richtung der angreifenden Kraft variiert wurden (Abb. 2.6 und 2.7).

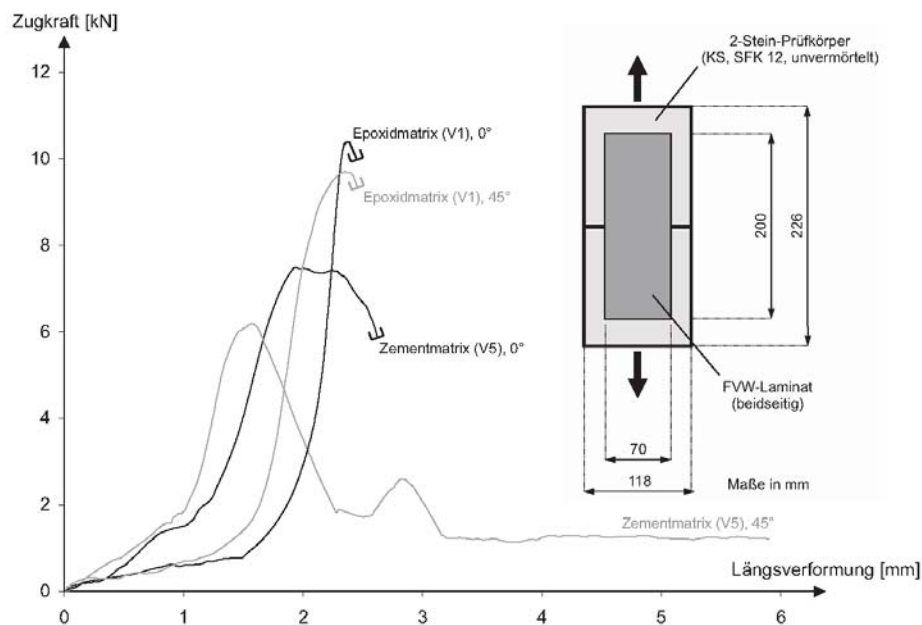
| Fasermaterial    | Aufbau | Bindung  | Flächengewicht<br>[g/m <sup>2</sup> ] | Dicke<br>[mm] | Feinheit<br>(längs/quer)<br>[tex] | Fadendichte<br>(längs/quer)<br>[1/cm] |
|------------------|--------|----------|---------------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Kohlenstoff (HT) | Gewebe | Leinwand | 375                                   | 0.63          | 800 / 800                         | 2.3 / 2.3                             |
| E-Glas           | Gewebe | Leinwand | 395                                   | 0.4           | 340 / 272                         | 6.0 / 6.7                             |
| Polyester        | Gewebe | Leinwand | 265                                   | 0.43          | 330 / 330                         | 3.9 / 3.9                             |
| Polyethylen      | Gewebe | Leinwand | 130                                   | 0.37          | 88 / 88                           | 8.0 / 6.0                             |

**Abbildung 2.5:** Materialeigenschaften der verwendeten Gewebe, aus [Wal08]

Mit Anwendung der Epoxidharzklebstoffe trat bei allen Versuchen ein *Spröbruchversagen* als *Kohäsionsbruch* in den oberflächennahen Bereichen der Steine ein. Im Gegensatz dazu zeigten die Probekörper mit der modifizierten Zementmörtelmatrix ein eher duktileres Kraft-Verformungsverhalten, wobei das Versagen durch ein kontinuierlich fortschreitendes Ablösen der Gewebe, beginnend an der Stoßfuge, zum Verbundbruch führte. Die größten Verbundbruchkräfte wurden mit dem Epoxidharzklebstoff, einem Kohlenstofffasergewebe und einer Faserorientierung senkrecht zur Stoßfuge (Variante 1) erreicht. Hingegen führte eine Faserorientierung von  $45^\circ$  zu einer Reduzierung der Verbundkräfte von bis zu 45 %. Eine Gegenüberstellung der Kraft-Verformungskurven für die zwei Klebstoffe in Kombination mit einem Kohlenstofffasergewebe (Varianten 1 und 5) wird in Abbildung 2.7 gegeben und veranschaulicht die beobachteten Grundphänomene.

| Variante | Fasermaterial | Struktur | Flächengewicht<br>[g/m <sup>2</sup> ] | Matrix                                   | Faserorientierung<br>[°] | Maximalkraft<br>[kN] |
|----------|---------------|----------|---------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------|----------------------|
| 1        | Kohlenstoff   | Gewebe   | 375                                   | Epoxidharz                               | 0                        | 10.34                |
|          |               |          |                                       |                                          | 45                       | 9.69                 |
| 2        | E-Glas        | Gewebe   | 395                                   |                                          | 0                        | 9.64                 |
|          |               |          |                                       |                                          | 45                       | 8.55                 |
| 3        | Polyester     | Gewebe   | 265                                   |                                          | 0                        | 6.91                 |
|          |               |          |                                       |                                          | 45                       | 6.62                 |
| 4        | Polyethylen   | Gewebe   | 130                                   |                                          | 0                        | 9.09                 |
|          |               |          |                                       |                                          | 45                       | 8.12                 |
| 5        | Kohlenstoff   | Gewebe   | 375                                   | kunststoff-<br>mod.<br>Zement-<br>mörtel | 0                        | 7.60                 |
|          |               |          |                                       |                                          | 45                       | 6.19                 |
| 6        | Polyester     | Gewebe   | 265                                   |                                          | 0                        | 3.75                 |
|          |               |          |                                       |                                          | 45                       | 2.41                 |
| 7        | Polyethylen   | Gewebe   | 130                                   |                                          | 0                        | 4.85                 |
|          |               |          |                                       |                                          | 45                       | 2.76                 |
| 8        | Kohlenstoff   | Gitter   | 2x159                                 |                                          | 0                        | 3.00                 |
|          |               |          |                                       |                                          | 45                       | 3.92                 |

**Abbildung 2.6:** Materialkombinationen und Ergebnisse der Verbundversuche an 2DF Steinen, aus [Wal08]

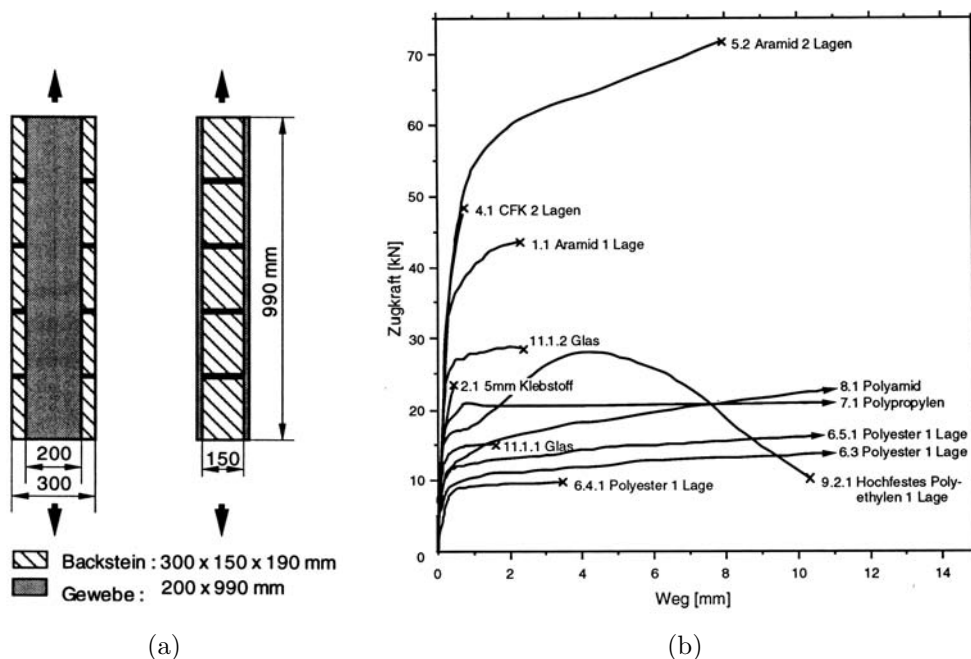


**Abbildung 2.7:** Kraft-Verformungskurven für die Varianten 1 und 5, aus [Wal08]

## 2.3 Untersuchungen an Mauerwerkskleinkörpern

### 2.3.1 Schwegler 1994

Schwegler [Sch94] befasste sich als einer der Ersten mit der Fragestellung der nachträglichen Verstärkung von Mauerwerksscheiben mit Faserverbundwerkstoffen. Hierzu führte er unter anderem sieben zyklische Bauteilversuche an verstärkten Wänden aus Hochlochziegeln durch. Eine ausführliche Darstellung hierzu wird in Abschnitt 2.4.1 gegeben.



**Abbildung 2.8:** Verbundversuche am Zugkörper aus Hochlochsteinen: (a) Zugkörper und (b) Kraft-Verformungskurven (Verformung gemessen über die gesamte Prüfkörperlänge), aus [Sch94]

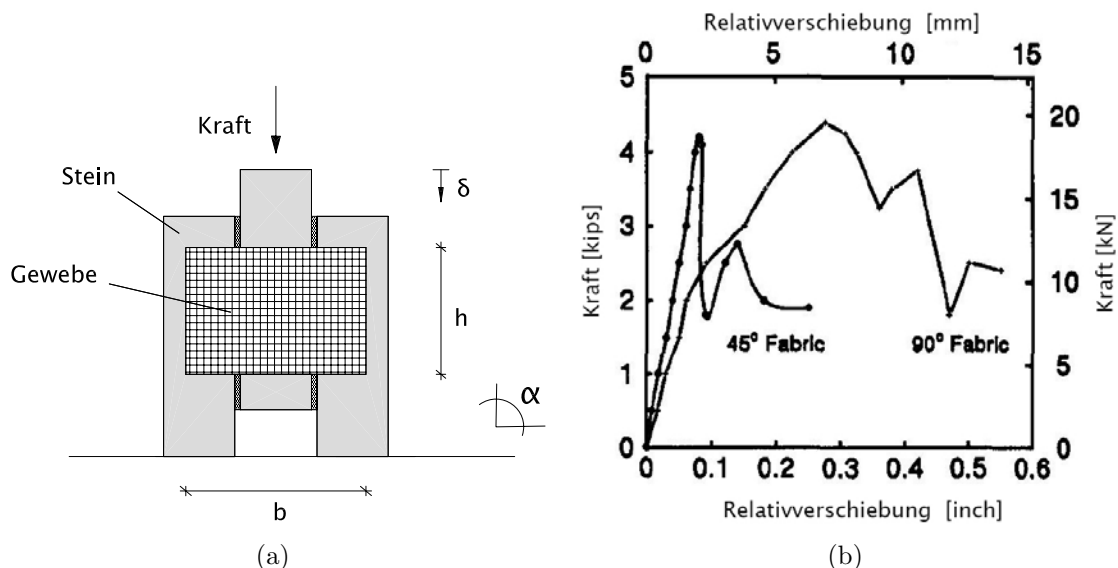
Die Auswahl der für die Bauteilversuche verwendeten Faserverbundwerkstoffe erfolgte mit Hilfe von Verbundversuchen an Mauerwerkskleinkörpern (Abb. 2.8a). Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Abbildung 2.8b dargestellt. Die erreichten Bruchkräfte lagen zwischen 9,2 kN bis 71,7 kN, wobei das Versagen bei Faserverbundwerkstoffen mit geringeren Dehnsteifigkeiten (Polyester, Polypropylen und Polyamid) vorwiegend als *Adhäsionsbruch* zwischen der Klebstoffmatrix und dem Gelege eintrat. Dies ging einher mit einem eher nachgiebigeren Verformungsverhalten. Im Gegensatz dazu zeigte sich für die mit Aramid-, Glasfaser-, hochfesten Polyethylen- und Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen verstärkten Kleinkörper ein vorwiegend sprödes Versagen mit *Kohäsionsbrüchen* in den Mauersteinen. Schwegler geht davon aus, dass

die Faserverbundwerkstoffe im Falle eine Mauerwerksverstärkung prinzipiell in den angrenzenden Bauteilen verankert werden müssen. Aus diesem Grund geht es bei der Modellierung der Verbundcharakteristik zwischen Stein und Faserverbundwerkstoff nicht weiter nach.

Im Hinblick auf eine Erdbebenbeanspruchung verstärkter Mauerwerkswände sollten diese eine große Energiedissipation aufweisen. *Schwegler* ist der Überzeugung, dass dies am ehesten mit Faserverbundwerkstoffen erreicht werden kann, die sich von der Klebstoffmatrix ablösen (Adhäsionsversagen), was letztendlich zu einem duktilen Kraft-Verformungsverhalten der Wände führen soll. Aus diesem Grund legt er sich für die im Anschluss durchgeführten Bauteilversuche (BW6, BW7) auf ein Polyester-gewebe fest.

### 2.3.2 Ehsani et al. 1997

*Ehsani et al.* [Ehs97] führten 24 Scherversuche an Drei-Stein-Körpern durch (Abb. 2.9a). Sie verwendeten Vollziegel ( $h, b, l = 64 \text{ mm}, 102 \text{ mm}, 216 \text{ mm}$ ), drei Glasfasergewebe mit unterschiedlichen Flächengewichten von  $339 \text{ g/m}^2$ ,  $406 \text{ g/m}^2$  und  $610 \text{ g/m}^2$  sowie einen Epoxidharzklebstoff. Die Breiten der Gelege wurden zwischen  $140 \text{ mm}$  und  $203 \text{ mm}$  variiert. Die Höhe dieser betrug einheitlich  $114 \text{ mm}$ . Darüber hinaus berücksichtigten sie zwei Faserorientierungen, in Bezug auf die Lagerfugenseite der Steine, von  $45^\circ$  und  $90^\circ$ . Die Versuche wurden weggesteuert durchgeführt.



**Abbildung 2.9:** (a) Versuchsaufbau, nach [Ehs97] und (b) Kraft-Verformungskurven, aus [Ehs97]

Im Allgemeinen ergaben sich drei Versagensformen: *Scherversagen* der Gewebe parallel zur Fuge bei Faserverbundwerkstoffen mit geringen Flächengewichten ( $339 \text{ g/m}^2$ ), *Verbundversagen* zwischen Faserverbundwerkstoff und mittlerem Stein bei Gewebebreiten von 203 mm und *Verbundversagen* am jeweils äußeren Stein bei Gewebebreiten von 140 mm. Die Faserorientierung ( $45^\circ/90^\circ$ ) führte zu keiner signifikanten Beeinflussung der Bruchkräfte. Jedoch zeigten die Versuchskörper mit einer Faserorientierung von  $90^\circ$  zur Fuge ein nachgiebigeres Kraft-Verformungsverhalten (Abb. 2.9b). Als Konsequenz hieraus schlugen die Autoren eine Faserorientierung von  $90^\circ$  zur Lagerfuge der Steine für nachgiebige Systeme und  $45^\circ$  für steife Wandsysteme vor. Die Wahl der Faserorientierung sollte ihrer Auffassung nach vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig gemacht werden und obliegt folglich dem Ingenieur.

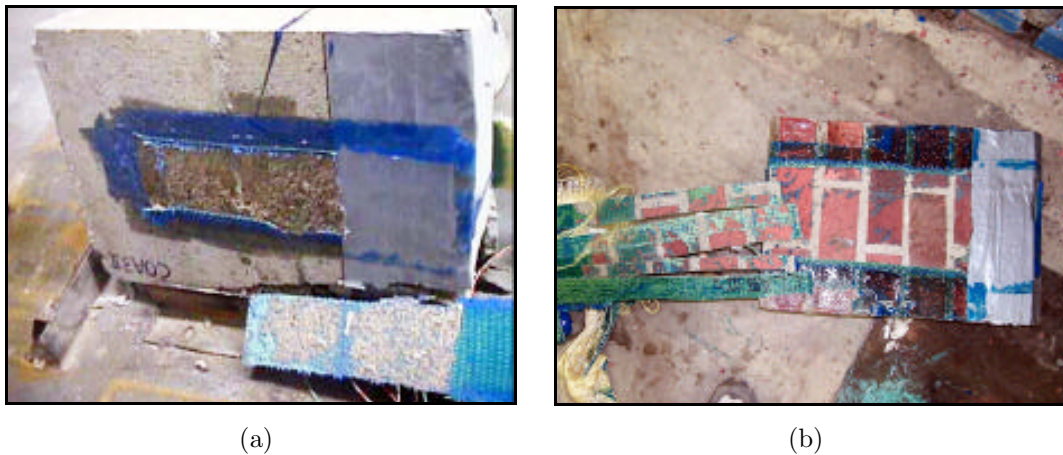
### 2.3.3 Casareto et al. 2003

Casareto et al. [Cas03] untersuchten an 12 Mauerwerkskleinkörpern das Verbundverhalten zwischen Faserverbundwerkstoffen aus Aramidfasergelegen und Betonvoll- sowie Ziegelvollsteinen. Der Versuchsaufbau bestand aus zwei sich zugewandten Mauerwerkskörpern mit auf den Seitenflächen aufgetragenen Gelegen (Abb. 2.10). Die Verbundlängen variierten sie zwischen 100 mm, 200 mm und 300 mm. Die Gelegebreiten zwischen 76 mm und 152 mm.

| Werkstoff         | Eigenschaften     | Kenngößen                |
|-------------------|-------------------|--------------------------|
| Aramidfasergelege | Dicke             | 0,28 mm                  |
|                   | Zugfestigkeit     | $1.880 \text{ N/mm}^2$   |
|                   | Elastizitätsmodul | $121.000 \text{ N/mm}^2$ |
|                   | Bruchdehnung      | 16,3 ‰                   |

**Tabelle 2.5:** Materialkennwerte des Aramidfasergeleges [Cas03]

Der Verbundbruch trat vorwiegend durch ein oberflächennahes *Kohäsionsversagen* in den Steinen ein (Abb. 2.10). Jedoch wurden auch kombinierte *Köhäsions-* und *Adhäsionsbrüche* zwischen der Klebstoffmatrix und den Faserverbundwerkstoffen beobachtet. Die größte Verbundbruchkraft wurde mit 48,9 kN am Ziegelsteinkörper erreicht, was umgerechnet  $3,8 \text{ kN/cm}$  Gelegebreite entspricht. Die größten Verbundbruchkräfte am Betonsteinkörper ergaben sich zu 46,4 kN ( $3,5 \text{ kN/cm}$  Gelegebreite). Einen wesentlichen Einfluss der berücksichtigten Verbundlängen von 100 bis 300 mm auf die Verbundbruchkräfte konnte nicht beobachtet werden. Hieraus schlussfolgern die Autoren, wie schon Aiello et al. (Abschnitt 2.2.2), dass es eine von der Verbundlänge unabhängige maximale Verbundbruchkraft geben muss. Die Autoren geben diese mit 100 mm an. Dies deckt sich mit den Angaben von Aiello et al., die eine maximale Verbundlänge zwischen 70 bis 130 mm vermuten.



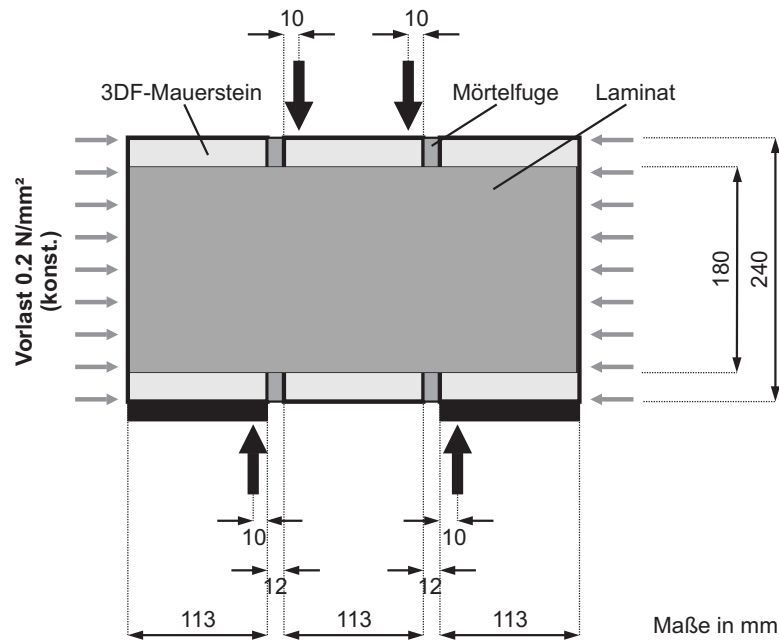
**Abbildung 2.10:** Probekörper nach Verbundbruch: (a) Betonsteinkörper, (b) Ziegelsteinkörper, aus [Cas03]

Die Autoren schlagen - ohne näher darauf einzugehen - für eine baupraktische Bemessung einen globalen Sicherheitsbeiwert von  $\gamma = 2,0$  vor. Darüber hinaus empfehlen sie die Dehnungen der Faserverbundwerkstoffe auf 8 ‰ zu begrenzen und eine Mindestverankerungslänge von 250 mm festzuschreiben.

### 2.3.4 Wallner 2008

Zur Abschätzung des Schubtragverhaltens führte *Wallner* [Wal08] Scherversuche nach [DIN EN 1052-3] durch (Abb. 2.11). Hierbei grenzte er die bei den Verbundversuchen (Abs. 2.2.3) berücksichtigten Materialkombinationen auf vier ein, wobei er zum Aufbringen der Gewebe in drei von vier Fällen einen modifizierten Zementmörtel verwendete. Die Faserorientierung in Lastrichtung variierte er, wie schon bei den vorangegangenen Versuchen, zwischen  $0^\circ/90^\circ$  und  $45^\circ$  zur Mörtelfuge.

Mit Anwendung des Epoxidharzklebstoffes, trat ein Spröbruchversagen als *Kohäsionsbruch* in den oberflächennahen Bereichen der Steine ein. Wurde ein modifizierter Zementmörtel verwendet, löste sich dieser während des Versuchs allmählich von den Geweben, was in der Folge zu einem duktilen Kraft-Verformungsverhalten führte (Abb. 2.12). *Wallner* konnte zeigen, dass es einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Faserorientierung ( $0^\circ/90^\circ$ ,  $45^\circ$ ) und der Verbundcharakteristik gibt. So kann man mit einer Faserorientierung von  $45^\circ$ , gegenüber  $0^\circ/90^\circ$ , höhere Bruchkräfte erreichen. Gleichzeitig kann sich die Nachgiebigkeit der Scherkörper auf bis zu 20 % verringern. Dies bestätigt zugleich die Ergebnisse von *Ehsani et al.* [Ehs97] die an Drei-Stein-Körpern zuvor schon den selben Zusammenhang herausstellten. Angemerkt sei, dass die Nachgiebigkeit der Scherfuge dann an Bedeutung gewinnt, wenn sich dies vorteilhaft auf den Tragwiderstand auswirkt. Dies ist beispielsweise bei einer Erdbebenbe-



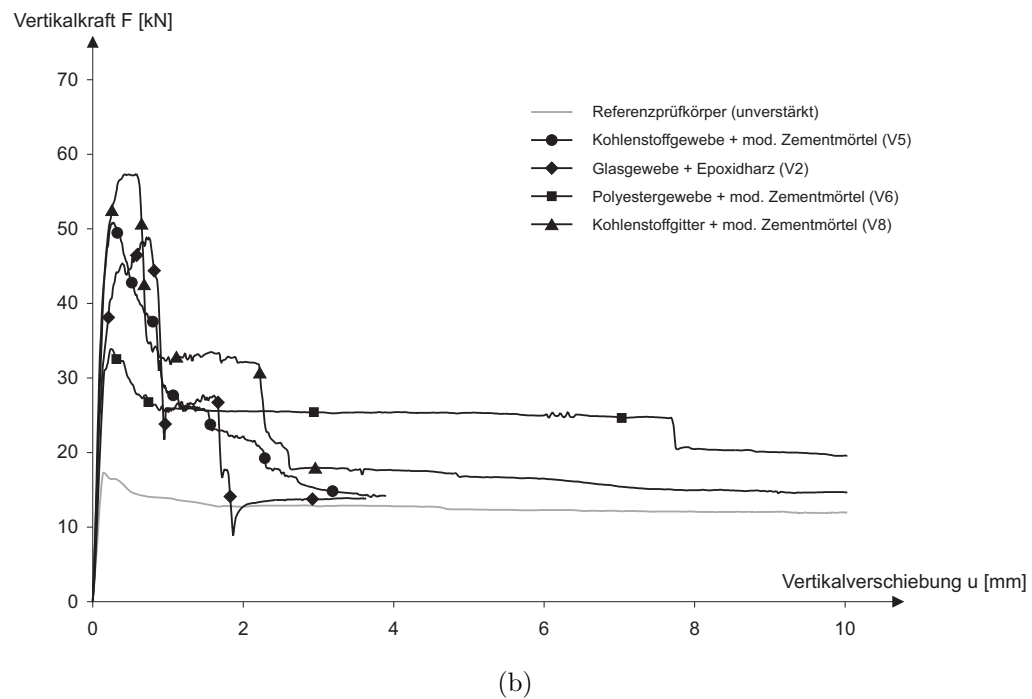
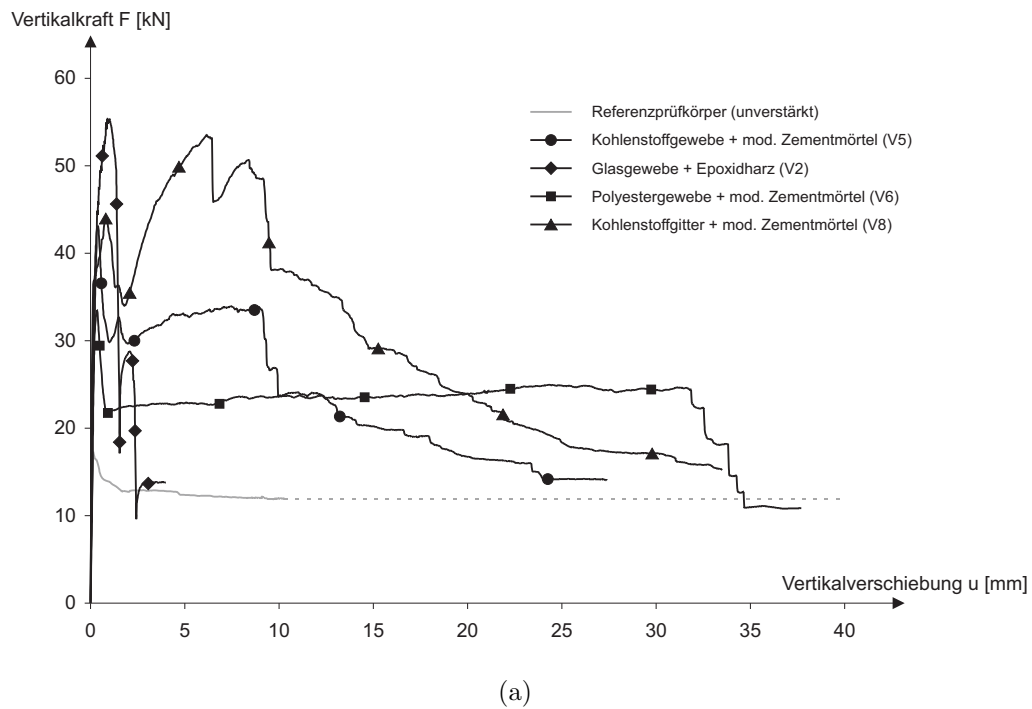
**Abbildung 2.11:** Versuchsanordnung, aus [Wal08]

anspruchung der Fall. *Wallner* verwendet daraufhin für die weiteren Bauteiluntersuchungen (Kap. 2.4.9) in fünf von sechs Fällen eine Faserorientierung von  $0^\circ/90^\circ$  zur Lagerfuge der Steine in Kombination mit dem modifizierten Zementmörtel.

## 2.4 Tragfähigkeitsuntersuchungen an Mauerwerkskörpern und Bauteilen

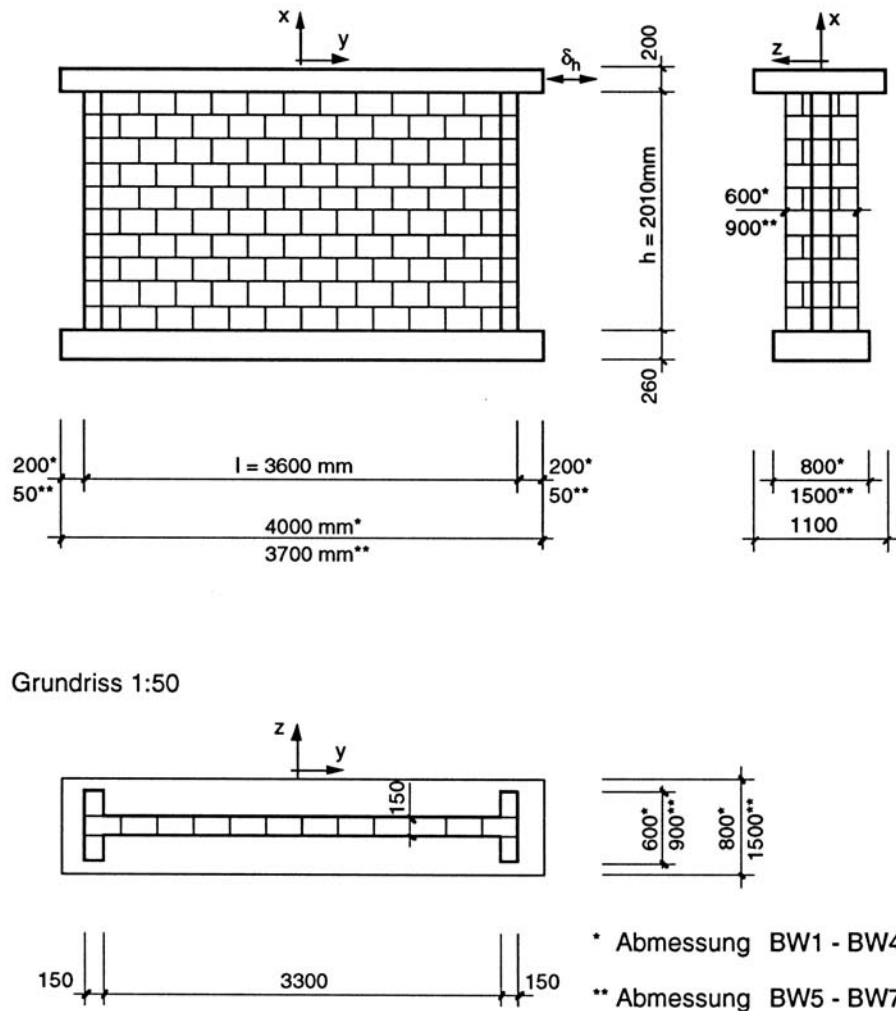
### 2.4.1 Schwegler 1994

Zur Verifizierung einer von *Ganz* [Gan85] hergeleiteten und von ihm auf die Anwendung von Faserverbundwerkstoffen erweiterten Bruchbedingung führte *Schwegler* sieben zyklische Bauteilversuche durch. Hierfür griff er auf einen Hochlochziegeltyp und eine Wandgeometrie zurück, die *Ganz* schon in den 1980iger Jahren für Schubtragfähigkeitsuntersuchungen an Mauerwerkswänden verwendet hatte. Die Breite der Wände betrug einschließlich der seitlich angebrachten Flansche 3,60 m, die Höhe 2,01 m (Abb. 2.13). Die Wanddicken wurden einheitlich mit 15 cm ausgebildet. Zur Verstärkung der Wände verwendete *Schwegler* Kohlenstofffaserlamellen, Kohlenstofffasergewebe sowie in einem Versuch Polyestergewebe. Auf das Mauerwerk aufgebracht wurden diese mit einem Zwei-Komponenten-Epoxidharzklebstoff. Zusätzlich wurden



**Abbildung 2.12:** Versuchsergebnisse: (a) Faserorientierung 0°/90° zur Mörtelfuge und (b) 45°, aus [Wal08]

die Faserverbundwerkstoffe in vier Fällen an den angrenzenden Decken- und Bodenplatten verankert (Tab. 2.6).



**Abbildung 2.13:** Aufbau und Abmessungen der Mauerwerksscheiben, aus [Sch94]

Während des Versuchs wurden die Wände mit einer Vertikalkraft von 418 kN belastet. Dies entspricht einer Normalspannung im Wandquerschnitt von ca.  $0,60 \text{ N/mm}^2$ . Die Schubkräfte wurden weggesteuert mit 5 bis 9 Verformungsstufen und jeweils 10 Verformungszyklen über die Deckenplatten in das Mauerwerk eingeleitet.

Durch die Verstärkung ergaben sich gegenüber den unverstärkten Wänden teils deutliche Steigerungen der Schubtrag- und der Verformungsfähigkeiten. So zeigte BW6 gegenüber der Referenzwand BW5 eine Steigerung der Tragfähigkeit von ca. 40 % (Abb. 2.14) mit einhergehender Verdreifachung der maximalen Verschiebung des Wandkopfes. Das Versagen trat letztlich durch die Ausbildung von treppenförmigen Rissen und Verbundversagen zwischen Faserverbundwerkstoff und Mauerwerk ein.

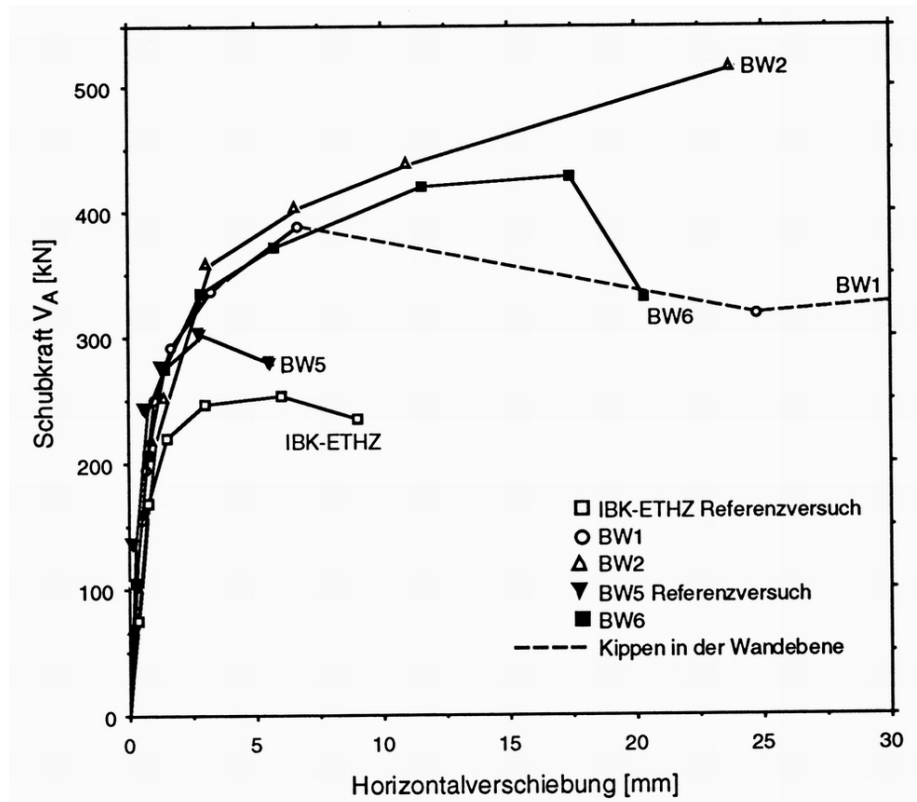
| Klasse        | Versuch | Art der Verstärkung | Verstärkungsmaterial | Applikation | Verankerung der FVW an Betonbauteilen |
|---------------|---------|---------------------|----------------------|-------------|---------------------------------------|
| Vorversuche   | BW1     | Lamelle             | Kohlenstoff          | einseitig   | ja                                    |
|               | BW2     | Lamelle             | Kohlenstoff          | beidseitig  | ja                                    |
|               | BW3     | Gewebe              | Kohlenstoff          | einseitig   | nein                                  |
|               | BW4     | Gewebe              | Kohlenstoff          | beidseitig  | nein                                  |
| Hauptversuche | BW5     | -                   | -                    | -           | -                                     |
|               | BW6     | Lamelle             | Kohlenstoff          | einseitig   | ja                                    |
|               | BW7     | Gewebe              | Polyester            | einseitig   | nein                                  |
|               |         | Lamelle             | Kohlenstoff          | einseitig   | ja                                    |

**Tabelle 2.6:** Übersicht der Bauteilversuche, nach [Sch94]

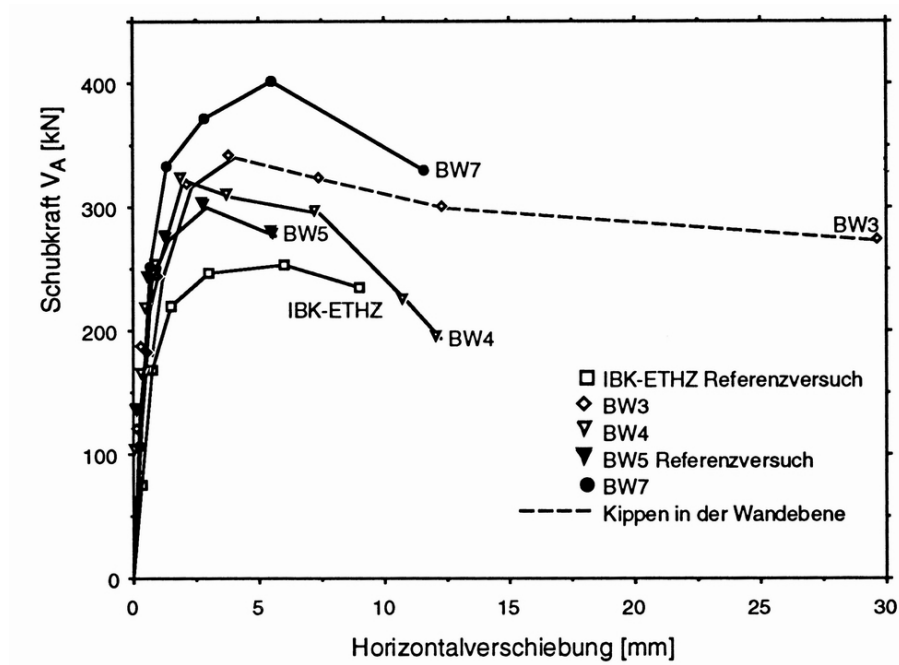
Bezeichnend für die Versuche BW1 und BW2 war, dass sich infolge einer einseitigen Lamellenanordnung (BW1) die Schubtragfähigkeit gegenüber einer beidseitigen Anordnung (BW2) nur geringfügig reduzierte. *Schwegler* schlussfolgert hieraus, dass das Aufbringen von Faserverbundwerkstoffen für schubbeanspruchte Wandscheiben mit einem geringen Tragwiderstandsverlust auf nur einer Mauerwerksseite erfolgen kann, wenn der Bewehrungsgrad beibehalten wird. Diese Erkenntnis hat baupraktisch eine große Bedeutung, da mit einer einseitigen Verstärkung der Arbeitsaufwand und die Kosten der Verstärkungsmaßnahmen reduziert werden können.

Zur Verifizierung der Versuchsergebnisse verwendet *Schwegler* die von *Ganz* [Gan85] erstmals für Mauerwerk angewandte Methode der Spannungsfelder und erweitert ein entsprechendes Bruchkriterium für die Anwendung von Faserverbundwerkstoffen. Das Verfahren wird in Abschnitt 3.1 erläutert. Für die Bemessung unterstellt *Schwegler* einen starrereren Verbund zwischen Faserverbundwerkstoff und Mauerwerk. Somit ist eine Berücksichtigung des Verbundversagens zwischen Mauerwerk und Faserverbundwerkstoff ausgeschlossen. Gerade diese Versagensform trat jedoch mehrfach bei den durchgeführten Schubversuchen auf. *Schwegler* geht hierauf jedoch nicht weiter ein.

Als Anwendungsbeispiel beschreibt *Schwegler* die nachträgliche Verstärkung einer Brandwand in einem Bürogebäude mit Kohlenstofffaserlamellen [Sch96].



(a)



(b)

**Abbildung 2.14:** Kraft-Verformungskurven für: (a) mit Kohlenstofffaserlamellen und (b) mit Geweben verstärkter Mauerwerkswände, aus [Sch94]

### 2.4.2 Ehsani et al. 1995 - 2000

*Ehsani et al.* [Ehs95] führten sechs Vier-Punkt-Biegezugversuche an mit Faserverbundwerkstoffen auf ihrer Unterseite verstärkten Mauerwerksbalken aus Ziegelvollsteinen durch (Abmessungen: 1,45 m, 0,22 m, 0,10 m). Auf die Balken aufgebracht wurden die Glasfasergewebe mit zwei Epoxidharzklebstoffen niedriger oder höherer Viskosität. Hierbei zeigte sich, dass der niedrigviskose Klebstoff zu einem besseren Verbund zwischen Faserwerkstoff und Mauerwerk führte, was im Vergleich zum höher viskosen Klebstoff eine Steigerung des Biegezugwiderstandes von bis zu 45 % ergab. Das die Anwendung eines niedrig viskosen Klebstoffs zu einem besseren Verbundtragverhalten führt, deckt sich auch mit den Versuchsbeobachtungen von *Vogel* [Vog00] (vgl. Abs. 2.2.1).

*Velazquez-Dimas* und *Ehsani* [VD00a] [VD00b] führten an senkrecht zu ihrer Wandebene beanspruchten Mauerwerksscheiben im Versuchsmaßstab 1:2 sieben Biegetragfähigkeitsversuche durch. Die Mauerwerkswände bestanden aus Ziegelvollsteinen. Zur Verstärkung verwendeten sie ein unidirektionales Glasfasergelege (Flächengewicht 610 g/m<sup>2</sup>) sowie als Matrix einen Epoxidharzklebstoff. Die Kräfte wurden mit einem Luftkissen seitlich gegen die Wand aufgebracht. Eine Vertikallast auf den Wandkopf wurde nicht berücksichtigt. Das Versagen kündigte sich bei allen Versuchskörpern durch einen horizontalen Riss der Lagerfuge in Wandmitte an. Die Dehnungen der Glasfaserverbundwerkstoffe betrugen zu diesem Zeitpunkt ca. 4 ‰. Als maßgebende Versagensform stellten *Velazquez-Dimas et al.* das *Verbundversagen* zwischen Glasfaserverbundwerkstoff und Mauerwerk beginnend in Wandmitte heraus, wobei langsam fortschreitende *Kohäsionsbrüche* in den oberflächennahen Bereichen der Steine eintraten. Eine Variierung der Verbundbreiten zwischen 13,5 cm und 28 cm führte zu einer nahezu linearen Erhöhung der Biegetragfähigkeit. Die größten Dehnungen des Faserverbundwerkstoffes wurden bei Versagenseintritt mit 12 ‰ gemessen.

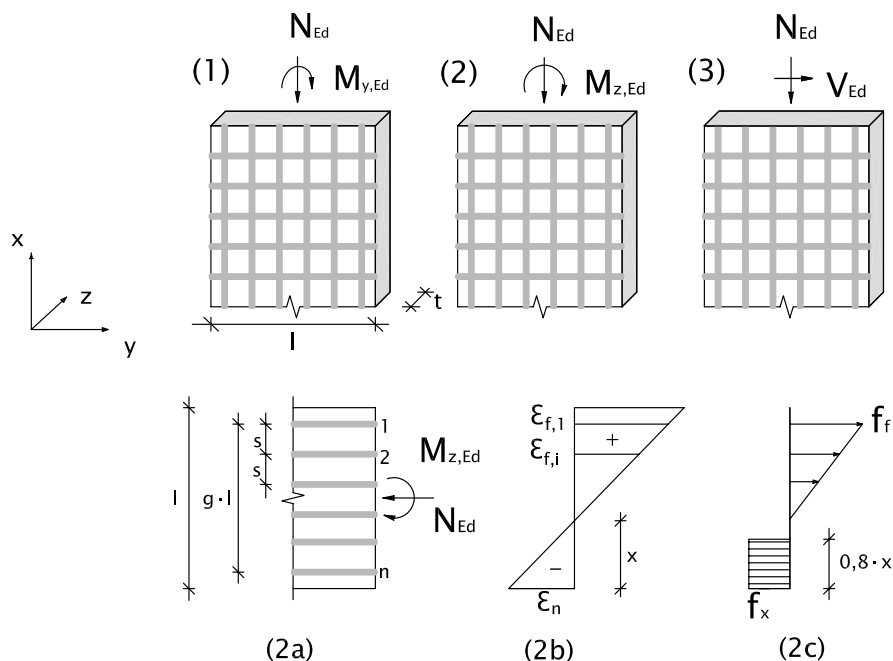
### 2.4.3 Triantafillou 1998

*Triantafillou* [Tri98a] [Tri98b] erweiterte ein im Eurocode 6 [EC6] verankertes Bemessungskonzept für bewehrte Mauerwerksbauteile auf die Anwendung von Faserverbundwerkstoffen. Hierbei unterschied er drei Beanspruchungsarten (Abb. 2.15), wobei er folgende Festlegungen - teils übernommen aus dem Eurocode - trifft:

- es gilt die Bernoulli-Hypothese (eben bleiben der Querschnitte)
- die Zugfestigkeiten des Mauerwerks werden vernachlässigt
- die Faserverbundwerkstoffe können einzig Zugkräfte aufnehmen, ein Lastabtrag senkrecht zur Faserrichtung wird ausgeschlossen

- es herrscht ein „perfekter Verbund“ zwischen den Faserverbundwerkstoffen und dem Mauerwerk vor  
(dies unterstellt, dass sich der Verbund unter keinen Umständen löst)
- die Faserverbundwerkstoffe folgen einem linear-elastischen Materialgesetz, für den Druckbereich des Mauerwerks gilt vereinfacht der rechteckige Spannungsbereich

*Triantafillou* geht bei seinen Modellen davon aus, dass eine sinnvolle und effiziente Verstärkung nur dann gelingt, wenn man die Kapazitäten der Faserverbundwerkstoffe und des Mauerwerks bestmöglich ausnutzt. Als Grenzfall für die reine Biegebeanspruchung trifft dies genau dann zu, wenn die Faserverbundwerkstoffe in der Zugzone des Mauerwerks dieselbe Kraft aufnehmen, wie in der Druckzone abgetragen werden kann. Die Widerstandsmomente für die Beanspruchungsarten (1) und (2) lassen sich mit den in Abbildung 2.15 dargestellten Annahmen in Anlehnung an den Eurocode 6 ermitteln.



**Abbildung 2.15:** Beanspruchungsarten (1), (2), (3) sowie Modellgrundlage für die Bemessung von (2): (2a) Anordnung der Lamellen, (2b) Dehnungsbeziehungen, (2c) Spannungsbereich mit Verteilung der Kräfte auf die Lamellen, nach [Tri98b]

Für bewehrte Mauerwerkswände kann nach Eurocode 6 eine erhöhte Schubtragfähigkeit angesetzt werden. Die hierfür erforderliche Bewehrung wirkt - analog dem Betonbau - als Bügelbewehrung. Der Tragwiderstand ergibt sich demnach aus zwei Anteilen: Dem

Schubtragfähigkeitsanteil des Mauerwerks ( $V_{Rd1}$ ) im überdrückten Bereich und dem Anteil ( $V_{Rd2}$ ), der sich aus der Horizontalbewehrung ergibt. Die Schubtragfähigkeit von mit Faserverbundwerkstoffen verstärkten Mauerwerkswänden wird von *Triantafillou* wie folgt angegeben:

$$V_{Ed} = V_{Rd1} + V_{Rd2} \quad (2.3)$$

$$V_{Rd2} = 0,9 \cdot r \cdot l \cdot (\rho_{f,h} \cdot t) \cdot f_f \quad (2.4)$$

$$\rho_{f,h} = \frac{A_{f,h}}{h \cdot t} \quad (2.5)$$

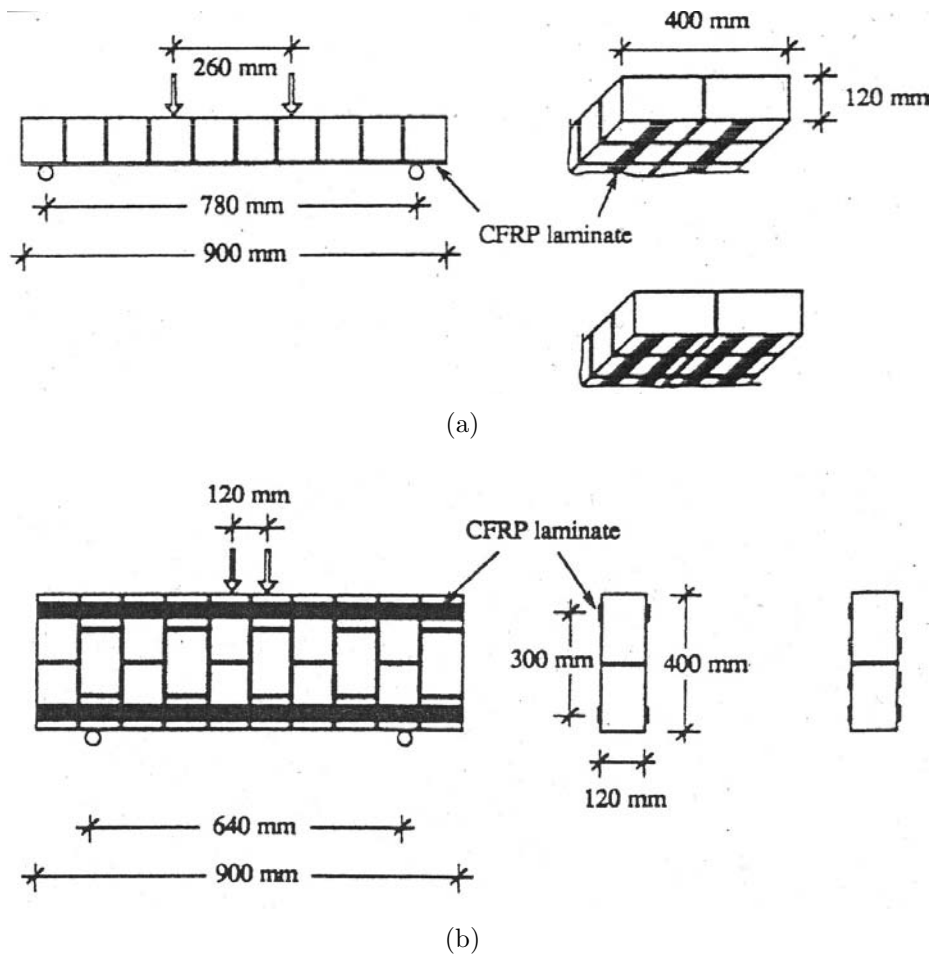
mit:

|              |                                                     |
|--------------|-----------------------------------------------------|
| $l, t, h$    | Wandlänge, Wanddicke, Wandhöhe                      |
| $f_f$        | Zugfestigkeit des Faserverbundwerkstoffs            |
| $\rho_{f,h}$ | horizontaler Bewehrungsgrad                         |
| $A_{f,h}$    | Gesamtquerschnittsfläche des Faserverbundwerkstoffs |

Ergänzend zum Eurocode 6 wurde von *Triantafillou* in Gleichung 2.4 eine zusätzliche Größe „ $r$ “ eingeführt. Dieser *Effizienzfaktor* soll ein ungewolltes frühzeitiges Verbundversagen zwischen Faserverbundwerkstoff und Mauerwerk sowie ein Zugversagen der Faserverbundwerkstoffe berücksichtigen. Er wird vom Autor ohne weitere Angaben mit 0,77 definiert.

*Triantafillou* verifiziert seine Modellansätze mit acht Vier-Punkt-Biegeversuchen: Vier (2x 2) in der schwachen und vier in der starken Achse (Abb. 2.16). Die verwendeten Kohlenstofffaserlamellen der Breite 50 mm und Dicke 1 mm wurden mit einem Epoxidharzklebstoff unterseitig beziehungsweise seitlich an die aus Ziegelvollsteinen gemauerten Mauerwerksbalken aufgeklebt. Die Versuche wurden weggesteuert durchgeführt.

Das Versagen trat bei Biegung um die schwache Achse ausnahmslos infolge Mauerwerksdruckversagen ein. Die größte Abweichung zwischen den berechneten und experimentell ermittelten Bruchkräften lag bei ca. 13 %. Die um die starke Achse beanspruchten Probekörper versagten infolge Verbundversagen, wobei sich ein fortschreitendes Lösen der Faserverbundwerkstoffe zeigte. Die maximale Abweichung zur berechneten Bruchkraft lag bei ca. 27 %.

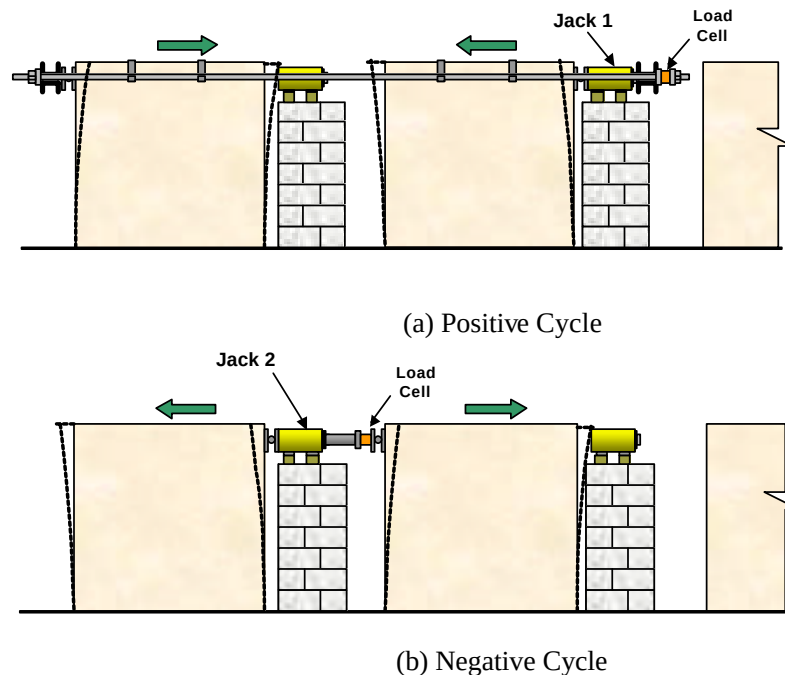


**Abbildung 2.16:** Versuchsaufbau: (a) Biegebeanspruchung um die schwache und (b) um die starke Achse, aus [Tri98b]

#### 2.4.4 Tumialan, Nanni, Galati et al. 1999 - 2005

Über einen Zeitraum von mehr als fünf Jahren wurden am *Center for Infrastructure* der *University of Missouri - Rolla (USA)* experimentelle und theoretische Untersuchungen zu nachträglich mit Faserverbundwerkstoffen verstärkten Mauerwerkswänden durchgeführt.

*Tumialan et al.* [Tum99] veröffentlichten 1999 einen Versuchsbericht zu mit Aramid-, Glas- und Kohlenstofffasergelegten sowie Faserverbundstäben verstärktem und „In-Situ“ getesteten Ziegelmauerwerk. Die Autoren führten 10 Schubversuche an im obersten Stockwerk eines Abrissgebäudes befindlichen Wandscheiben (Abb. 2.17) sowie drei auf Plattenbiegung beanspruchten Wänden in einem tiefer gelegenen Stockwerk durch. Ergänzt wurden diese durch Laboruntersuchungen an 26 biegebeanspruchten Mauerwerksbalken aus Ziegel- und Betonsteinen [Tum02]. An ihren Unterseiten verstärkt wurden die Balken mit Glas- und Aramidfasergelegten.



**Abbildung 2.17:** Versuchsaufbau der „In-Situ“ durchgeführten Schubtragfähigkeitsversuche, aus [Tum99]

*Tumialan* formulierte erstmals in [Tum01] einen Bemessungsansatz für auf Plattenbiegung beanspruchtes Mauerwerk. Für die Modellbildung trifft er die selben Festlegungen wie *Triantafillou* (Abs. 2.4.3). *Galati et al.* [Gal05] ergänzen seinen Ansatz um zwei Bemessungsgleichungen für in der Ebene auf Biegung und schubbeanspruchtes Mauerwerk. Für die Schubbemessung erweitern sie - wie schon *Triantafillou* - die Bemessungsgröße  $V_{Rd}$  um  $V_{Rd2}$  (Gl. 2.6).

$$V_{Rd2} = A_{f,\omega} \cdot k_{v,\omega} \cdot f'_{fu} \quad (2.6)$$

$$f'_{fu} = C_E \cdot f_{fu} \quad (2.7)$$

mit:

|                |                                                         |
|----------------|---------------------------------------------------------|
| $A_{f,\omega}$ | Querschnittsfläche der Faserverbundwerkstoffe           |
| $k_{v,\omega}$ | Reduktionsfaktor in Abhängigkeit vom Verstärkungssystem |
| $C_E$          | Reduktionsfaktor in Abhängigkeit von Umwelteinflüssen   |
| $f_{fu}$       | Zugfestigkeit der Faserverbundwerkstoffe                |

Der Reduktionsfaktor  $k_{v,\omega}$  berücksichtigt das Tragverhalten unterschiedlicher Verstärkungssysteme und muss für jede Anwendungsart experimentell ermittelt werden. Die Größe ist Abhängig von der Faserorientierung, dem verwendeten Faserverbundwerkstoff sowie der Klebstoffart und wird von *Galati et al.* zwischen 0,25 bis 0,80 angegeben. Der Reduktionsfaktor  $C_E$  erfasst Umwelteinflüsse durch Feuchte und Chemikalien und ist in etwa mit den Expositionsklassen des Betonbaus [DIN 1045-1] vergleichbar.  $C_E$  wird abhängig vom verwendeten Faserwerkstoff zwischen 0,50 (Glasfaser) bis 0,95 (Kohlenstofffaser) angegeben.

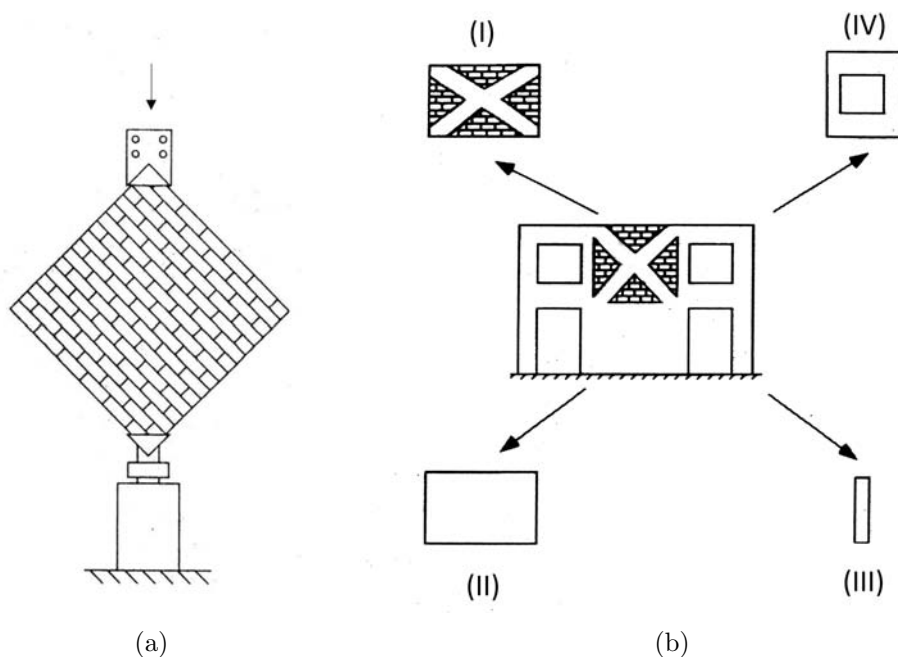
Wie schon erwähnt, kann es neben dem Druckversagen des Mauerwerks und Zugversagen der Faserverbundwerkstoffe zu einem *Verbundversagen* zwischen Mauerwerk und Faserverbundwerkstoff kommen. Alle in diesem Abschnitt aufgeführten Autoren messen dieser Versagensform die größte Bedeutung zu. *Tumialan, Galati et al.* [Gal02] [Tum02] [Tum03] [Gal04] beobachteten an biegebeanspruchten Mauerwerksbalken, dass das Verbundversagen dominierte. Um ein Verbundversagen auszuschließen, wurde von *Nanni et al.* [Nan03] eine Reduzierung der Zugfestigkeit der Faserverbundwerkstoffe unter Anwendung eines entsprechenden Beiwertes  $k_m$  vorgeschlagen (Gl. 2.8). Der Bemessungswert der Zugfestigkeit ergibt sich demnach wie folgt:

$$f_{fd} = k_m \cdot C_E \cdot f_{fu} \quad (2.8)$$

Der Beiwert  $k_m$  wird in [Gal05] in Abhängigkeit der verwendeten Klebstoffe und Verstärkungssysteme zwischen 0,35 (FVW-Stäbe) bis 0,65 (Lamellen, Gelege) angegeben. *Nanni et al.* [Nan03] empfehlen darüber hinaus für Verstärkungen unter hoher Dauerlast die Berücksichtigung von  $k_m = 0,20$ .

### 2.4.5 Jai, Springer 2000

Jai, Springer [Jai00b] führten drei Schubversuche an Mauerwerkskörpern aus Ziegelvollsteinen durch (Abb. 2.18a). Sie untersuchten eine unverstärkte, eine mit diagonalen Streifen sowie eine vollflächig mit Glasfaserwerkstoffen verstärkte Wand. Zur Verklebung verwendeten sie einen Epoxidharzklebstoff. Gegenüber der unverstärkten Wand ergab sich eine Verdopplung der Tragfähigkeit für die diagonal und eine Verdreifachung für die vollflächig verstärkte Wand.



**Abbildung 2.18:** (a) Versuchsaufbau, (b) Grundelemente zur Modellbildung - Anordnung der Faserverbundwerkstoffe: (I) Wandelement - diagonal, (II) Wandelement - vollflächig, (III) Stütze und (IV) Öffnungsbereich, aus [Jai00a]

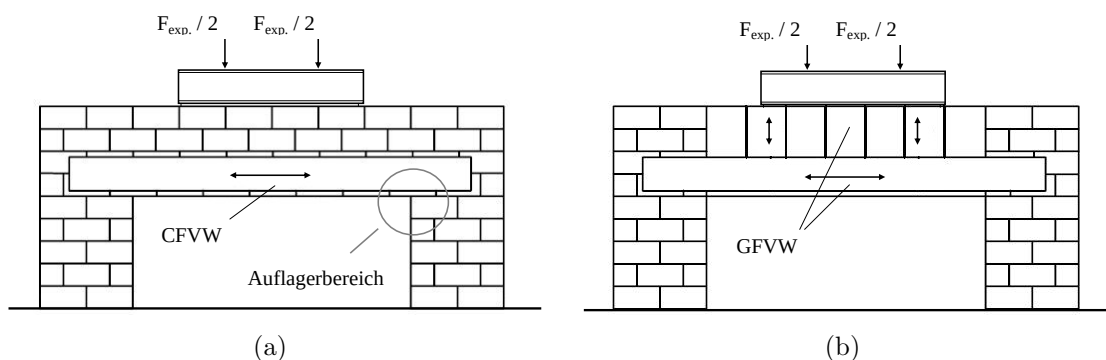
Für die Verstärkung von Mauerwerk leiteten sie ein Bemessungsmodell [Jai00a] mit vier Grundelementen her (Abb. 2.18b). Hinsichtlich der Modellbildung trafen sie die selben Festlegungen wie *Triantafillou* (Abs. 2.4.3). Die Bemessung folgt der Fachwerk- (Elemente: I und II) und der Biegetheorie (Elemente: III und IV). Da auch Jai, Springer bei ihrer Modellbildung von einem „perfektem Verbund“ zwischen Faserverbundwerkstoff und Mauerwerk ausgehen, ist ein Verbundversagen gänzlich ausgeschlossen. Theoretisch könnten die Faserverbundwerkstoffe somit bis zum Erreichen ihrer Zugfestigkeit beansprucht werden. Zwar zeigte sich bei Versuchen anderer Autoren (z. B. *Tumialan, Galati et al.*), dass ein Zugversagen der Faserverbundwerkstoffe möglich ist, vordergründig trat das Versagen jedoch als Verbundversagen ein.

Auf Grund der starken Vereinfachungen - Mauerwerk isotrop, Elastizitätsmodule

von Stein und Mörtel identisch, perfekter Verbund usw. - kann das von *Jai, Springer* [Jai00a] vorgeschlagene Bemessungsmodell für nachträglich verstärkte Mauerwerkswände nicht für die Modellierung des Lastabtrags örtlich verstärkter Mauerwerksscheiben herangezogen werden.

### 2.4.6 Seim et al. 2002 - 2003

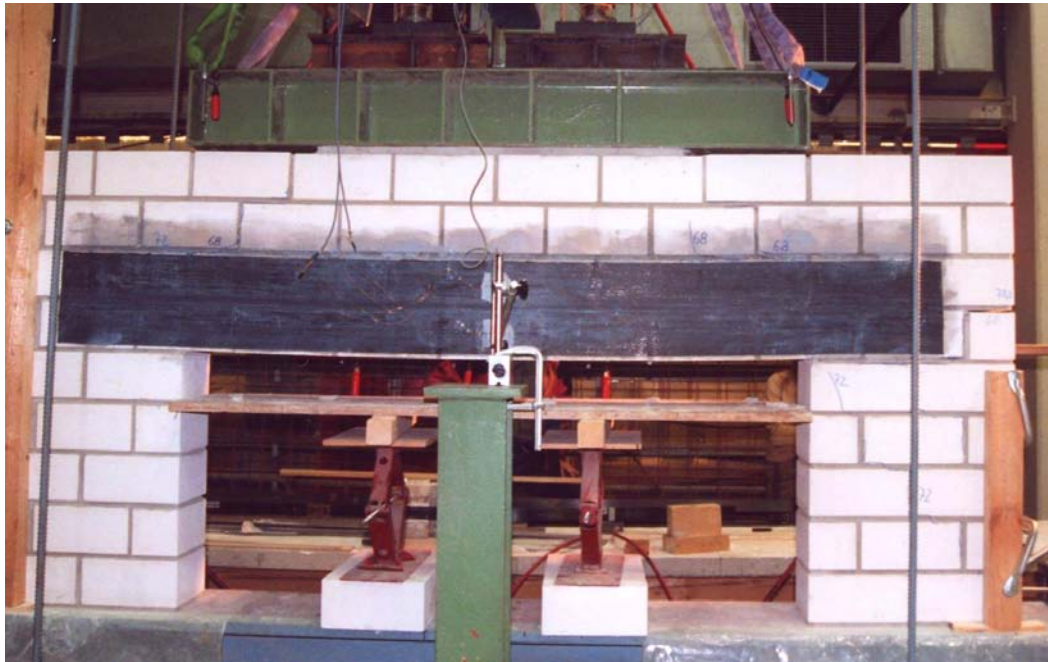
*Seim et al.* [Stü02, Sei03] konnten zeigen, dass sich nachträgliche Wandöffnungen mit örtlich über einem geplanten Wanddurchbruch aufgeklebten Faserverbundwerkstoffen vergleichsweise einfach herstellen lassen. Hierzu führten sie, unter anderem, zwei Bauteilversuche an Wandscheiben (Abb. 2.19) durch. Diese waren 2,49 m breit und 1,12 m hoch. Die Öffnung betrug 1,51 m in der Breite und 0,64 m in der Höhe. Die Wände wurden mit Kalksandlochsteinen der Druckfestigkeitsklasse 20 und einem Mauermörtel der Mörtelgruppe IIa hergestellt.



**Abbildung 2.19:** Versuchsaufbau mit Angabe der Faserorientierung: (a) Wand 1 und (b) Wand 2, nach [Sei03]

Wand 1 wurde mit 22 cm breiten, beidseitig über der Öffnung in horizontaler Richtung aufgetragenen Kohlenstofffasergelegen (SikaWrap 230C) verstärkt. Zur Verbesserung der Schubtragfähigkeit wurde bei Wand 2 über der Öffnung zusätzlich eine vertikale Verstärkung vorgesehen. Für Wand 2 kam einzig ein Glasfasergelege (SikaWrap 430G) zur Anwendung. Die Klebstoffmatrix bestand bei beiden Versuchen aus einem Epoxidharzklebstoff (SikaDur 330). Die Auswahl der Werkstoffe erfolgte mit Hilfe der von *Vogel* (vgl. Abs. 2.2.1) durchgeführten Verankerungsuntersuchungen. Belastet wurden die Wände am Wandkopf mit zwei im Abstand von 45 cm aufgetragenen Hydraulikzylindern.

Für die Wand 1 kündigte sich das Versagen durch ein Gleiten der Lagerfuge direkt über dem horizontal aufgetragenen Gelege an. Die Gesamtbelastung betrug zu diesem Zeitpunkt ca. 68 kN. Anschließend konnte die Last unter anhaltender sichtbarer Durchbiegung (Abb. 2.20a) im Öffnungsbereich, bis auf 73 kN gesteigert werden.



(a)



(b)



(c)

**Abbildung 2.20:** (a) Wand 1 mit sichtbarer Durchbiegung im Öffnungsbereich und Wand 2 (b) mit Rissbildung im rechten Auflagerbereich und (c) Zugversagen der Glasfaserverbundwerkstoffe, aus [Stü02]

Wand 2 zeigte ab einer Last von 82 kN erste Risse im Auflagerbereich. Die Belastung konnte anschließend, unter anhaltenden Bruchgeräuschen, bis auf 107 kN gesteigert werden. Das Versagen trat letztlich durch Zugversagen der Glasfasergelege (Abb. 2.20c) in Auflagernähe ein. Die größte Durchbiegung im Öffnungsbereich betrug zu diesem Zeitpunkt 15 mm. Die größten Dehnungen der Faserverbundwerkstoffe wurden an der Unterseite der horizontal aufgetragenen Gelege mit 11 ‰ gemessen.

*Seim et al.* [Sei03] halten fest, dass es zu keinem Zeitpunkt zu einem Verbundversagen zwischen den Faserverbundwerkstoffen und dem Mauerwerk kam. Eine genaue Untersuchung der Verbundcharakteristik für unterschiedliche Mauersteinarten und Faserverbundwerkstoffe halten sie dennoch für erforderlich.

### 2.4.7 ElGawady 2004

*ElGawady* [ElG04] befasste sich mit der Herleitung eines Bemessungsmodells für verstärkte, schubbeanspruchte Mauerwerkswände. Hierbei beschränkte er sich auf einseitig vollflächig mit Aramid- und Glasfasergeweben sowie mit Kohlenstofffaserlaminaten kreuzweise verstärkte Wandscheiben. Zur Herleitung eines Bemessungsmodells traf er die selben Festlegungen wie zuvor schon *Triantafillou* (Abs. 2.4.3). Darüber hinaus blieben in Anlehnung an die Erkenntnisse der Arbeit von *Schwegler* (Abs. 2.4.1) Modelleinflüsse aus einer einseitigen Verstärkung unberücksichtigt.

Die Herleitung des Modells erfolgt am schubbeanspruchten differentiellen Wandelement. *ElGawady* leitet eine *Fourier-Reihe* für die Beanspruchung der Faserverbundwerkstoffe und der Klebstoffmatrix her. Die Tragfähigkeit der verstärkten Wand ergibt sich als Summe der Mauerwerkstragfähigkeit und der Faserverbundwerkstoffe. Jedoch lässt sich die hergeleitete *Fourier-Reihe* einzig sinnvoll computergestützt lösen. Für einfache Handrechnungen ist dieser Ansatz ungeeignet.

Zur Überprüfung des Modells führte der Autor elf statisch zyklische und neun dynamische Schubversuche an Wandscheiben im verkleinerten Maßstab 1:2 durch. Für die statisch zyklisch durchgeführten Schubversuche verwendete der Autor 1,60 m hohe und 1,57 m lange Wände. Die Abmessungen der dynamisch getesteten Wände betrugen in der Höhe 1,60 m bzw. 0,70 m und in der Länge 1,57 m. Das Mauerwerk bestand aus Hochlochziegeln der selben Art die zuvor schon *Ganz* und *Schwegler* für ihre Untersuchungen verwendeten, in Kombination mit einem schwachen (M2,5) und einem starken (M9) Mörtel. Als Klebstoff kam ein Epoxidharz zur Anwendung. Die auf die Wände aufgetragenen Faserverbundwerkstoffe wurden in den Wanddeckbereichen mit Stahllaschen an massiven Kopf- und Fußbalken verankert. Die Tragfähigkeiten der Wände wurden zunächst an den unverstärkten Wänden ermittelt. Anschließend wurden diese mit Faserverbundwerkstoffen verstärkt. Im Ergebnis zeigte sich eine Verdopplung des Tragwiderstandes gegenüber den unverstärkten Wänden. Hierbei muss

man jedoch berücksichtigen, dass die Faserverbundwerkstoffe an ihren Enden verankert wurden. Die anschließende Verifizierung des Modells ergab eine Abweichung der rechnerisch ermittelten Schubtragfähigkeit von bis zu 40 % für die statisch zyklisch durchgeführten und 28 % für die dynamisch beanspruchten Wandscheiben.

*ElGawady* geht bei der Modellbildung von einem vereinfachten Verbundansatz zwischen Mauerwerk und Faserverbundwerkstoffen aus. Hierzu bedient er sich einer mittleren Verbundschubspannung. Dies mag für vollflächig verstärkte Wände hinreichend genau sein. Für die Bemessung *örtlich* verstärkter Wandbereiche ist eine genauere Erfassung der Verbundcharakteristik als auch des Lastabtrags im Endverankerungsbereich erforderlich. In der Konsequenz eignet sich das vorgeschlagene Modell nicht zur Bemessung örtlicher Verstärkungen.

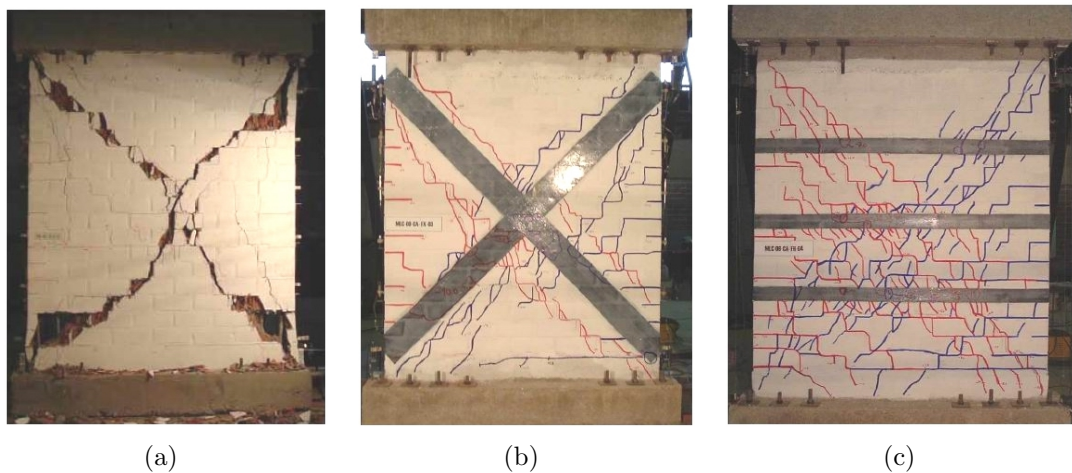
#### 2.4.8 Maria et al. 2006

*Maria et al.* [Mar06] führten sechs Schubversuche an Mauerwerksscheiben durch. Jeweils zwei an unverstärkten, an mit Faserverbundwerkstoffen kreuzweise und horizontal verstärkten Wänden. Die Wände bestanden aus Hochlochziegeln. Die Abmessungen der Wände betrugen 2,0 m in der Höhe, 1,98 m in der Länge und 0,14 m in der Dicke. Zur Erhöhung des Biegewiderstandes wurden zusätzlich in den Randbereichen der Wände je zwei Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 25 mm eingebracht und in den kopf- und fußseitigen Stahlbeton-Balken verankert. Verstärkt wurden die Wände mit Kohlenstofffaserwerkstoffen die mit einem Epoxidharzklebstoff aufgeklebt wurden. Die Versuche wurden statisch zyklisch und weggesteuert durchgeführt. Auf eine Behinderung der Wandkopfverdrehung sowie eine Verankerung der Faserverbundwerkstoffe am Wandkopf und Wandfuß wurde verzichtet. Eine Übersicht zu den Versuchen wird in Tabelle 2.7 gegeben.

| Wand | Anordnung<br>der FVW | Breite<br>der FVW<br>[mm] | vertikale<br>Auflast<br>[kN] | horizontale<br>Schubkraft<br>[kN] |
|------|----------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 1a   | -                    | -                         | 104,0                        | 145,9                             |
| 1b   | -                    | -                         | 100,7                        | 135,3                             |
| 2a   | diagonal             | 300                       | 103,2                        | 259,4                             |
| 2b   | diagonal             | 200                       | 101,9                        | 229,6                             |
| 3a   | horizontal           | 3x 150                    | 101,2                        | 226,7                             |
| 3b   | horizontal           | 3x 100                    | 100,6                        | 220,2                             |

**Tabelle 2.7:** Übersicht und Ergebnisse der Bauteilversuche, aus [Mar06]

Ein Vergleich der in Tabelle 2.7 angegebenen Schubkräfte zeigt, dass mit der Wand 2a - gegenüber dem Mittelwert der Wände 1a, 1b - die Schubtragfähigkeit um bis zu 80 % gesteigert werden konnte. Hierbei trat das Versagen durch ein Verbundversagen zwischen Faserverbundwerkstoffen und Mauerwerk auf bis zu 50 % der Verbundfläche mit einhergehendem Druckversagen des Mauerwerks in den Randbereichen ein. Die Wände 3a, 3b versagten hingegen schrittweise. Die Versche wurden abgebrochen, als sich der Großteil der Faserverbundwerkstoffe von den Wandoberflächen gelöst hatte. Eine Darstellung der Rissbilder wird in Abbildung 2.21 gegeben.



**Abbildung 2.21:** Rissbilder und Anordnung der Faserverbundwerkstoffe: (a) Wand 1a, 1b, (b) 2a, 2b und (c) 3a, 3b, aus [Mar06]

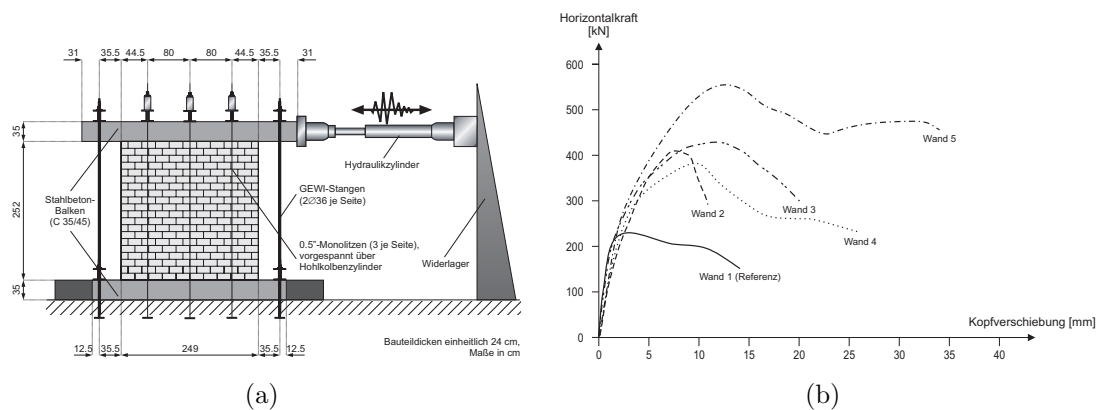
### 2.4.9 Wallner 2008

Zum Abschluss seines Forschungsvorhabens führte *Wallner* [Wal08] fünf pseudodynamische Schubversuche an Mauerwerksscheiben ohne und drei an Wänden mit Öffnungen (Abb. 2.23a und Abb. 2.24a) durch. Die Wände waren 2,5 m hoch, 2,5 m lang und 0,24 m dick. Die verwendeten Kalksandvollsteine entsprachen der Druckfestigkeitsklasse 12, die mittlere Prismendruckfestigkeit des verwendeten Mörtels betrug  $2,5 \text{ N/mm}^2$ . Zur Berücksichtigung einer Deckeneinspannung wurde ein kopfseitig angebrachter Stahlbeton-Balken mit Gewindestangen fixiert (Abb. 2.23a). Über diesen Balken erfolgte auch die Einleitung der Horizontalkräfte in die Wandscheiben. Die vertikale Belastung betrug während des Versuchs 330 kN. Dies entspricht einer Druckspannung von  $0,55 \text{ N/mm}^2$  im Wandquerschnitt. Alle Mauerwerksscheiben wurden zunächst in einem pseudodynamischen Schubversuch unter Verwendung der Daten eines in Rumänien gemessenen Erdbebens (Nord-Süd Komponente Vrancea-Beben) vorgeschädigt. Die Steigerung der Belastung erfolgte in Schritten von 25 %

bis auf 250 % des gemessenen Spektrums. Es bildeten sich deutlich sichtbare, diagonal verlaufende Treppenrisse aus. Anschließend wurden die Wände beidseitig mit Faserverbundwerkstoffen verstärkt. Als Klebstoffe kamen ein kunststoffmodifizierter Zementmörtel bzw. der Epoxidharzklebstoff SikaDur 330 zur Anwendung. Auf eine Verankerung der Faserverbundwerkstoffe am Wandkopf- und Wandfußbereich wurde verzichtet. Eine Übersicht der Schubversuche wird in Abbildung 2.22 gegeben.

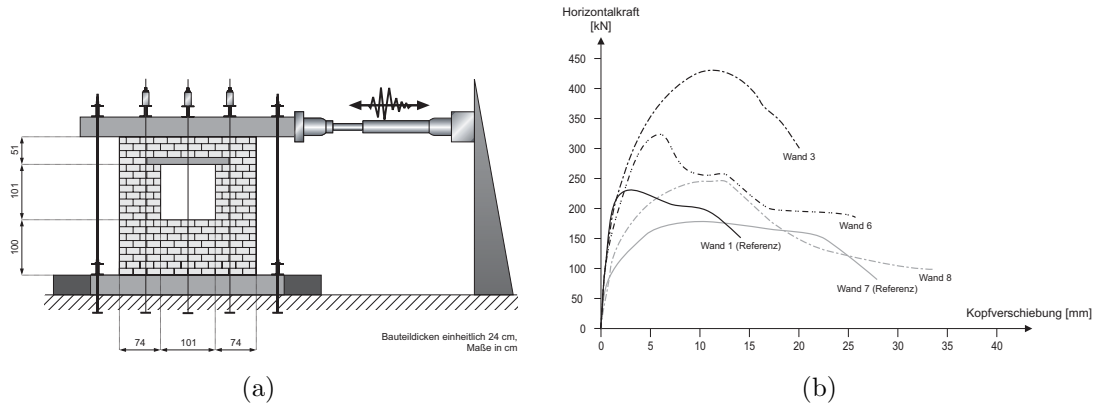
| WPK | Öffnung | Fasermaterial          | Struktur | Flächengewicht [g/m²] | Matrix            | Applikation (beidseitig) | Skalierungsstufen [%] |
|-----|---------|------------------------|----------|-----------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------|
| 1   | nein    | Referenz (unverstärkt) |          |                       |                   |                          | 25 - 150              |
| 2   |         | E-Glas                 | Gewebe   | 395                   | Epoxidharz        | Diagonalstreifen (45°)   | 25 - 225              |
| 3   |         | Kohlenstoff            | Gewebe   | 375                   | mod. Zementmörtel | vollflächig (0°/90°)     | 25 - 225              |
| 4   |         | Polyester              | Gewebe   | 130                   |                   |                          | 25 - 225              |
| 5   |         | Kohlenstoff            | Gitter   | 2x159                 |                   |                          | 25 - 400              |
| 6   | nein    | Kohlenstoff            | Gewebe   | 375                   | mod. ZM           | einseitig (0°/90°)       | 25 - 200              |
| 7   | ja      | Referenz (unverstärkt) |          |                       |                   |                          | 25 - 250              |
| 8   |         | Kohlenstoff            | Gewebe   | 375                   | mod. ZM           | beidseitig (0°/90°)      | 25 - 250              |

**Abbildung 2.22:** Übersicht der Bauteilversuche, aus [Wal08]



**Abbildung 2.23:** Schubwände ohne Öffnungen: (a) Versuchsaufbau, (b) Schubkraft-Verformungs-Kurven, aus [Wal08]

Es ergaben sich Steigerungen der Tragwiderstände von bis zum 2,5-fachen der Referenzwände. Und das, obwohl diese im Vorfeld der Verstärkung geschädigt wurden und auf eine Verankerung der Faserverbundwerkstoffe am Wandkopf und -fuß verzichtet wurde. Auch die Anfangssteifigkeiten der verstärkten Wände entsprachen in etwa denen der Referenzwände. Das Versagen der verstärkten Wände trat hierbei vordergründig als Druckversagen in den unteren Wandecken sowie durch Lösen des Verbundes zwischen Faserverbundwerkstoff und Mauerwerk ein.



**Abbildung 2.24:** Schubwände mit Öffnungen: (a) Versuchsaufbau, (b) Schubkraft-Verformungs-Kurven, aus [Wal08]

## 2.5 Anwendungsempfehlungen und Normen

### 2.5.1 CNR-DT 200/2004

Im Jahr 2004 veröffentlichte der *Nationale Forschungsrat* Italiens die Anwendungsempfehlung *CNR-DT 200* [CNR04] zur nachträglichen Verstärkung von Beton- und Mauerwerkskonstruktionen mit oberflächlich aufgeklebten Faserverbundwerkstoffen. Diese Empfehlung regelt die Anwendung von Aramid-, Glas- und Kohlenstofffaserprodukten in Kombination mit einem Epoxidharzklebstoff. Eine Einschränkung auf Lamellen oder Gelege wurde nicht getroffen. Nachfolgend sei im Besonderen auf den Nachweis der Endverankerung von Faserverbundwerkstoffen auf Mauerwerk eingegangen. Die Verbundbruchkraft sowie die maximale Verbundlänge am Mauerstein ergeben sich demnach wie folgt:

$$F_{f,d} = \frac{1}{\gamma_f \cdot \sqrt{\gamma_m}} \cdot b_v \cdot \sqrt{2 \cdot G_v \cdot E_f \cdot t_f} \quad (2.9)$$

$$l_{v,max} = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot f_{st,t}}} \quad (2.10)$$

mit:

$$G_v = c_v \cdot \sqrt{f_{st} \cdot f_{st,t}} \quad (2.11)$$

und

|                      |                                                   |
|----------------------|---------------------------------------------------|
| $t_f, b_v$           | Dicke und Breite des Faserverbundwerkstoffs       |
| $E_f$                | Elastizitätsmodul des Faserverbundwerkstoffs      |
| $f_{st}, f_{st,t}$   | mittlere Druck- und Zugfestigkeit der Mauersteine |
| $l_{v,max}$          | maximale Verbundlänge                             |
| $c_v$                | Kalibrierungsfaktor                               |
| $\gamma_f, \gamma_m$ | Teilsicherheitsbeiwerte: FVW, Mauerwerk           |

Wird die maximale Verbundlänge  $l_{v,max}$  nicht erreicht, kann die rechnerische Verbundbruchkraft mit folgender Beziehung abgemindert werden:

$$F'_{f,d} = F_{f,d} \cdot \frac{l_v}{l_{v,max}} \left( 2 - \frac{l_v}{l_{v,max}} \right) \quad (2.12)$$

Der Kalibrierungsfaktor  $c_v$  wird ohne weitere Angaben für die in der Anwendungsempfehlung aufgeführten Faserverbundwerkstoffarten auf 0,015 festgelegt. Der Sicherheitsbeiwert  $\gamma_f$  wird in Abhängigkeit der Versagensform (Verbundversagen, Zugversagen der Faserverbundwerkstoffe) mit 1,10 bis 1,50 angegeben. Eine Definition des Sicherheitsbeiwerts für das Mauerwerk  $\gamma_m$  wird nicht gegeben.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die im *CNR-DT 200* enthaltenen Formulierungen zum Verbundverhalten zwischen Faserverbundwerkstoffen und Mauerwerk schon Mitte der 1990iger Jahre von *Holzenkämpfer* [Hol94] publiziert wurden. *Holzenkämpfer* untersuchte vorrangig das Verbundverhalten von auf Beton aufgeklebten Stahllaschen.

### 2.5.2 SIA 166:2004 - Klebebewehrungen

Ebenfalls 2004 veröffentlichte der Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein (SIA) die Vornorm *Klebebewehrungen* [SIA166]. In ihr sind erste Ansätze zur Berechnung nachträglicher Verstärkungen von aus „*allen gängigen konstruktiven Baustoffen bestehenden Tragwerken*“ geregelt. Dies schließt Beton-, Mauerwerk-, Holz- und Stahlbauteile ein. Zur Verstärkung sind Baustähle der Güte S235 und Faserverbundwerkstoffe zugelassen. Die Verklebung sollte mit einem Epoxidharzklebstoff erfolgen. Andere Klebstoffe sind zulässig, wenn sie festgelegte Kriterien erfüllen. Für Mauerwerk wird eine Verankerung der Klebbewehrung in den angrenzenden Betonbauteilen empfohlen. Gelingt dies nicht, muss eine Verankerung der Klebbewehrung

durch Formschluss auf dem Mauerwerk erfolgen. Eine mechanische Endverankerung der Klebbewehrung auf dem Mauerwerk wird somit erforderlich.

Die Vornorm stellt einen wichtigen Entwicklungsschritt dar, da mit ihr erstmals eine allgemeine Anwendbarkeit einer Klebbewehrung aus Stahl oder Faserverbundwerkstoffen für Mauerwerk geregelt ist.

## 2.6 Zwischenbilanz

In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Tragfähigkeitsuntersuchungen an mit Faserverbundwerkstoffen flächig oder kreuzweise verstärkten und schubbeanspruchten Mauerwerksscheiben durchgeführt [Sch94, ElG04, Wal08]. Vereinzelt finden sich in der Literatur Scherversuche an mit Faserverbundwerkstoffen verstärkten Drei-Stein-Körpern [Ehs95, Wal08] oder Verankerungsuntersuchungen an Steinen [Vog00, Aie03]. Einzig *Seim et al.* [Sei03] befassten sich mit dem Tragverhalten *örtlich* verstärkter Mauerwerksscheiben.

Mitte der 1990iger Jahre führte *Schwegler* [Sch94] erste theoretische und experimentelle Untersuchungen zu mit Faserverbundwerkstoffen verstärkten und schubbeanspruchten Wänden durch. Arbeiten von *Triantafillou* [Tri98a], *Tumialan et al.* [Tum99], *Jai, Springer* [Jai00b] und *Wallner* [Wal08] folgten. Wurden zur Verstärkung anfänglich noch Polyesterfasern verwendet, so beschränkt sich dies in den Folgejahren ausschließlich auf Glas- und Kohlenstofffaserwerkstoffe. Als Klebstoffe kamen nahezu ausnahmslos Zwei-Komponenten-Epoxidharzklebstoffe zur Anwendung. Einzig *Wallner* [Wal08] verwendete zur Verklebung der Faserwerkstoffe einen kunststoffmodifizierten Zementmörtel. Allen experimentellen Untersuchungen an mit Faserverbundwerkstoffen verstärkten und schubbeanspruchten Mauerwerksscheiben ist gemein, dass sich deutliche Steigerungen der Tragwiderstände von bis zum 2,5-fachen Wert gegenüber den unverstärkten Mauerwerkswänden ergaben. Das Versagen trat vorrangig durch Mauerwerksdruckversagen und Lösen der Faserverbundwerkstoffe vom Mauerwerk ein, wobei sich im Allgemeinen ein *Kohäsionsversagen* in den oberflächennahen Steinbereichen zeigte. Vereinzelt kam es zum Zugversagen der Faserverbundwerkstoffe. Bei der überwiegenden Zahl der Untersuchungen wurde eine Verankerung der Faserverbundwerkstoffe an den angrenzenden Decken- und Bodenplatten vorgesehen. Dieses Vorgehen ist in sich stimmig, führt es doch zu einer bestmöglichen Ausnutzung der Verstärkungssysteme. Die mit diesen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse können jedoch für eine *örtliche* Verstärkung nicht direkt angewendet werden, da hier eine Aussage über die Verbundcharakteristik zwischen Mauerwerk und Faserverbundwerkstoffen erforderlich ist.

Die wenigen Berechnungsansätze für klebebewehrtes und schubbeanspruchtes Mauerwerk unterstellen in aller Regel einen „*perfekten*“ Verbund zwischen Faserverbundwerkstoffen und Mauerwerk oder eine Verankerung dieser an den angrenzenden Bauteilen. Zudem werden teils starke Vereinfachungen getroffen: das Materialverhalten der Werkstoffe bis hin zum Mauerwerk wird als isotrop, homogen und linear-elastisch angenommen. Eine Anwendung dieser Modelle auf die Bemessung *örtlicher* Verstärkungen ist somit nicht möglich.

*Casareto et al.* [Cas03] konnten mit Verankerungsuntersuchungen an Mauerwerkskleinkörpern zeigen, dass das Verbundversagen zwischen Faserverbundwerkstoffen

und Mauerwerk vorrangig als *Kohäsionsbruch* in den oberflächennahen Steinbereichen eintritt. Eine Steigerung der Verbundlänge über 100 mm hinaus ergab für ihre Untersuchungen keine nennenswerte Erhöhung der Verbundbruchkräfte. Hieraus schlussfolgern *Casareto et al.*, dass es eine maximale Verbundbruchkraft mit einer zugehörigen „*maximalen Verbundlänge*“ geben muss. Diese vermuten sie bei ca. 100 mm.

Eine für die *örtliche* Verstärkung wichtige Fragestellung ist die nach dem Verbund zwischen Faserverbundwerkstoffen und Mauersteinen. Experimentelle Untersuchungen hierzu wurden von *Vogel* [Vog00], *Aiello, Sciolti* [Aie03] und *Wallner* [Wal08] durchgeführt. Ein erster Ansatz zur Berechnung der Verbundbruchkräfte wurde in CNR-DT 200 [CNR04] von *Holzenkämpfer* [Hol94] übernommen. Bei Verankerungsversuchen zeigte sich auch hier, dass das Verbundversagen vorrangig als spröder *Kohäsionsbruch* in den oberflächennahen Bereichen der Steine eintrat. *Vogel* stellt zudem heraus, dass die Verwendung eines niedrigviskosen Epoxidharzklebstoffs zu einer Steigerung der Verbundbruchkräfte von bis zu 30 % führen kann. Einen ähnlichen Einfluss der Klebstoffviskosität auf die Verbundbruchkräfte beobachtet auch *Ehsani* [Ehs99] bei auf Plattenbiegung beanspruchten Wandscheiben. Die höchsten Verbundbruchkräfte wurden mit Klebebewehrungen aus Kohlenstofffasern erreicht. Im Vergleich hierzu führten Klebebewehrungen aus Glasfaserwerkstoffen zu 25 % niedrigeren Verbundkräften [Vog00]. Dies zeigt, dass ein klarer Zusammenhang zwischen der Dehnsteifigkeit der Faserverbundwerkstoffe und den experimentell erreichten Verbundbruchkräften besteht. *Aiello, Sciolti* [Aie03] zeigen darüber hinaus - wie *Casareto et al.* [Cas03] -, dass sich mit der Steigerung der Verbundlänge ein Maximum der Verbundbruchkraft einstellt. Die *maximale Verbundlänge* vermuten sie zwischen 70 mm und 130 mm.

*Nanni, Galati et al.* [Nan03, Gal05] schlagen zur Erhaltung der Dauerstandsfestigkeit von Klebverbindungen eine Begrenzung der nutzbaren Zugfestigkeit der Faserverbundwerkstoffe vor. Hierzu legen sie in Abhängigkeit der Verstärkungsart Grenzwerte von 35 % bis 65 % der Zugfestigkeit fest. Für Dauerlasten schlagen sie eine Reduktion auf 20 % der Faserverbundzugfestigkeit vor.



## 3 Grundlagen der Modellbildung

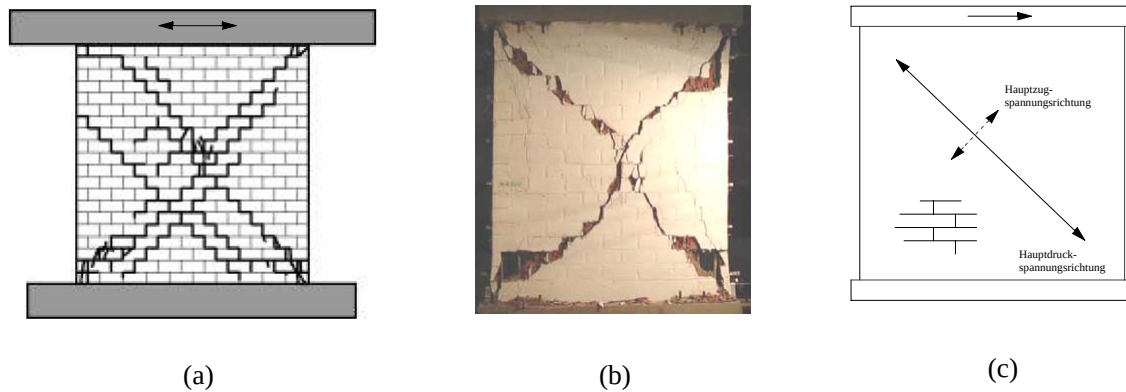
Die *Theorie der Spannungsfelder* wird in den folgenden Kapiteln zur Modellierung des Lastabtrags unverstärkter und verstärkter Mauerwerksscheiben herangezogen. Vorab sollen jedoch die Grundlagen der Modellbildung und das prinzipielle Vorgehen bei der Anwendung erklärt werden. Der *Ansatz des verschieblichen Verbundes* bildet die Grundlage zur Modellierung des Verbundes zwischen Mauersteinen und Faserverbundwerkstoffen. Hierzu werden alle erforderlichen Gleichungen und Bedingungen hergeleitet und falls erforderlich diskutiert.

### 3.1 Die Theorie der Spannungsfelder

#### 3.1.1 Einführung in die Thematik

In ihrer Ebene beanspruchte Mauerwerksscheiben können prinzipiell auf drei Arten versagen: durch das *Gleiten der Lagerfugen* bei geringen Auflasten, durch *Schubversagen* (Steinzugversagen) bei mittleren Auflasten sowie durch *Druckversagen* bei hohen Auflasten. Die erste Versagensform (Abb. 3.1a) wird in der Fachliteratur häufig als *treppenförmiger Diagonalriss* beschrieben, der sich bei Wänden mit im Vergleich zu der Steindruckfestigkeit geringen Lagerfugenreibung einstellt. Im Gegensatz dazu findet sich ein Schubversagen vorrangig bei Wänden mit geringen Steindruckfestigkeiten und im Vergleich dazu größeren Lagerfugenreibung (Abb. 3.1b).

Das in Abbildung 3.1b gezeigte Schubversagen kann auch als ein *Zugversagen* der entsprechenden Mauerwerksbereiche infolge von *Hauptzugspannungen* senkrecht zu den Rissen interpretiert werden. Normal zur Hauptzugspannungsrichtung findet sich nach der Festigkeitslehre die Hauptdruckspannungsrichtung. Somit wird ersichtlich, dass sich infolge der Normalkraft sowie der Schubkraft eine *Hauptdruckdiagonale* in der Mauerwerksscheibe ausbildet. In Kenntnis dieses Wissens ist es daher naheliegend, diese Charakteristik mit einem Strukturmodell abbilden zu wollen. Dies gelingt unter anderem mit *Stabwerksmodellen* oder mit *Spannungsfeldern* bzw. *Spannungsfächern*. Die Anfänge der Modellierung mit Stabwerken geht im Betonbau bis in das Jahr 1899 zurück. W. Ritter leitete erstmals ein Stabwerksmodell für in der Zugzone gerissene Eisenbetonbalken her, welches seit E. Mörsch (1912) die Grundlage für die Bemessung von Betonbalken bildet. Hierbei werden die Spannungstrajektoren einzelner Spannungsfelder zu Druck- und Zugstreben zusammengefasst und begradigt.



**Abbildung 3.1:** Rissbilder schubbeanspruchter Mauerwerksscheiben: (a) Gleiten der Lagerfugen, aus [Wal08], (b) Schubversagen, aus [Mar06] und (c) Interpretation der Hauptspannungsrichtungen

#### 3.1.2 Die Plastizitätstheorie

Die Plastizitätstheorie wurde erstmals von *Ganz* [Gan85] zur Berechnung der Tragfähigkeit von Mauerwerksscheiben herangezogen. Hierbei wird ein *starr-idealplastisches* (Abb. 3.2) Materialverhalten angenommen. Das äußere Gleichgewicht wird am unverformten System gebildet. Eine ausführliche Beschreibung der Plastizitätstheorie wird unter anderem von [Roi78, Man00, Wit01] gegeben.

Mit den Grenzwertsätzen der Plastizitätstheorie lassen sich untere und obere Grenzen der Tragfähigkeit eines Bauteils angeben. Demzufolge werden die Grenzwertsätze auch in einen *Unteren Grenzwertsatz* und einen *Oberern Grenzwertsatz* unterschieden. Voraussetzung für die Anwendung der Plastizitätstheorie auf Tragwerke ist eine ausreichende Verformungsfähigkeit der plastischen Bereiche.

##### Unterer Grenzwertsatz der Plastizitätstheorie

(statischer Grenzwertsatz)

*„Jede Belastung zu der sich ein stabiler, statisch zulässiger Spannungszustand angeben lässt, liegt nicht höher als die Traglast“*

Ein Spannungszustand gilt als statisch zulässig, wenn die Gleichgewichtsbedingungen und die statischen Randbedingungen in jedem Punkt erfüllt sind. Er ist stabil, wenn die Bruchbedingung nirgends verletzt wird.

### Oberer Grenzwertsatz der Plastizitätstheorie

(kinematischer Grenzwertsatz)

„Jede Belastung zu der sich ein instabiler, kinematisch zulässiger Bewegungszustand angeben lässt, liegt nicht niedriger als die Traglast“

Ein Bewegungszustand gilt als kinematisch zulässig, wenn er die kinematischen Bedingungen und die kinematischen Randbedingungen erfüllt. Er ist instabil, wenn die durch Lasten hervorgerufene äußere Arbeit größer oder gleich der Dissipationsarbeit des Systems ist.

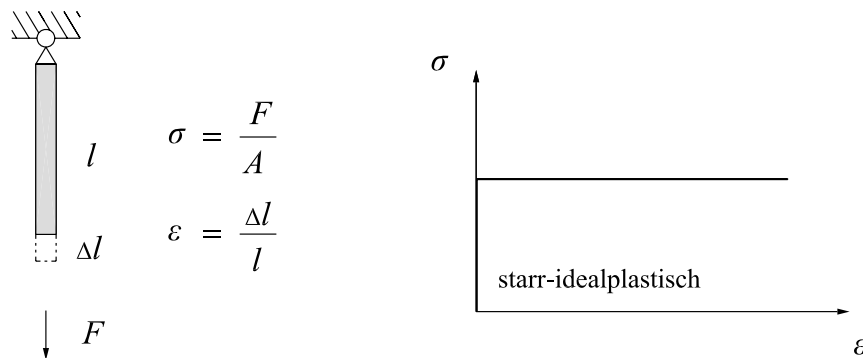


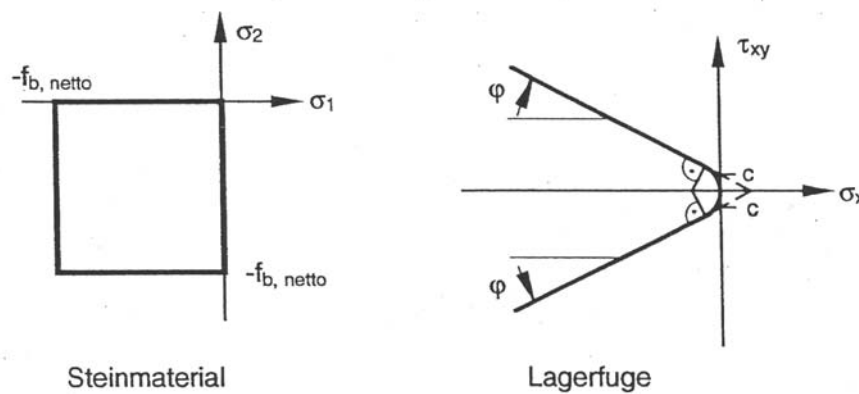
Abbildung 3.2: starr-idealplastisches Materialgesetz

Der Nachweis der Tragsicherheit von Mauerwänden erfolgt bei der Anwendung der Spannungsfelder nach *Zimmerli et al.* [Zim99] mit dem Unteren Grenzwertsatz der Plastizitätstheorie.

### 3.1.3 Bruchbedingung für Mauerwerk

In Deutschland erfolgt der rechnerische Tragfähigkeitsnachweis von unbewehrtem Mauerwerk seit den 1970iger Jahren mit dem von Mann und Müller hergeleiteten Schubfestigkeitsmodell. Eine ausführliche Darstellung der hierfür erforderlichen Grundlagen, sowie aktuelle Forschungsergebnisse zum Schubtragverhalten unbewehrter Mauerwerkswände findet sich bei *Kranzler* [Kra08]. Die in dieser Arbeit verwendete Bruchbedingung für Mauerwerk beruht auf den Vorschlägen von *Ganz* [Gan85]. Dieser untersuchte das Versagen unbewehrter und bewehrter Mauerwerkswände unter Scheibenschub und Normalkraft. Bei seinen Untersuchungen ging *Ganz* von einem anisotropen Verhalten des Mauerwerks aus. Dieses resultiert aus den unterschiedlichen Eigenschaften von Steinen und Mörtel, aus dem Mauerwerksverband sowie der Art der Stoßfugenausbildung. Hieraus ergeben sich unterschiedliche Druckfestigkeiten des Mauerwerks parallel und senkrecht zu den Lagerfugen. Zur Herleitung einer Bruchbedingung für unbewehrtes Mauerwerk trifft *Ganz* folgende Festlegungen:

- die Mauersteine und der Mörtel zeigen ein starr-idealplastisches Materialverhalten (Abb. 3.2)
- es wird ein ebener Spannungszustand in der Wandebene unterstellt
- die Steine folgen einer modifizierten Bruchbedingung von *Coulomb* mit verschwindender Zugfestigkeit (Abb. 3.3a)
- der Reibungswiderstand der Lagerfugen folgt ebenfalls einer modifizierten Bedingung von *Coulomb* (Abb. 3.3b)
- Scherbrüche entlang der Stoßfugenflucht werden ausgeschlossen



**Abbildung 3.3:** von *Ganz* verwendete modifizierte Bruchkriterien nach Mohr-Coulomb mit verschwindender Zugfestigkeit, aus [Gan85]

Somit ergibt sich die Bruchbedingung (Abb. 3.4a) mit fünf Regimen zu:

*I*: Zugversagen des Mauerwerks

*II*: Druckversagen des Mauerwerks

*III*: Schubversagen des Mauerwerks

*IVa*: Gleiten der Lagerfuge

*IVb*: Zugversagen der Lagerfuge (Trennbruch)

$$I: 0 \geq \tau_{xy}^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y \quad (3.1)$$

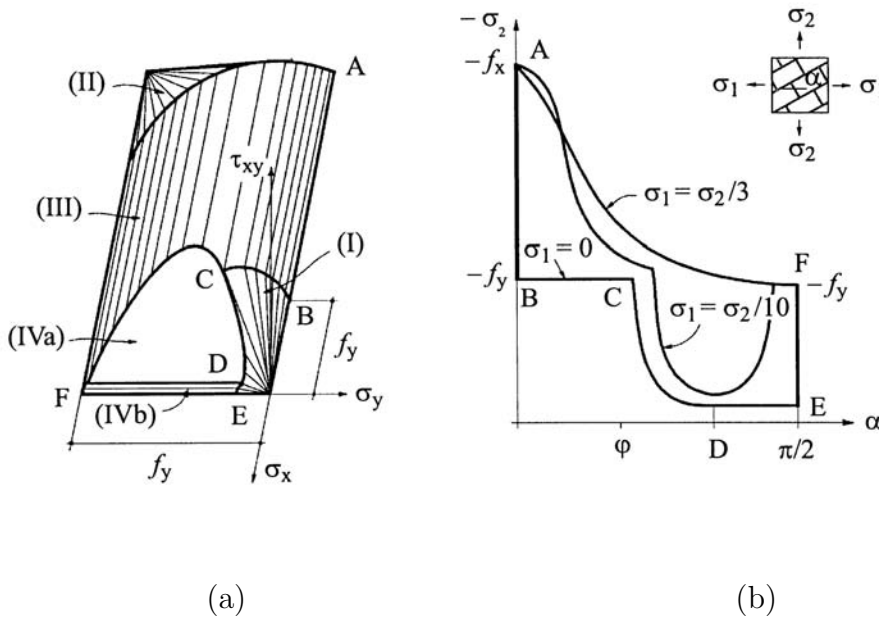
$$II: 0 \geq \tau_{xy}^2 - (\sigma_x + f_x) \cdot (\sigma_y + f_y) \quad (3.2)$$

$$III: 0 \geq \tau_{xy}^2 + \sigma_y \cdot (\sigma_y + f_y) \quad (3.3)$$

$$IVa: 0 \geq \tau_{xy}^2 - (f_v - \sigma_x \cdot \tan \varphi)^2 \quad (3.4)$$

$$IVb: 0 \geq \tau_{xy}^2 + \sigma_x \cdot \left( \sigma_x + 2 \cdot f_v \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \right) \quad (3.5)$$

Die von *Ganz* für Mauerwerk hergeleitete Bruchbedingung (Abb. 3.4a) erfordert folgende Eingangsgrößen: die Mauerwerksdruckfestigkeiten  $f_x$ ,  $f_y$ , die Haftscherfestigkeit  $f_v$  sowie den Reibungswinkel  $\varphi$  der Lagerfuge. Transformiert man die Bruchbedingung auf die Hauptspannungsrichtungen, so ergibt sich die Schubspannung  $\tau_{xy}$  zu Null. Man erhält die Bruchbedingung (Abb. 3.4b) in Abhängigkeit zur Neigung  $\alpha$  der Resultierenden.



**Abbildung 3.4:** Bruchbedingung von *Ganz* für unbewehrte Mauerwerksscheiben: (a) dargestellt in einem orthogonalen Koordinatensystem zur Lagerfuge und (b) bezogen auf die Hauptachsen mit den Spannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  der Resultierenden, aus [Zim99]

Für den Sonderfall einer einachsigen Druckbeanspruchung ( $\sigma_1 = 0$ ) ergibt sich einzig für eine Lastrichtung senkrecht zur Lagerfuge die Beanspruchbarkeit von  $\sigma_2 = -f_x$  (Gl. 3.6 bis 3.10). Bei einer geringfügigen Neigungsänderung der Druckresultierenden fällt die Beanspruchbarkeit des Mauerwerks auf die Größe  $\sigma_2 = -f_y$  zurück. Ist der Neigungswinkel größer als der innere Reibungswinkel der Lagerfuge, tritt ein Versagen der Lagerfugen infolge Gleiten ein. Die zulässige Beanspruchung fällt dann nahezu auf Null ab, wobei einzig die Haftscherfestigkeit der Lagerfugen einen Spannungsanteil liefert. Bei einer Beanspruchung parallel zur Lagerfuge steigt  $\sigma_2$  wiederum auf  $-f_y$  an.

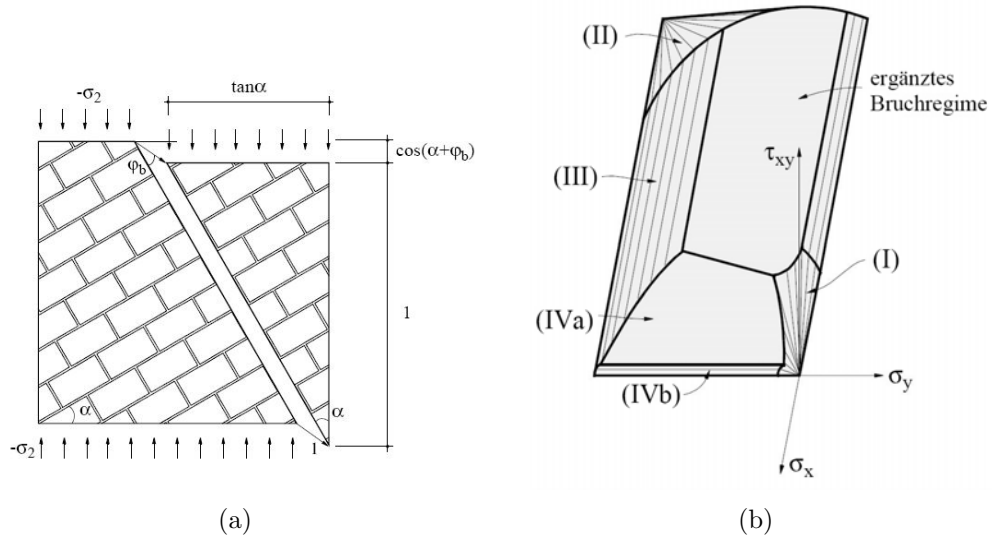
$$A: \sigma_2 = -f_x \quad (3.6)$$

$$BC: \sigma_2 = -f_y \quad (3.7)$$

$$CD: \sigma_2 = \frac{-f_v}{\sin\alpha \cdot \cos\alpha - \cos^2\alpha \cdot \tan\varphi} \quad (3.8)$$

$$CE: \sigma_2 = -2 \cdot f_v \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (3.9)$$

$$F: \sigma_2 = -f_y \quad (3.10)$$



**Abbildung 3.5:** Versagen entlang der Stoßfugenflucht nach Mojsilovic: (a) Modellvorstellung und (b) erweiterte Bruchbedingung von Ganz, aus [Moj95]

Wie beschrieben, schloss Ganz ein Versagen entlang der Stoßfugenflucht aus. An schubbeanspruchten Mauerwerksscheiben mit unvermörtelten oder teilvermörtelten Stoßfugen wurde dieses Bruchbild experimentell jedoch mehrfach beobachtet. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen führte Mojsilovic [Moj95], aufbauend auf den Arbeiten von Ganz, 20 Kleinkörper- und 28 Bauteilversuche an schubbeanspruchten Mauerwerkswänden durch. Hierbei leitete er ein sechstes Bruchregime her, mit welchem ein Scherversagen entlang der Stoßfugenflucht erfasst werden kann (Abb. 3.5). Demnach muss nach SIA 266 [SIA 266] für schubbeanspruchtes Mauerwerk mit unvermörtelten Stoßfugen die rechnerisch zulässige Druckfestigkeit  $f_y$  um ein Drittel verringert werden.

### 3.1.4 Unverstärkte Mauerwerkswände

Mauerwerkswände sind innerlich hochgradig unbestimmt. Demzufolge ergeben sich in Abhängigkeit der Beanspruchungsarten eine Vielzahl von Lastabtragsmöglichkeiten. Diese können unter Einhaltung des inneren und äußeren Gleichgewichts sowie der geometrischen Randbedingungen weitestgehend frei gewählt werden. Die Grundlagen für die Bemessung von Mauerwerkswänden mit Spannungsfeldern wurden unter der Führung von Prof. Bruno Thürlimann an der ETH Zürich entwickelt. Zusammenfassende Darstellungen finden sich bei *Bachmann* [Bac97] und *Zimmerli et al.* [Zim99]. Für die Bemessung werden folgende Festlegungen getroffen:

- die Wanddicke ist konstant
- die Haftscherfestigkeit der Lagerfugen wird vernachlässigt
- es wird starr-idealplastisches Materialverhalten des Mauerwerks vorausgesetzt
- die Spannungsfelder dürfen den Wandquerschnitt nicht verlassen

Mit der Vernachlässigung der Haftscherfestigkeit ergibt sich die in Abbildung 3.7 dargestellte idealisierte Bruchbedingung nach *Ganz* für die einachsige Mauerwerksdruckfestigkeit. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass *Ganz* den Neigungswinkel  $\alpha$  bezogen auf die Stoßfuge der Mauersteine angibt. Wie in Deutschland üblich wird sich jedoch im Folgenden der Arbeit auf die Neigung zur Lagerfuge bezogen.

$$e_1 = \frac{M_{z1}}{N_{x,v}} \quad (3.11)$$

$$e_2 = \frac{M_{z2}}{N_{x,v}} = \frac{M_{z1} + V_y \cdot h_w}{N_{x,v}} \quad (3.12)$$

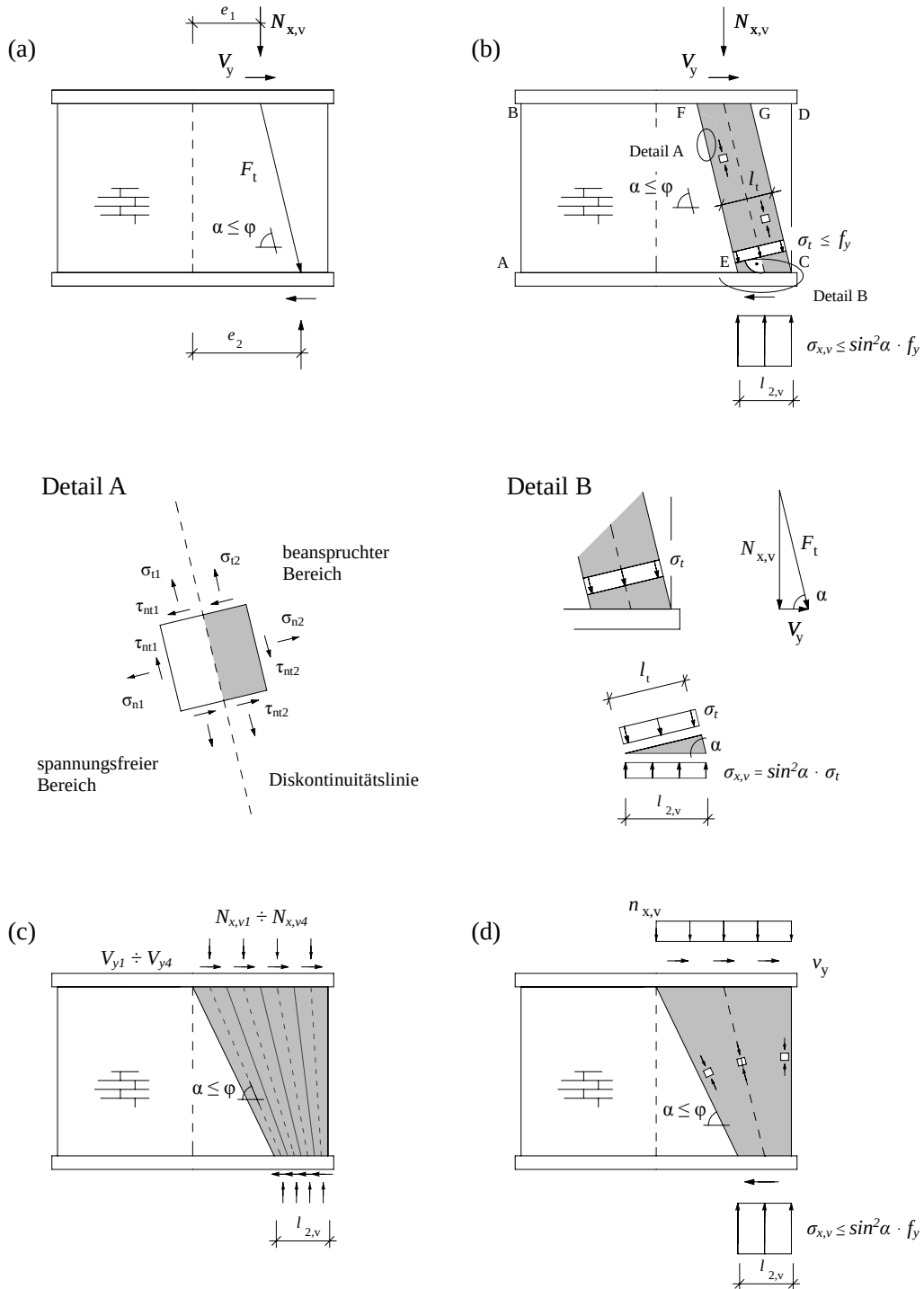
$$l_{2,v} = l_w - 2 \cdot \frac{M_{z2}}{N_{x,v}} \quad (3.13)$$

$$\tan \alpha = \frac{N_{x,v}}{V_y} \quad (3.14)$$

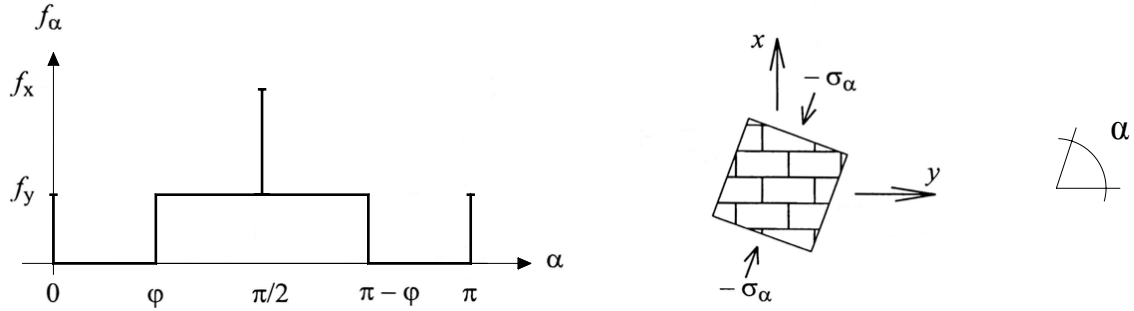
$$l_t = l_{2,v} \cdot \sin \alpha \quad (3.15)$$

$$F_t = \sqrt{N_{x,v}^2 + V_y^2} \quad (3.16)$$

$$\sigma_t = \frac{F_t}{t_w \cdot l_t} \leq f_\alpha \quad (3.17)$$



**Abbildung 3.6:** Lastabtrag für eine exzentrisch am Wandkopf beanspruchte Mauerwerkscheibe unter Normalkraft und Scheibenschub: (a) Stabwerksmodell, (b) Spannungsfeld, (c) und (d) Spannungsfächer, nach [Zim99]



**Abbildung 3.7:** Bruchbedingung von *Ganz* für die einachsige Druckfestigkeit ( $f_\alpha$ ) von Mauerwerk, unter Vernachlässigung der Haftscherfestigkeit, nach [Zim99]

Die Annahme eines starr-idealplastischen Materialverhaltens (Abb. 3.2) lässt die Bildung des äußeren Gleichgewichts der Kräfte am unverformten System zu. Für die Modellierung des inneren Kraftabtrags kann somit die Ausnutzung der verwendeten Materialien bis zu ihrer Festigkeit erfolgen. Die Neigung der Druckresultierenden (Abb. 3.6a) ergibt sich aus der am Wandkopf angreifenden Normal- und Schubkraft. Diese muss - zur Vermeidung eines Lagerfugengleitens - betragsmäßig größer oder gleich des inneren Reibungswinkels  $\varphi$  sein. Durch eine symmetrische Aufweitung der Resultierenden  $F_t$  auf einen statisch äquivalenten Spannungsbereich (Abb. 3.6b) ergibt sich das *Spannungsfeld* EFGC mit parallel zueinander verlaufenden Spannungsfasern. Somit herrscht ein einachsialer Spannungszustand vor. Hierzu senkrecht treten keine Spannungen auf. Im Randbereich des *Spannungsfeldes* EFGC fällt die Spannung  $\sigma_t$  auf Grund der Annahme eines starr-idealplastischen Materialverhaltens schlagartig auf Null ab (vgl. Abb. 3.6: Detail A,  $\sigma_{t2} \hat{=} \sigma_t$ ,  $\sigma_{t1} = 0$ ). Das Feld ABFE ist somit spannungsfrei. An der Grenze zwischen den Feldern ABFE und EFGC ergibt sich eine Unstetigkeit oder auch Diskontinuität im Spannungsverlauf. Demzufolge bezeichnet man diese Grenze auch als *Diskontinuitätslinie*. Da gleichwohl das innere Gleichgewicht erfüllt sein muss, ergibt sich ein stetiger Verlauf der Schubspannungen  $\tau_{nt}$  und der Normalspannungen  $\sigma_n$  über die Diskontinuitätslinie hinweg, woraus folgt:

$$\sigma_{t1} \neq \sigma_{t2} \quad (3.18)$$

$$\sigma_{n1} = \sigma_{n2} = 0 \quad (3.19)$$

$$\tau_{nt1} = \tau_{nt2} = 0 \quad (3.20)$$

Mit den Gleichungen 3.21 bis 3.25 kann für das Detail B in Abbildung 3.6 gezeigt werden, dass ein Versagen ( $\sigma_t \leq f_y$ ) geneigter Spannungsfelder auszuschließen ist, wenn die Spannung am Wandfuß auf  $\sigma_{x,v} \leq f_y \cdot \sin^2 \alpha$  begrenzt wird.

$$l_{2,v} = l_t / \sin \alpha \quad (3.21)$$

$$N_{x,v} = F_t \cdot \sin \alpha \quad (3.22)$$

$$\sigma_{x,v} = \frac{N_{x,v}}{l_{2,v} \cdot t_w} = \frac{F_t}{l_t \cdot t_w} \cdot \sin^2 \alpha \quad (3.23)$$

$$f_y \geq \sigma_t = \frac{F_t}{l_t \cdot t_w} \quad (3.24)$$

$$\sigma_{x,v} \leq f_y \cdot \sin^2 \alpha \quad (3.25)$$

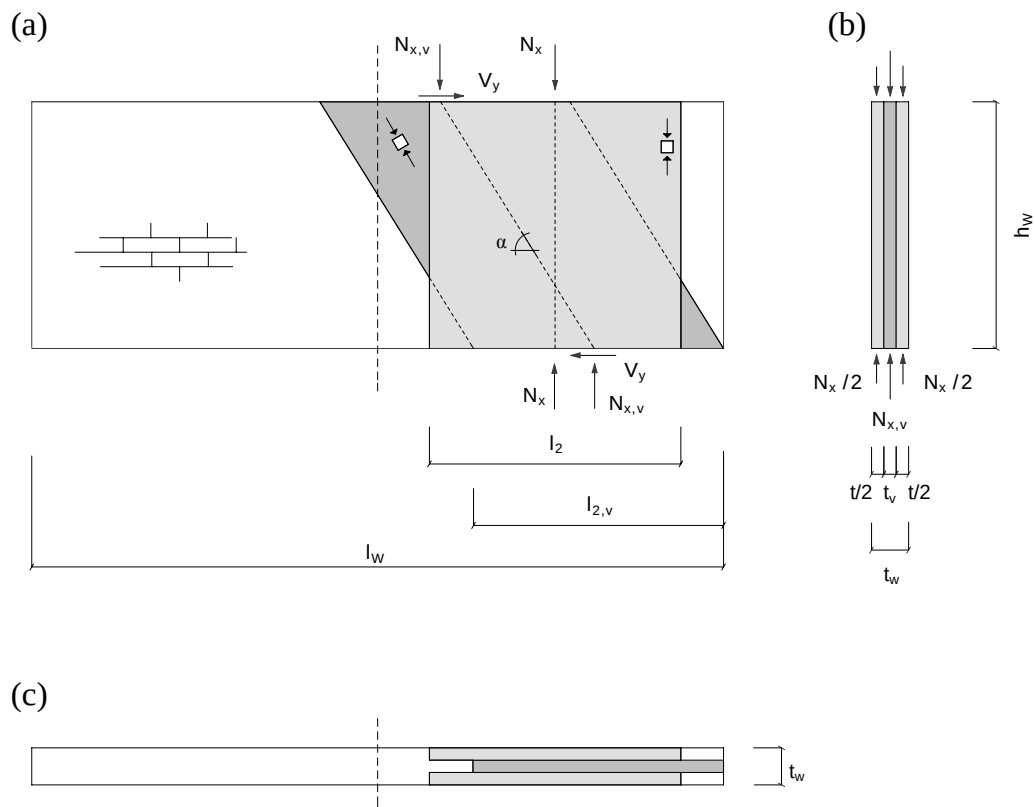
In den Spannungsfeldern erfolgt der Kraftabtrag parallel zu der Resultierenden woraus folgt, dass alle Spannungsfasern die selbe Neigung aufweisen. Dies gilt jedoch nicht für Spannungsfächer (Abb. 3.6c). *Zimmerli et al.* [Zim99] geben hierzu an, dass bei der Anwendung von Spannungsfächern die Neigung der Fächerresultierenden maßgebend ist. Dies ist an sich plausibel, kann doch ein Fächer auf ein Spannungsfeld zurückgeführt werden. Gleichwohl kann ein Spannungsfächer in mehrere Fächer unterteilt werden, wobei wiederum die Neigung des am flachsten geneigten Fächers maßgebend wird. Die Grenze ist in einer unendlichen Teilung der Fächer erreicht, wobei dann die Neigung der am flachsten geneigten *Randfaser* maßgebend wird. Somit gilt für alle Spannungsfasern - ob Spannungsfeld oder Spannungsfächer soweit die Lagerfugenkohäsion vernachlässigt wird, dass diese in ihrer Neigung den Winkel der inneren Reibung nicht unterschreiten dürfen. Die Neigung  $\alpha$  der Resultierenden  $F_t$  kann mit Gleichung 3.14 berechnet werden.

Das von *Zimmerli et al.* [Zim99] in Abbildung 3.8a gezeigte Beispiel lässt eine Kreuzung der Resultierenden der Spannungsfelder zu, ohne dass sich diese in ihrer Richtung beeinflussen. Dies scheint zunächst dem mechanischen Verständnis zu widersprechen, wonach sich zwei in einem Punkt kreuzende Vektoren nach dem Kräftedreieck ablenken müssten. Der vermeintliche Widerspruch löst sich auf, indem man jedem Spannungsfeld „gedanklich“ nur so viel Fläche zuweist, wie für den inneren Lastabtrag nötig ist. Die Kräfte werden somit in parallel zueinander verlaufenden Spannungsfeldern - unterschiedlicher Schichten - abgetragen. Eine Beeinflussung findet somit nicht statt. Die Grenze dieses Vorgehens oder auch Tragfähigkeit der Wand ist dann gefunden, wenn zum Lastabtrag die gesamte Breite der Wand benötigt wird. Die Beanspruchungen der einzelnen Spannungsfelder können wie folgt berechnet werden:

$$t_w = t_v + t \quad (3.26)$$

$$N_{x,v} \leq l_{2,v} \cdot t_v \cdot f_y \cdot \sin^2 \alpha \quad (3.27)$$

$$N_x \leq l_2 \cdot t \cdot f_x \quad (3.28)$$



**Abbildung 3.8:** (a) beispielhaftes Modell eines Lastabtrags nach *Zimmerli et al.* [Zim99],  
(b) und (c) eigene Interpretation der Lastabtragsbereiche

Nach Umstellen und Einsetzen der Gleichungen ergibt sich die Größe  $N_x$  in Abbildung 3.8 zu:

$$N_x \leq l_2 \cdot \left( t_w - \frac{N_{x,v}}{l_{2,v} \cdot f_y \cdot \sin^2 \alpha} \right) \cdot f_x \quad (3.29)$$

#### 3.1.5 Verstärkte Mauerwerkswände

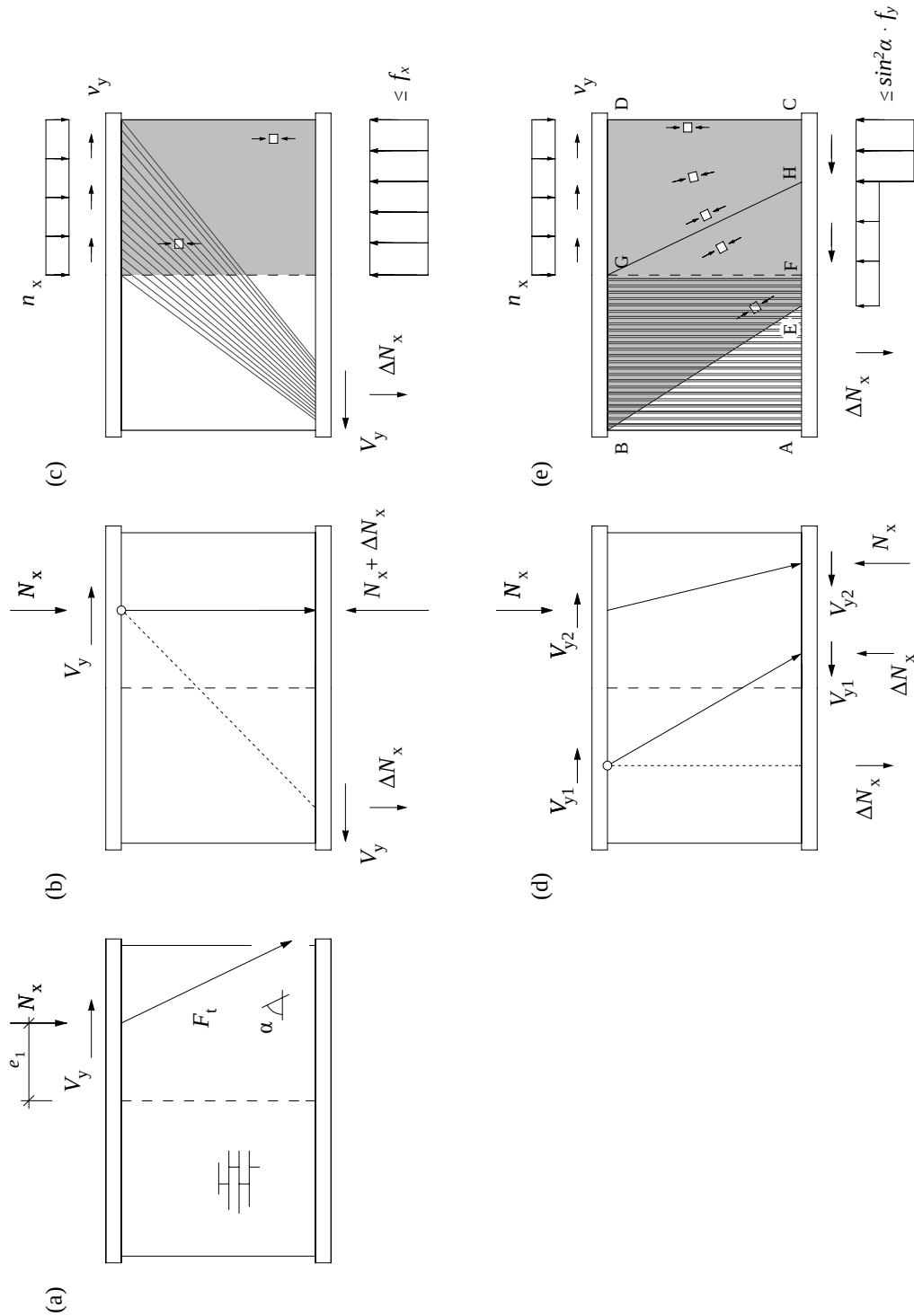
Mauerwerkswände können auf unterschiedlichste Art und Weise verstärkt werden. Durch Injektionen bei mehrschaligen Konstruktionen, durch die Verstärkung mit bewehrtem Spritzbeton, durch das Einbringen einer Vorspannung sowie durch Aufkleben von Faserverbundwerkstoffen. Dieser Abschnitt bezieht sich auf letztere Verstärkungsart, wobei gleichwohl das prinzipielle Vorgehen auch auf andere Verfahren übertragbar ist. Die Aufgabe der Verstärkung besteht in der Aufnahme von Zugkräften. Diese können vom Mauerwerk nur bedingt aufgenommen werden. Mit einer Verstärkung lassen sich die inneren Kräfte gezielt beeinflussen, wodurch in der Regel höhere Tragfähigkeiten erreicht werden können.

Für das in Abbildung 3.9 gezeigte Beispiel wurde die am Kopf angreifende Schubkraft  $V_y$  aus Abbildung 3.6 verdoppelt. Die Normalkraft  $N_x$  und die geometrischen Randbedingungen wurden beibehalten. In der Folge gerät die Resultierende  $F_t$  außerhalb des Wandquerschnitts (Abb. 3.9a). Dies kann durch die Einführung von Zuggliedern verhindert werden (Abb. 3.9b), indem diese ein Teil oder wie hier gezeigt die gesamte Schubkraft  $V_y$  aufnehmen. Die Normalkraft  $N_x$  wird mit einem vertikalen *Druckspannungsfeld* abgetragen (Abb. 3.9c).

Das in Abbildung 3.9d dargestellte System wird häufig in der Literatur beschrieben (vgl. [Zim99]). Die Schubkraft  $V_y$  am Wandkopf wurde in zwei gleich große Kräfte aufgeteilt. Darüber hinaus wurde zur Verstärkung ein zusätzliches vertikales Zugspannungsfeld ABGF (Abb. 3.9e) eingeführt. Dieses erzwingt eine Auflast  $\Delta N_x$  am Wandkopf, infolge dessen sich ein Spannungsfächer EBGH einstellt. Die Bildung des inneren Gleichgewichts erfolgt aufgrund des starr-idealplastischen Materialverhaltens am unverformten System. Die Notwendigkeit der Verankerung der Zugglieder in den Decken- und Bodenplatten besteht weiterhin.

## 3.2 Der Ansatz des verschieblichen Verbundes

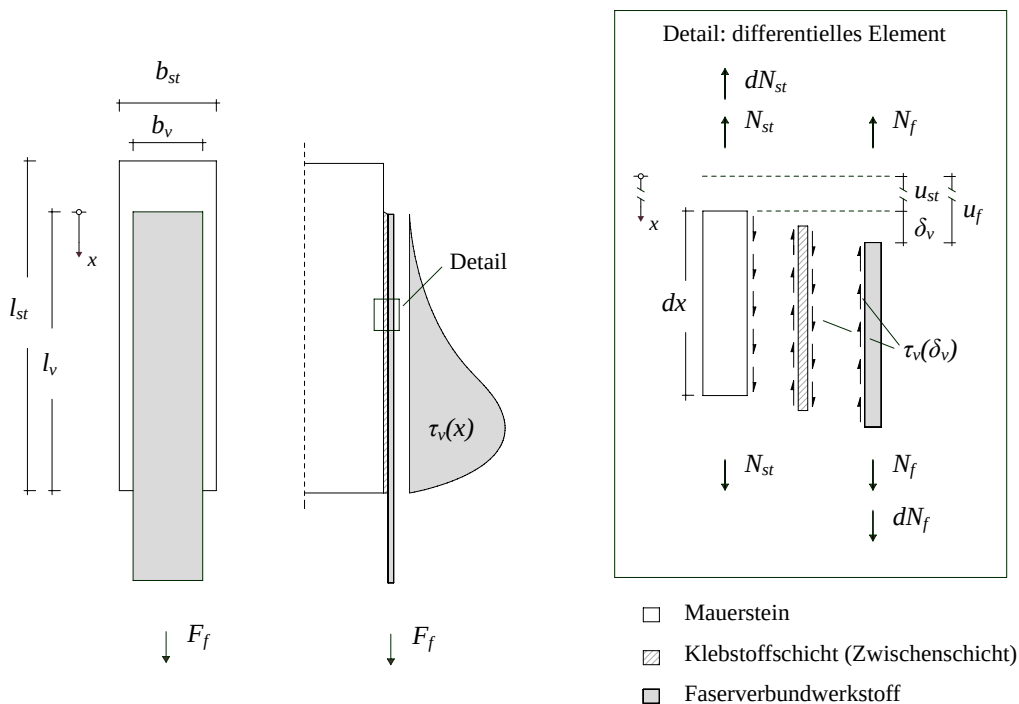
Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen des „*Verbundmodells*“ von auf Mauerwerk aufgeklebten Faserverbundwerkstoffen hergeleitet. Dieses basiert auf dem *Ansatz des verschieblichen Verbundes*.



**Abbildung 3.9:** verstärkte exzentrisch am Wandkopf beanspruchte Mauerwerksscheibe unter Normalkraft und Scheibenschub: (a bis c) Verstärkung mit diagonal und (d, e) mit vertikal angebrachten Verstärkungselementen, nach Schwegler [Sch94]

### 3.2.1 Grundlagen

Erste Überlegungen zum *Ansatz des verschieblichen Verbundes* wurden schon 1938 von *Volkersen* publiziert [Vol53a, Vol53b, Vol53c]. Dieser befasste sich mit dem Verbund genieteter Stahllaschenverbindungen. In einem von ihm hergeleiteten *Verbundmodell* berücksichtigte er die Schubverbundwirkung der Nieten mit einer Zwischenschicht (Abb. 3.10), welcher unterschiedliche Schubspannungs-Verformungsbeziehungen zugewiesen werden konnten. Im Folgenden wird diese Beziehung als „*Verbundansatz*“ bezeichnet (Abb. 3.11). In den Folgejahren erweiterte *Volkersen* seinen Ansatz auf Klebverbindungen. Demzufolge wird das Verbundmodell auch als *Klebschichtmodell* bezeichnet.



**Abbildung 3.10:** Endverankerungselement mit den Fügeileilen Stein und Faserverbundwerkstoff

Der zugrunde liegende Ansatz basiert auf der Überlegung, den Trennbruch der Fügeileile nicht als direktes Materialversagen, sondern vielmehr als Versagen einer Zwischenschicht abzubilden. Die in der Zwischenschicht übertragbaren Verbundschubspannungen werden mit einem *Verbundansatz* (Abb. 3.11) erfasst, welcher einen Zusammenhang zwischen der Verbundschubspannung und der Relativverschiebung der Fügeileile am differentiellen Element wiedergibt. Prinzipiell können unterschiedlichste Verbundansätze berücksichtigt werden, auch wenngleich sich nur für wenige Verbundansätze eine geschlossene analytische Lösung angeben lässt. Die Verbundansätze

können verfestigende, plastische oder entfestigende Verbundeigenschaften abbilden. Das Verfahren ist somit allgemein auf eine Vielzahl von Verbundproblemen anwendbar.

### 3.2.2 Herleitung

Die Herleitung der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes kann unter Verwendung folgender Festlegungen erfolgen:

- das Materialverhalten der Fügeteile (z. B. Stein und Faserverbundwerkstoffen) wird vereinfachend als linear-elastisch angenommen
- die Eigenschaften der Klebstoffschicht werden vernachlässigt, sie wird im Modell durch eine Zwischenschicht ersetzt
- Einflüsse aus Biegung werden vernachlässigt
- senkrecht zur Verbundfläche treten keine Spannungen auf
- die Spannungen und Verformungen am differentiellen Element sind konstant

Die Verbundbruchkraft nach Abbildung 3.10 ergibt sich zu:

$$F_f = b_v \cdot \int_{x=0}^{x=l_v} \tau_v(x) dx \quad (3.30)$$

Für das differentielle Element nach Abbildung 3.10 gilt:

Die Relativverformungen der Fügeteile ergeben sich zu:

$$\delta_v = u_f - u_{st} \quad (3.31)$$

$$\delta'_v = u'_f - u'_{st} \quad (3.32)$$

Die Dehnungen ergeben sich zu:

$$u'_f = du_f / dx = \epsilon_f \quad (3.33)$$

$$u'_{st} = du_{st} / dx = \epsilon_{st} \quad (3.34)$$

Die Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens führt zu:

$$\epsilon_f = N_f / (E_f \cdot A_f) \quad (3.35)$$

$$\epsilon_{st} = N_{st} / (E_{st} \cdot A_{st}) \quad (3.36)$$

Die Gleichungen 3.31 bis 3.36 liefern letztlich einen Zusammenhang zwischen den Relativverformungen und den inneren Kräften:

$$\delta'_v = \frac{N_f}{E_f \cdot A_f} - \frac{N_{st}}{E_{st} \cdot A_{st}} \quad (3.37)$$

Das Gleichgewicht der inneren Kräfte führt zu:

$$0 = N_f - N_f - dN_f + \tau_v \cdot b_v \cdot dx \quad (3.38)$$

$$\rightarrow N'_f = \frac{dN_f}{dx} = \tau_v \cdot b_v \quad (3.39)$$

$$0 = N_{st} - N_{st} - dN_{st} - \tau_v \cdot b_v \cdot dx \quad (3.40)$$

$$\rightarrow N'_{st} = -\frac{dN_{st}}{dx} = -\tau_v \cdot b_v \quad (3.41)$$

Durch Ableiten der Gleichung 3.37 nach  $dx$  und anschließendes Einsetzen der Gleichungen 3.39 und 3.41 folgt:

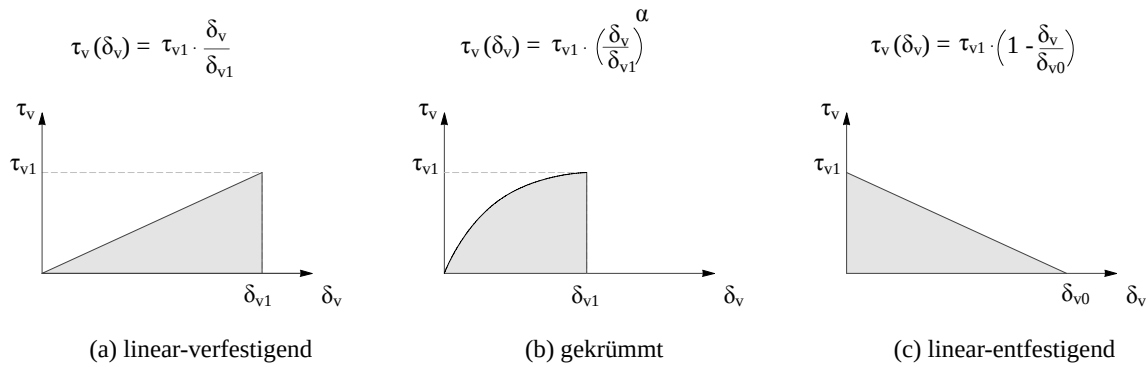
$$\delta''_v = \frac{N'_f}{E_f \cdot A_f} - \frac{N'_{st}}{E_{st} \cdot A_{st}} = \frac{\tau_v \cdot b_v}{E_f \cdot A_f} + \frac{\tau_v \cdot b_v}{E_{st} \cdot A_{st}} \quad (3.42)$$

Die *allgemeine Form* der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes ergibt sich nach Umstellung der Gleichung 3.42 zu:

$$\Rightarrow \delta''_v - \tau_v(\delta_v) \left( \frac{1}{E_f \cdot t_f} + \frac{1}{E_{st} \cdot t_{st}} \right) = 0 \quad (3.43)$$

Die Lösung der Gleichung 3.43 kann sowohl analytisch als auch iterativ - rechnergestützt - erfolgen, wobei eine Vielzahl unterschiedlicher Verbundansätze  $\tau_v(\delta_v)$

möglich sind. In Abbildung 3.11 sind drei Verbundansätze dargestellt, für die die Differentialgleichung vollständig lösbar ist. Die Ansätze (a) und (b) wurden zur Beschreibung des Verbundes von auf Beton aufgeklebten Stahllaschen hergeleitet. Der dritte Verbundansatz (c) ist in der Schweizer Vornorm *SIA 166 / Vornorm 505 166* [SIA166] zur Bemessung von Klebverbindungen enthalten. Eine ausführliche Beschreibung des Lösungsweges der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes unter Einbeziehung der Ansätze (a, b) wird unter anderem von *Holzenkämpfer* [Hol97] gegeben.



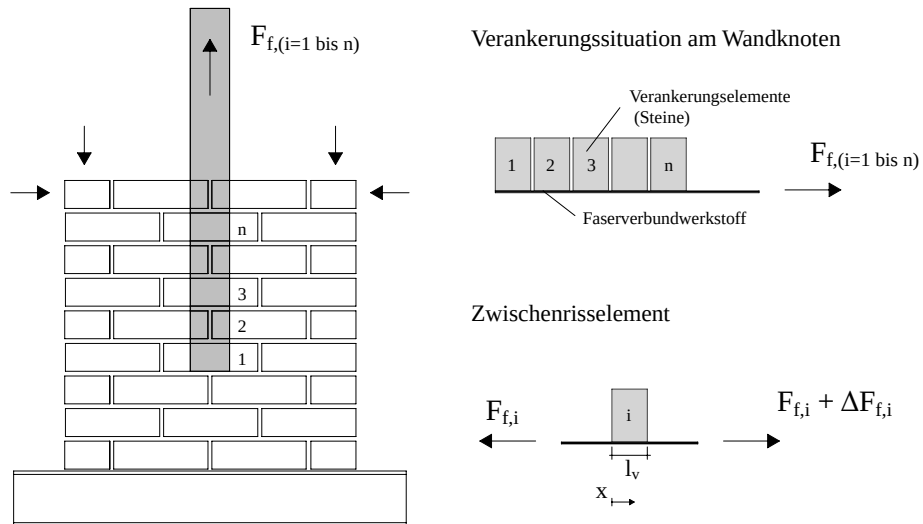
**Abbildung 3.11:** Verbundansätze  $\tau_v(\delta_v)$  nach (a) *Bresson* [Bre71], (b) *Wicke/Pichler* [Wic91] und (c) *Niedermeyer* [Nie00] für den Klebeverbund zwischen Beton und Stahllaschen sowie Lamellen

### 3.2.3 Lösung am Zwischenrisselement

Das Zwischenrisselement ergibt sich an der Wandscheibe zwischen den senkrecht zur Krafteinleitung orientierten Fugen. Die Verbundbruchkraft  $F_{f,u}$  ergibt sich als Summe einzelner Differenzkräfte  $\Delta F_{f,i}$  (Abb. 3.12).

Für die Lösung der Differentialgleichung am Zwischenrisselement können zwei Grenzfälle herausgestellt werden. Der *Gleichgewichtsverbund* und der *Verträglichkeitsverbund* (Abb. 3.13). Ein reiner Gleichgewichtsverbund liegt dann vor, wenn der Faserverbundwerkstoff am Verankerungselement nur auf einer Zugseite beansprucht wird. Es findet eine vollständige Übertragung der Verbundkräfte in das Verankerungselement statt ( $\Delta F_{f,i}$  ist maximal, Abb. 3.13a). Das Verankerungselement wird dann als *Endverankerungselement* bezeichnet. Hingegen stellt sich der reine Verträglichkeitsverbund ein, wenn die beidseitig am Faserverbundwerkstoff angreifenden Zugkräfte den gleichen Betrag aufweisen ( $\Delta F_{f,i} = 0$ , Abb. 3.13c). Im Allgemeinen treten Gleichgewichts- und Verträglichkeitsverbund kombiniert auf (Abb. 3.13b).

Für die Lösung der Differentialgleichung am Zwischenrisselement wird im Folgenden ein linearer-verfestigender Verbundansatz (Abb. 3.11a) vorausgesetzt. Dieser kann

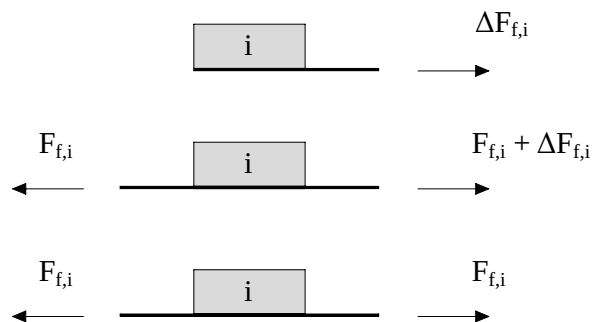


**Abbildung 3.12:** Zwischenrisselement: Herleitung und Kräfte am Beispiel des Wandknotens (vgl. Kap. 6)

a) reiner Gleichgewichtsverbund  
(Endverankerungselement)

b) Kombination aus Gleichgewichts-  
und Verträglichkeitsverbund  
(Zwischenrisselement)

c) reiner Verträglichkeitsverbund  
(Zwischenrisselement)



**Abbildung 3.13:** Verbundarten

wie folgt beschrieben werden:

$$\tau_v(\delta_v) = \tau_{v1} \cdot \frac{\delta_v}{\delta_{v1}} = \frac{\tau_{v1}}{\delta_{v1}} \cdot \delta_v \quad (3.44)$$

Da die Dehnsteifigkeiten der Mauersteine in aller Regel um ein vielfaches größer sind als die der Faserverbundwerkstoffe  $E_{st} \cdot A_{st} \gg E_f \cdot A_f$ , wird im Folgendem der aus den Steinen resultierende Verformungsanteil in Gleichung 3.43 vernachlässigt. Selbiges Vorgehen findet sich auch bei der Herleitung von Verbundmodellen für mit Lamellen biegeverstärkte Betonbauteile (vgl. [Hol94, Neu00, Nie00]). Unter den getroffenen Festlegungen und der Verwendung des in Gleichung 3.44 formulierten Verbundansatzes ergibt sich folgende homogene Differentialgleichung 2. Ordnung:

$$\delta_v'' - \tau_v(\delta_v) \cdot \frac{1}{E_f \cdot t_f} = \delta_v'' - \delta_v \cdot \left( \frac{1}{E_f \cdot t_f} \cdot \frac{\tau_{v1}}{\delta_{v1}} \right) = \delta_v'' - \delta_v \cdot \omega^2 = 0 \quad (3.45)$$

mit:

$$\omega = \sqrt{\frac{\tau_{v1}}{E_f \cdot t_f \cdot \delta_{v1}}} \quad (3.46)$$

Die homogene Differentialgleichung 2. Ordnung stellt ein *Randwertproblem* dar. Die allgemeine Lösung ergibt sich z. Bsp. nach *Bartsch* [Bar01] zu:

$$\delta_v(x) = C_1 \cdot \sinh(\omega \cdot x) + C_2 \cdot \cosh(\omega \cdot x) \quad (3.47)$$

$$\delta_v'(x) = \omega \cdot C_1 \cdot \cosh(\omega \cdot x) + \omega \cdot C_2 \cdot \sinh(\omega \cdot x) \quad (3.48)$$

Hierbei können folgende Randbedingungen für die Dehnungen der Faserverbundwerkstoffe und die Relativverschiebungen der Fügeteile berücksichtigt werden:

$$\epsilon_f(x=0) = \delta_v'(x=0) = \epsilon_{f,0} \quad (3.49)$$

$$\delta_v(x=l_v) = \delta_{v1} \quad (3.50)$$

Nach Einsetzen der Randbedingung 3.49 in Gleichung 3.48 ergibt sich die Konstante  $C_1$  zu:

$$C_1 = \frac{\epsilon_{f,0}}{\omega} \quad (3.51)$$

Die Konstante  $C_2$  ergibt sich unter Berücksichtigung der Randbedingung 3.50 für Gleichung 3.47 zu:

$$C_2 = \frac{\delta_{v1} - C_1 \cdot \sinh(\omega \cdot l_v)}{\cosh(\omega \cdot l_v)} \quad (3.52)$$

Die Dehnungen der Faserverbundwerkstoffe am Verbundanfang ( $x = 0$ ) ergeben sich zu:

$$\epsilon_{f,0} = \frac{F_{f,i}}{E_f \cdot t_f \cdot b_v} \quad (3.53)$$

Die Relativverformung der Fügeteile für das Zwischenrisselement ergibt sich unter Einbeziehung der Gleichungen 3.47 und 3.53 sowie der Lösungen für die Konstanten  $C_1$  und  $C_2$  abschließend wie folgt:

$$\begin{aligned} \Rightarrow \delta_v(x) &= \frac{F_{f,i}}{\omega \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_v} \cdot \sinh(\omega \cdot x) \\ &+ \frac{\delta_{v1} - \frac{F_{f,i}}{\omega \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_v} \cdot \sinh(\omega \cdot l_v)}{\cosh(\omega \cdot l_v)} \cdot \cosh(\omega \cdot x) \end{aligned} \quad (3.54)$$

Die Dehnungen der Faserverbundwerkstoffe ergeben sich durch Ableitung der Gleichung 3.54 nach  $dx$  zu:

$$\begin{aligned}\delta'_v(x) &= \frac{F_{f,i}}{E_f \cdot t_f \cdot b_v} \cdot \cosh(\omega \cdot x) \\ &+ \omega \cdot \frac{\delta_{v1} - \frac{F_{f,i}}{\omega \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_v} \cdot \sinh(\omega \cdot l_v)}{\cosh(\omega \cdot l_v)} \cdot \sinh(\omega \cdot x)\end{aligned}\quad (3.55)$$

Die Dehnung  $\delta'_v$  am Verbundende ( $x = l_v$ ) beträgt:

$$\delta'_v(x = l_v) = \epsilon_f(x = l_v) = \frac{F_{f,i} + \Delta F_{f,i}}{E_f \cdot t_f \cdot b_v} \quad (3.56)$$

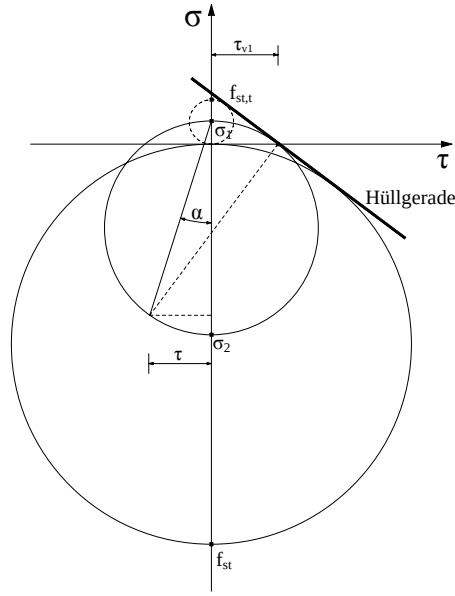
Die Verbundkräfte  $\Delta F_{f,i}$  am Zwischenrisselement ergeben sich mit den Gleichungen 3.55 und 3.56 wie folgt:

$$\begin{aligned}\Delta F_{f,i}(l_v \leq l_{v,max.}) &= -F_{f,i} + F_{f,i} \cdot \cosh(\omega \cdot l_v) \\ &+ \omega \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_v \cdot \frac{\delta_{v1} - \frac{F_{f,i}}{\omega \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_v} \cdot \sinh(\omega \cdot l_v)}{\cosh(\omega \cdot l_v)} \cdot \sinh(\omega \cdot l_v)\end{aligned}\quad (3.57)$$

Gleichung 3.57 kann umgeformt werden:

$$\begin{aligned}\Delta F_{f,i}(l_v \leq l_{v,max.}) &= -F_{f,i} + F_{f,i} \cdot \cosh(\omega \cdot l_v) \\ &+ \omega \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_v \cdot \left( \delta_{v1} - \frac{F_{f,i}}{\omega \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_v} \cdot \sinh(\omega \cdot l_v) \right) \cdot \tanh(\omega \cdot l_v)\end{aligned}\quad (3.58)$$

Der Kraftabtrag in der Verbundfuge hängt somit von der Dehnsteifigkeit des Faser-verbundwerkstoffs ( $E_f, t_f, b_v$ ) und den Größen des Verbundansatzes ( $\tau_{v1}, \delta_{v1}$ ) ab. Das Integral des Verbundansatzes (Abb. 3.11) ergibt die „Bruchenergie“  $G_v$ . Diese muss aufgebracht werden, um ein vollständiges Entkoppeln der Füge-teile am differentiellen Element zu erreichen. Für einen linearen Verbundansatz (Abb. 3.11a) ergibt sich  $G_v$  zu:



**Abbildung 3.14:** *Mohr-Coulomb-Bruchkriterium*, nach [Hol97]

$$G_v = \int_{\delta_v=0}^{\delta_v=\delta_{v1}} \tau_v(\delta_v) d\delta_v = \frac{\tau_{v1} \cdot \delta_{v1}}{2} \quad (3.59)$$

Die maximale Verbundschubspannung  $\tau_{v1}$  kann nach dem *Bruchkriterium* von *Mohr-Coulomb* (Abb. 3.14) wie folgt angegeben werden:

$$\tau_{v1} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{f_{st} \cdot f_{st,t}} \quad (3.60)$$

Die Verbundkraft am Zwischenrisselement ergibt sich nach Einführung der Gleichung 3.59 und einer Umstellung der Größen wie folgt:

$$\begin{aligned} \Rightarrow \Delta F_{f,i}(l_v \leq l_{v,max.}) &= -F_{f,i} + F_{f,i} \cdot \cosh(\omega \cdot l_v) \\ &+ \left( \frac{2 \cdot \omega \cdot G_v \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_v}{\tau_{v1}} - F_{f,i} \cdot \sinh(\omega \cdot l_v) \right) \cdot \tanh(\omega \cdot l_v) \end{aligned} \quad (3.61)$$

Da mit Gleichung 3.61 eine Beziehung zur Beschreibung der Verbundkräfte am Zwischenrisselement gefunden ist, stellt sich nun die Frage, bei welchen Verbundlängen  $l_v$  die maximalen Verbundkräfte erreicht werden. Die Lösung kann mit einer Extremwertberechnung erfolgen. Somit ergibt sich die erste Ableitung von Gleichung 3.61 nach der Verbundlänge zu:

$$\frac{d\Delta F_{f,i}}{dl_v} = \frac{\omega}{\cosh^2(l_v \cdot \omega)} \cdot \left( \frac{2 \cdot G_v \cdot \omega \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_v}{\tau_{v1}} - F_{f,i} \cdot \sinh(\omega \cdot l_v) \right) = 0 \quad (3.62)$$

Da der erste Term auf der rechten Seite (Bruch) immer ungleich Null ist, ergibt sich die Lösung für  $l_{v,max.}$  aus dem rechten Klammerausdruck:

$$\left( \frac{2 \cdot G_v \cdot \omega \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_v}{\tau_{v1}} - F_{f,i} \cdot \sinh(\omega \cdot l_v) \right) = 0 \quad (3.63)$$

zu

$$l_{v,max.} = \frac{1}{\omega} \cdot \operatorname{arcsinh} \left( -\frac{2 \cdot G_v \cdot \omega \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_v}{\tau_{v1} \cdot F_{f,i}} \right) \quad (3.64)$$

Dieser Ausdruck kann in einen logarithmischen Ansatz überführt werden,

$$l_{v,max.} = -\frac{1}{\omega} \cdot \ln \left( -\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 1} \right) \quad (3.65)$$

wobei sich die Größe  $\alpha$  wie folgt angeben lässt:

$$\alpha = \frac{2 \cdot G_v \cdot \omega \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_v}{\tau_{v1} \cdot F_{f,i}} \quad (3.66)$$

Der Ausdruck lässt sich unter Berücksichtigung der Gleichungen 3.46, 3.59 und der im folgenden Abschnitt hergeleiteten Gleichung 3.82 als Verhältnis der Verbundbruchkraft am Endverankerungselement zur Verbundkraft am Zwischenrisselement mit  $\alpha \leq 1$  wie folgt angeben:

$$\alpha = \frac{F_{f,EVE}}{F_{f,i}} \quad (3.67)$$

Setzt man die maximale Verbundlänge  $l_{v,max.}$  in Gleichung 3.61 ein, so ergeben sich die Verbundbruchkräfte am Zwischenrisselement für  $l_v \geq l_{v,max.}$  zu:

$$\Delta F_{f,i}(l_v \geq l_{v,max.}) = F_{f,i} \cdot \frac{(-1 - \alpha + \beta) \cdot (1 + \alpha^2 - \alpha \cdot \beta - \beta)}{1 + (\alpha - \beta)^2} \quad (3.68)$$

mit:

$$\beta = \sqrt{1 + \alpha^2} \quad (3.69)$$

Teile der Herleitung finden sich unter anderem auch bei *Holzenkämpfer* [Hol94] und *Niedermeier* [Nie00]. Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass die Gleichungen 3.61 und 3.68 keine geschlossenen Lösungen darstellen. Die Berechnung der Verbundkräfte  $F_{f,u}$  muss iterativ über mehrere Zwischenrisselemente mit der bekannten Verbundkraft  $F_{f,i}$  des vorangegangenen Elementes erfolgen. Der Beginn der Berechnung erfolgt stets am Endverankerungselement. Somit ergeben sich die Verankerungskräfte über  $n$  Verankerungselemente zu:

$$F_f = \sum_{i=1}^n \Delta F_{f,i} \quad (3.70)$$

### 3.2.4 Lösung am Endverankerungselement

Aufgrund der Bedeutung für die vorliegende Arbeit soll neben der Lösung für das Zwischenrisselement auch die Lösung der Differentialgleichung (Gl. 3.43) für das Endverankerungselement aufgezeigt werden.

Für den Verbundansatz am Endverankerungselement werden folgende Randbedingungen definiert:

$$\epsilon_f(x=0) = \delta'_v(x=0) = 0 \quad (3.71)$$

$$\delta'_v(x=l_v) = \epsilon_f \quad (3.72)$$

$$\delta_v(x=l_v) = \delta_{v1} \quad (3.73)$$

Nach Berücksichtigung der Randbedingung 3.71 für Gleichung 3.48 ergibt sich die Konstante  $C_1$  zu Null. Die Konstante  $C_2$  folgt nach Einsetzen der Randbedingung 3.73 in Gleichung 3.47 zu:

$$C_2 = \frac{\delta_{v1}}{\cosh(\omega \cdot l_v)} \quad (3.74)$$

Die Lösung für die Relativverformung der Fügeile ergibt sich damit und nach Gleichung 3.47 zu:

$$\Rightarrow \delta_v(x) = \frac{\delta_{v1}}{\cosh(\omega \cdot l_v)} \cdot \cosh(\omega \cdot x) \quad (3.75)$$

Die Dehnung des Faserverbundwerkstoffes am Verbundende ( $x = l_v$ ) ergibt sich durch Ableitung der Gleichung 3.75 nach  $dx$  zu:

$$\delta'_v(x=l_v) = \omega \cdot \frac{\delta_{v1}}{\cosh(\omega \cdot l_v)} \cdot \sinh(\omega \cdot l_v) = \delta_{v1} \cdot \omega \cdot \tanh(\omega \cdot l_v) \quad (3.76)$$

Mit der Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens der Faserverbundwerkstoffe gilt für die Dehnung am Verbundende ( $x = l_v$ ):

$$\delta'_v(x = l_v) = \epsilon_f(x = l_v) = \frac{F_{f,u}}{E_f \cdot t_f \cdot b_v} \quad (3.77)$$

Die Verbundkraft am Endverankerungselement ergibt sich durch Gleichsetzen der Gleichungen 3.76 und 3.77 zu:

$$F_f(x \leq l_v) = E_f \cdot t_f \cdot b_v \cdot \delta_{v1} \cdot \omega \cdot \tanh(\omega \cdot l_v) \quad (3.78)$$

Unter Berücksichtigung der Gleichungen 3.46 und 3.59 folgt für die Verbundkraft am Endverankerungselement:

$$\Rightarrow F_f = b_v \cdot \sqrt{2 \cdot G_v \cdot E_f \cdot t_f} \cdot \tanh(\omega \cdot l_v) \quad (3.79)$$

Wie im vorhergehenden Abschnitt stellt sich hier die Frage nach der für die Verbundbruchkräfte erforderlichen maximalen Verbundlängen. Gleichung 3.79 gibt die Verbundbruchkräfte in Abhängigkeit der Verbundlängen  $l_v$  an. Eine Aussage über die maximale Verbundlänge  $l_{v,max}$  erhält man, indem der Ausdruck  $\tanh(\omega \cdot l_v)$  aus Gleichung 3.79 ein Maximum - gleich 1 - ergibt. Unter Einbeziehung der Gleichungen 3.46 und 3.59 sowie der sinnvollen Näherung, dass  $\arctanh(1) \approx 4$  ergibt, folgt:

$$\arctanh(1) \approx 4 = \sqrt{\frac{\tau_{v1}^2 \cdot l_{v,max}^2}{2 \cdot G_v \cdot E_f \cdot t_f}} \quad (3.80)$$

Die maximale Verbundlänge  $l_{v,max}$  am Endverankerungselement ergibt sich abschließend zu:

$$\Rightarrow l_{v,max} \hat{=} l_{v,EVE} = 4 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot G_v \cdot E_f \cdot t_f}{\tau_{v1}^2}} \quad (3.81)$$

und die Verbundbruchkraft am Endverankerungselement für  $l_v \geq l_{v,max}$ . ergibt sich somit zu:

$$\Rightarrow F_f(l_v \geq l_{v,max.}) \hat{=} F_{f,EVE} = b_v \cdot \sqrt{2 \cdot G_v \cdot E_f \cdot t_f} \quad (3.82)$$

Aus Gleichung 3.82 geht deutlich hervor, dass sich die maximale Verbundbruchkraft  $F_{f,EVE}$  unabhängig von der Verbundlänge  $l_v$  zeigt. Zwar ist zum Abtrag der Verbundbruchkraft eine maximale Verbundlänge  $l_{v,max}$  erforderlich. Eine Erhöhung der Verbundlänge darüber hinaus führt jedoch zu keiner Steigerung der Verbundkräfte. Gleichwohl tritt bei einer Verbundlänge unterhalb der maximalen Verbundlänge eine Reduzierung der übertragbaren Verbundkräfte ein. Dieser Zusammenhang kann nach Gleichung 3.79 berechnet werden.

In den vorangegangenen Abschnitten der Arbeit wurden die Lösungen des verschieblichen Verbundes (Gl. 3.43) für das Zwischenriss- und das Endverankerungselement aufgezeigt. Es stellt sich jedoch die Frage, ob beide Lösungen auch konsistent sind. Setzt man in Gleichung 3.61 die Größe  $F_{f,i}$  zu Null, so ergibt sich folgender Ausdruck:

$$\Delta F_{f,i} = 0 + \left( \frac{2 \cdot G_v \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_v \cdot \omega}{\tau_{v1}} \right) \tanh(\omega \cdot l_v) \quad (3.83)$$

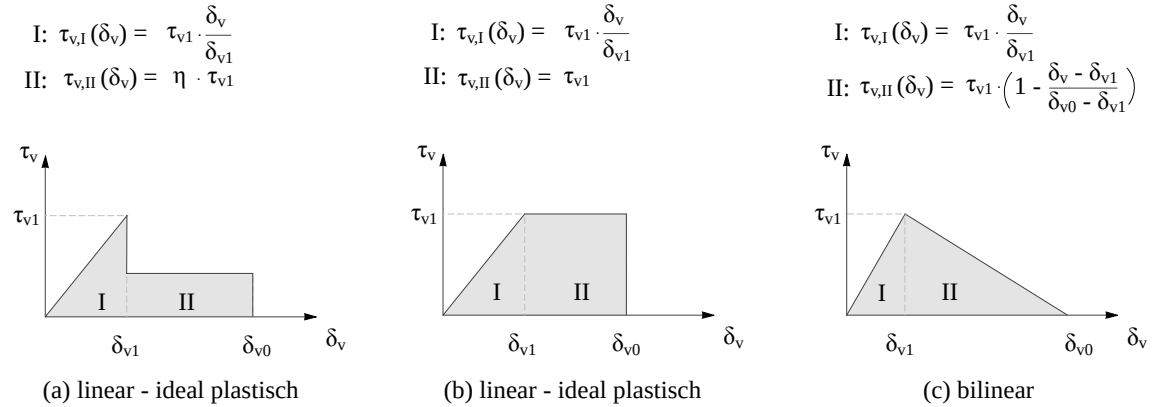
Ersetzt man unter Anwendung der Gleichungen 3.46 und 3.59 die Größe  $\omega$  in Gleichung 3.83, so ergibt sich die nach Gleichung 3.79 bekannte Beziehung für die Berechnung der Verbundkraft am Endverankerungselement:

$$F_f = b_v \cdot \sqrt{2 \cdot G_v \cdot E_f \cdot t_f} \cdot \tanh(\omega \cdot l_v) \quad (3.84)$$

Somit zeigt sich, dass die Lösung des verschieblichen Verbundes für das Endverankerungselement einen Sonderfall der Lösung für das Zwischenrisselement darstellt. Teile der Herleitung finden sich unter anderem auch bei *Holzenkämpfer* [Hol94] und *Niedermeier* [Nie00].

### 3.2.5 Rechnergestützte Lösung für das Endverankerungselement

Die rechnergestützte Lösung der *Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes* (Gl. 3.43) eröffnet die Möglichkeit, auch solche Verbundansätze zu berücksichtigen, für die sich keine geschlossenen analytischen Lösungen herleiten lassen. In Abbildung 3.15 sind beispielhaft drei solche Ansätze dargestellt.



**Abbildung 3.15:** Verbundansätze  $\tau_v(\delta_v)$  für den Klebeverbund von Füge teilen

In der vorliegenden Arbeit soll auf eine von *Pörtner* [Pör06] entwickelte Routine zurückgegriffen werden. Diese wurde zur Berechnung der Verbundcharakteristik von in Holz eingeklebten stiftförmigen faserverstärkten Kunststoffen entwickelt und auf die Verbundproblematik von auf Mauersteinen aufgeklebten Faserverbundwerkstoffen angepasst. Hierzu wurde der in der Routine programmierte Stabumfang  $U_{st}$  der Breite der Faserverbundwerkstoffe  $b_v$  und der Stabquerschnitt  $A_{st}$  dem Flächenquerschnitt der Faserverbundwerkstoffe  $A_f$  gleichgesetzt. Die von *Pörtner* für die Berechnung der Nachgiebigkeit der stiftförmigen Verbindung eingeführte „Einflusstiefe“ des Holzes  $t_w$  wurde zu Null eingegeben.

Die Rechenroutine wurde mit Hilfe des Programms MATLAB geschrieben. Diese ist in der Lage, die Gleichung 3.43 iterativ zu lösen. Hierzu wird die Verbundlänge  $l_v$  in Elemente der Länge  $dx$  (Abb. 3.10) unterteilt. Danach wird eine Rechenschleife gestartet, die die Verbundkräfte schrittweise steigert ( $F_{f,i} = F_{f,i} + \Delta F_f$ ). Die Lösung erfolgt, beginnend mit dem ersten Verbundelement am Krafteinleitungspunkt  $x = l_v$ , schrittweise für alle Elemente. Ist ein inneres Gleichgewicht unter Berücksichtigung des verwendeten Verbundansatzes gefunden, wird die Verbundkraft  $F_{f,i}$  gesichert. Die Steigerung der Verbundkraft erfolgt so lange, bis sich kein inneres Gleichgewicht mehr erreichen lässt. Ist dies der Fall, wird der Rechenlauf abgebrochen. Die Verbundbruchkraft  $F_{f,u}$  ergibt sich abschließend aus der Summe der über die Verbundelemente erreichten Verbundkräfte.

## 4 Verwendete Werkstoffe

Im folgenden Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Werkstoffe mit ihren Eigenschaften dargestellt. Es wird auf die Wahl der Materialien ebenso eingegangen wie auf die Verfahren zur Kennwertbestimmung.

### 4.1 Wahl der Werkstoffe

Das in dieser Arbeit behandelte Verfahren zur nachträglichen Verstärkung von Mauerwerksscheiben soll sowohl im Altbau oder wenn erforderlich auch im Neubau angewendet werden können. Aus diesem Grund wurde bei den experimentellen Untersuchungen ein breites Spektrum an Mauersteinen berücksichtigt. Hierzu zählten fabrikneue künstliche Steine, eine Ziegelart aus dem Bestand sowie ein Sandsteintyp. Auch wurde sich - bis auf eine Steinart - auf Vollsteine beschränkt. Für die Untersuchungen kamen Faserverbundwerkstoffe bestehend aus Glas- und Kohlenstofffasern zur Anwendung. Der überwiegende Teil der experimentellen Untersuchungen wurde jedoch mit dem Glasfasergelege durchgeführt. Diese haben sich bei einer Vielzahl von Untersuchungen [Sch94, Ehs97, Wal08] als vorteilhaft für die nachträgliche Verstärkung von Mauerwerksstrukturen erwiesen. Darüber hinaus sind Glasfaserwerkstoffe im Vergleich zu Kohlenstofffaserwerkstoffen kostengünstiger und breit am Markt verfügbar. Da Untersuchungen von *Ehsani et al.* [Ehs95] und *Vogel* [Vog00] gezeigt haben, dass die Wahl der Klebstoffe einen direkten Einfluss auf die Verbundtragfähigkeit der Klebverbindung haben kann, wurden zwei Epoxidharzklebstoffe unterschiedlicher Viskositäten und ein Zementmörtel zur Verklebung der Gelege verwendet.

### 4.2 Klebstoffe

Zum Verkleben der Faserprodukte auf Beton- und Mauerwerk haben sich Zwei-Komponenten-Epoxidharzklebstoffe vielfach bewährt (vgl. Übersicht zum Stand der Forschung, Tab. 2.1 und 2.2). Dies ist unter anderem auf die einfache Verarbeitung, die guten Festigkeitseigenschaften sowie die große Bandbreite an verfügbaren Viskositäten (im Verarbeitungszustand) zurückzuführen. Da in jüngster Zeit auch vermehrt Zementmörtel als Klebstoffe eingesetzt (vgl. [Wal08]) wurden, wurde in zwei Versuchsserien (A68 bis A73) ein hochfester minaralischer Zementmörtel zum Verkleben der

Gelege auf den Steinen verwendet. Die Rezeptur der Zementmörtelmischung (RPC) wurde in Anlehnung an [Zil08] gewählt. Abweichend wurde die dreifache Menge an Fließmittel zugegeben.

| Bezeichnung |                       | Typ               | Festigkeit<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Viskosität                          | Dichte<br>[kg/l]  | Farbe            |
|-------------|-----------------------|-------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|------------------|
| SD330       | SikaDur 330           | Epoxid-<br>harz   | 30,0 <sup>1</sup><br>(Zugf.)       | hochviskos                          | 1,31 <sup>1</sup> | grau             |
| SP55        | SuP Resin<br>Epoxy 55 | Epoxid-<br>harz   | 35,0 <sup>1</sup><br>(Zugf.)       | niedrigviskos                       | 1,11 <sup>1</sup> | trans-<br>parent |
| ZM          | RPC                   | Zement-<br>mörtel | 74,0 <sup>2</sup><br>(Druckf.)     | Ausbreitmaß <sup>3</sup><br>22,5 cm | -                 | grau             |

<sup>1</sup> Herstellerangaben, <sup>2</sup> nach [DIN EN 1015-11], <sup>3</sup> nach [DIN EN 1015-3]

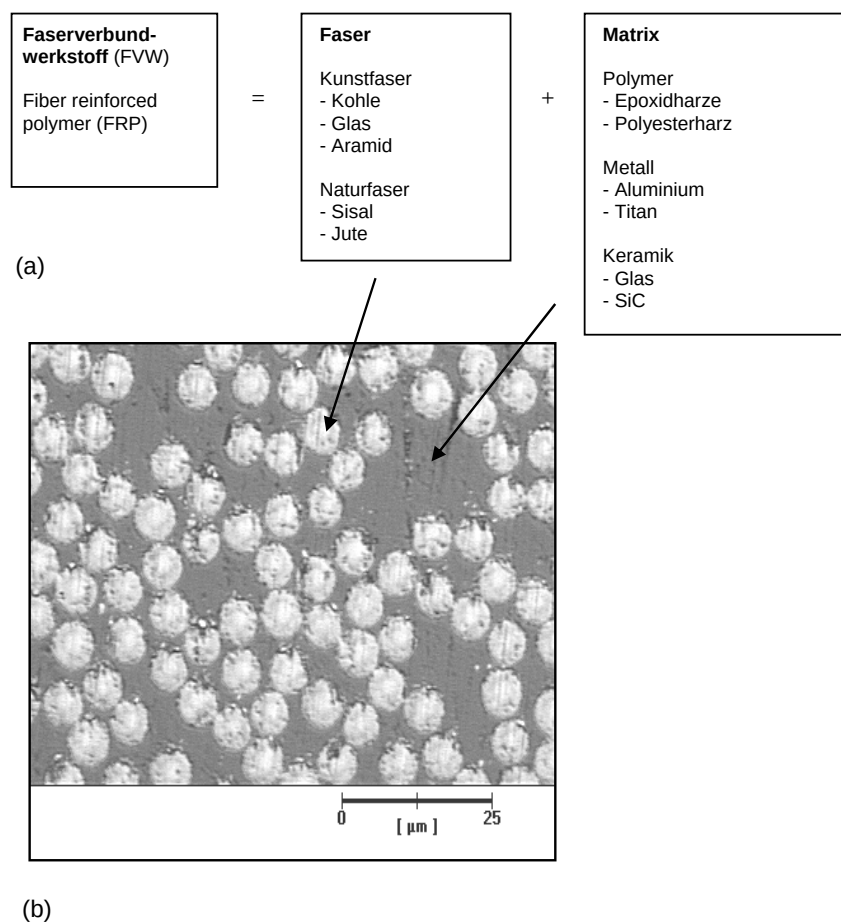
**Tabelle 4.1:** verwendete Klebstoffe

Zwei-Komponenten-Epoxidharzklebstoffe dürfen nur bei stabilen und kontrollierbaren Umweltbedingungen verarbeitet werden. Die Untergründe müssen staub- und fettfrei sein. Während des Aushärtvorgangs muss die Klebstoffschicht vor Feuchtigkeit geschützt werden. Ein Vorteil der Zwei-Komponenten-Epoxidharzklebstoffe ist die Beständigkeit gegen Laugen, verdünnte Säuren, Salzlösungen und Mineralöle [SuP04]. Sie sind allerdings empfindlich gegenüber UV-Lichteinwirkung und Feuchteeinwirkung [Hab02]. Die Klebstoffverbindungen besitzen eine gute Tauwechselbeständigkeit [Gre00], jedoch stellt sich schon ab einer Umgebungstemperatur von +50°C (trocken) und +40°C (feucht) [Sik02, SuP04] eine Entfestigung der Klebverbindung ein. So sind Zwei-Komponenten-Epoxidharzklebstoffe noch nicht uneingeschränkt einsetzbar und müssen von fachkundigen sowie gesondert geschulten Firmen verarbeitet werden. Die beschriebenen Nachteile stellen jedoch kein allgemeines Problem der Klebtechnik dar. Vielmehr ist dies eine Frage der Klebstoffqualität, welche sich zukünftig sicherlich noch verbessern wird. Eine Zusammenstellung der für die experimentellen Untersuchungen verwendeten Klebstoffe findet sich in Tabelle 4.1. Im Folgenden sei für das Kleben auf Bauteilen noch auf die Veröffentlichungen von [Ehr92, Erh99, Ehr04] verwiesen.

### 4.3 Faserverbundwerkstoffe

Faserverbundwerkstoffe sind hybride, aus mindestens zwei Materialien bestehende, Werkstoffe. Sie setzen sich aus einem *Faserwerkstoff* und einer die Fasern umschließenden *Matrix* zusammen (vgl. Abb. 4.1). Beide Bestandteile können sowohl organischen als auch anorganischen Ursprungs sein (vgl. *Habenicht* [Hab02]). Im Bauwesen

werden vorwiegend Kunstfasern: synthetische Polymere (Aramid- und Polyesterfasern) und anorganische Chemiefasern (Glas- und Kohlenstofffasern) verwendet. Vereinzelt werden in Forschungsvorhaben auch Naturfasern (Jute) benutzt. Kunstfasern zeichnen sich durch eine - im Vergleich zum Baustahl - hohe Festigkeit bei vergleichsweise niedrigem Gewicht aus. Zudem besitzen sie eine gute Korrosionsbeständigkeit. Jedoch zeigen unbehandelte Glasfasern im basischen Milieu einen Festigkeitsverlust. Die Industrie bietet aus diesem Grund beschichtete Glasfasern an oder empfiehlt die vollständige Einbettung der Fasern in eine Klebstoffmatrix. Die Matrizen bestehen im Bauwesen nahezu ausnahmslos aus Zwei-Komponenten-Epoxidharzklebstoffen (Reaktionspartner: Epoxidharz, Amine). Die Matrix gewährleistet den Verbund der Fasern und schützt diese vor chemischen Einflüssen und mechanischen Beschädigungen.



**Abbildung 4.1:** Querschnitt eines Faserverbundwerkstoffs: (a) Komponenten und (b) mikroskopische Aufnahme, aus [Sei07]

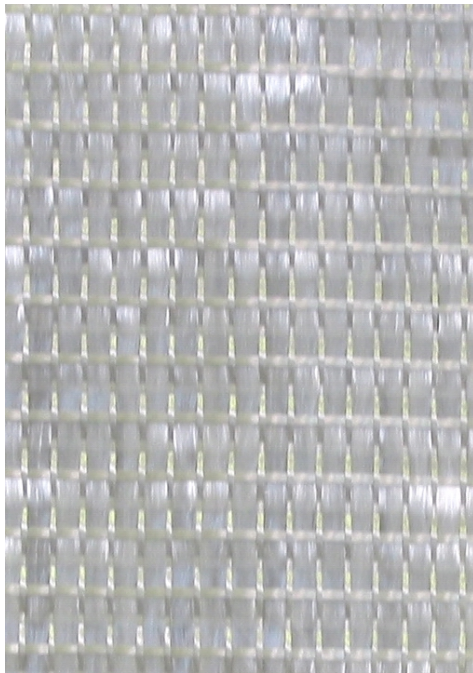
Zur Weiterverarbeitung werden die einzelnen Fasern (Filamente) zu Faserbündeln (Rovings) - in der Regel bestehend aus ca. 2000 Filamenten - zusammengefasst. Anschließend erfolgt die Verarbeitung zu Gelegen, Geweben und Matten (Abb. 4.2 a bis c). Werden diese in eine Klebstoffmatrix eingebettet, spricht man von Laminaten. Hingegen werden Lamellen direkt aus den Fasern und einer umschließenden Klebstoffmatrix hergestellt (Abb. 4.2d). Auf Grund des Verbundes zwischen Faserwerkstoffen und Klebstoffmatrix werden die Lamellen und Lamine auch als Faserverbundwerkstoffe bezeichnet. Streng genommen ergeben sich, im Vergleich zu den Lamellen, die Lamine erst bei der Verklebung auf dem Bauteil, wobei in der Regel die Einbettung der Faserwerkstoffe in die Matrix und die Verklebung in einem Arbeitsgang erfolgt.

Gelege bestehen aus einer Vielzahl parallel angeordneter Faserbündel, welche mit senkrecht zu den Bündeln aufgebracht - jedoch nicht verwobenen - Fäden gegen seitliches Verrutschen gesichert werden. Je nach Stärke der Schussfäden können Gelege unidirektionale oder bidirektionale Beanspruchbarkeiten aufweisen. Im Vergleich zu den Gelegen sind die Faserbündel der Gewebe miteinander verwoben. Somit ergibt sich für die Gewebe eine bidirektionale Beanspruchbarkeit. In der Praxis haben sich unidirektionale Gelege und bidirektionale Gewebe durchgesetzt. Somit werden im Weiteren den Gelegen (unidirektionale) und Geweben (bidirektionale) Beanspruchbarkeiten unterstellt.

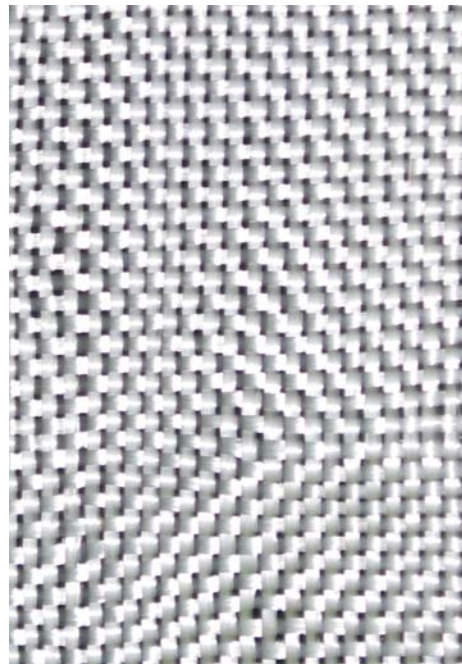
| Bezeichnung           |                           | alkali-<br>best. | Flächen-<br>gewicht<br>[g/m <sup>2</sup> ] | Elastizitäts-<br>modul<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Zugfes-<br>tigkeit<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Quer-<br>schnitt<br>[mm <sup>2</sup> /m] |
|-----------------------|---------------------------|------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|
| Sa397G<br>(E-Glas)    | Saertex<br>397G           | nein             | 366                                        | 73.000                                         | 2.550                                      | 139                                      |
| SP90/10G<br>(E-Glas)  | SuP G-Sheet<br>AR 90/10 A | ja               | 440                                        | 65.000                                         | 3.000                                      | 149                                      |
| SW430G<br>(E-Glas)    | SikaWrap<br>430G          | nein             | 445                                        | 76.000                                         | 3.400                                      | 172                                      |
| SP240C<br>(Kohlenst.) | SuP C-Sheet<br>240        | ja               | 200                                        | 240.000                                        | 3.800                                      | 117                                      |

**Tabelle 4.2:** Herstellerangaben zu den verwendeten Gelegen

Für die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit wurden drei Glas- und ein Kohlenstofffasergelege (Tab. 4.2) verwendet. Der Großteil der experimentellen Untersuchungen wurde mit einem E-Glasfasergelege der Firma *SAERTEX-Stade GmbH* durchgeführt. Mit diesem wurde auch der Einfluss der Mehrlagigkeit auf die Zugfestigkeits-



(a)



(b)



(c)



(d)

**Abbildung 4.2:** typische Werkstoffe: (a) Glasfaser-Gelege (unidirektional), (b) Glasfaser-Gewebe (bidirektional), (c) Glasfaser-Matte (multidirektional) und (d) Kohlenstofffaser-Lamelle (unidirektional)

und Steifigkeitseigenschaften der Faserverbundwerkstoffe untersucht (vgl. Abb. 4.4), wobei als Matrix der Klebstoff *SP55* verwendet wurde.

Die Eigenschaften der Faserverbundwerkstoffe hängen von den Materialeigenschaften der Fasern und der verwendeten Matrix ab und können mit der so genannten *Mischregel* berechnet werden:

$$f_f = f_{fa} \cdot \left[ \phi + \frac{E_m}{E_{fa}} \cdot (1 - \phi) \right] \quad (4.1)$$

$$E_f = \phi \cdot E_{fa} + (1 - \phi) \cdot E_m \quad (4.2)$$

$$\phi = \frac{A_{fa}}{A_{fa} + A_m} \quad (4.3)$$

mit:

|                    |                                                               |
|--------------------|---------------------------------------------------------------|
| $f_f, f_{fa}$      | Zugfestigkeiten parallel zur Faser:<br>FVW, Fasern            |
| $E_f, E_{fa}, E_m$ | Elastizitätsmodule parallel zur Faser:<br>FVW, Fasern, Matrix |
| $A_{fa}, A_m$      | Querschnitte: Faserfläche, Matrixfläche                       |
| $\phi$             | Faseranteil am FVW                                            |

Die Zugfestigkeiten und Elastizitätsmodule der verwendeten Faserverbundwerkstoffe wurden nach [DIN EN 2747] bestimmt. Je Faserverbundwerkstoff wurden drei Versuche durchgeführt. Die Breite der Zugproben betrug 50 mm. Die Länge des Prüfbereichs 150 mm. Die Verklebung der Gelege erfolgte ein- und mehrlagig, mit an den Enden verstärkten Bereichen (Abb. 4.3b). Die Versuche wurden weggesteuert mit 2 mm/min. durchgeführt. Die Dehnungen der Faserverbundwerkstoffe wurden mit einem Extensometer gemessen, die Dicken mit einer digitalen Schieblehre an fünf Messpunkten erfasst. Die experimentellen Kennwerte ergeben sich zu:

$$f_f = \frac{F_{u,exp.}}{b_f \cdot t_f} \quad (4.4)$$

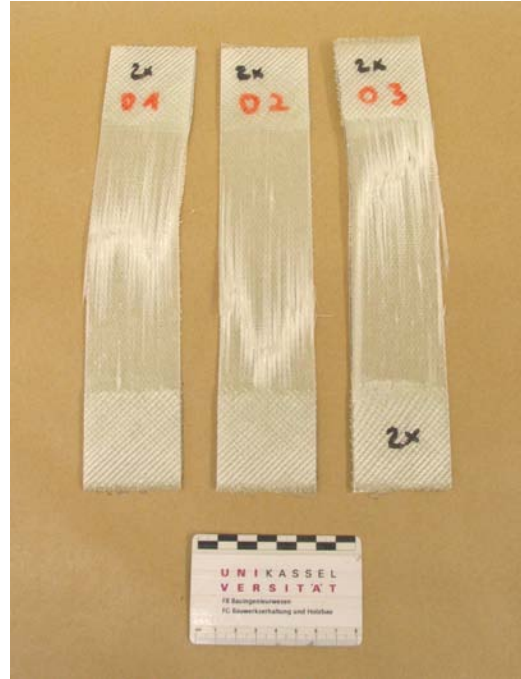
$$E_f = \frac{f_f}{\epsilon_{f,u}} = \frac{f_f}{\Delta l / l} \quad (4.5)$$

$$\phi = \frac{A_{fa}}{b_f \cdot t_f} \quad (4.6)$$

Im Bereich der Klebtechnik ist es üblich die Zugfestigkeiten der Faserverbundwerkstoffe nicht als Spannungswert sondern auf die Breite bezogen (vgl. [Sik02, SuP04]) anzugeben. Demzufolge wird die Festigkeit in [kN/cm-Breite] angegeben.



(a)



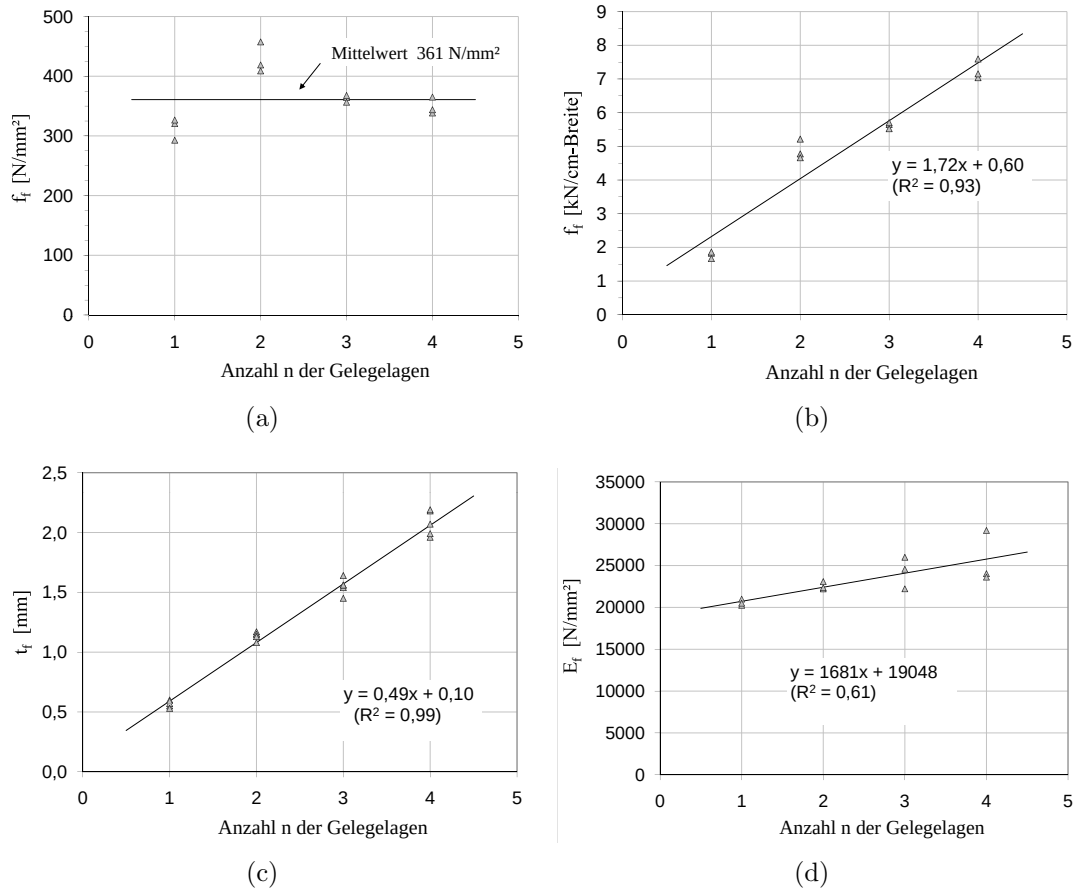
(b)

**Abbildung 4.3:** Bestimmung der Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften der Faserverbundwerkstoffe: (a) Versuchsaufbau und (b) typische Bruchbilder

Aus den Regressiongeraden in Abbildung 4.4 wird ersichtlich, dass sich die Größen jeweils aus einem variablen - von der Anzahl  $n$  der Gelegelagen abhängigen - und einem konstanten Anteil ergeben. Eine Abhängigkeit der Größen in Bezug auf die Anzahl der Gelegelagen war vor allem für die Gelegedicken und Festigkeiten zu erwarten und bedarf keiner weiteren Erklärung. Hingegen ergibt sich der konstante Anteil in Abbildungen 4.4 aus dem Einfluss der Klebstoffmatrizen. Abschließend ist festzuhalten, dass sich für die zwei verwendeten Epoxidharzklebstoffe kein Einfluss auf die Materialkennwerte der Faserverbundwerkstoffe ergab. Eine ausführliche Zusammenstellung der experimentellen Einzelergebnisse kann den Tabellen A.1 und A.2 im Anhang entnommen werden.

## 4.4 Mauersteine

Insgesamt wurden bei der Versuchsdurchführung acht Steinarten berücksichtigt. Hier-von waren sechs fabrikneu, eine Ziegelart wurde aus dem Bestand entnommen und ei-



**Abbildung 4.4:** Einflüsse der Mehrlagigkeit für die Gelege-Klebstoff-Kombination *Sa397G* + *SP55* auf: (a) und (b) Zugfestigkeit, (c) Dicke und (d) Elastizitätsmodul der Faserverbundwerkstoffe

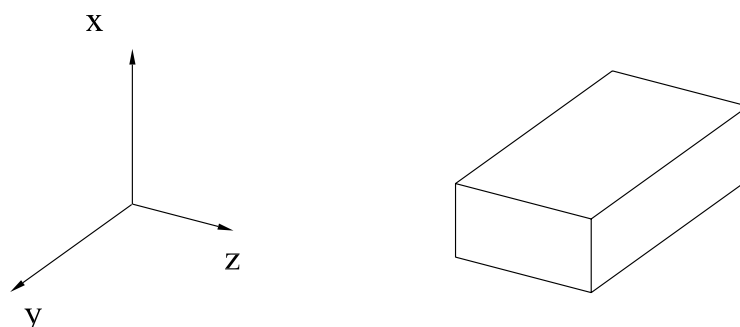
ne Sandsteinart aus einem Steinbruch direkt bezogen. Nachforschungen ergaben, dass die Bestandsziegel aus einer Ziegelei bei Buttlar (Wartburgkreis) stammen. Sie wurden höchstwahrscheinlich im Zeitraum von 1910 bis 1930 hergestellt. Nach *Böttcher* [Böt00] wurden zu dieser Zeit Ziegel (Backsteine) mittlerer Qualität mit Mz12 und hartgebrannte Ziegel mit Mz20 bezeichnet. Die hier verwendeten Bestandsziegel wiesen eine mittlere Bohrkerndruckfestigkeit von  $22,2 \text{ N/mm}^2$  (Tab. A.3) auf. Einen Überblick zu den verwendeten Mauersteinen wird in Tabelle 4.3 gegeben.

|                   | Werkstoffe     | Bezeichnungen                     | Herkunft                                  |
|-------------------|----------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|
| KS12              | Kalksandstein  | KS12-1,8-NF                       | fabrikneu                                 |
| KS20              | Kalksandstein  | KS20-1,8-NF                       | fabrikneu                                 |
| KS28              | Kalksandstein  | KS28-2,0-NF                       | fabrikneu                                 |
| Mz12              | Ziegel         | Mz12-1,8-NF                       | fabrikneu                                 |
| Mz20              | Ziegel         | Mz20-2,0-NF                       | fabrikneu                                 |
| Hlz               | Ziegel         | Hlz12-0,9-NF                      | fabrikneu                                 |
| hiMz <sup>1</sup> | Ziegel         | Mz12-RF                           | aus Bestand                               |
| Sa                | Wesersandstein | auf Normalformat<br>zugeschnitten | Steinbruch Oberkirchen<br>(Niedersachsen) |

<sup>1</sup> Reichsformat: Steinbreite 65 mm

**Tabelle 4.3:** Übersicht der verwendeten Mauersteine

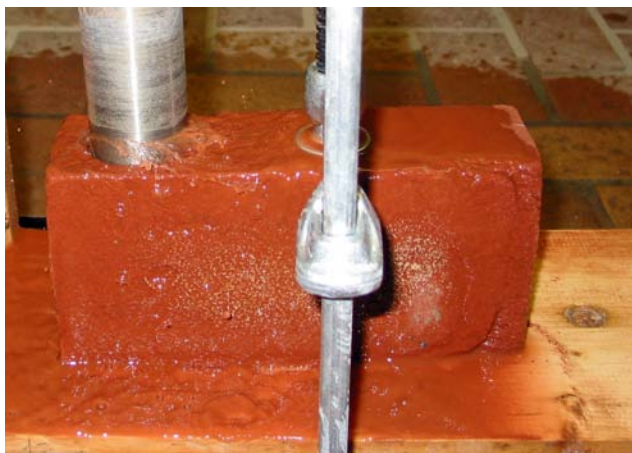
Für die Berechnung der Verbundtragfähigkeit zwischen Faserverbundwerkstoffen und Mauerwerk wurden die Druck- und Oberflächenzugfestigkeiten senkrecht zu den Steinlängsseiten (Abb. 4.5, z-Richtung) ermittelt. Für die Herleitung der Mauerwerksdruckfestigkeit der Wandknoten wurden darüber hinaus die Steindruckfestigkeiten senkrecht zur Lagerfugenfläche (x-Richtung) bestimmt.



**Abbildung 4.5:** Bezeichnung der Koordinatenrichtungen

### 4.4.1 Druckfestigkeiten

Die Steindruckfestigkeiten in Richtung der Steinlängsseiten wurden an mit einem Kernbohrgerät gewonnenen Bohrkernen (Abb. 4.6) der Schlankheit  $\lambda = 2$  bestimmt. Um Streuungen zu reduzieren, sollte der Kerndurchmesser nicht zu klein gewählt werden. Gleichwohl muss es möglich sein auch bei Steinen mit geringeren Höhen Proben zu gewinnen. Die kleinste Steinhöhe betrug bei den Bestandsziegeln 65 mm. Aus diesem Grund wurde eine Bohrkronen mit einem Außendurchmesser von 50 mm verwendet. Der Durchmesser der Bohrkern betrug somit ca. 45 mm.



(a)



(b)

**Abbildung 4.6:** (a) Ausbohren der Kerne aus den Steinlängsseiten und (b) Bestimmung der Druckfestigkeit an Bohrkernen

Im Gegensatz zum Betonbau ist im Mauerwerksbau die nachträgliche Bestimmung der Druckfestigkeit an aus Steinen gewonnenen Bohrkernen nicht genormt. Für eine sinnvolle baupraktische Anwendung der hier vorgeschlagenen Verfahren soll sich im Folgenden an die Normung des Betonbaus angelehnt werden. In [DIN EN 13791] wird die Prüfung von Betonbohrkernen der Schlankheit  $\lambda = 1$  gefordert. *Egermann* [Ege90] untersuchte sehr ausführlich die Druckfestigkeitseigenschaften von Mauersteinen. Für eine Umrechnung der Bohrkerndruckfestigkeit von  $\lambda = 2$  auf eine Schlankheit von  $\lambda = 1$  gibt er einen Formbeiwert von  $f = 1,15$  an. Auch zeigte sich, dass sich an aus den Steinlängsseiten entnommenen Bohrkernen mit Durchmessern zwischen 30 mm bis 70 mm und Schlankheiten von  $\lambda = 1$ , kein Einfluss auf die Druckfestigkeit ergab. Somit kann je nach Anwendungsfall der Bohrkerndurchmesser variiert werden. Gleichwohl wird sich für die Ermittlung der Steindruckfestigkeit aus den Steinlängsseiten auf einen lufttrockenen Bohrkern mit ca. 45 mm im Durchmesser und einer Schlankheit von  $\lambda = 1$  festgelegt. Für die in dieser Arbeit durchgeführten verifizierenden Berechnungen zur Verbundtragfähigkeit wurde dieser Druckfestigkeitskennwert verwen-

det, der im Folgenden mit  $f_{st,z}$  (z-Richtung) bezeichnet wird. Für die noch folgende Berechnung der Mauerwerksdruckfestigkeiten wurden die Steindruckfestigkeiten der Mauerziegel nach [DIN V 105-100] und der Kalksandsteine nach [DIN V 106] bestimmt. Die an den normalformatigen Steinen ermittelten Festigkeiten wurden, wie in den Normungen angegeben, auf den *Referenzkörper* (2DF-Stein) überführt. Die so ermittelten Druckfestigkeitskennwerte werden im Weiteren mit  $f_{st,x}$  (x-Richtung) bezeichnet. Eine ausführliche Zusammenstellung aller Druckfestigkeitswerte findet sich im Anhang A.2.

#### 4.4.2 Oberflächenzugfestigkeiten

Die Verbundcharakteristik zwischen Faserverbundwerkstoffen und Mauerwerk wird, unter anderem, von der Oberflächenzugfestigkeit (Haftzugfestigkeit) des spröden Materials - Beton oder Mauerstein - beeinflusst (vgl. [Sch05]). Die Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit ist für Mauerwerk nicht genormt. Hier kann jedoch auf ein genormtes Messverfahren aus dem Betonbau [DIN 1048-2] zurückgegriffen werden.

Zur Durchführung der Messung wurde mit einer Bohrkronen eine 5 bis 10 mm Tiefe Ringnut in die Steinoberflächen eingebracht (Abb. 4.7a). Anschließend wurde ein Prüfstempel (Durchmesser 50 mm) mit dem Epoxidharzklebstoff *X60* der Firma *Hottinger Baldwin Messtechnik* aufgeklebt. Es zeigte sich anhand einer Vielzahl von Adhäsionsbrüchen, dass der Klebstoff keinen ausreichenden Verbund zwischen dem Prüfstempel und der Oberfläche der Mauersteine herstellen konnte. Auch ein Aufrauen der Steinoberflächen mit einer Drahtbürste änderte dies nicht. Aus diesem Grund wurde wie folgt vorgegangen:

Die Oberflächen der Steine wurden mit Druckluft gereinigt. Danach wurden auf die zu prüfenden Flächen die auch für die Verklebung der Gelege verwendeten *SikaDur 330* [Sik02] oder *SuP Resin Epoxy 55* [SuP04] Epoxidharzklebstoffe aufgebracht. Nach sieben Tagen wurde mit einer Bohrkronen eine 5 mm bis 10 mm tiefe Ringnut in die Steinoberflächen eingebracht. Anschließend erfolgte das Aufbringen der Prüfstempel mit dem Klebstoff *X60* auf die zuvor mit Sandpapier aufgerauten Oberflächen. Der Zugversuch erfolgte mit einer speziellen Zugvorrichtung (Abb. 4.7c).

Das Vorgehen führte bei allen Versuchen zu einem eindeutigen Kohäsionsversagen am Ende der Ringnut (Abb. 4.7d). Mit der Auswertung der Oberflächenzugfestigkeiten zeigte sich, dass die Standardabweichung der Ergebnisse teils deutlich über 20% lag. Selbiges stellte zuvor schon *Schilde* [Sch05] bei Oberflächenzugfestigkeitsmessungen an Betonbauteilen fest. An dieser Stelle konnte einzig vermutet werden, dass das Anbohren der Steine zu einer Gefügeschädigung und damit zu einem frühzeitigen Versagen führte. Gleichwohl ist das Anbohren der Steine arbeits- und zeitaufwändig. Aus diesem Grund wurde nach einem alternativen Verfahren zur Bestimmung der



(a)



(b)



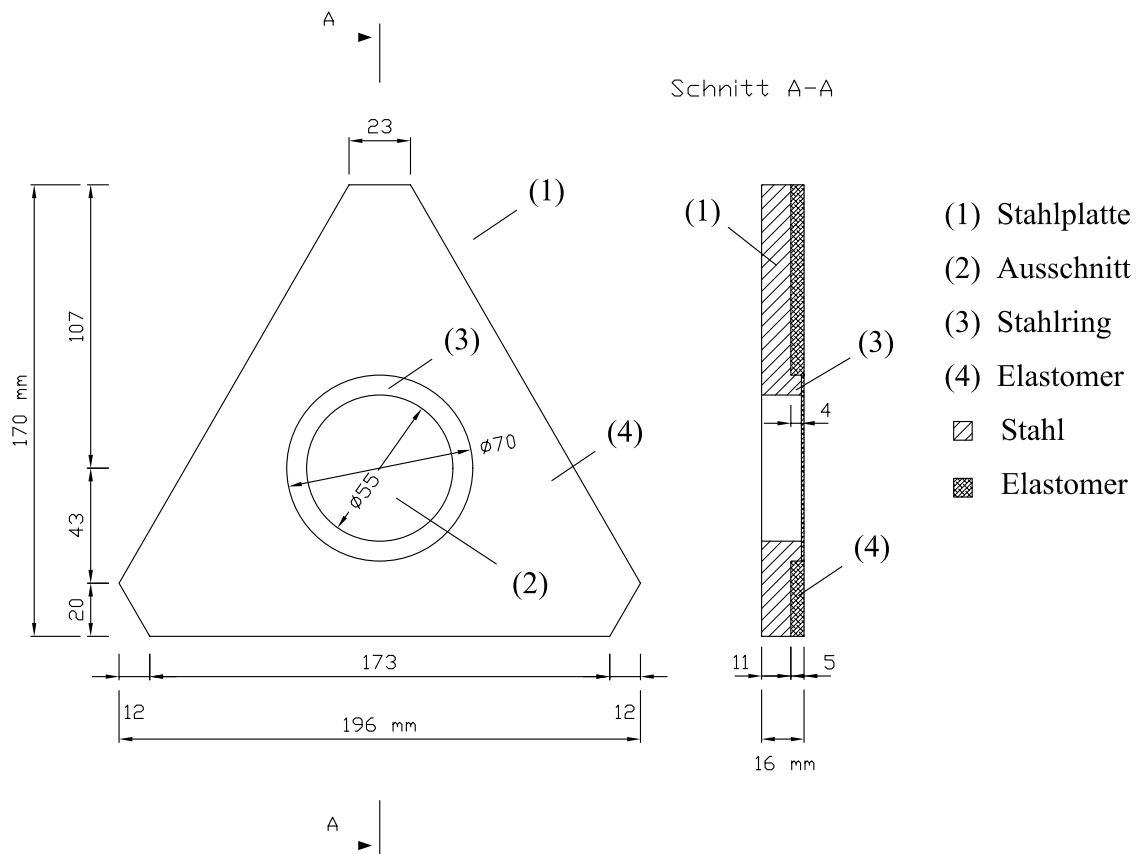
(c)



(d)

**Abbildung 4.7:** Prüfverfahren nach DIN 1048-2: (a) Stein mit Ringnut und Klebstoff, (b) Probe mit Prüfstempel, (c) Versuchsdurchführung mit der Zugmaschine F15D Easy M2000 und (d) typische Bruchfläche

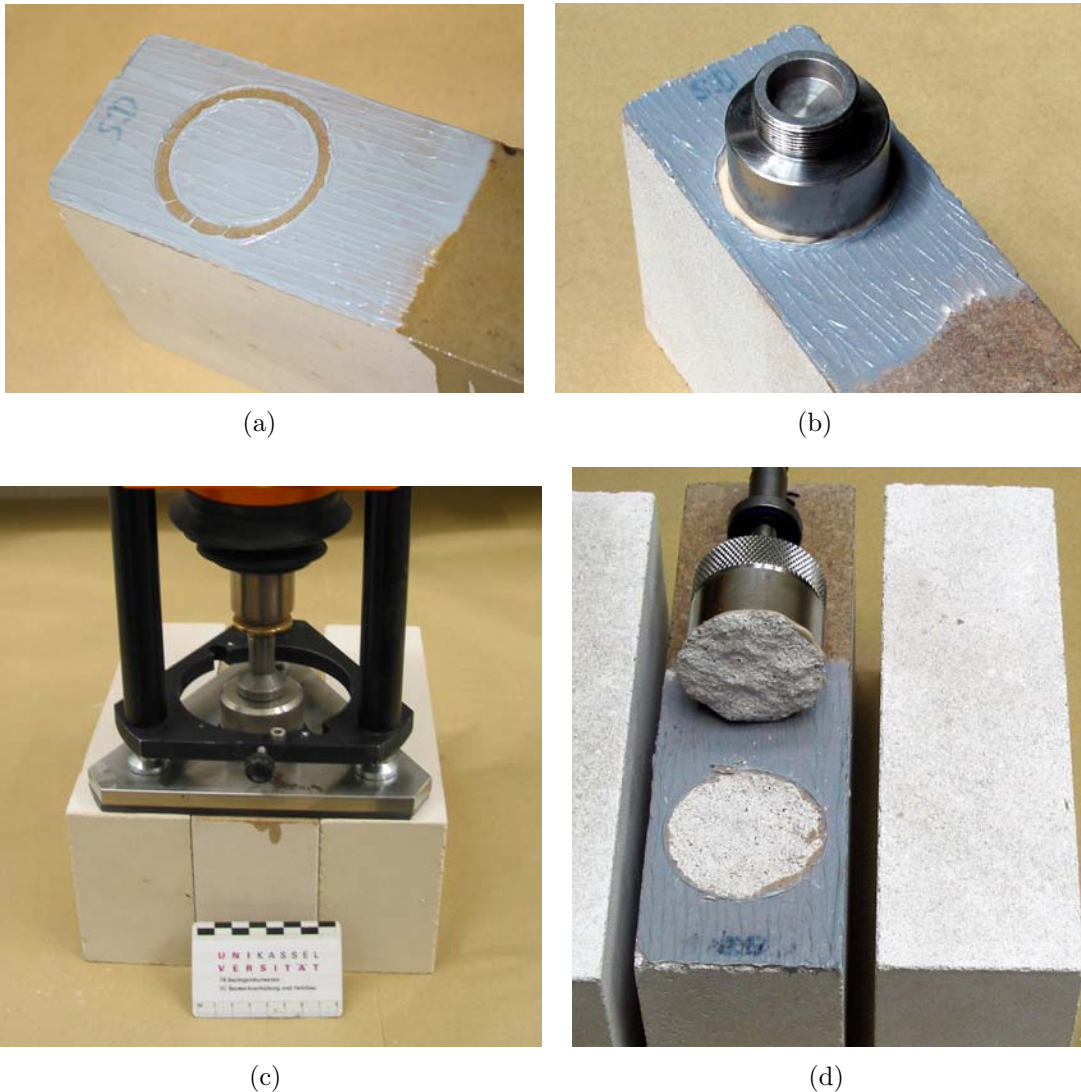
Oberflächenzugfestigkeiten von Mauersteinen gesucht. Die Prüfung sollte ohne vorheriges Einbringen einer Ringnut in die Steinoberflächen erfolgen. Um dennoch eine Bruchfläche vorzugeben wurde eine dreiecksförmige *Druckplatte* (Abb. 4.8) mit einer kreisrunden Aussparung entworfen. Der Durchmesser der Aussparung wurde mit 55 mm so gewählt, dass sich zwischen Prüfstempel und Druckplatte ein Spalt von 2,5 mm ergab. Im Folgenden wird das Verfahren als „*Prüfverfahren mit Druckplatte*“ bezeichnet.



**Abbildung 4.8:** Druckplatte, aus [Sei08]

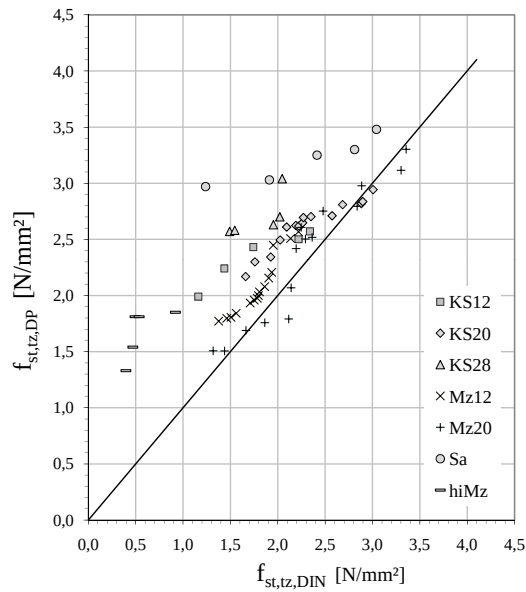
Das Versagen trat als Kohäsionsbruch (Abb. 4.9d) in den oberflächennahen Steinbereichen ein. Da die Mauerziegel Mz12 eine poröse Oberflächenstruktur aufwiesen drang der zuvor aufgetragene niedrigviskose Klebstoff *SuP Resin Epoxy 55* tief in die Steinoberflächen ein. Hierbei stellte sich eine oberflächennahe Verfestigung ein, sodass hierfür keine Oberflächenzugfestigkeitswerte zur Verfügung stehen. Gleichwohl ergaben sich mit dem neuen Prüfverfahren geringere Streuungen und im Mittel über 270 Versuche um ca. 24 % höhere Festigkeiten (Abb. 4.10) als nach DIN 1048-2. Für die Festigkeitsberechnung wurde als Prüffläche die der Aussparung, mit einem Durchmesser von 55 mm, herangezogen. Eine umfassende Darstellung der Vorgehensweise

findet sich in *Seim et al.* [Sei08]. Da sich das Verfahren mit der Druckplatte zur Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeiten bewährt hat, soll dieses als *Referenzverfahren* dienen. Die so ermittelten Festigkeitswerte werden zukünftig mit  $f_{st,tz,DP}$  (z-Richtung und DP-Druckplatte) bezeichnet. Gleichwohl werden aus Vergleichsgründen für die Berechnung der Verbundtragfähigkeiten auch die nach DIN 1048-2 ermittelten Oberflächenzugfestigkeiten  $f_{st,tz,DIN}$  herangezogen.

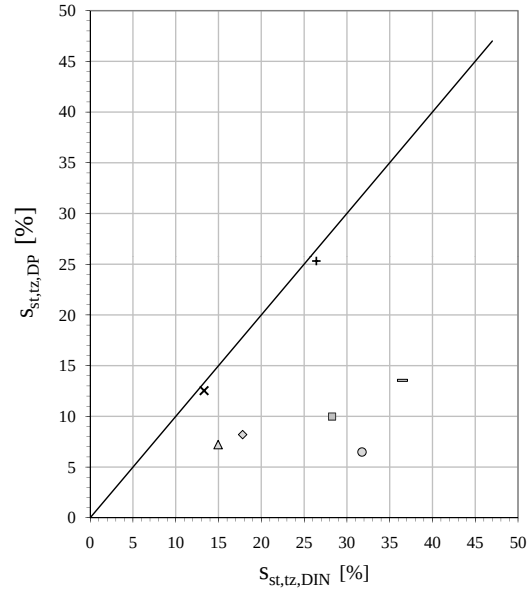


**Abbildung 4.9:** Prüfverfahren mit Druckplatte (*Referenzverfahren*): (a) vorbereitete Oberfläche, (b) aufgebrachter Prüfstempel, (c) Versuch mit Druckplatte und (d) typisches Bruchbild (Prüflächendurchmesser 55 mm)

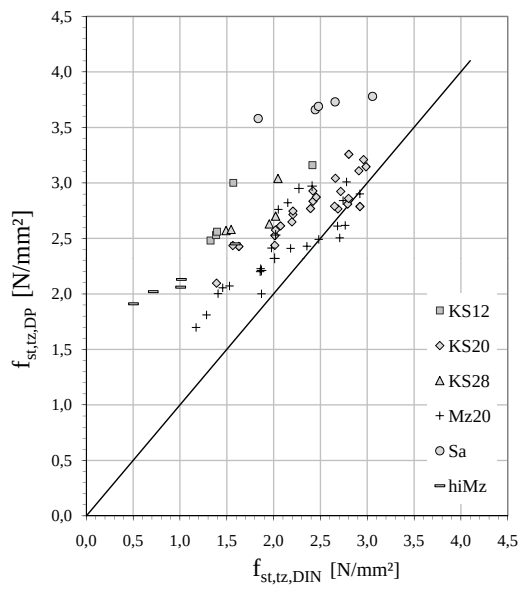
Eine ausführliche Zusammenstellung aller Oberflächenzugfestigkeitswerte findet sich im Anhang A.3. Bei Voruntersuchungen zeigte sich, dass sich die Festigkeiten der Steine von zwei zugleich angelieferten Paletten teils deutlich unterschieden. Aus diesem



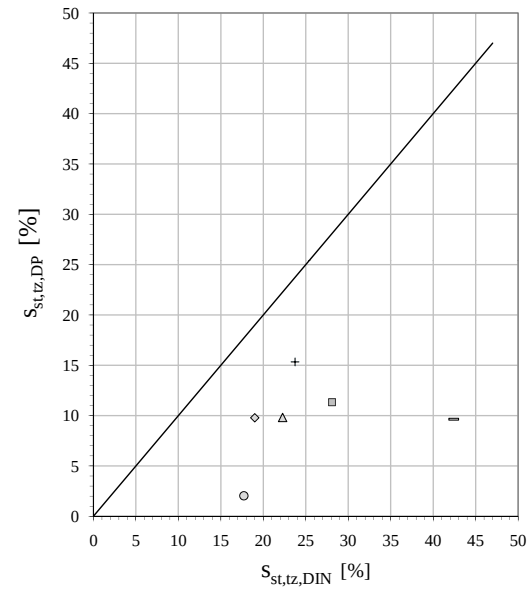
(a)



(b)



(c)



(d)

**Abbildung 4.10:** Vergleich der Oberflächenzugfestigkeiten und Standardabweichungen für die nach *DIN 1048-2* ( $n = 135$ ) und mit *Druckplatte* ( $n = 135$ ) ermittelten Werte, für: (a) und (b) Verwendung des SD330-Klebstoffs sowie (c) und (d) des SP55-Klebstoffs (die Paarbildung der Oberflächenzugfestigkeiten erfolgte - beginnend mit den kleinsten - aufsteigend)

Grund wurden die Steinfestigkeiten jeder Palette bestimmt. Im Folgenden werden diese als *Charge* bezeichnet.

### 4.5 Mörtel

Für die Herstellung der Mauerwerksknoten (vgl. Abs. 6) wurde eine Kalk-Zement-Mörtelmischung der Druckfestigkeitsklasse *M5* nach [DIN EN 998-2] - entspricht *MG IIa* nach [DIN 1053-1] - verwendet. Dieser Mörtel besitzt in der Praxis einen großen Verbreitungsgrad und ist für die Herstellung von Mauerwerkswänden zugelassen. Die Druckfestigkeiten der Mörtel wurden nach [DIN EN 1015-11] an je drei Prismen ermittelt. Die Prüfung erfolgte nach mehr als 28 Tagen. Die so ermittelten Festigkeiten wurden mit  $f_{mo}$  bezeichnet und sind im Anhang A.4 dokumentiert.

### 4.6 Mauerwerk

Die Ermittlung der Mauerwerksdruckfestigkeit kann nach [DIN EN 1052-1] am RI-LEM Körper erfolgen. Alternativ kann diese auch mit den Stein- und Mörteldruckfestigkeiten berechnet werden. Hierzu wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl von empirischen Berechnungsansätzen hergeleitet, wobei sich folgender Ansatz durchgesetzt hat.

$$f_x = a \cdot f_{st,x}^b \cdot f_{mo}^c \quad (4.7)$$

Für Mauerwerk aus Kalksand- und Ziegel-Vollsteinen in Kombination mit Normalmörtel kann nach *Schubert* [Sch01] die mittlere Druckfestigkeit wie folgt berechnet werden:

$$f_x(KS) = 0,70 \cdot \bar{f}_{st,x}^{0,74} \cdot \bar{f}_{mo}^{0,21} \quad (4.8)$$

$$f_x(Mz) = 0,73 \cdot \bar{f}_{st,x}^{0,73} \cdot \bar{f}_{mo}^{0,16} \quad (4.9)$$

Zur Abschätzung der Mauerwerksdruckfestigkeit parallel zu den Lagerfugen schlägt *Glitz* [Gli88] gestützt auf eine Literaturstudie - für Mauerwerk aus Vollsteinen - eine Abminderung der vertikalen Druckfestigkeit um 25% vor.

$$f_y = 0,75 \cdot f_x \quad (4.10)$$

Für die Berechnung der Mauerwerksdruckfestigkeit  $f_\alpha$  nach den Gleichungen 3.6 bis 3.10 werden zudem die Haftscherfestigkeit  $f_v$  und der Reibungsbeiwert  $\mu$  benötigt. Gleichwohl ist zu berücksichtigen, dass die Steine bei der Herstellung der Wandknoten vorgehäst wurden. *Hofmann, Stöckl* [Hof88] geben hierzu, gestützt auf eigene Scherversuche mit vorgehäst verarbeiteten Steinen und der Verwendung eines Normalmörtels MG IIa, für Mauerwerk aus Kalksandsteinen der Steifestigkeitsklassen (SFK) 12 und 28 Haftscherfestigkeiten zwischen 0,28 N/mm<sup>2</sup> bis 0,53 N/mm<sup>2</sup> und Reibungsbeiwerte zwischen 0,67 und 0,71 an. Für Mauerwerk aus Ziegeln der Steifestigkeitsklasse 20 geben die Autoren ein Haftscherfestigkeit von 0,90 N/mm<sup>2</sup> und einen Reibungsbeiwert von 0,71 an. *Dialer et al.* [Dia90] ergänzen dies durch eine Literaturstudie für Mauerziegel der Steifestigkeitsklasse 12 und 28 in Kombination mit einem Normalmörtel MG IIa, wobei sie Haftscherfestigkeiten zwischen 0,05 N/mm<sup>2</sup> bis 0,98 N/mm<sup>2</sup> und Reibungsbeiwerte zwischen 0,65 bis 0,73 angeben. Für die Berechnung der Mauerwerksdruckfestigkeiten wurden die in Tabelle 4.4 enthaltenen Kennwerte verwendet. Der Reibungswinkel  $\varphi$  in den Gleichungen 3.6 bis 3.10 ergibt sich zu  $\tan(\varphi) = \mu$ .

|               | SFK | Mörtel | $\mu$<br>[-] | $f_v$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|---------------|-----|--------|--------------|-------------------------------|
| Kalksandstein | 20  | MG IIa | 0,71         | 0,53                          |
| Mauerziegel   | 20  | MG IIa | 0,73         | 0,90                          |

**Tabelle 4.4:** Reibungsbeiwerte und Haftscherfestigkeiten für die Berechnung der Mauerwerksdruckfestigkeiten der Versuchsserie C



## 5 Endverankerungsversuche am Stein - Serien A und B

Im folgenden Kapitel werden die Vorbereitung, der Aufbau und die Durchführung der Verankerungsversuche am Stein erklärt sowie die Ergebnisse diskutiert. Für die Versuche wurden acht unterschiedliche Steinarten, vier Gelegearten sowie drei Klebstoffe verwendet (Tab. 5.1). Je Materialkombination wurden drei (A17-A73, B1-B18) bzw. anfänglich vier (A1-A16) Versuche durchgeführt. Insgesamt wurden mit den Serien A und B 91 Verankerungsversuche durchgeführt. Mit der Serie A sollten die Verbundeigenschaften der Fügeteile in Abhängigkeit der Steinarten, Klebstoffe und Gelegearten untersucht werden. Die Verbundlänge  $l_v$  (vgl. Abb. 3.10) betrug bei dieser Serie einheitlich 240 mm. Mit der Serie B wurde der Einfluss unterschiedlicher Verbundlängen auf die Verbundbruchkräfte untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Verbundlängen auf 180 mm, 120 mm und 60 mm reduziert. Die Verbundbreite betrug bei beiden Serien 70 mm.

### 5.1 Versuchskörper

Die Herstellung der Versuchskörper erfolgte in einem eigens dafür vorgesehenen Kleberaum. Die Raumtemperaturen betrugen +20°C bis +25°C bei 50% bis 60% relativer Luftfeuchte. Zur Verklebung von Stein und Faserwerkstoff wurde eine Klebevorrichtung entworfen (Abb. 5.1a). Die Steine wurden in dieser mit Füllhölzern fixiert und anschließend mit Druckluft gesäubert. Die Bestandsziegel (hiMz) wurden zusätzlich mit einer Drahtbürste von anhaftenden Mörtelresten befreit. Anschließend wurden mit einem Velour-Roller im zeitlichen Abstand von ca. zwei Minuten zwei Klebstoffschichten auf die Steine aufgetragen und die Gelege auf die Steine aufgelegt. Danach wurden diese mit einem Teflon-Roller in den Klebstoff eingearbeitet (Abb. 5.1b). Abschließend wurde zum Schutz der Fasern eine weitere Klebstoffschicht aufgetragen. Die Versuche wurden nach einer Aushärtezeit von sieben Tagen (SD330, SP55) bzw. 28 Tagen (ZM) durchgeführt.

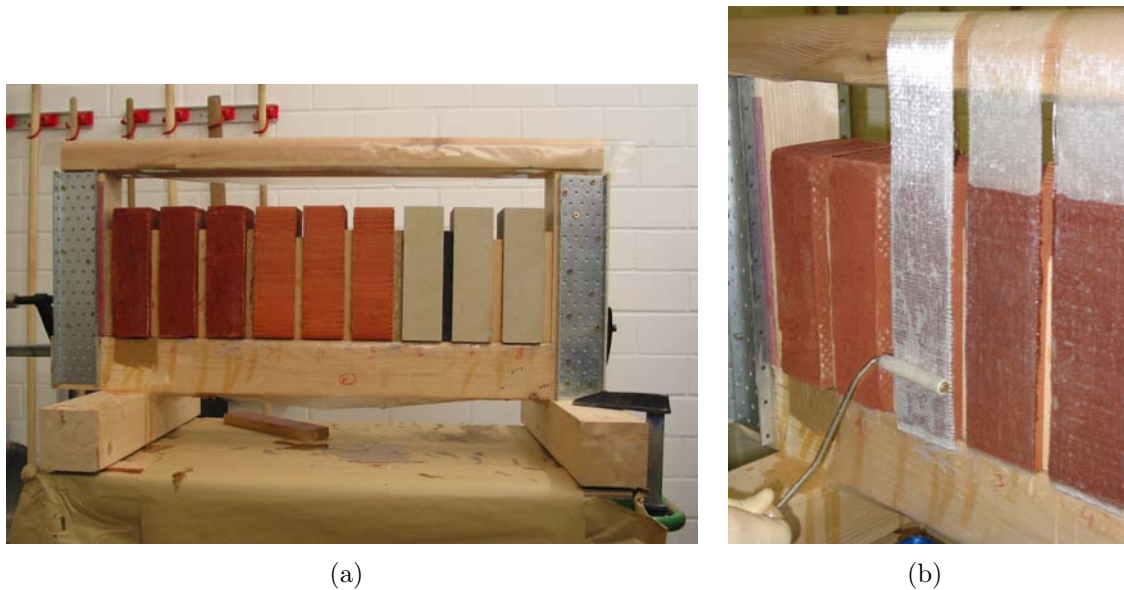
Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass weder für den Klebstoff *SikaDur 330* noch für den *SuP Resin Epoxy 55* die Verwendung eines *Primers* gefordert wird.

| Versuche  | Stein-<br>typ | Stein-<br>charge | Kleb-<br>stoff | Gelege-<br>typ | $b_v$<br>[mm] | $l_v$<br>[mm] |
|-----------|---------------|------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| A1 - A4   | KS20          | I                | SD330          | SW430G         | 70            | 240           |
| A5 - A8   | KS20          | I                | SP55           | SW430G         | 70            | 240           |
| A9 - A12  | KS20          | I                | SD330          | SP90/10G       | 70            | 240           |
| A13 - A16 | KS20          | I                | SP55           | SP90/10G       | 70            | 240           |
| A17 - A19 | KS12          | I                | SD330          | Sa397G         | 70            | 240           |
| A20 - A22 | KS20          | I                | SD330          | Sa397G         | 70            | 240           |
| A23 - A25 | KS28          | I                | SD330          | Sa397G         | 70            | 240           |
| A26 - A28 | Mz12          | I                | SD330          | Sa397G         | 70            | 240           |
| A29 - A31 | Mz20          | I                | SD330          | Sa397G         | 70            | 240           |
| A32 - A34 | Sa            | I                | SD330          | Sa397G         | 70            | 240           |
| A35 - A37 | hiMz          | I                | SD330          | Sa397G         | 65            | 240           |
| A38 - A40 | KS12          | I                | SP55           | Sa397G         | 70            | 240           |
| A41 - A43 | KS20          | I                | SP55           | Sa397G         | 70            | 240           |
| A44 - A46 | KS28          | I                | SP55           | Sa397G         | 70            | 240           |
| A47 - A49 | Mz12          | I                | SP55           | Sa397G         | 70            | 240           |
| A50 - A52 | Mz20          | I                | SP55           | Sa397G         | 70            | 240           |
| A53 - A55 | Sa            | I                | SP55           | Sa397G         | 70            | 240           |
| A56 - A58 | hiMz          | I                | SP55           | Sa397G         | 65            | 240           |
| A59 - A61 | Hlz           | I                | SP55           | Sa397G         | 70            | 240           |
| A62 - A64 | KS20          | III              | SP55           | SP240C         | 70            | 240           |
| A65 - A67 | Mz20          | I                | SP55           | SP240C         | 70            | 240           |
| A68 - A70 | KS20          | III              | ZM             | SP90/10G       | 70            | 240           |
| A71 - A73 | Mz20          | I                | ZM             | SP90/10G       | 70            | 240           |

**Tabelle 5.1:** Übersicht zu Versuchsserie A

| Versuche  | Stein-<br>typ | Stein-<br>charge | Kleb-<br>stoff | Gelege-<br>typ | $b_v$<br>[mm] | $l_v$<br>[mm] |
|-----------|---------------|------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| B1 - B3   | KS20          | I                | SP55           | Sa397G         | 70            | 180           |
| B4 - B6   | KS20          | I                | SP55           | Sa397G         | 70            | 120           |
| B7 - B9   | KS20          | I                | SP55           | Sa397G         | 70            | 60            |
| B10 - B12 | Mz20          | I                | SP55           | Sa397G         | 70            | 180           |
| B13 - B15 | Mz20          | I                | SP55           | Sa397G         | 70            | 120           |
| B16 - B18 | Mz20          | I                | SP55           | Sa397G         | 70            | 60            |

**Tabelle 5.2:** Übersicht zu Versuchsserie B



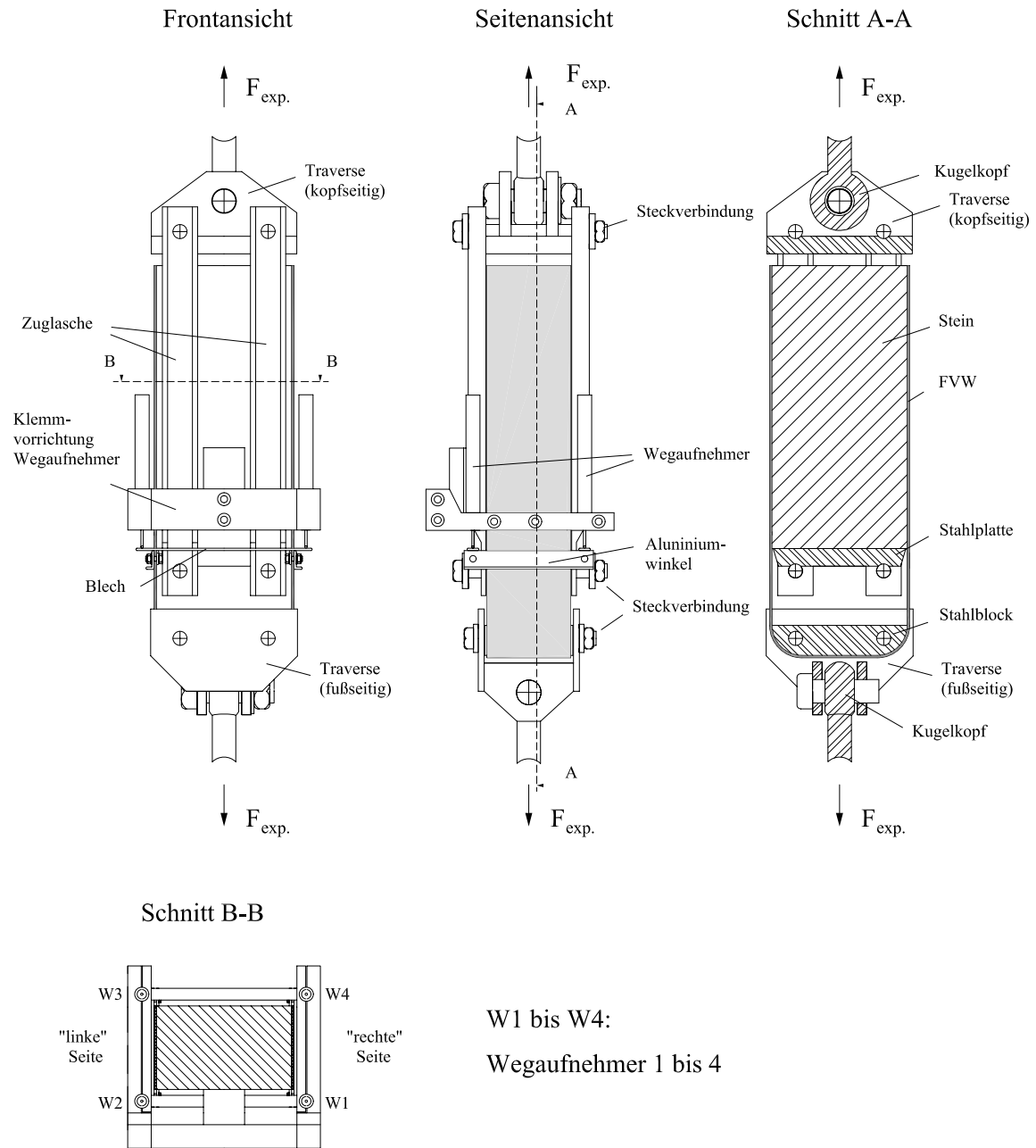
**Abbildung 5.1:** Aufbringen der Gelege auf die Steinlängsseiten: (a) vorbereitete Steine und (b) Einarbeiten der Gelege in den Klebstoff mittels Teflon-Roller

## 5.2 Versuchsaufbau

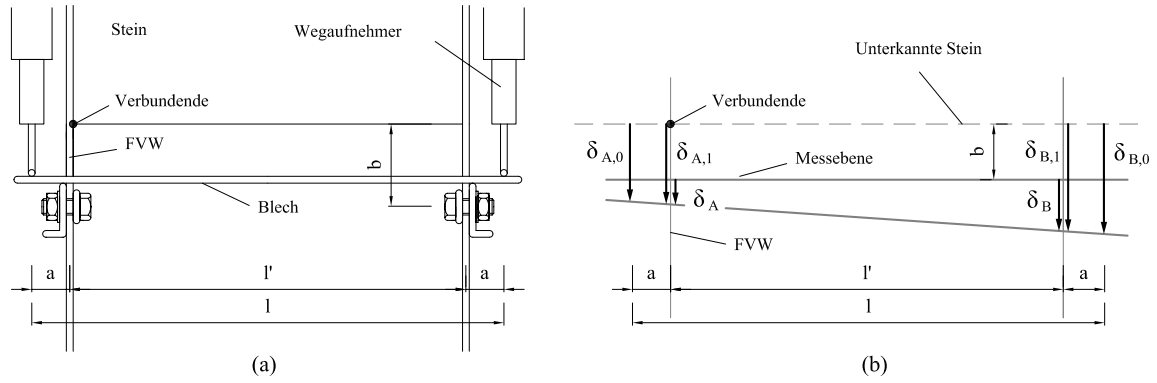
Aufbauend auf die Erfahrungen von *Vogel* [Vog00], wurde ein neuer Versuchsaufbau entwickelt. Dieser sollte eine ausreichende Steifigkeit aufweisen, eine zwängungsfreie Einleitung der Schubkräfte in die Mauersteine garantieren und die Erfassung der Verformung zwischen Faserverbundwerkstoff und Stein an der Verbundfuge ermöglichen.

Die Versuchskörper wurden stirnseitig auf eine Stahlplatte (Abb. 5.2) aufgelagert. Diese wurde durch zwei Steckverbindungen mit vier Zuglaschen verbunden. Am Kopf des Versuchskörpers wurden die Zuglaschen an eine Traverse angeschlossen, die wiederum gelenkig mit dem Prüfraumen (INSTRON 6025) verbunden wurde. Fußseitig wurden die Faserverbundwerkstoffe (FVW) umgelenkt und mit einer weiteren Traverse gelenkig an den Prüfraumen angeschlossen. Durch ein Auseinanderziehen der kopf- und fußseitigen Traversen wurden letztlich Zugkräfte auf die Faserverbundwerkstoffe aufgebracht.

Die messtechnische Erfassung der Verformungen zwischen Faserverbundwerkstoffen und Steinen erwies sich anfänglich als schwierig. Da die Gesamtverformung bis zum Verbundbruch in einem Bereich von ca. 2 mm lag, musste die Messeinrichtung sehr genau arbeiten. Eine Konstruktion mit an den Faserverbundwerkstoffen angebrachten Aluminiumwinkeln, auf die zwei Bleche aufgelegt wurden, ermöglichte ab Versuch A17 eine genaue Erfassung der Verformungen. Die Wegaufnehmer werden in eine Klemmvorrichtung eingespannt, die wiederum am Stein befestigt wurde (Abb. 5.2).



**Abbildung 5.2:** Versuchsaufbau: Verankerungsversuche am normalformatigen Stein (Versuchsserien A und B)



**Abbildung 5.3:** Umrechnung der Verformungsmesswerte: (a) Messeinrichtung zur Ermittlung der Relativverformung zwischen Faserverbundwerkstoff (FVW) und Stein, (b) Berechnung der Verformung der Fügeiteile

Andere Messeinrichtungen führten zu teils widersprüchlichen und nicht verwertbaren Ergebnissen (zuerst negative, danach positive Verformungen).

Mit der in Abbildung 5.3 gezeigten Messeinrichtung lassen sich die Verformungen der Fügeiteile zuverlässig ermitteln. Jedoch werden mit den vier angebrachten Wegaufnehmern (W1 bis W4) Verformungen im Abstand  $a$  (neben den Faserverbundwerkstoffen) gemessen. Diese Verformungen sind mit  $\delta_{A,0}$  und  $\delta_{B,0}$  bezeichnet (Gl. 5.1 bis 5.6). Eine Umrechnung der Messwerte auf die Mittelachse der Faserverbundwerkstoffe kann mit einer Dreisatzrechnung erfolgen. Es ergeben sich  $\delta_{A,1}$  und  $\delta_{B,1}$ . Da sich die Messpunkte der Wegaufnehmer im Abstand  $b$  zur Unterkante der Steine befinden, die Relativverformung jedoch am Verbundende ( $x = l_v$ ) gemessen werden sollte, mussten die Messwerte um den Dehnungsanteil der Faserverbundwerkstoffe reduziert werden. Somit ergeben sich die Relativverschiebungen  $\delta_A$  bzw.  $\delta_B$  zwischen Faserverbundwerkstoff und Stein am Verbundende (Unterkante Stein) zu:

$$\delta_{A,0} = \frac{\delta_{W2} + \delta_{W3}}{2} \quad (5.1)$$

$$\delta_{A,1} = \delta_{A,0} + \frac{a}{l} \cdot (\delta_{B,0} - \delta_{A,0}) \quad (5.2)$$

$$\delta_A = \delta_{A,1} - \frac{F_{f,exp.} \cdot b}{t_f \cdot b_f \cdot E_f} \quad (5.3)$$

$$\delta_{B,0} = \frac{\delta_{W1} + \delta_{W4}}{2} \quad (5.4)$$

$$\delta_{B,1} = \delta_{B,0} - \frac{a}{l} \cdot (\delta_{B,0} - \delta_{A,0}) \quad (5.5)$$

$$\delta_B = \delta_{B,1} - \frac{F_{f,exp.} \cdot b}{t_f \cdot b_f \cdot E_f} \quad (5.6)$$

mit:

|                                 |                                                                            |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $\delta_{(W1 \text{ bis } W4)}$ | gemessene Verformungen                                                     |
| $\delta_{A,0}, \delta_{B,0}$    | Verformung je Versuchskörperseite                                          |
| $\delta_{A,1}, \delta_{B,1}$    | auf die Mittelachse der FVW bezogene Verformung                            |
| $\delta_A, \delta_B$            | Relativverformung zwischen FVW und Stein am Verbundende                    |
| $a, b, l$                       | Abstände: $a = 12 \text{ mm}$ , $b = 25 \text{ mm}$ , $l = 140 \text{ mm}$ |

Die Messdaten (Kräfte, Wege, Dehnungen) wurden mit einem Messverstärker des Typs *MGC Plus* der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik erfasst und mit dem Computerprogramm *CATMAN* verarbeitet und aufgezeichnet. Eine beispielhafte Überprüfung der Versuchsanordnung am Versuch A54 ergab, dass die Kräfte gleichmäßig in die zwei vorhandenen Verbundfugen eingeleitet wurden (Abb. 5.4b), was sich am deckungsgleichen Anstieg der Kraft-Dehnungskurven ableiten lässt. Somit ergibt sich die Zugkraft der Faserverbundwerkstoffe zu:

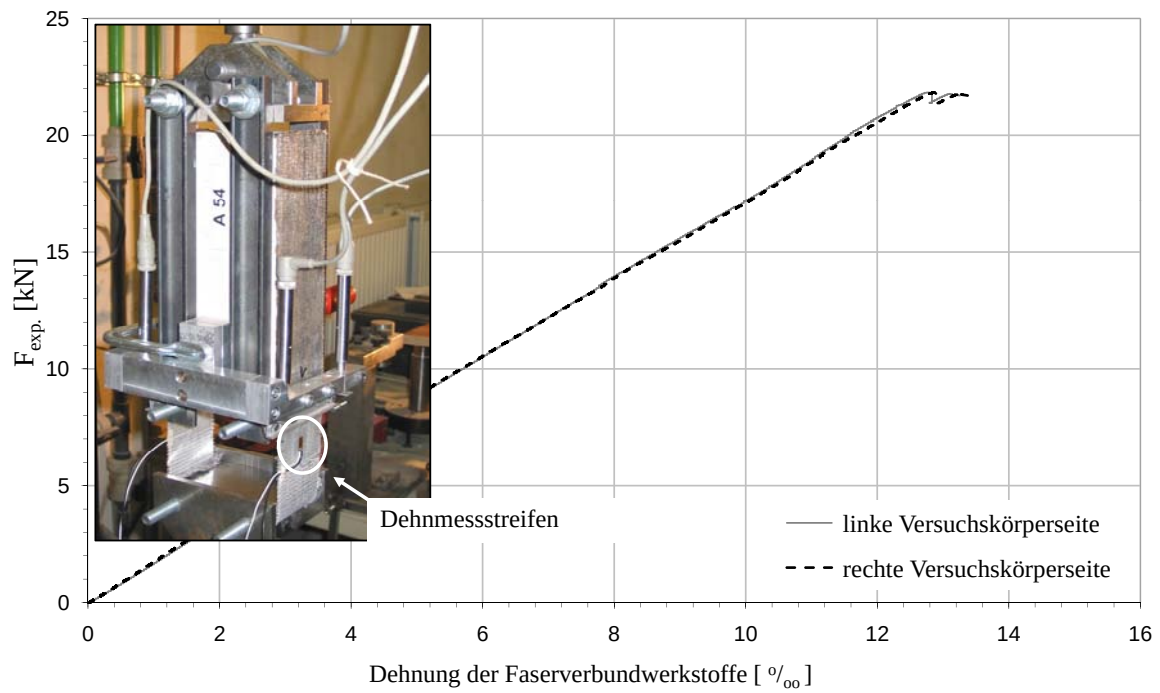
$$F_{f,exp.} = \frac{F_{exp.}}{2} \quad (5.7)$$

Die Versuche wurden weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 0,35 mm/min. durchgeführt.

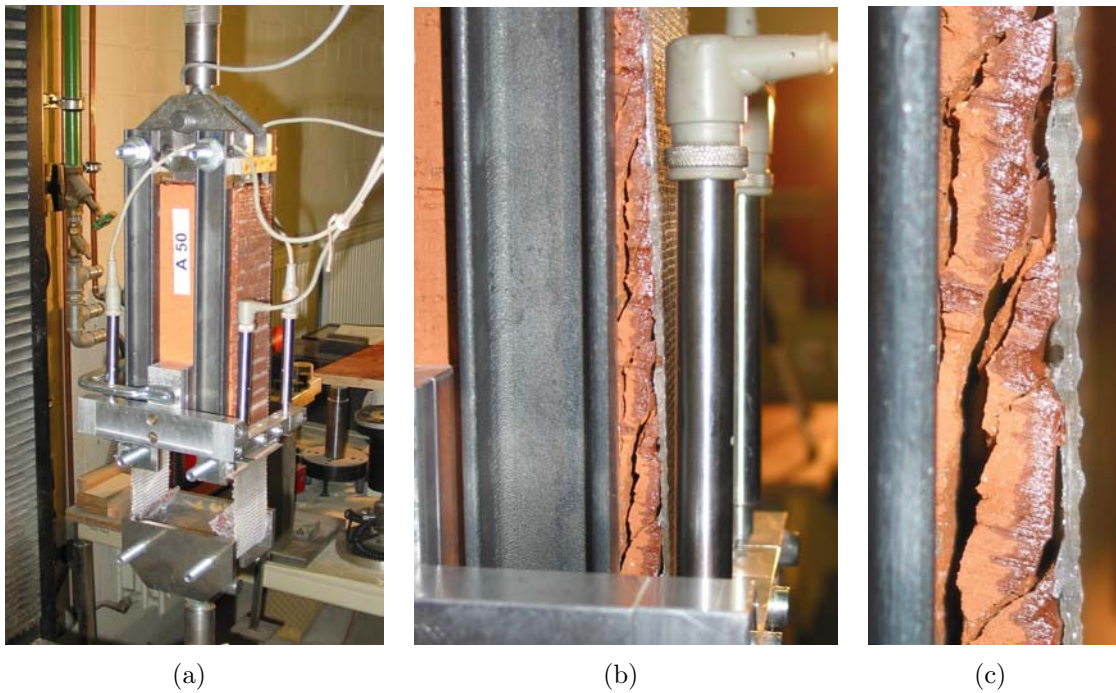
## 5.3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Versuchsserien A und B aufbereitet und diskutiert. Es werden Beobachtungen und Besonderheiten, die die Versuchsdurchführung betreffen, aufgezeigt sowie Schlussfolgerungen gezogen. Eine Übersicht der Ergebnisse zur Serie A wird in den Tabellen 5.3 und 5.4 sowie im Anhang A.5 gegeben. Die Ergebnisse der Serie B finden sich in Tabelle 5.5 und Anhang A.6.

Mit Erreichen der halben Verbundbruchkräfte waren durchgängig bei allen Versuchen erste Knistergeräusche wahrzunehmen. Diese steigerten sich kontinuierlich bis zur Erstrissbildung (Entkoppelungsbeginn) zwischen den Fügeteilen am Verbundende ( $x = l_v$ ). Besonders ausgeprägt waren die Knistergeräusche bei den mit den Mauerziegeln durchgeführten Versuchen. Mit Entkoppelungsbeginn stellte sich bei den Kalksandsteinen keine und bei den Mauerziegeln eine geringfügige Steigerung der Verbundkräfte ein. Dies ging einher mit einer kontinuierlichen Steigerung der Relativverschiebung zwischen Faserverbundwerkstoff und Stein sowie einer Risswanderung



**Abbildung 5.4:** Versuch A54: Kraft-Dehnungs-Diagramm der Faserverbundwerkstoffe



**Abbildung 5.5:** (a) Versuchskörper, (b) Rissbild mit Ausbildung von „Risszähnen“ und (c) Detail

| Versuch | $F_{u,exp.}$<br>[kN] | $\bar{F}_{u,exp.}$<br>[kN] | $s_{\bar{x}}$<br>[kN] | Versuch | $F_{u,exp.}$<br>[kN] | $\bar{F}_{u,exp.}$<br>[kN] | $s_{\bar{x}}$<br>[kN] |
|---------|----------------------|----------------------------|-----------------------|---------|----------------------|----------------------------|-----------------------|
| A1      | 10,65                | 17,70                      | 0,33                  | A9      | 10,99                | 16,18                      | 0,29                  |
| A2      | 11,37                |                            |                       | A10     | 9,65                 |                            |                       |
| A3      | 10,48                |                            |                       | A11     | 9,21                 |                            |                       |
| A4      | 10,66                |                            |                       | A12     | 9,70                 |                            |                       |
| A5      | 17,99                |                            |                       | A13     | 16,18                |                            |                       |
| A6      | 17,24                |                            |                       | A14     | 15,76                |                            |                       |
| A7      | 17,74                |                            |                       | A15     | 16,40                |                            |                       |
| A8      | 17,86                |                            |                       | A16     | 16,37                |                            |                       |
| A17     | 9,90                 | 14,10                      | 0,04                  | A35     | 14,34                | 15,73                      | 0,23                  |
| A18     | 9,16                 |                            |                       | A36     | 17,88                |                            |                       |
| A19     | 9,68                 |                            |                       | A37     | 14,36                |                            |                       |
| A20     | 9,54                 |                            |                       | A38     | 13,24                |                            |                       |
| A21     | 10,58                |                            |                       | A39     | 14,12                |                            |                       |
| A22     | 9,76                 |                            |                       | A40     | 13,68                |                            |                       |
| A23     | 14,10                |                            |                       | A41     | 15,72                |                            |                       |
| A24     | 14,14                |                            |                       | A42     | 15,96                |                            |                       |
| A25     | 14,06                | 15,89                      | 1,86                  | A43     | 15,50                | 17,97                      | 1,17                  |
| A26     | 16,72                |                            |                       | A44     | 19,16                |                            |                       |
| A27     | 17,18                |                            |                       | A45     | 17,92                |                            |                       |
| A28     | 13,76                |                            |                       | A46     | 16,82                |                            |                       |
| A29     | 15,44                |                            |                       | A47     | 22,58                |                            |                       |
| A30     | 16,00                |                            |                       | A48     | 20,84                |                            |                       |
| A31     | 14,46                |                            |                       | A49     | 22,96                |                            |                       |
| A32     | 17,10                |                            |                       | A50     | 18,42                |                            |                       |
| A33     | 17,48                | 17,67                      | 0,69                  | A51     | 17,38                | 17,68                      | 0,64                  |
| A34     | 18,44                |                            |                       | A52     | 17,24                |                            |                       |

**Tabelle 5.3:** Ergebnisse zur Versuchsserie A (Tabelle 1/2)

| Versuch | $F_{u,exp.}$<br>[kN] | $\bar{F}_{u,exp.}$<br>[kN] | $s_{\bar{x}}$<br>[kN] | Versuch | $F_{u,exp.}$<br>[kN] | $\bar{F}_{u,exp.}$<br>[kN] | $s_{\bar{x}}$<br>[kN] |
|---------|----------------------|----------------------------|-----------------------|---------|----------------------|----------------------------|-----------------------|
| A53     | 23,66                | 23,77                      | 1,98                  | A65     | 28,96                | 27,81                      | 1,08                  |
| A54     | 25,80                |                            |                       | A66     | 27,65                |                            |                       |
| A55     | 21,84                |                            |                       | A67     | 26,82                |                            |                       |
| A56     | 18,76                |                            |                       | A68     | 3,10                 |                            |                       |
| A57     | 20,02                |                            |                       | A69     | 3,98                 |                            |                       |
| A58     | 20,94                | 19,91                      | 1,09                  | A70     | 5,38                 | 4,15                       | 1,15                  |
| A59     | 12,55                |                            |                       | A71     | 5,50                 |                            |                       |
| A60     | 11,57                |                            |                       | A72     | 5,66                 |                            |                       |
| A61     | 10,21                |                            |                       | A73     | 6,40                 |                            |                       |
| A62     | 23,68                |                            |                       |         |                      |                            |                       |
| A63     | 25,74                | 25,24                      | 1,37                  |         |                      |                            |                       |
| A64     | 26,29                |                            |                       |         |                      |                            |                       |

**Tabelle 5.4:** Ergebnisse zur Versuchsserie A (Tabelle 2/2)

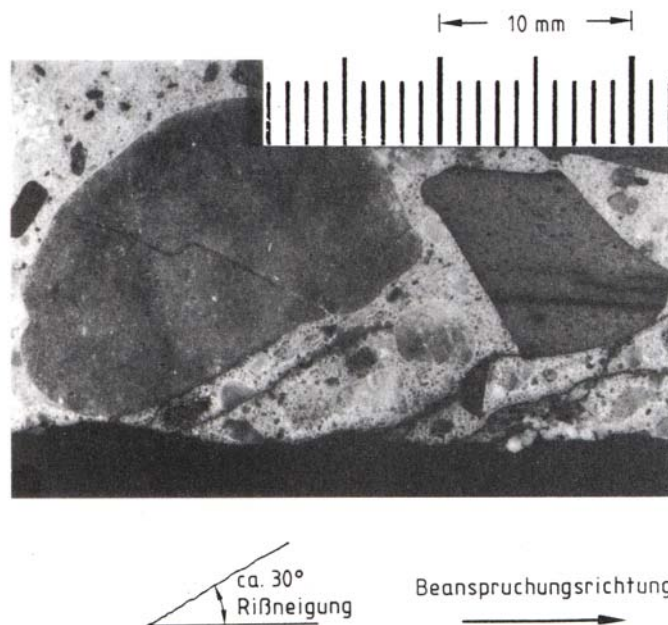
| Versuch | $F_{u,exp.}$<br>[kN] | $\bar{F}_{u,exp.}$<br>[kN] | $s_{\bar{x}}$<br>[kN] | Versuch | $F_{u,exp.}$<br>[kN] | $\bar{F}_{u,exp.}$<br>[kN] | $s_{\bar{x}}$<br>[kN] |
|---------|----------------------|----------------------------|-----------------------|---------|----------------------|----------------------------|-----------------------|
| B1      | 14,95                | 15,05                      | 0,60                  | B10     | 15,93                | 16,95                      | 3,15                  |
| B2      | 15,69                |                            |                       | B11     | 20,48                |                            |                       |
| B3      | 14,51                |                            |                       | B12     | 14,44                |                            |                       |
| B4      | 15,58                |                            |                       | B13     | 14,45                |                            |                       |
| B5      | 15,72                |                            |                       | B14     | 17,25                |                            |                       |
| B6      | 14,53                | 15,28                      | 0,65                  | B15     | 14,10                | 15,27                      | 1,73                  |
| B7      | 14,32                |                            |                       | B16     | 16,47                |                            |                       |
| B8      | 13,63                |                            |                       | B17     | 13,13                |                            |                       |
| B9      | 13,94                |                            |                       | B18     | 13,58                |                            |                       |

**Tabelle 5.5:** Ergebnisse zur Versuchsserie B

zum Verbundbeginn ( $x = 0$ ). Hierbei konnten drei Stadien vom intakten Verbund hin zur vollständigen Entkoppelung beobachtet werden:

1. Intakter Verbund zwischen Faserverbundwerkstoff und Stein
2. Zwischenstadium, Ausbildung von Rissen und „Risszähnen“ im Stein
3. Vollständige Entkoppelung zwischen Faserverbundwerkstoff und Stein

In Abbildung 5.5c ist deutlich die Ausbildung von *Risszähnen* zu erkennen, wobei die Anfangsneigung zur Verbundfläche zwischen ca.  $10^\circ$  und  $30^\circ$  liegt. Selbiges beobachtete *Holzenkämpfer* [Hol94] zuvor schon bei Endverankerungsuntersuchungen an Betonkörpern. Da die Risse den Verlauf der Hauptdruckrichtung anzeigen, ist die Rissbildung auf ein Hauptzugversagen der oberflächennahen Steinbereiche zurückzuführen.



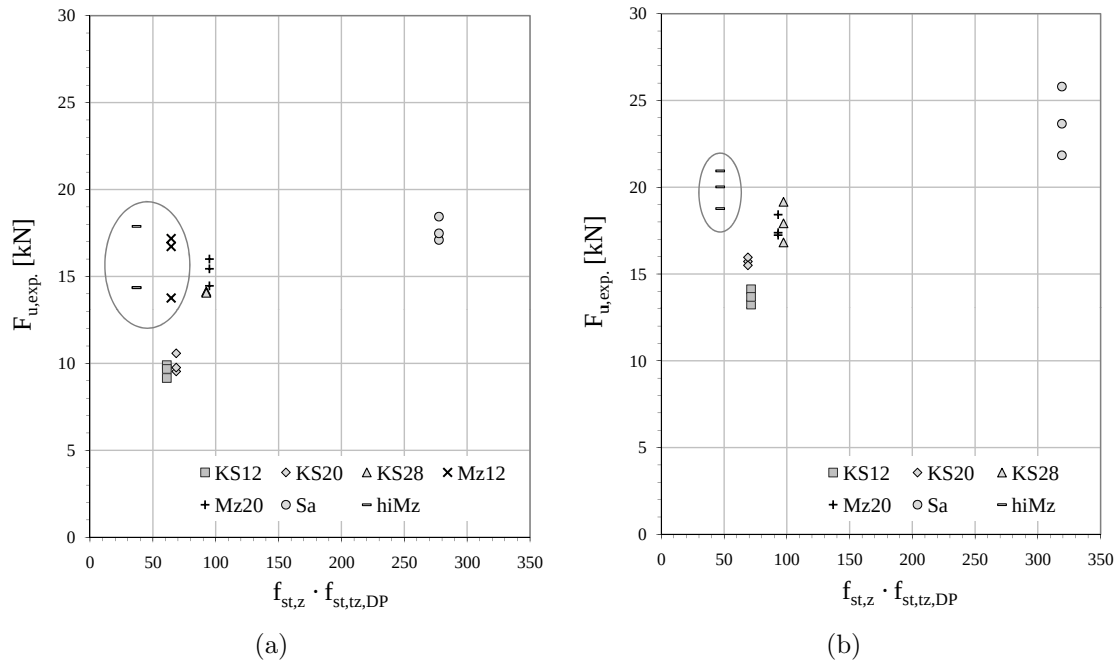
**Abbildung 5.6:** Rißbildung im oberflächennahen Beton, aus [Hol94]

Bei den Untersuchungen konnte beobachtet werden, dass die Entkopplung zwischen Faserverbundwerkstoff und Stein bis auf eine Restverbundlänge von ca. 70 mm eintrat. Im Anschluss trat das Verbundversagen schlagartig als *Kohäsionsbruch* infolge Hauptzugversagen der oberflächennahen Steinbereiche ein.

### 5.3.1 Einfluss der Mauersteine

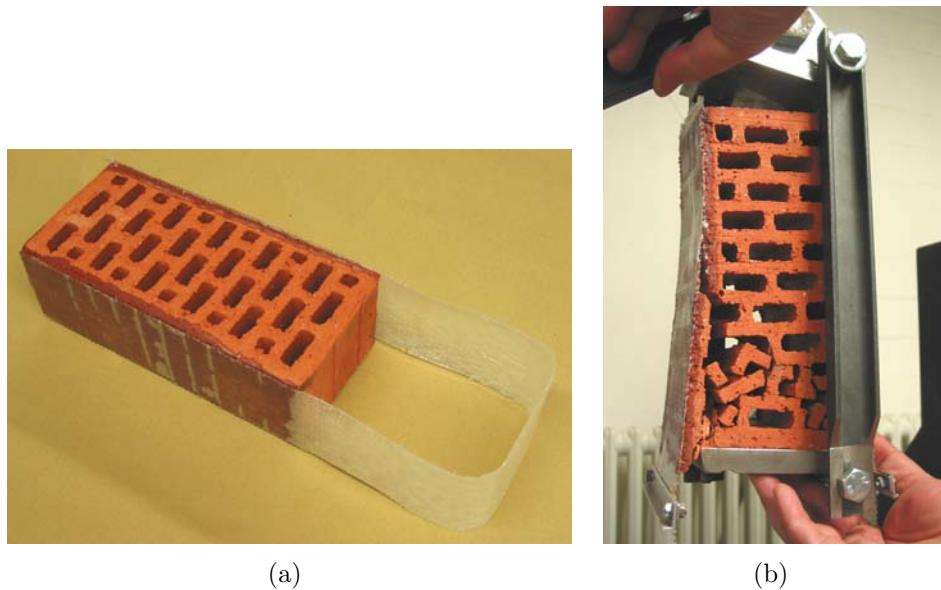
Bei den Versuchen A17 bis A37 und A38 bis A58 wurden einzig die Klebstoffe (SD330, SP55) variiert, sodass sich hier jeweils der Einfluss der Steinfestigkeiten auf die Ver-

bundbruchkräfte untersuchen lässt. Aus Gleichung 3.60 geht hervor, dass sich die für den Verankerungsnachweis erforderliche Bruchenergie aus dem Produkt der Steifigkeiten berechnet. Aus diesem Grund wurden in Abbildung 5.7 die Verbundbruchkräfte mit Bezug zum Produkt aus der Druck-  $f_{st,z}$  und der Oberflächenzugfestigkeit  $f_{st,tz,DP}$  der Steine aufgetragen. Hieraus wird deutlich, dass mit zunehmender Festigkeit die Verbundbruchkräfte zunehmen. Die Bestandsziegel (hiMz) und die Mauerziegel (Mz12) scheinen hier eine Ausnahme zu bilden. Dies ist damit zu erklären, dass sowohl der Mauerziegel (Mz12) als auch der Bestandsziegel (hiMz) eine *poröse* Oberflächenstruktur aufweisen, welche ein Eindringen der Klebstoffe in die Steine begünstigt. Dies führt - da die Zugfestigkeit der Klebstoffe um das 10-fache höher ist als die der Steine - zu einer Oberflächenvergütung und somit zu einer höheren Verbundtragfähigkeit. Als Fazit ist hieraus zu entnehmen, dass sich an Mauerwerk mit *porösen* Steinoberflächen, in Abhängigkeit zu den Festigkeiten, höhere Verbundtragfähigkeiten erreichen lassen als bei Mauersteinen mit dichterem Gefüge.



**Abbildung 5.7:** Verbundbruchkräfte in Bezug zum Produkt der Steifigkeiten für: (a) SD330 Klebstoff, Versuche A17-A37 und (b) SP55 Klebstoff, Versuche A38-A58

Mit drei Versuchen wurde das Verbundverhalten am Hochlochziegel untersucht (Abb. 5.8). Hier trat, im Gegensatz zum Kohäsionsversagen der vorangegangenen Versuche, ein Steindruckversagen ein. Dies zeigt, dass neben der Verbundbemessung auch der Nachweis auf Steindruckversagen maßgebend werden kann. Der Nachweis für diese Versagensform kann am Wandknoten mit Anwendung der Theorie der Spannungsfelder (Abs. 3.1 und 7) erfolgen.

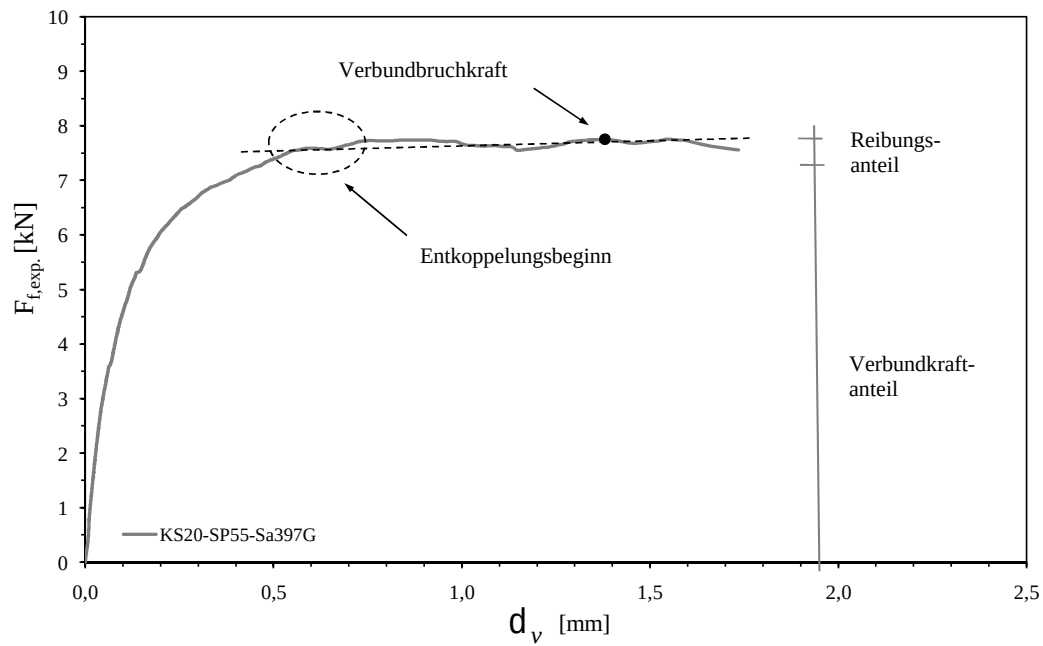


**Abbildung 5.8:** Versuche A59 bis A61: (a) Versuchskörper und (b) Bruchzustand

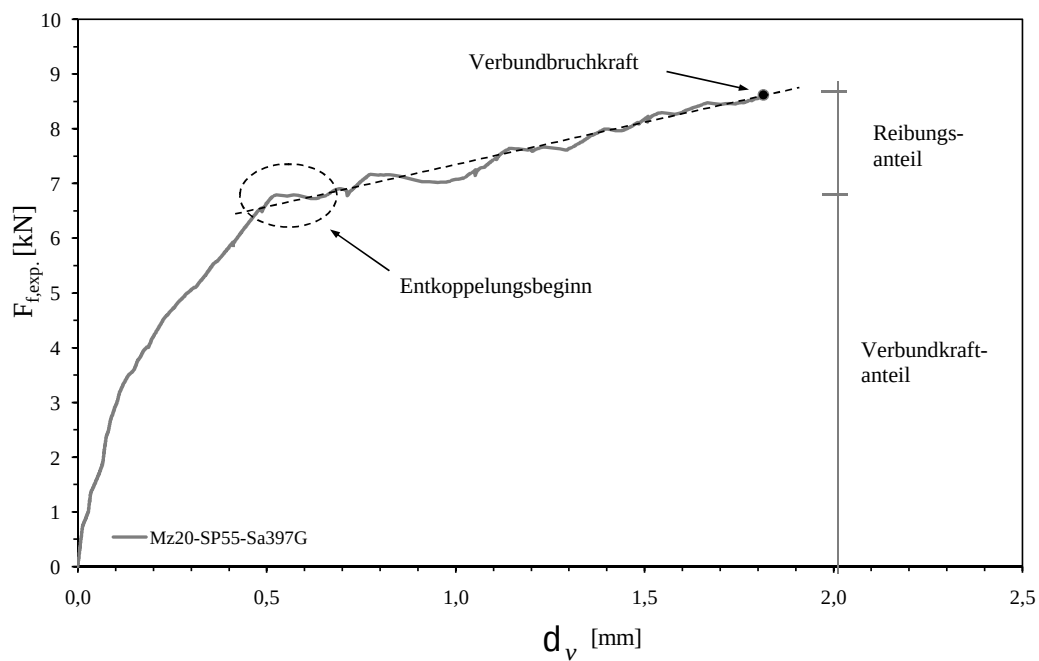
In den Abbildungen 5.10 und 5.9 sind beispielhaft zwei typische an der Verbundfuge gemessene Verbundkraft-Relativverschiebungs-Kurven dargestellt (weitere in Anhang A.5). Hier zeigt sich, dass sich das Verformungsverhalten im Wesentlichen in drei Abschnitte unterteilen lässt. In einen nahezu linearen Anstiegsbereich, einen Abschnitt mit einem flacheren Kräftezuwachs oder sogar plateauförmigen Verlauf und einen Übergangsbereich dazwischen. Mit Eintritt des Entkoppelungsbeginns ist die am Mauerstein abtragbare Verbundkraft erreicht. Eine Verbundkraftsteigerung kann in der Folge einzig durch einen *Reibungsanteil* zwischen Faserverbundwerkstoff und Stein mobilisiert werden. *Niedermeier* [Nie00] erwähnt dieses Verhalten im Zusammenhang mit Verbundversuchen zwischen CFK-Lamellen und Beton. *Aiello et al.* [Aie03] (Abs. 2.2.2) beobachteten bei Verbundversuchen an Mauersteinen ein Ansteigen der Verbundkräfte nach Entkoppelungsbeginn, wobei sie dieses Phänomen als „friction contribution“, also Reibungsanteil bezeichneten.

### 5.3.2 Einfluss der Klebstoffe

*Ehsani* [Ehs95] und *Vogel* [Vog00] beobachteten ein Ansteigen der Verbundtragfähigkeiten bei Verwendung eines niedrigviskosen (Verarbeitungszustand) Klebstoffs. Dieser Beobachtung wurde mit den Versuchen A1 bis A58 unter Verwendung zweier unterschiedlicher Epoxidharzklebstoffe (SD330, SP55) nachgegangen. Es zeigte sich über die Versuche hinweg ein deutlicher Einfluss der Epoxidharzklebstoffe auf die Verbundbruchkräfte (Abb. 5.11). Der niedrigviskose Klebstoff SP55 führte, unabhängig vom verwendeten Mauerstein und Faserwerkstoff, zu im Mittel ca. 40% und bis zu

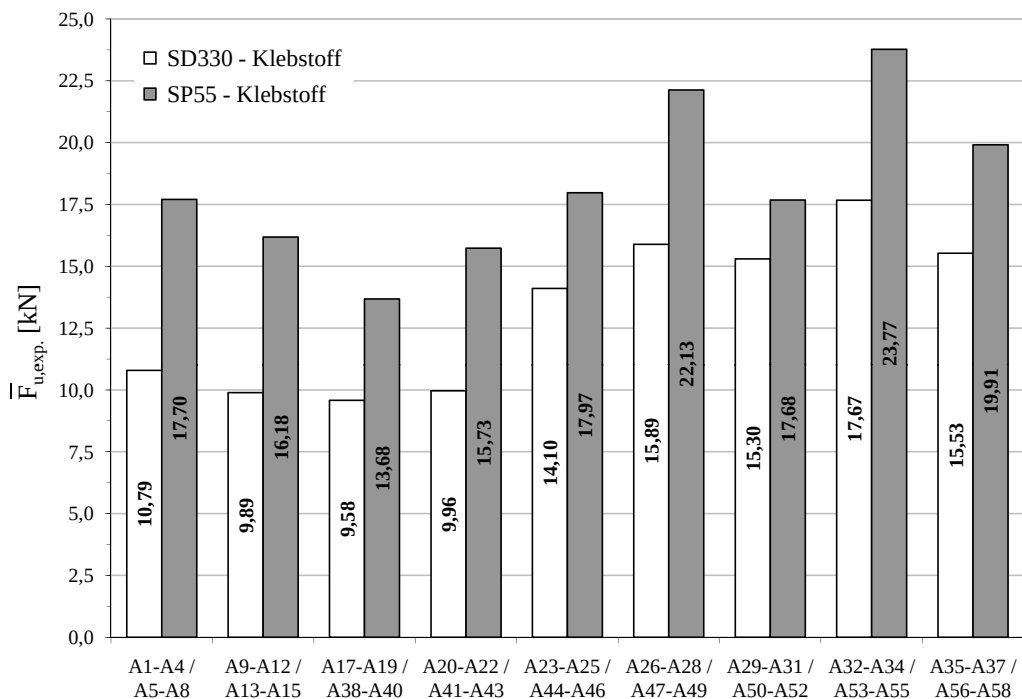


**Abbildung 5.9:** Versuch A41 (KS20): typische Verbundkraft- Relativverformungskurve



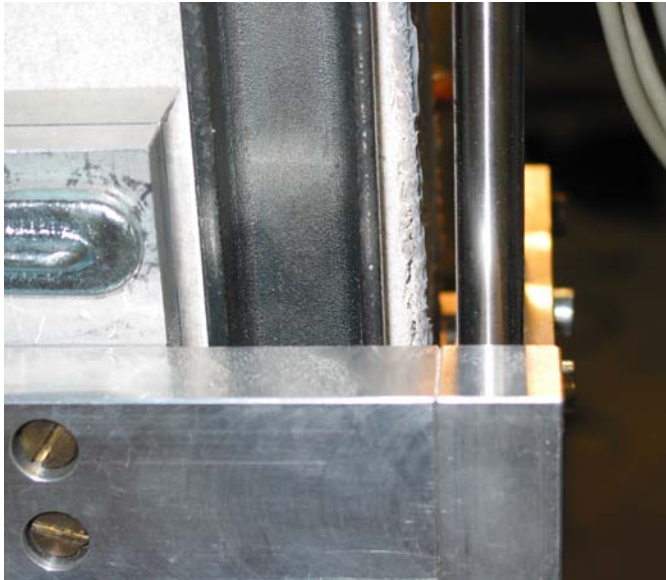
**Abbildung 5.10:** Versuch A50 (Mz20): typische Verbundkraft- Relativverformungskurve

maximal ca. 60% (Versuche A1-A8) höheren Verbundbruchkräften. Unterschiede im Bruchverhalten waren bei der Versagenstiefe im Stein und der Größe der *Risszähne* zu beobachten (Abb. 5.12). Die Tiefe - zur Steinoberfläche - in der das Versagen eintrat, betrug beim SD330 Klebstoff im Mittel ca. 2 mm und beim SP55 Klebstoff ca. 6 mm. Eine Erklärung könnte sein, dass der SP55 Klebstoff aufgrund seiner - gegenüber dem SD330 Klebstoff geringeren Viskosität - besser in der Lage ist, die Steinoberflächen zu benetzen, was nach *Habenicht* [Hab02] zu einer stärkeren *Mechanischen Adhäsion* zwischen Stein und Faserverbundwerkstoff führt. Gleichwohl kann die Anwendung des niedrigviskosen Klebstoffs (SP55) zu einer Oberflächenvergütung führen. Als Konsequenz hieraus sollten niedrigviskose Klebstoffe, sofern sie sich baupraktisch sinnvoll anwenden lassen, höherviskosen Klebstoffen vorgezogen werden.



**Abbildung 5.11:** Mittlere Verbundbruchkräfte in Abhängigkeit vom verwendeten Epoxidharzklebstoff

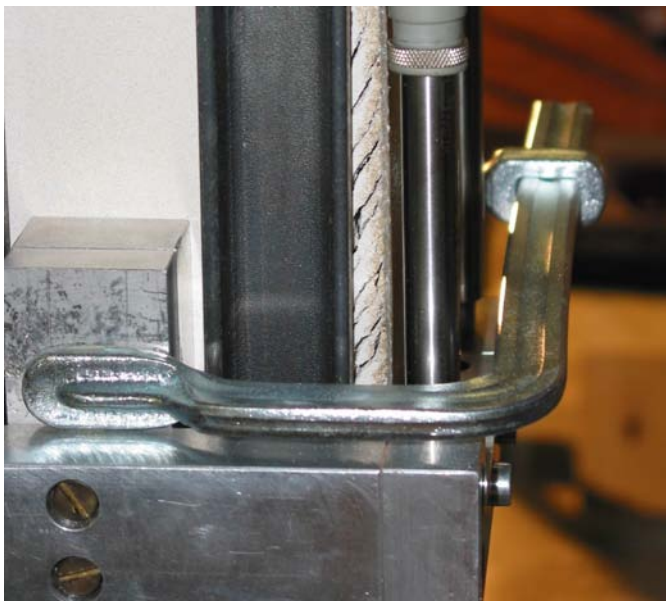
In zwei Versuchsreihen (A68-A70 und A71-A73) wurden Glasfasergelege mit hochfesten Mörteln auf Kalksandsteinen und Mauerziegeln verklebt (Abb. 5.13). Zur Verbesserung des Verbundes wurden die Steinoberflächen gesandstrahlt. Das Versagen kündigte sich bei allen Versuchen als *Adhäsionsbruchversagen* zwischen dem Faserverbundwerkstoff und der Mörtelschicht an. In der Folge trat ein Versagen der Matrix ein. Die erreichten Verbundbruchkräfte sind im Vergleich zu den mit Epoxidharzklebstoffen verklebten Glasfasergelegen um ein Vielfaches geringer (vgl. Tab. 5.4). Nach Auffassung des Autors könnte der Verbund verbessert werden, indem man bei der Mörtelrezeptur (vgl. Abs. 4.2) auf den Quarzsand als Zuschlagsstoff verzichtet. Bei



(a)



(b)



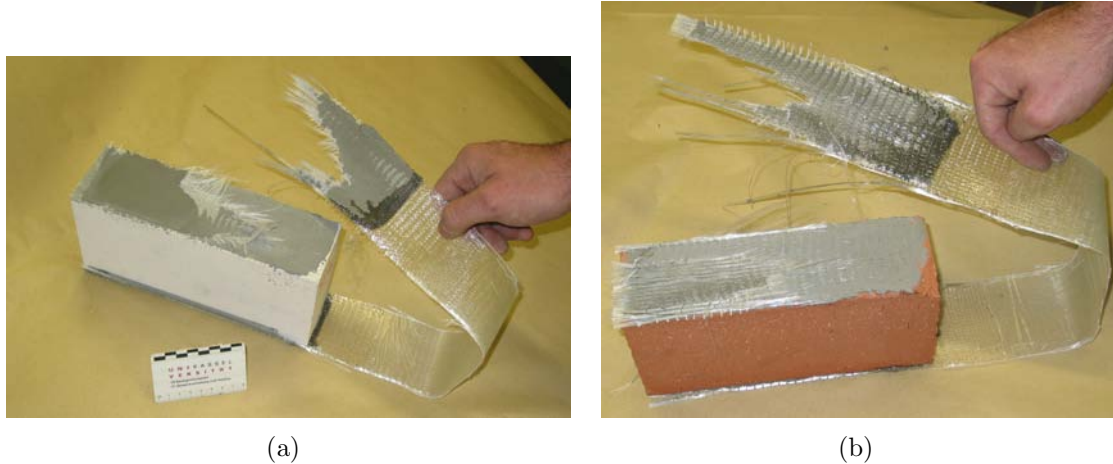
(c)



(d)

**Abbildung 5.12:** Risszähne im Stadium 2: (a), (b) Versuch A23 - SD330 Klebstoff und (c), (d) Versuch A41 - SP55 Klebstoff

Verbunduntersuchungen von *Wallner* (vgl. Abs. 2.2.3) erwies sich auch ein kunststoffmodifizierter Zementmörtel als geeignet.



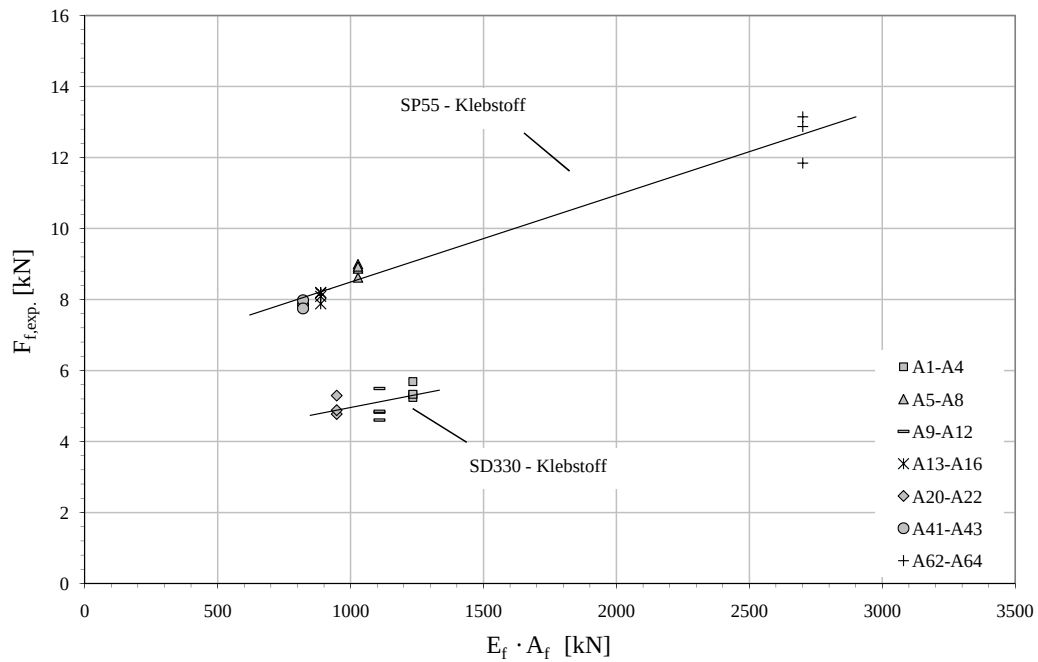
**Abbildung 5.13:** typische Bruchbilder von mit hochfesten Mörteln auf Steinen verklebten Glasfasergelegen: (a) Versuch A68 (KS20) und (b) Versuch A72 (Mz20)

### 5.3.3 Einfluss der Faserverbundwerkstoffe

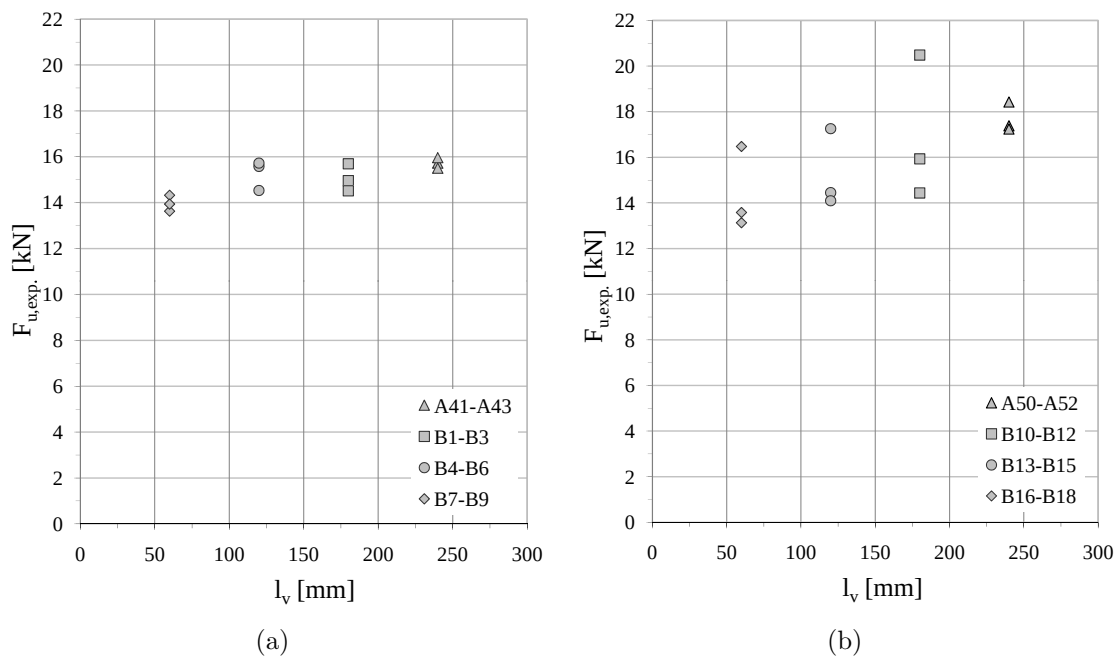
In Abbildung 5.14 ist augenscheinlich ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen den experimentell ermittelten Verbundbruchkräften und den Dehnsteifigkeiten der Faserverbundwerkstoffe erkennbar. Höhere Dehnsteifigkeiten der Faserverbundwerkstoffe führen zu einer Steigerung der aktivierten Verbundlänge in Richtung des unbeanspruchten Endes des Verbundkörpers. Die am Faserverbundwerkstoff angreifenden Kräfte können auf einer größeren Länge abgetragen werden. Dies führt zu einer Steigerung der Verbundbruchkräfte. Somit kann prinzipiell festgehalten werden, dass höhere Dehnsteifigkeiten der Faserverbundwerkstoffe auch zu höheren Verbundbruchkräften führen. Dies lässt sich sowohl durch eine Erhöhung der Elastizitätsmoduli bzw. der Querschnittsflächen der Faserverbundwerkstoffe erreichen.

### 5.3.4 Einfluss der Verbundlänge

Anhand von 24 Versuchen wurde der Einfluss der Verbundlänge auf die Verbundbruchkraft untersucht. Dies erfolgte stellvertretend mit zwei Mauersteinarten (KS20, Mz20). In Abbildung 5.15 ist deutlich eine Verringerung des Verbundkraftanstiges mit zunehmender Verbundlänge zu erkennen. Eine quantitative Bewertung dieser Beobachtung wird mit den verifizierenden Berechnungen im Kapitel 8 vorgenommen.

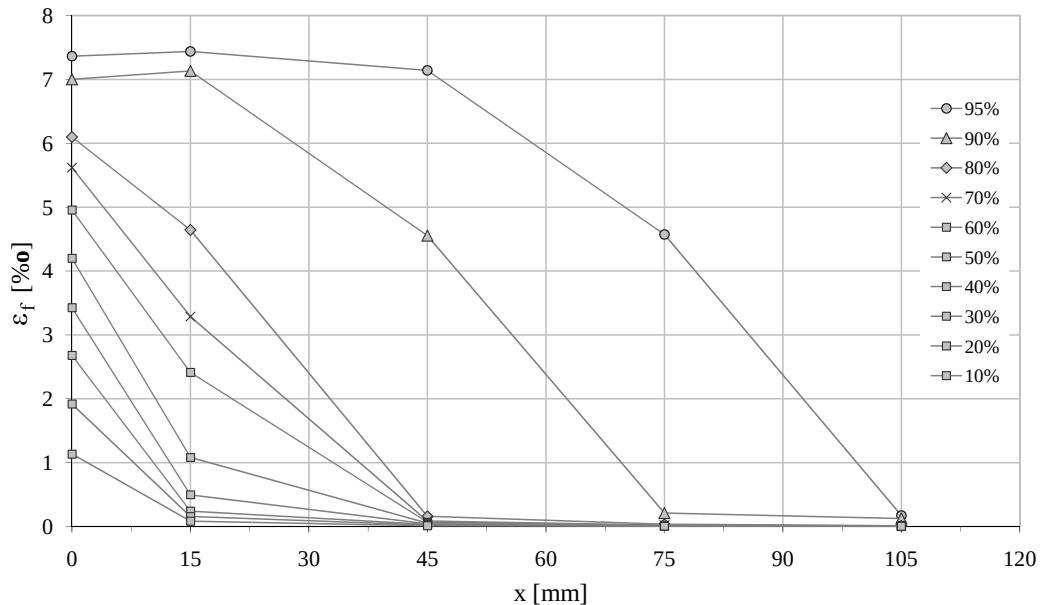


**Abbildung 5.14:** Verbundbruchkräfte in Bezug zur Dehnsteifigkeit der Faserverbundwerkstoffe (beispielhaft für KS20)



**Abbildung 5.15:** Verbundbruchkräfte in Bezug zur Verbundlänge: (a) Kalksandstein (KS20) und (b) Ziegel (Mz20)

Wie eingangs beschrieben, konnte während der Versuchsdurchführung eine sukzessive Entkoppelung zwischen Faserverbundwerkstoffen und Steinen bis auf eine Restverbundlänge von ca. 70 mm beobachtet werden. Danach trat ein schlagartiges Verbundversagen ein. Um dieser Beobachtung nachzugehen, wurde beispielhaft mit Versuch B4 die Dehnungen der Faserverbundwerkstoffe (Abb. 5.16) gemessen. Hierzu wurden fünf Dehnungsmessstreifen (DMS) im Abstand von  $x = 0, 15, 45, 75, 105$  mm auf den Faserverbundwerkstoff aufgebracht. Der Messbereich der DMS betrug 10 mm.



**Abbildung 5.16:** Versuch B4 (KS20): Dehnungen der Faserverbundwerkstoffe in Abhängigkeit von der Verbundlänge für Verbundkräfte zwischen 10% bis 95% der Verbundbruchkraft

Es können drei Phasen des Versagens unterschieden werden. Bei Verbundkräften zwischen 0% bis ca. 80% der Verbundbruchkraft findet der Abtrag auf einer Verbundstrecke von ca. 45 mm statt. Die Krümmungen der Graphen - von konkav zu konvex - zeigen an, dass sich ab ca. 70% der Verbundbruchkraft erste Entfestigungen am Stein einstellen. Im Bereich von ca. 80% bis 90% der Verbundbruchkraft tritt eine Entkoppelung zwischen Faserverbundwerkstoff und Stein auf den ersten ca. 15 mm ( $x = 0$  mm bis 15 mm) ein. In diesem Bereich liegen konstante Dehnungen im Faserverbundwerkstoff vor. Die zum Kraftabtrag erforderliche Verbundstrecke beträgt ca. 60 mm ( $x = 15$  mm bis 75 mm). In der dritten Phase, ca. 90% bis 95% der Verbundbruchkraft, stellt sich eine fortschreitende Entkoppelung auf einer Strecke von ca. 45 mm ( $x = 0$  mm bis 45 mm) ein. Die für den Kraftabtrag beanspruchte Verbundstrecke ergibt sich wiederum zu ca. 60 mm ( $x = 45$  mm bis 105 mm).

Es zeigt sich, dass sich eine maximale Verbundlänge einstellt (hier ca. 60 mm), die sich mit fortschreitender Entkoppelung in Richtung des unbelasteten Endes der Faser-

verbundwerkstoffe bewegt. Diese Versagenscharakteristik lässt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf alle Verbundversuche der Serien A und B übertragen.



## 6 Verankerungsversuche am Wandknoten - Serie C

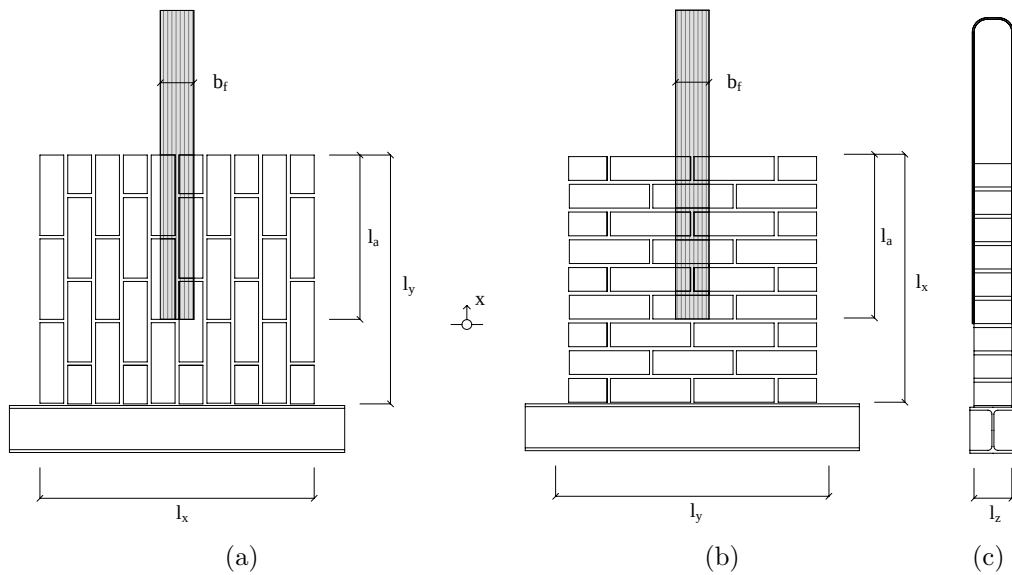
Mit den durchgeführten Verankerungsversuchen an Wandknoten galt es im Wesentlichen zwei Fragen zu beantworten. Zum Einen, wie die Kräfte im Verankerungsbereich der Wandknoten umgelenkt werden. Hierzu musste eine Versuchsanordnung entwickelt werden, die eine Umlenkung der Verankerungskräfte in den Wandscheiben zulässt. Zum Zweiten stellte sich die Frage, wie sich der Kraftabtrag der Faserverbundwerkstoffe über die Mörtelfugen hinweg verhält. Hierzu wurde ein Versuchsaufbau mit einer einschaligen Wand entworfen. Es wurden zwei Mauersteinarten, ein Gelegetyp sowie eine Klebstoffart (Tab. 6.1) verwendet. Vorrangig wurden die Verankerungslänge, Verankerungsbreite und Orientierungsrichtung der Faserverbundwerkstoffe - senkrecht, parallel zur Lagerfugenrichtung (Abb. 6.1) - variiert. Bei der Vorbemessung der Versuchsanordnung zeigte sich, dass die verwendeten Sa397G Gelege mehrlagig auf die Wandkörper (Tab. 6.2) aufzubringen waren, um die zu erwartenden Verbundkräfte aufzunehmen.

| Versuche  | Steintyp | Steincharge | Klebstoff | Gelegetyp |
|-----------|----------|-------------|-----------|-----------|
| C1 - C3   | KS20     | II          | SP55      | Sa397G    |
| C4 - C6   | KS20     | II          | SP55      | Sa397G    |
| C7 - C9   | Mz20     | II          | SP55      | Sa397G    |
| C10 - C12 | Mz20     | II          | SP55      | Sa397G    |
| C13 - C15 | Mz20     | II          | SP55      | Sa397G    |
| C16 - C18 | Mz20     | III         | SP55      | Sa397G    |
| C19 - C21 | Mz20     | III         | SP55      | Sa397G    |
| C21 - C24 | Mz20     | III         | SP55      | Sa397G    |

**Tabelle 6.1:** Übersicht der Versuchsserie C

### 6.1 Versuchskörper

Die Wandkörper wurden aus normalformatigen Kalksandsteinen (KS20) und Ziegeln (Mz20) hergestellt. Die Dicke betrug einheitlich 0,115 m und die Breite 0,74 m. Die



**Abbildung 6.1:** Wandknoten: (a) Orientierung der Faserverbundwerkstoffe parallel (||) zur Lagerfuge, (b) senkrecht ( $\perp$ ) zur Lagerfuge und (c) Seitenansicht

| Versuche  | Geometrie der Wand  |                       |                      | Art der Verstärkung |                  |               |               |
|-----------|---------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|------------------|---------------|---------------|
|           | $l_x$ (Höhe)<br>[m] | $l_y$ (Breite)<br>[m] | $l_z$ (Dicke)<br>[m] | Richtung<br>FVW     | Gelege-<br>lagen | $b_f$<br>[mm] | $l_a$<br>[mm] |
| C1 - C3   | 0,82                | 0,74                  | 0,115                |                     | 2                | 100           | 490           |
| C4 - C6   | 0,75                | 0,74                  | 0,115                | $\perp$             | 2                | 100           | 490           |
| C7 - C9   | 0,82                | 0,74                  | 0,115                |                     | 2                | 100           | 490           |
| C10 - C12 | 0,75                | 0,74                  | 0,115                | $\perp$             | 2                | 100           | 490           |
| C13 - C15 | 0,82                | 0,74                  | 0,115                |                     | 3                | 100           | 615           |
| C16 - C18 | 0,75                | 0,74                  | 0,115                | $\perp$             | 3                | 100           | 570           |
| C19 - C21 | 0,82                | 0,74                  | 0,115                |                     | 4                | 150           | 740           |
| C22 - C24 | 0,91                | 0,74                  | 0,115                |                     | 3                | 200           | 740           |

|| Orientierung der Faserverbundwerkstoffe parallel zur Lagerfuge  
 $\perp$  Orientierung der Faserverbundwerkstoffe senkrecht zur Lagerfuge

**Tabelle 6.2:** Abmessungen und Aufbau der Wandknoten

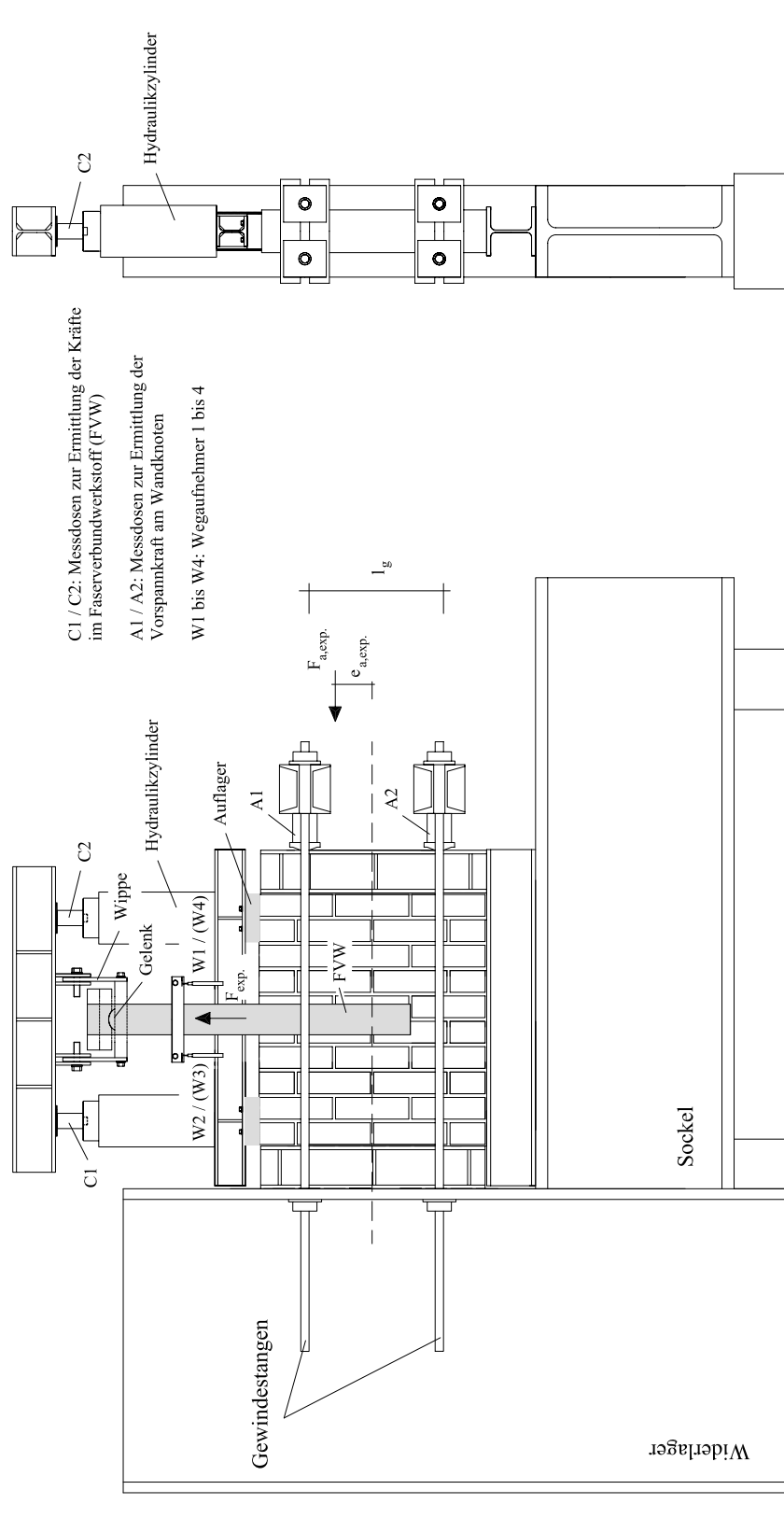
Höhen der Wandscheiben variierten zwischen 0,75 m (9 Steinlagen) bis ca. 0,91 m (11 Steinlagen). Da das in dieser Arbeit entwickelte Verstärkungsverfahren sowohl im Altbau als auch bei Neubauten Anwendung finden sollte, wurde ein Mauermörtel der Druckfestigkeitsklasse *M5* (vgl. Abs. 4.5) verwendet.

Die Wände wurden auf ein Stahlprofil aufgemauert. Nach einer Pause von mindestens 21 Tagen wurden die Wandkörper, bei denen die Faserverbundwerkstoffe parallel zu den Lagerfugen aufgeklebt werden sollten, um 90° in der Scheibenebene gedreht. Die Verbundflächen der Wandkörper aus Kalksandsteinen wurden mit einer Drahtbürste von anhaftenden Mörtelresten befreit. Die Oberflächen der Ziegel waren aufgrund des Brennvorgangs glatt und zum Verkleben der Gelege ungeeignet. Die Flächen wurden mit einer handelsüblichen Steinschleifscheibe und einem Winkelschleifer angeschliffen. Anschließend wurde das Sa397G Gelege lagenweise aufgeklebt. Die Versuche erfolgten frühestens 7 Tage nach Aufbringen der Gelege und 28 Tage nach Herstellung der Wandknoten.

## 6.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht im Wesentlichen aus einer Zugvorrichtung zum Belasten der Faserverbundwerkstoffe und einer Vorrichtung zum „Vorspannen“ der Wandkörper (Abb. 6.2 und 6.3).

Kopfseitig der Wandkörper wurde ein Stahlträger aufgelegt, auf welchem sich zwei Hydraulikzylinder abstützten. Auf den Zylindern wurden je eine Kraftmessdose (C1, C2) vorgesehen. Für eine zwängungsfreie Einleitung der Kräfte in die Faserverbundwerkstoffe, wurde eine Art „Wippenkonstruktion“ an einem kopfseitig auf den Hydraulikzylindern aufgelegten Stahlträger angeschlossen. Durch die an den Stirnseiten der Mauerwerksknoten angeordneten Auflager ergab sich eine gezielte Umlenkung (Spreizung) der Verankerungskräfte im Wandknoten. Da Mauerwerkswände in aller Regel durch Vertikallasten beansprucht werden, wurden die Wandkörper senkrecht zur Lagerfuge vorgespannt. Die Vorspannung erfolgte mit zwei horizontal angebrachten Gewindestangen und zwei Stahlprofilen. Eine Kontrolle erfolgte mit den Kraftmessdosen A1 und A2. Zur Festlegung der Vorspannkräfte wurde eine Überschlagsrechnung angestellt. Für ein Einfamilienhaus ergeben sich Normalspannungen im Wandquerschnitt von ca. 0,50 bis 0,60 N/mm<sup>2</sup>. *Schwegler* [Sch94] und *Wallner* [Wal08] verwendeten bei ihren Tragfähigkeitsuntersuchungen Auflasten, die zu Normalspannungen von ca. 0,60 N/mm<sup>2</sup> und 0,55 N/mm<sup>2</sup> führten. Somit wurden die Wandkörper C1-C3, C7-C9, C13-C15 und C19-C24 mit 50 kN - entspricht ca. 0,60 N/mm<sup>2</sup> - und C4-C6, C10-C12 und C16-C18 mit 12,5 kN - entspricht ca. 0,15 N/mm<sup>2</sup> - vorgespannt. Die Relativverformung zwischen Faserverbundwerkstoff und Wandkörper wurde mit der zuvor



**Abbildung 6.2:** Versuchsaufbau: Verankerungsversuche am Wandknoten

bewährten Apparatur mit vier Wegaufnehmern (W1 bis W4) gemessen. Die Messpunkte befanden sich in einem Abstand von 26 cm zum Wandkopf. Die Versuche wurden weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min. durchgeführt.

## 6.3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die bei der Versuchsdurchführung gemachten Beobachtungen und Besonderheiten aufgezeigt sowie Schlussfolgerungen gezogen. Eine Übersicht zu den Einzelergebnissen findet sich im Anhang A.7 und in Tabelle 6.3, wobei die senkrecht zur Beanspruchung der Faserverbundwerkstoffe am Wandknoten angreifenden Querdruckkräfte  $F_{a,exp.}$  und die zugehörige Exzentrizität  $e_{a,exp.}$  zu

$$F_{a,exp.} = F_{A1} + F_{A2} \quad (6.1)$$

$$e_{a,exp.} = l_g \cdot \left( \frac{F_{A1}}{F_{a,exp.}} - \frac{1}{2} \right) \quad (6.2)$$

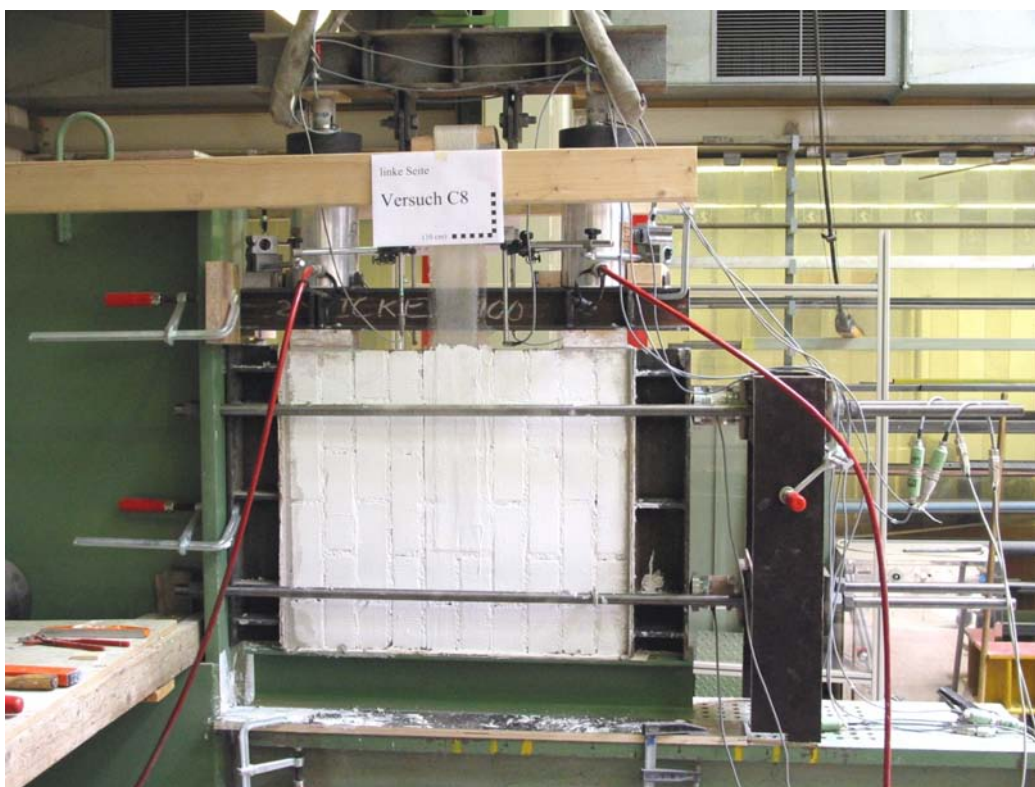
mit:

$l_g$  Abstand der Kraftmessdosen A1, A2 mit 44 cm

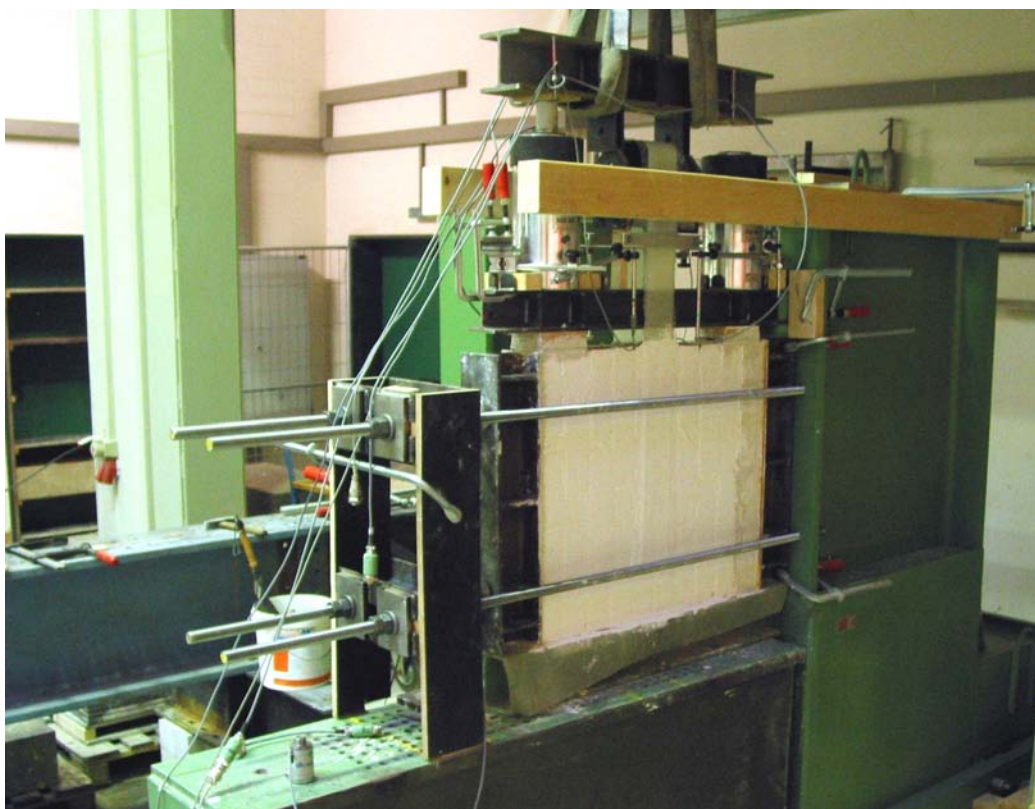
berechnet werden können.

Mit Erreichen von ca. 40% bis 60% der Verankerungskräfte waren erste Knistergeräusche wahrzunehmen. Dies ging einher mit der Ausbildung feiner Risse in den Steinen (in Richtung der Auflager) und in den Fugen (senkrecht zur Beanspruchungsrichtung) im Bereich des zugbeanspruchten Endes der Faserverbundwerkstoffe. Im Anschluss bildeten sich um den Rand der Faserverbundwerkstoffe oberflächennahe Risse in den Steinen aus. Zugleich stellten sich Risse durch die Steine und Fugen, ausgehend vom Rand der Faserverbundwerkstoffe in Richtung der Lasteinleitungsstellen, mit Rissweiten von 1 bis 2 mm ein. Dazwischen ergaben sich Wandbereiche ohne sichtbare Risse. Einen Überblick über die Versuche geben die Abbildungen 6.4, 6.5 und 6.6). Generell zeigten sich drei Versagensformen:

1. Verbundversagen zwischen Faserverbundwerkstoff und Wandknoten (allg.)
2. Gleiten der Lagerfugen (Wandknoten: C1, C3)
3. Riss des Faserverbundwerkstoffs (Wandknoten: C5)



(a)



(b)

114 **Abbildung 6.3:** Versuchsanordnung: (a) linke Seite und (b) rechte Seite

| Versuch | $F_{u,exp.}$ | $\bar{F}_{u,exp.}$ | $s_{\bar{x}}$ | Querdruckkräfte <sup>1)</sup> |                  |                      |                            |                      |                            |
|---------|--------------|--------------------|---------------|-------------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
|         | [kN]         | [kN]               | [kN]          | $F_{A1}$<br>[kN]              | $F_{A2}$<br>[kN] | $F_{a,exp.}$<br>[kN] | $\bar{F}_{a,exp.}$<br>[kN] | $e_{a,exp.}$<br>[mm] | $\bar{e}_{a,exp.}$<br>[mm] |
| C1      | 75,9         | 66,7 <sup>2)</sup> | -             | 32,5                          | 22,9             | 55,4                 | 54,2                       | 38                   | 40                         |
| C2      | 66,7         |                    |               | 34,3                          | 22,1             | 56,3                 |                            | 48                   |                            |
| C3      | 66,3         |                    |               | 29,3                          | 21,6             | 50,9                 |                            | 33                   |                            |
| C4      | 73,8         | 74,5 <sup>3)</sup> | 1,0           | 40,8                          | 9,4              | 50,2                 | 56,3                       | 138                  | 144                        |
| C5      | 76,0         |                    |               | 49,5                          | 9,9              | 59,4                 |                            | 147                  |                            |
| C6      | 75,2         |                    |               | 49,4                          | 9,9              | 59,3                 |                            | 146                  |                            |
| C7      | 59,9         | 56,3               | 3,9           | 28,6                          | 23,1             | 51,7                 | 51,6                       | 24                   | 25                         |
| C8      | 56,9         |                    |               | 29,3                          | 22,9             | 52,2                 |                            | 27                   |                            |
| C9      | 52,2         |                    |               | 28,2                          | 22,7             | 50,9                 |                            | 24                   |                            |
| C10     | 72,7         | 77,2               | 5,1           | 31,1                          | 8,6              | 39,7                 | 43,7                       | 124                  | 147                        |
| C11     | 82,8         |                    |               | 36,2                          | 5,7              | 41,9                 |                            | 160                  |                            |
| C12     | 76,2         |                    |               | 42,2                          | 7,1              | 49,3                 |                            | 157                  |                            |
| C13     | 97,1         | 91,6               | 4,8           | 36,3                          | 22,9             | 59,2                 | 60,0                       | 50                   | 52                         |
| C14     | 89,5         |                    |               | 39,2                          | 22,7             | 61,9                 |                            | 59                   |                            |
| C15     | 88,3         |                    |               | 35,9                          | 22,9             | 58,8                 |                            | 49                   |                            |
| C16     | 106,7        | 110,4              | 9,0           | 46,1                          | 5,1              | 51,1                 | 59,2                       | 176                  | 165                        |
| C17     | 103,9        |                    |               | 46,6                          | 9,8              | 56,5                 |                            | 143                  |                            |
| C18     | 120,6        |                    |               | 62,8                          | 7,0              | 69,8                 |                            | 176                  |                            |
| C19     | 140,4        | 129,1              | 19,4          | 45,7                          | 26,0             | 71,8                 | 66,9                       | 60                   | 57                         |
| C20     | 106,8        |                    |               | 36,5                          | 23,5             | 60,0                 |                            | 48                   |                            |
| C21     | 140,3        |                    |               | 44,2                          | 24,6             | 68,8                 |                            | 63                   |                            |
| C22     | 138,8        | 147,1              | 9,8           | 39,2                          | 25,4             | 64,6                 | 68,8                       | 47                   | 64                         |
| C23     | 157,9        |                    |               | 40,7                          | 22,8             | 63,5                 |                            | 62                   |                            |
| C24     | 144,7        |                    |               | 54,3                          | 24,2             | 78,4                 |                            | 84                   |                            |

<sup>1)</sup> Ergebnisse bei Erreichen von  $F_{u,exp.}$

<sup>2)</sup> Einzelwert, da bei C1 und C3 ein Schubversagen der Lagerfugen eintrat

<sup>3)</sup> Mittelwert aus C4 und C6, da bei C5 ein Zugversagen der FVW eintrat

**Tabelle 6.3:** Ergebnisse zur Versuchsserie C

Das Verbundversagen kündigte sich im Allgemeinen, ausgehend vom Wandkopf, durch ein fortschreitendes Entkoppeln zwischen Faserverbundwerkstoff und Mauerwerk auf ca. 50 % bis 60 % der Verbundlänge in Richtung des unbelasteten Endes der Faserverbundwerkstoffe an (Abb. 6.5a und 6.6a). Danach trat das Versagen schlagartig als Zugversagen der oberflächennahen Steinbereiche (*Kohäsionsversagen*) in einer Steintiefe von ca. 5 bis 10 mm für KS20 und ca. 3 mm für Mz20 ein. Bei den Wandkörpern C4 bis C6 zeigten sich keilförmige Ausbrüche, beginnend von den Lagerfugen hin zur Mitte der Steine bis in eine Steintiefe von ca. 30 mm (Abb. 6.6c). Vereinzelt kam es bei den Wandknoten aus Mauerziegeln (Mz20) zu *Adhäsionsbrüchen* zwischen den Faserverbundwerkstoffen und Steinen in einer Größe von ca. 5 % (C9) bis 15 % (C12) der Verbundflächen.

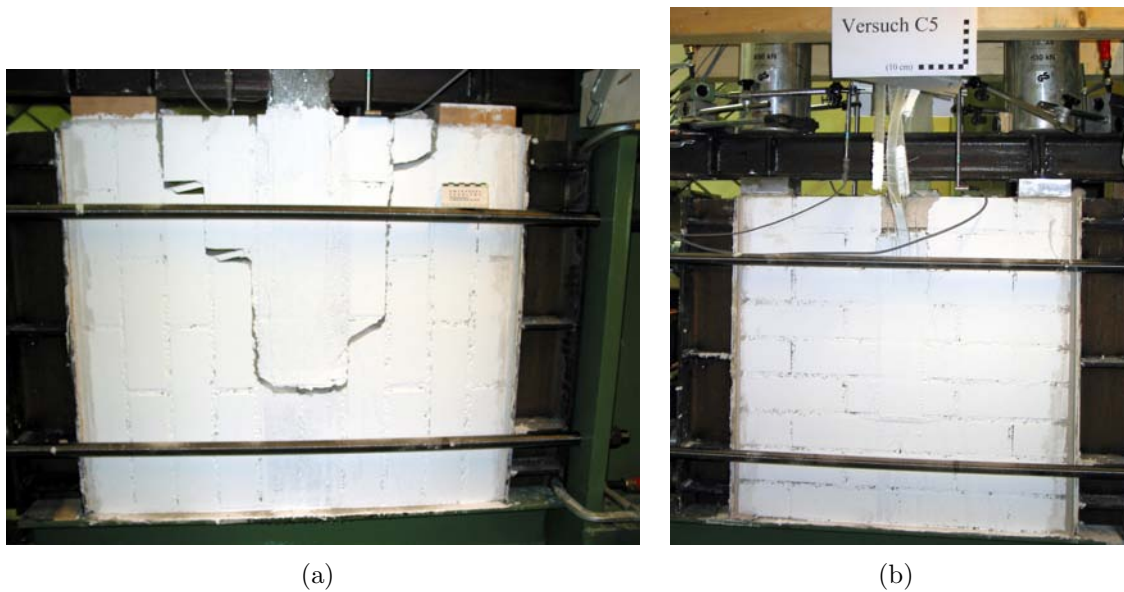
Das Gleiten der Lagerfugen trat ohne Vorankündigung ein. Auffälligkeiten im Vergleich zu den weiteren Versuchen wurden nicht festgestellt. Beachtlich ist, dass am Wandknoten C1 - im Vergleich zu C2 und C3 - eine um ca. 14% höhere Bruchkraft erreicht wurde. Somit kann nicht davon ausgegangen werden, dass der Wandknoten C1 einen Herstellungsmangel aufwies. Vielmehr ist anzunehmen, dass das Verbundversagen zwischen Faserverbundwerkstoff und Wandkörper sowie ein Gleiten der Lagerfugen bei den Versuchen C1 bis C3 mit einer ähnlichen Wahrscheinlichkeit eintreten. Die vergleichsweise hohen Steinfestigkeiten führten zu großen Verbundbruchkräften. Diese können im Krafteinleitungsbereich des Wandkopfes, mittels sich flach ausbildender Spannungsfächer, nur bedingt abgetragen werden (vgl. Abs. 7). Es kann zum Versagen des Mauerwerks kommen. Hieraus folgt, dass bei kleinen Verbundlängen und großen Verbundkräften mit einem Gleiten der Lagerfugen im Krafteinleitungsbereich zu rechnen ist. Das ist bei der Bemessung zu berücksichtigen.

Der Riss des Faserverbundwerkstoffs trat am Wandknoten C5 unterhalb der ersten Steinlage am Wandkopf ein. Die Dicken der Faserverbundwerkstoffe wurden so bemessen, dass diese bestmöglich ausgenutzt wurden. Die Zugbeanspruchung des Faserverbundwerkstoffs betrug bei diesem Versuch ca. 76 % der Zugfestigkeit. Somit kann an dieser Stelle nur vermutet werden, dass entweder ein Materialfehler oder eine mechanische Beschädigung des Faserverbundwerkstoffs zum frühzeitigen Rissversagen führte.

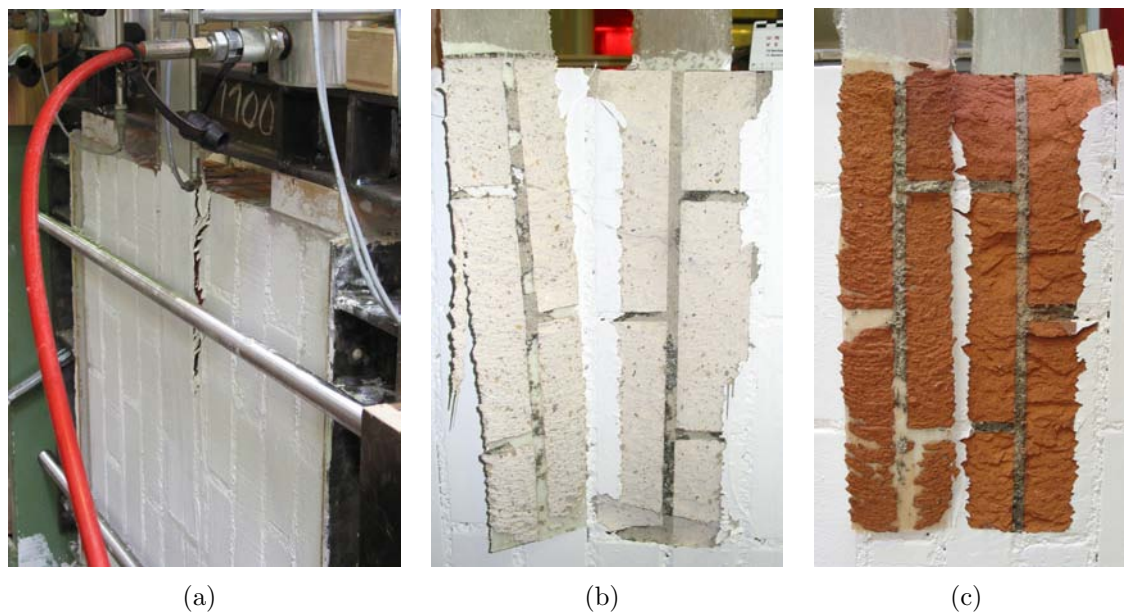
Die Verankerungskräfte ( $F_{u,exp.}$ ) lagen in einem Bereich von 52,2 kN für Versuch C9 bis 157,9 kN für C23.

### 6.3.1 Einfluss der Orientierung der FVW zur Lagerfuge

Die Verklebung der Faserverbundwerkstoffe mit einer Faserorientierung senkrecht zu den Lagerfugen führte, im Vergleich zu einer parallelen Ausrichtung, zu einer Steigerung der Verbundbruchkräfte um bis zu 35%. Dies ging einher mit einer Zunahme der Relativverformungen zwischen Faserverbundwerkstoffen und Mauerwerk (vgl.



**Abbildung 6.4:** (a) Schubversagen der Lagerfugen am Wandknoten C1 und (b) Riss des Faserverbundwerkstoffs am Wandknoten C5



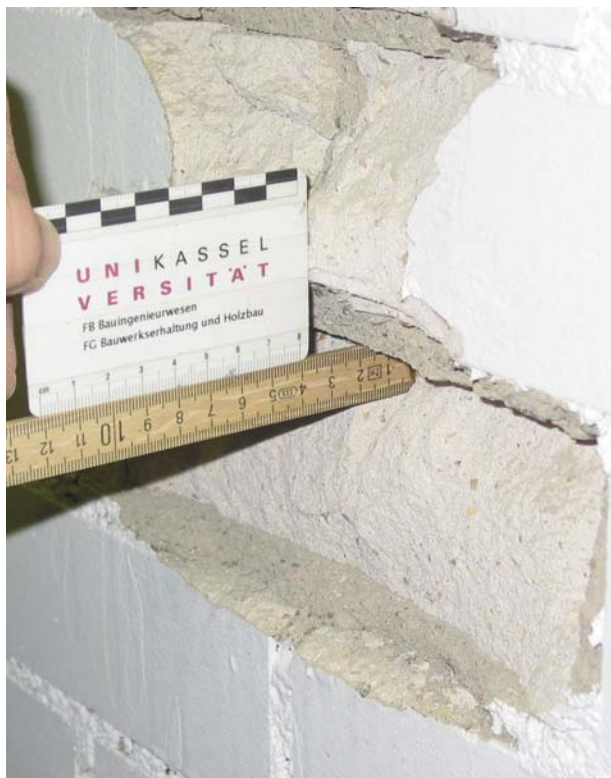
**Abbildung 6.5:** Orientierung der FVW parallel zu den Lagerfugen: (a) beginnendes Verbundversagen (Versuch C8), (b) typische Verbundbruchfläche für Wandknoten aus KS20 (Versuch C2) und (c) Mz20 (Versuch C8)



(a)



(b)



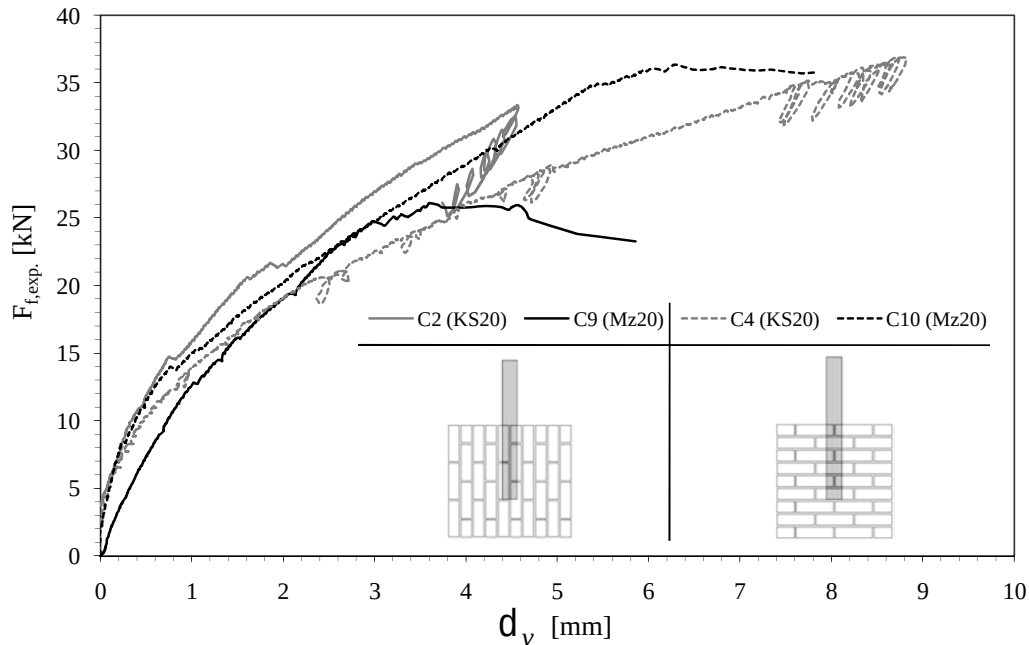
(c)



(d)

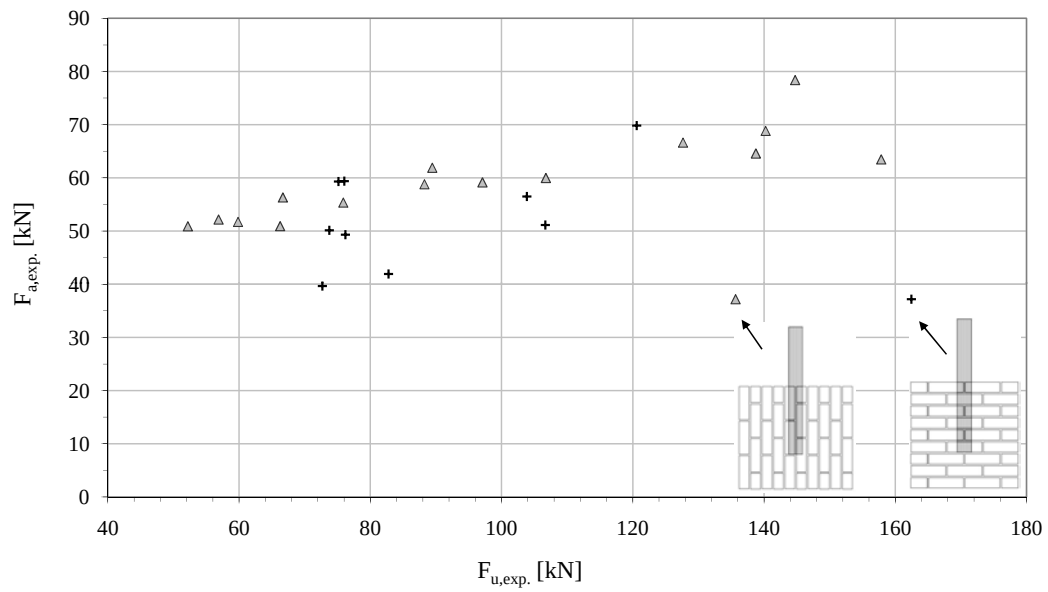
**Abbildung 6.6:** Orientierung der FVW senkrecht zu den Lagerfugen: (a) beginnendes Verbundversagen mit sichtbarer Rissbildung, (b) und (c) typische Verbundbruchflächen für KS20 (Versuch C6) und (d) Mz20 (Versuch C11)

C9/C10, Abb. 6.7). Für die Anfangssteifigkeiten und den Kraft-Verformungsverlauf ergaben sich keine wesentlichen Unterschiede. Es zeigten sich vergleichbare Verbundsteifigkeiten für Wandknoten mit senkrecht und parallel zu den Lagerfugen aufgeklebten Faserverbundwerkstoffen.

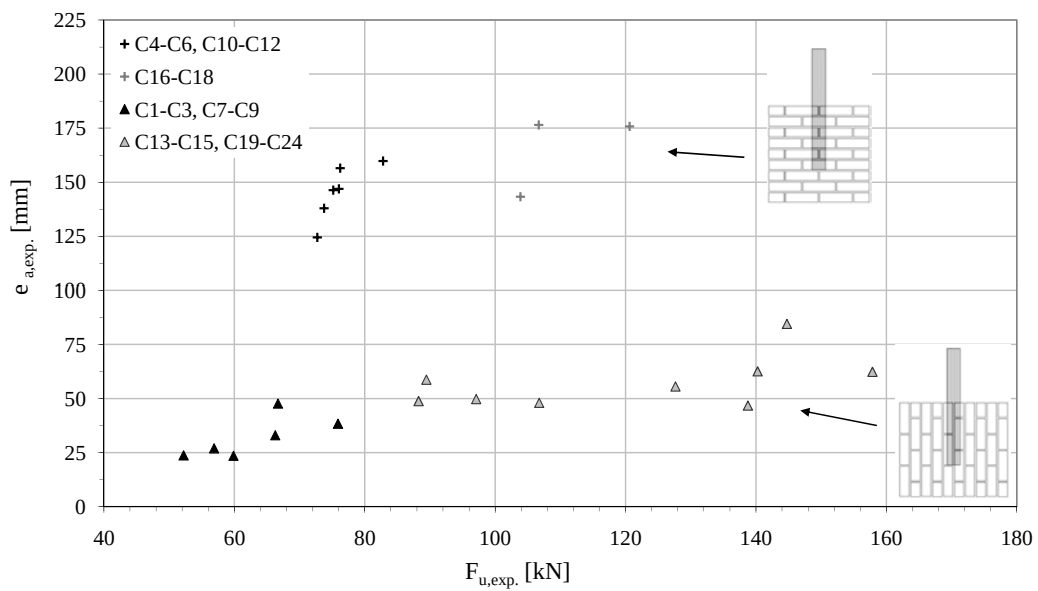


**Abbildung 6.7:** Typische Verbundkraft-Verformungskurven zwischen Faserverbundwerkstoff und Wandknoten, bezogen auf den Wandkopf

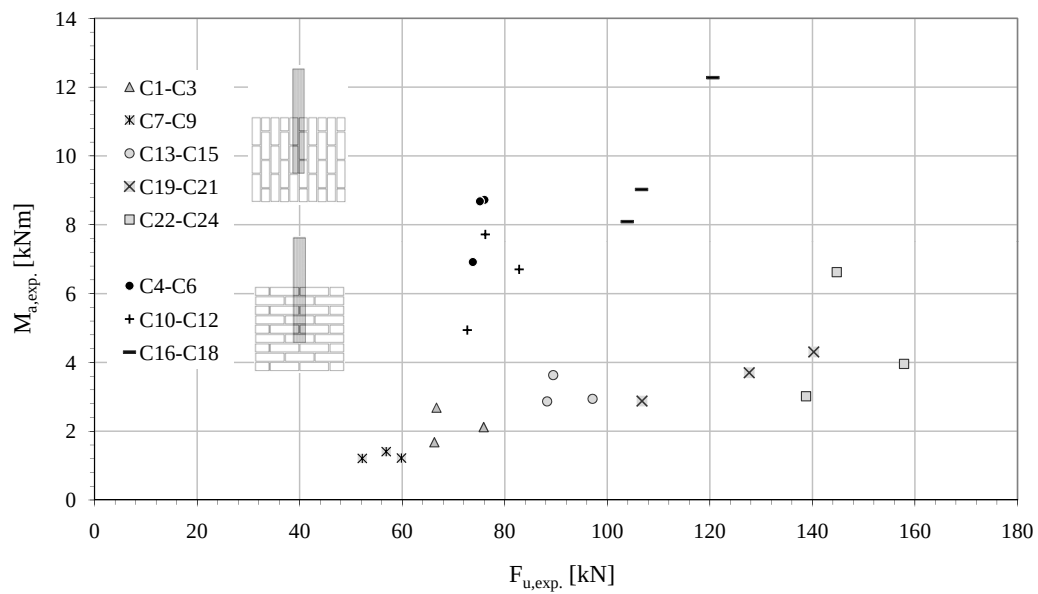
In Abbildung 6.8 wurden die gemessenen Querdruckkräfte mit Bezug zu den Verankerungskräften für den Zeitpunkt des Versagens aufgetragen. So ist augenscheinlich eine nahezu lineare Abhängigkeit der Größen zu erkennen, wobei quantitativ kein wesentlicher Unterschied für eine Applikation der Faserverbundwerkstoffe  $\perp$  oder  $\parallel$  zu den Lagerfugen erkennbar ist. Auf Grund der Vorspannung von 50 kN für Wandknoten mit FVW  $\parallel$  und 12,5 kN für Wandknoten mit FVW  $\perp$  zeigt sich jedoch, dass sich ein deutlicher Unterschied beim Anstieg der Querdruckkräfte ergab. In Abbildung 6.9 wurden die Exzentrizitäten der Querdruckkräfte in Bezug zu den Verbundbruchkräften aufgetragen. Hierzu wurden die Versuche C1 bis C12 herangezogen, da einzig diese die selbe Verbundgeometrie aufwiesen. Gleichwohl ergab sich für die Versuche C13 bis C24 eine ähnliche Charakteristik so dass diese mit dargestellt wurden. Für eine Orientierung der FVW  $\perp$  zu den Lagerfugen ergaben sich Exzentrizitäten von ca. 125 mm bis 175 mm. Im Gegensatz dazu zeigten sich bei einer Faserorientierung  $\parallel$  zur Lagerfuge geringere Exzentrizitäten von ca. 25 mm bis 75 mm, wobei jedoch nicht vergessen werden darf, dass diese mit 50 kN vorgespannt waren. Die Produkte aus den Querdruckkräften und den Exzentrizität sind in Abbildung 6.10 dargestellt. Eine Bewertung der Zusammenhänge erfolgt im Rahmen der Modellbildung (Abs. 8).



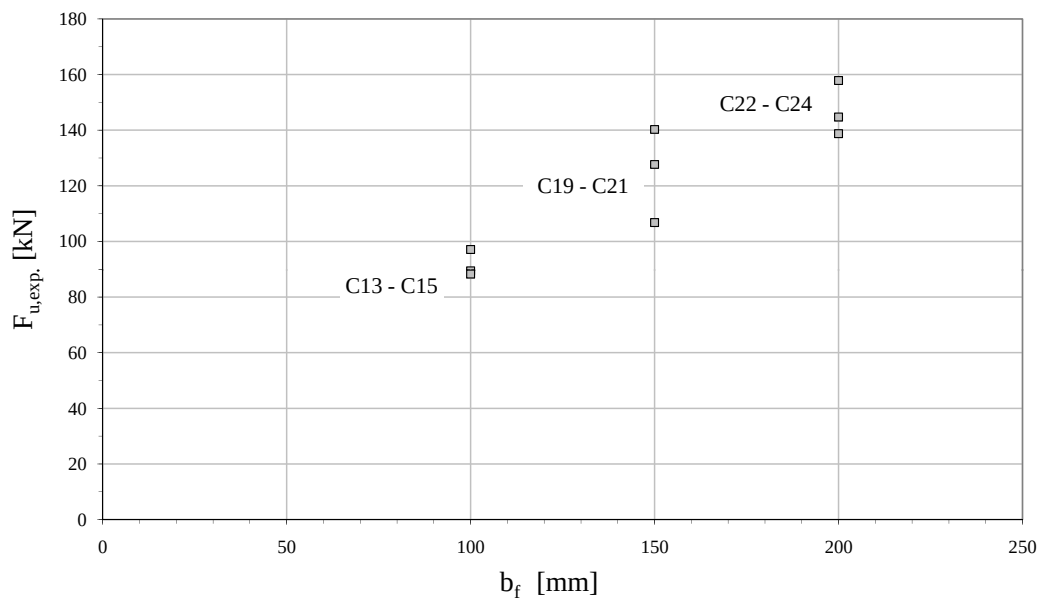
**Abbildung 6.8:** Querdruckkräfte über alle Versuche der Serie C mit Bezug zu den Verankerungskräften



**Abbildung 6.9:** Exzentrizitäten der Querdruckkräfte in Bezug zu den Verankerungskräften



**Abbildung 6.10:** Moment aus der Querdruckkraft und der Exzentrizität



**Abbildung 6.11:** Einfluss der Verbundbreiten der Faserverbundwerkstoffe auf die Verbundbruchkräfte

### 6.3.2 Einfluss der Verbundbreite

Eine wichtige Fragestellung ist die nach dem Einfluss der Verbundbreite auf die Verbundbruchkräfte. *Casareto et al.* [Cas03] zeigten an Verankerungskörpern aus Mauerwerk, dass eine Verdopplung der Verbundbreiten - unabhängig von der verwendeten Steinart - nahezu zu einer Verdopplung der Verbundkräfte führte (vgl. Abs. 2.2.2). Bei den hier durchgeführten Verankerungsversuchen ergab sich ein klarer Zusammenhang zwischen der Verbundbreite und den erreichten Verbundbruchkräften (Abb. 6.11). Eine Aussage zu dieser Fragestellung wird bei der Modellbildung im Abschnitt 8 gegeben.

Zum Abschluss soll noch darauf hingewiesen werden, dass mit zunehmenden Dicken der Faserverbundwerkstoffe deutlich weniger Risse am Wandknoten mit kleineren Rissweiten und Risslängen auftraten.

## 7 Rechenmodell für den Klebverbund

Nachdem im 3. Kapitel die Grundlagen erläutert wurden, sollen diese nun zur Modellierung der Verbundcharakteristik von auf Mauerwerk aufgeklebten Faserverbundwerkstoffen verwendet werden. Die hierfür notwendigen Eingangsgrößen werden umfassend hergeleitet und gegebenenfalls ergänzt. Im Anschluss wird das Verbundmodell diskutiert und die erforderlichen Rechenschritte übersichtlich in einem Struktogramm dargestellt.

### 7.1 Herleitung der Modellparameter

Die Problematik bei der Herleitung der rechnerischen Verbundbruchkräfte liegt in der Bestimmung der *Bruchenergie*  $G_v$  (vgl. Abs. 3.2.3). Die *Bruchenergie* ergibt sich als integraler Zusammenhang aus dem *Verbundansatz* mit der Verbundschubspannung  $\tau_v$  und der Relativverformung  $\delta_v$  am differentiellen Verbundelement (vgl. Abb. 3.11). Die maximale Verbundschubspannung  $\tau_{v1}$  kann nach Gleichung 3.60 berechnet werden, womit diese Größe bekannt ist. Hingegen lässt sich die Relativverformung bei der das Entkoppeln der Fügeiteile eintritt weder mechanisch herleiten noch messtechnisch erfassen. Die Größe wird im Folgenden aus einer Regressionsrechnung mit dem *Kalibrierungsfaktor*  $c_v$  ermittelt.

Für die Berücksichtigung eines linear-verfestigenden Verbundansatz (vgl. Abb. 7.6, Ansatz II) kann die Bruchenergie  $G_v$  nach Gleichung 3.59 und unter Berücksichtigung von Gleichung 3.60 wie folgt angegeben werden:

$$G_v = \frac{1}{4} \cdot \delta_{v1} \cdot \sqrt{f_{st} \cdot f_{st,t}} \quad (7.1)$$

Der Term  $\frac{1}{4} \cdot \delta_{v1}$  wird durch den Kalibrierungsfaktor  $c_v$  erfasst. Dieser ist noch zu bestimmen. Somit folgt für die Berechnung der Bruchenergie:

$$G_v = c_v \cdot \sqrt{f_{st} \cdot f_{st,t}} \quad (7.2)$$

### 7.1.1 Verbundbruchkräfte bei Entkoppelungsbeginn

Die Verbundbruchkräfte am Endverankerungselement können in Abhängigkeit der Verbundlänge nach Gleichung 3.79 berechnet werden. Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass sich mit dem Berechnungsansatz einzig diejenige Verbundkraft bestimmen lässt, bei welcher das *Entkoppeln* zwischen dem Stein und dem Faser-verbundwerkstoff beginnt. Während der Versuchsdurchführung wurde mehrfach ein Ansteigen der gemessenen Verbundkräfte nach dem Entkoppelungsbeginn beobachtet, was aus einem Reibungsanteil der Füge-teile resultieren könnte (vgl. Abb. 7.1 und 7.2). Aus diesem Grund müssen die am Endverankerungskörper experimentell gemessenen Verbundbruchkräfte  $F_{u,exp.}$  um den Reibungsanteil abgemindert werden. Die Verbundkräfte bei Entkoppelungsbeginn  $F'_{u,exp.}$  sind am Übergang eines gekrümmten in einen nahezu linearen Anstiegsbereich der Verbundkraft-Relativverformungskurven zu finden. Die abgeminderten Verbundbruchkräfte wurden graphisch bestimmt und deren Größen mit den Beobachtungen aus den experimentellen Untersuchungen verglichen. Demnach ergeben sich die Verbundbruchkräfte bei Entkoppelungsbeginn der Füge-teile in guter Näherung zu:

$$F'_{u,exp.} = \zeta_v \cdot F_{u,exp.} \quad (7.3)$$

Der Reibungsanteil konnte, bezogen auf die experimentelle Verbundbruchkraft  $F_{u,exp.}$ , am normalformatigen Stein zu 5% für die Kalksand- und Sandsteine sowie 20% für die Ziegel abgeschätzt werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass der Reibungsanteil von der vorhandenen Verbundlänge abhängt. Für Verbundlängen unter 240 mm wird eine lineare Interpolation zwischen der rechnerischen Mindestverbundlänge  $l_{v,max.}$  und  $l_{v,NF}$  nach Abbildung 7.3 vorgeschlagen.

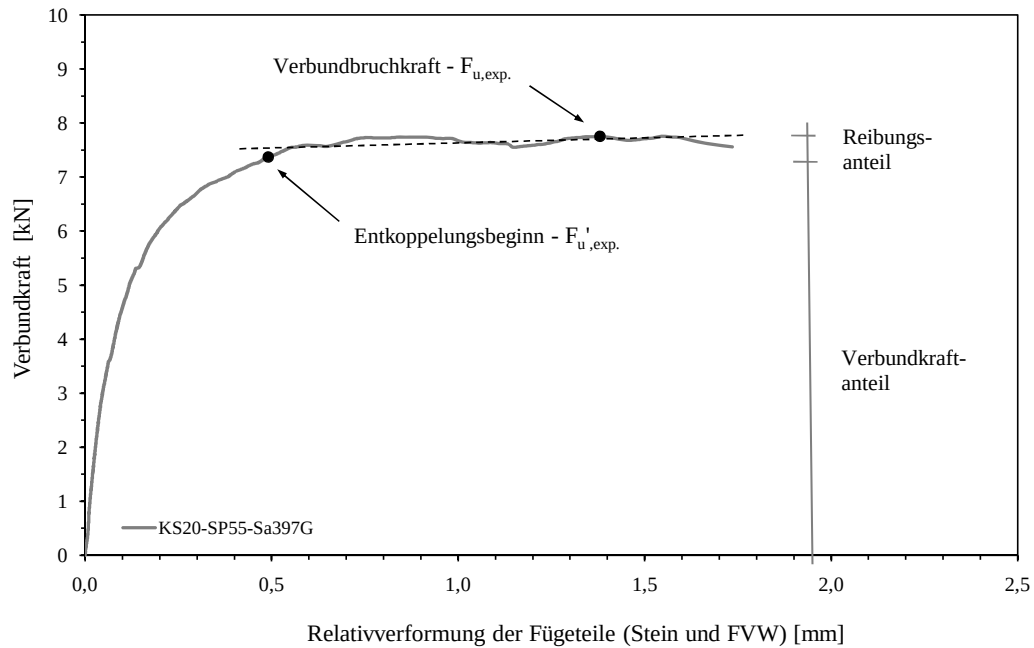
$$l_v \leq l_{v,max.} : \quad \zeta_v = 1,0 \quad (7.4)$$

$$l_v > l_{v,max.} : \quad \zeta_v = \zeta_{v,NF} + \frac{l_v - l_{v,NF}}{l_{v,max.} - l_{v,NF}} \cdot (1 - \zeta_{v,NF}) \quad (7.5)$$

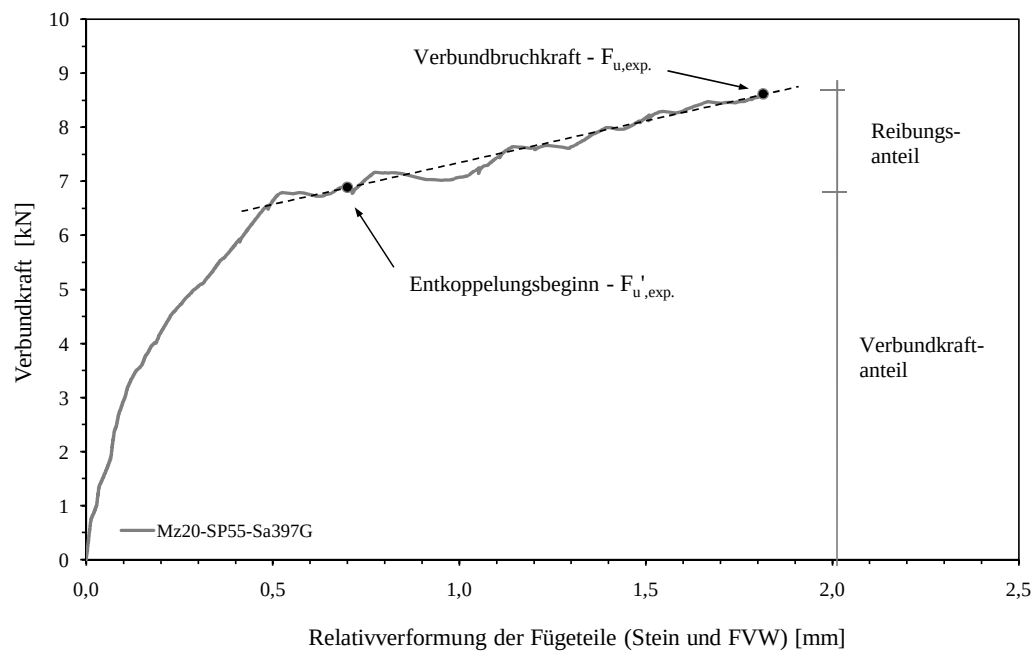
mit:

$$\begin{aligned} \zeta_{v,NF} &= 0,95 && \text{für Kalksand- und Sandsteine} \\ \zeta_{v,NF} &= 0,80 && \text{für Ziegel} \end{aligned}$$

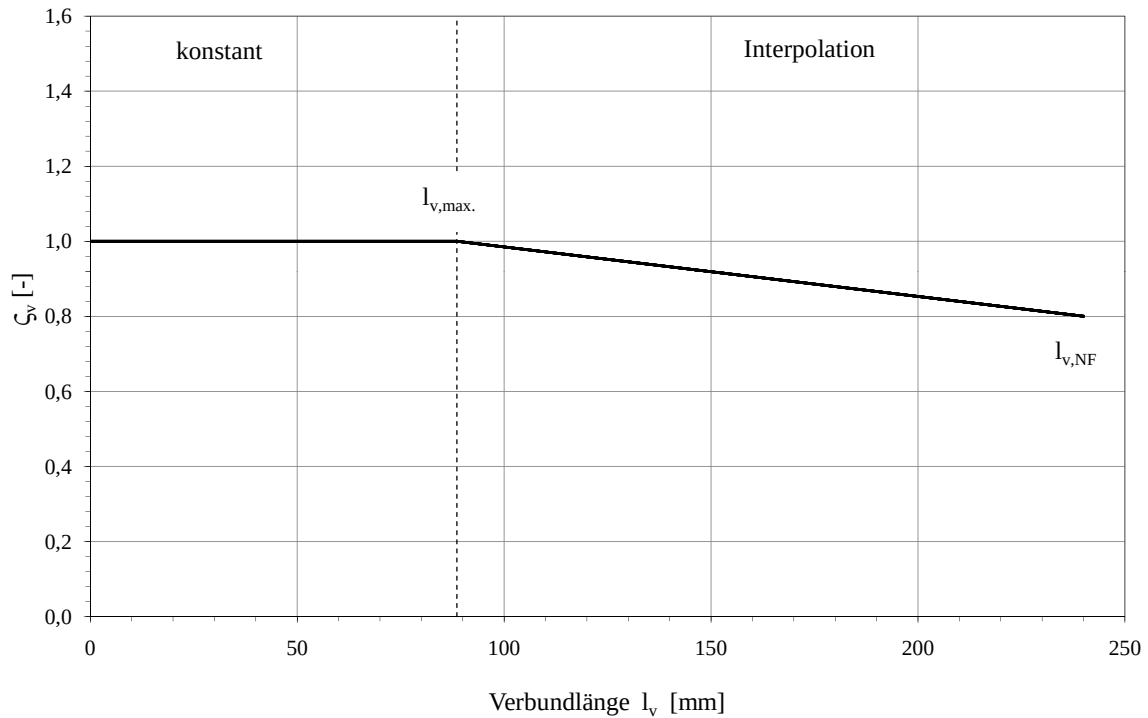
Eine Validierung des Vorgehens erfolgt im Abschnitt 8.1.2 der Arbeit. Eine ausführliche Darstellung der Verbundkraft-Relativverformungskurven mit den abgeminderten Verbundkräften wird im Anhang A.5 gegeben.



**Abbildung 7.1:** Versuch A41: typische Verbundkraft-Relativverformungskurve (1/2)



**Abbildung 7.2:** Versuch A50: typische Verbundkraft-Relativverformungskurve (2/2)



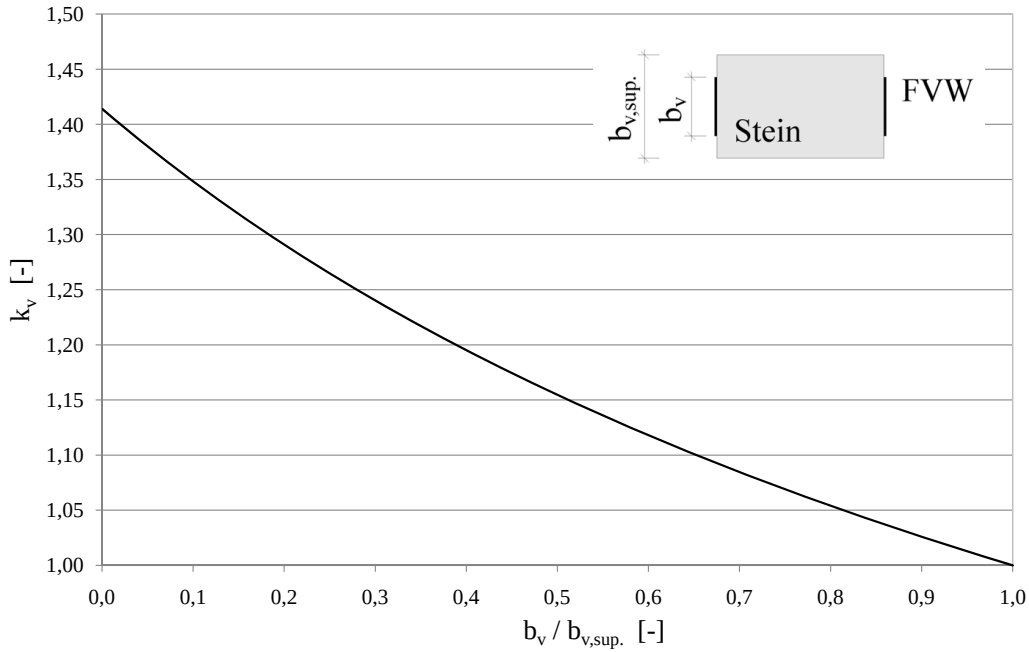
**Abbildung 7.3:** Ermittlung der Größe  $\zeta_v$  in Abhängigkeit der Verbundlänge

### 7.1.2 Einführung eines Beiwerts

Im Zuge der Modellbildung stellte sich die Frage, ob das Verhältnis aus der Verbundbreite  $b_v$  zur Breite des Verankerungskörpers  $b_{v,sup.}$  (vgl. Abb. 7.4) einen Einfluss auf die rechnerischen Verbundbruchkräfte haben könnte. Für die Herleitung des Verbundansatzes wurde ein ebener Spannungszustand am Verankerungskörper unterstellt. Jedoch gibt *Holzenkämpfer* [Hol94] - im Zusammenhang mit auf Beton aufgeklebten Lamellen - zu bedenken, dass der Verbundkraftabtrag zu einem dreiaxialen Spannungszustand führt. Um diesem Verhalten Rechnung zu tragen leitete er den Faktor „ $k_{b2}$ “ her. Dieser soll hier übernommen werden. Er wird im Folgenden mit „ $k_v$ “ bezeichnet.

$$k_v = \sqrt{\frac{2}{1 + (b_v/b_{v,sup.})}} \quad (7.6)$$

In Abbildung 7.4 wurde der Beiwert  $k_v$  aufgetragen. Hier zeigt sich für steigende überklebte Verbundflächen eine deutliche Abnahme des Beiwerts, wobei sich dieser zwischen  $k_v = 1,0$  bis 1,41 ergibt. Eine Überprüfung des Ansatzes erfolgt im Rahmen der verifizierenden Berechnungen in Kapitel 8 der Arbeit.



**Abbildung 7.4:** Beiwert  $k_v$  in Abhängigkeit der Geometrien (Gl. 7.6)

### 7.1.3 Bestimmung der Bruchenergie

Zur Berechnung der Bruchenergie  $G_v$  werden - neben den Festigkeiten - die *Kalibrierungsfaktoren*  $c_v$  benötigt (vgl. Gl. 7.2). Diese sollen im Folgenden aus einer Regressionsrechnung für die Verbundbruchkräfte am Endverankerungselement der Serie A (Versuche A17 bis A58) bestimmt werden. Die Verbundbruchkräfte ergeben sich unter Einbeziehung des Formbeiwerts  $k_v$  zu:

$$F_f = k_v \cdot b_v \cdot \sqrt{2 \cdot G_v \cdot E_f \cdot t_f} \cdot \tanh(\omega \cdot l_v) \quad (7.7)$$

Bei den durchgeführten experimentellen Untersuchungen ergab sich ein deutlicher Einfluss der zwei verwendeten Klebstoffarten (SD330, SP55) auf die erreichten Verbundbruchkräfte. Diese Eigenschaft wird in Gleichung 7.7 durch die Bruchenergie  $G_v$  und letztlich mit zwei Kalibrierungsbeiwerten erfasst. Da die für die Ermittlung von  $G_v$  notwendigen Oberflächenzugfestigkeiten der Mauersteine nach DIN 1048-2 und mit einem neu vorgeschlagenen Prüfverfahren mit Druckplatte ermittelt wurden, muss hier eine weitere Unterscheidung vorgenommen werden. Die Kalibrierung der Bruchenergie  $G_v$  hat somit in Abhängigkeit der verwendeten Klebstoffe und der Art der Festigkeitsermittlung zu erfolgen.

Die Bruchenergie  $G_v$  ergibt sich nach Gleichung 7.7, indem  $F_f = F'_{u,exp.}/2$  in Gleichung 7.3 gleichgesetzt wird. Mit einer Regressionsrechnung und Gleichung 7.2 wurden die *Kalibrierungsbeiwerte*  $c_v$  wie folgt bestimmt (vgl. Abb. 7.5):

Referenzverfahren - Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit mit Druckplatte

|                    |       |                     |
|--------------------|-------|---------------------|
| $c_{v,SD330,DP} =$ | 0,030 | für Klebstoff SD330 |
| $c_{v,SP55,DP} =$  | 0,058 | für Klebstoff SP55  |

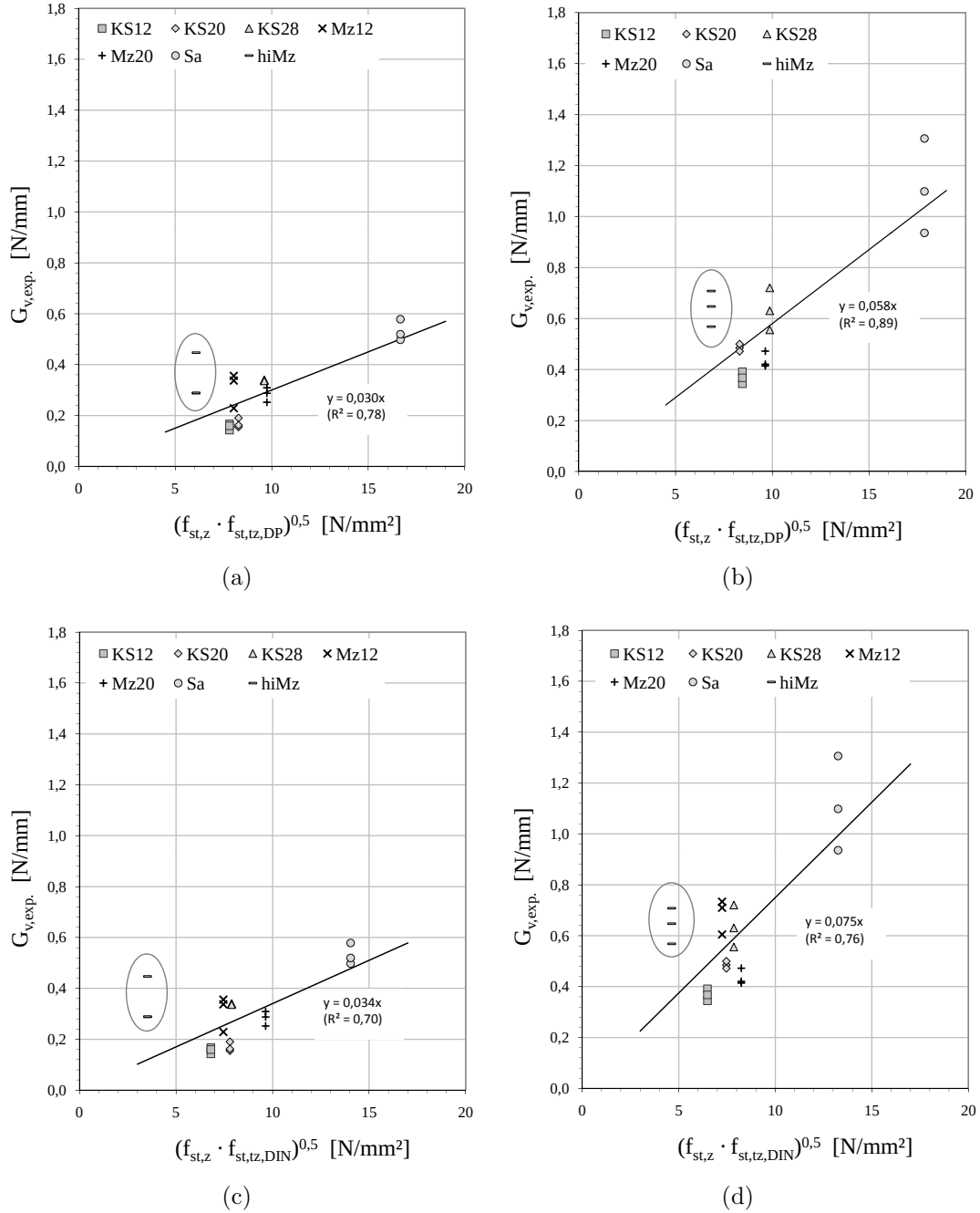
Alternativverfahren - Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit nach DIN 1048-2

|                     |       |                     |
|---------------------|-------|---------------------|
| $c_{v,SD330,DIN} =$ | 0,034 | für Klebstoff SD330 |
| $c_{v,SP55,DIN} =$  | 0,075 | für Klebstoff SP55  |

Mit den Bestandsziegeln (hiMz) wurden im Vergleich zu ihren Festigkeiten hohe Verbundbruchkräfte erreicht, was gleichwohl zu hohen Bruchenergien  $G_v$  (Abb. 7.5) führte. Da sich das Verhalten von den weiteren Materialkombinationen unterschied, blieben die Bruchenergien der Bestandsziegel in der Regressionsrechnung unberücksichtigt. Im Umkehrschluss heißt dies aber auch, dass mit älteren Ziegeln trotz der oft geringen Steifigkeiten vergleichsweise hohe Verbundkräfte erreicht werden können. Dies ist vor allem im Hinblick auf die Bestandssanierung hervorzuheben.

In der Anwendungsempfehlung CNR-DT 200/2004 (vgl. Abs. 2.5.1) wurde für die Endverankerung von Faserverbundwerkstoffen auf Mauersteinen ein Kalibrierungsbeiwert von  $c_v = 0,015$  angegeben. Die hier ermittelten Werte liegen somit um das 2 bis 5-fache über diesem Vergleichswert. Da die Bruchenergie bei der Berechnung der Verbundbruchkräfte (Gl. 7.7) unter dem Wurzelausdruck eingeht, ergeben sich bis zu 2,2-fach höhere Verbundbruchkräfte. Die Unterschiede können hier nicht erklärt werden, da sich im CNR-DT 200/2004 auf die selben Festigkeitswerte bezogen wurde. Weitergehende Angaben zur Herleitung der Größe  $c_v$  finden sich nicht.

Die Abhängigkeit der Kalibrierungsbeiwerte von den verwendeten Klebstoffen mag zunächst überraschen. *Schilde* [Sch05] untersuchte das Verbundverhalten zwischen Beton und Kohlenstofffaserlamellen am Zwischenrisselement. Hierbei stellt er fest, dass *Neubauer*, [Neu00] der sich unter anderem experimentell mit dem Verbund von auf Beton aufgeklebten Lamellen aus Kohlenstofffasern am Endverankerungselement befasste, eine um das 2,3-fache niedrigere Bruchenergie ermittelte. *Schilde* schlussfolgerte hieraus, dass sich entweder die am Zwischenrisselement und am Endverankerungselement ermittelten Bruchenergien nicht vergleichen lassen oder es weitere Faktoren geben muss, die im Rahmen seiner Arbeit nicht identifiziert werden konnten. Da jedoch beide Autoren zur Ermittlung der Bruchenergien auf dasselbe Verbundmodell zurückgreifen ist anzunehmen, dass die für die experimentellen Untersuchungen



**Abbildung 7.5:** Ermittlung der Kalibrierungsbeiwerte  $c_v$  mit Bestimmtheitsmaß  $R^2$ : (a)  $c_{v,SD330,DP}$ , (b)  $c_{v,SP55,DP}$ , (c)  $c_{v,SD330,DIN}$  und (d)  $c_{v,SP55,DIN}$

verwendeten unterschiedlichen Klebstoffe einen Einfluss auf die ermittelten Bruchenergien hatten.

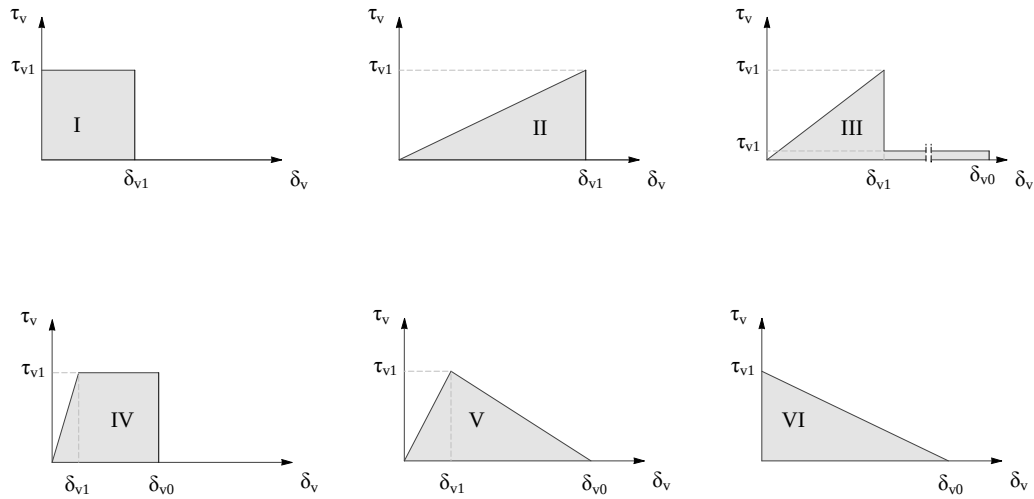
Entscheidend für die Qualität des Verbundmodells ist, dass in die Berechnung der Bruchenergien (Gl. 7.2) einzig die Druck- und Oberflächenzugfestigkeiten der Steine sowie die Kalibrierungsbeiwerte eingehen. Das Modell ist somit allgemein auf unterschiedliche Mauersteinarten (künstliche, natürliche; Ziegel, Kalksandsteine, Sandsteine) anwendbar. Für die Zulassung von Verstärkungssystemen heißt dies aber auch, dass Endverankerungsuntersuchungen mit den in der Zulassung festgehaltenen Mauersteinen in Kombination mit den Faserwerkstoffen und Klebstoffen durchzuführen sind. Hieraus müssen die Kalibrierungsbeiwerte für das jeweilige Verstärkungssystem ermittelt werden.

In diesem Zusammenhang sei noch erwähnt, dass bei der Bemessung von Klebverbindungen von nachträglich auf Betonbauteilen aufgeklebten Kohlenstofffaserlamellen gelegentlich nur die Betonoberflächenzugfestigkeiten zur Berechnung der Bruchenergien herangezogen werden (*Schilde* [Sch05], *Laumer* [Lau02]). Gleichwohl wird hier auf das *Mohr-Coulomb-Bruchkriterium* zurückgegriffen. Jedoch werden die Betondruckfestigkeiten durch einen Berechnungsansatz in die Betonzugfestigkeiten überführt. Der Vorteil liegt in der Berücksichtigung nur eines Bauteilkennwertes, der Oberflächenzugfestigkeit. Dieses Vorgehen erwies sich jedoch für den Berechnungsansatz zur Verklebung von Gelegen auf Mauersteinen als unvorteilhaft, da sich mit der Regressionsrechnung zur Ermittlung von  $c_v$ , nur geringe Konvergenzen ergaben.

### 7.1.4 Einflüsse der Verbundansätze

Für die im Abschnitt 3.2 hergeleiteten Gleichungen zur Ermittlung der Verbundbruchkräfte am Verankerungselement wurde ein linear-verfestigender Verbundansatz vorausgesetzt (vgl. Abb. 7.6, Verbundansatz II). Es ist jedoch die Frage zu klären, inwieweit der gewählte Ansatz einen Einfluss auf die Verbundbruchkräfte und das rechnerische Verbundkraft-Verformungsverhalten hat. Aus diesem Grund wurde auf eine von *Pörtner* [Pör06] entwickelte Rechenroutine zurückgegriffen, mit der die Einflüsse unterschiedlicher Verbundansätze am Endverankerungskörper untersucht werden können (vgl. Abs. 3.2.5). Die Untersuchung erfolgte beispielhaft für die Versuche A41 bis A43 anhand von sechs Verbundansätzen mit jeweils gleichen Bruchenergien. Die Eingangsparameter der Verbundansätze sind in Tabelle 7.1 angegeben.

Vergleicht man die mit der Routine für den Verbundansatz II errechneten Verbundbruchkräfte (Tab. 7.1, Spalte 6) mit der für den Verbundansatz hergeleiteten analytischen Lösung (Gl. 7.7), so ergibt sich eine Differenz von gerade einmal einem Newton. Das zeigt, dass die Anwendung der Routine für den validierten Ansatz zu einer guten Übereinstimmung der Bruchkräfte führt. Gleichwohl ergeben sich für die weiteren



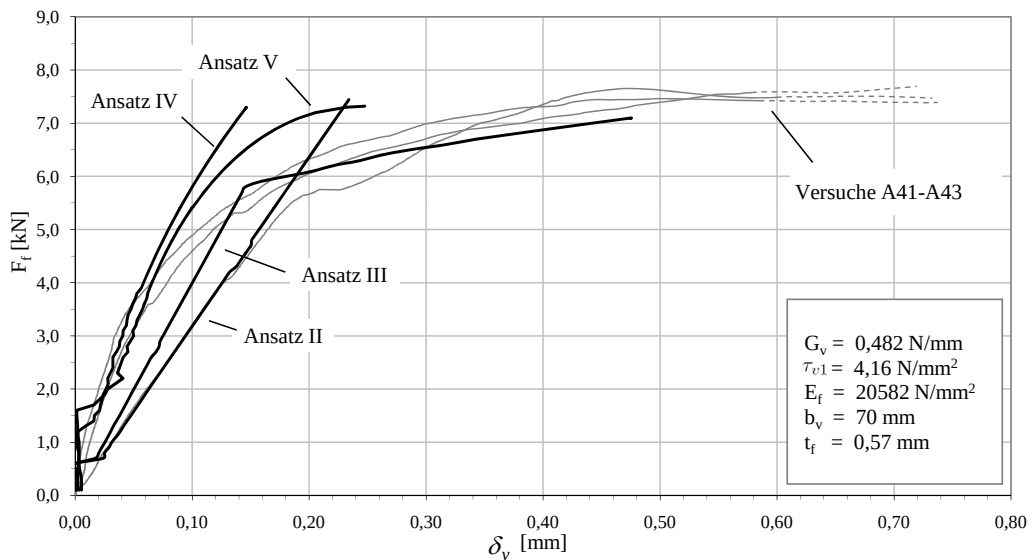
**Abbildung 7.6:** unterschiedliche Verbundansätze mit identischen Bruchenergien

| Verbundansatz | $\tau_{v1}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\tau_{pl}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\delta_{v1}$<br>[mm] | $\delta_{v0}$<br>[mm] | $F_{f,u}$<br>[kN] | Abweichung zu $F_{f,u}$<br>mit Ansatz II [%] |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------------------------|
| I             | 4,16                                | -                                   | 0,116                 | -                     | 7,35              | 1,20                                         |
| II            | 4,16                                | -                                   | 0,232                 | -                     | 7,44              | -                                            |
| III           | 4,16                                | 0,42                                | 0,145                 | 0,580                 | 7,45              | < 1                                          |
| IV            | 4,16                                | -                                   | 0,033                 | 0,132                 | 7,51              | < 1                                          |
| V             | 4,16                                | -                                   | 0,058                 | 0,232                 | 7,41              | < 1                                          |
| VI            | 4,16                                | -                                   | -                     | 0,232                 | 7,34              | 1,30                                         |

$\tau_{pl} = 0,10 \cdot \tau_{v1}$  sowie  $\delta_{v1} = 0,25 \cdot \delta_{v0}$

**Tabelle 7.1:** Parameter der Verbundansätze und zugehörige Verbundbruchkräfte

fünf Verbundansätze nur geringe Unterschiede (Tab. 7.1, Spalte 7) in den Verbundbruchkräften. Diese liegen in einem Bereich von unter zwei Prozent und sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die iterative Lösung der Routine zurückzuführen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Wahl des Verbundansatzes für die Berechnung der Verbundbruchkräfte unerheblich ist, sofern sie die selbe Verbundbruchenergie  $G_v$  aufweisen.



**Abbildung 7.7:** Verbundkraft-Relativverformungskurven für unterschiedliche Verbundansätze, errechnet mit der Routine von Pörtner [Pör06]

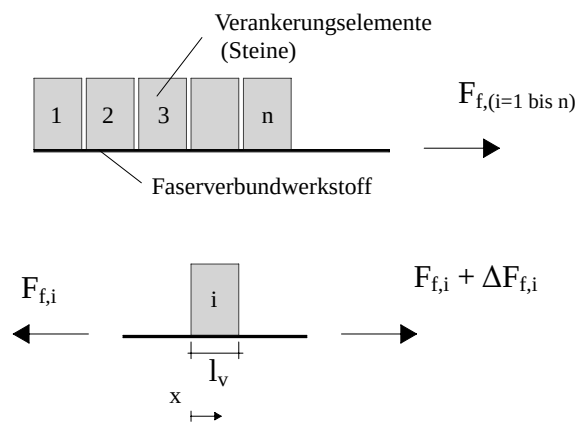
In Abbildung 7.7 sind für vier der sechs untersuchten Verbundansätze die Verbundkraft-Relativverformungskurven dargestellt. Für die Verbundansätze I und VI wurden aufgrund des sprunghaften Anstiegs zu Beginn der Schubspannungs-Verformungsbeziehungen keine Konvergenzen erreicht. Somit stehen hierfür keine Kurven zur Verfügung. So zeigt sich in Abhängigkeit des gewählten Verbundansatzes ein deutlicher Einfluss auf das Verbundkraft-Relativverformungsverhalten. Vergleicht man einzig die Verbundansätze III und IV miteinander so zeigt sich, dass zum Erreichen der maximalen Verbundschubspannung  $\tau_{v1}$  für den Ansatz III größere Relativverformungen am differentiellen Element aufgebracht werden müssen. In der Summe ergibt sich über die Verbundlänge hinweg für die selbe Verbundkraft eine größere Relativverformung (vgl. Abb. 7.7).

Zwar zeigt sich mit Verwendung des Verbundansatz V qualitativ eine gute Übereinstimmung zu den Versuchskurven (Versuche A41 bis A43), jedoch führt dieser zu einem steiferen Verformungsverhalten. Gleichwohl führt der Verbundansatz III zu einer guten Übereinstimmung zwischen der rechnerischen Kurve und den Versuchskurven.

## 7.2 Diskussion des Verbundmodells

Im Folgenden wird das Verbundmodell aus Kapitel 3.2.3 hinsichtlich der zu erwartenden Lösungen kritisch diskutiert. Phänomene und Eigenschaften des Modells sollen aufgezeigt und abschließend beurteilt werden.

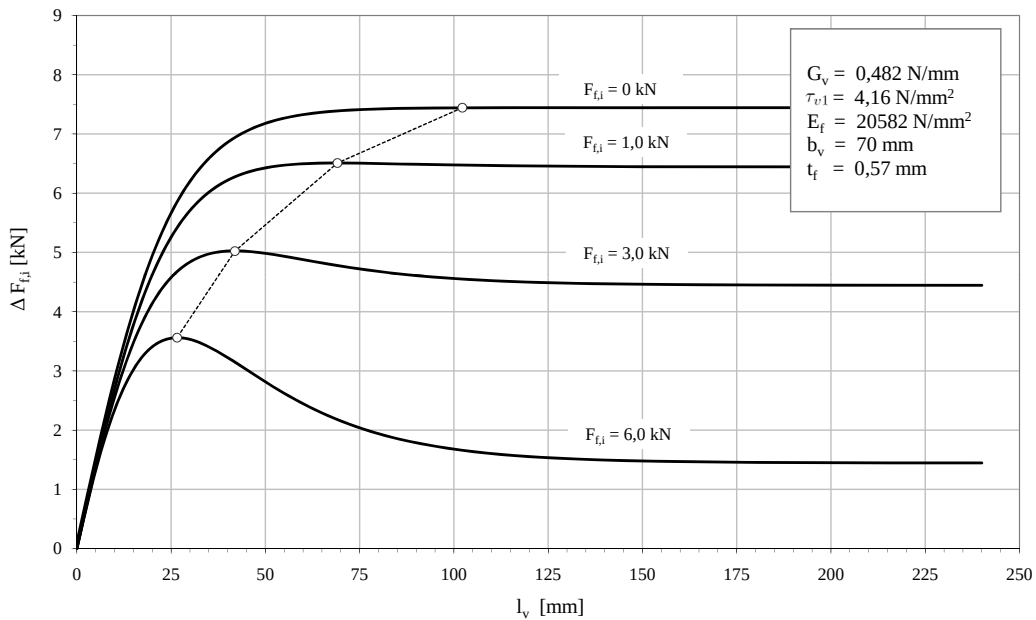
Die Verbundkraft am Zwischenrisselement kann für einen linear-verfestigenden Verbundansatz nach Gleichung 3.61 berechnet werden. Sind die Kennwerte der Faserverbundwerkstoffe und die Bruchenergie bekannt, können die am Zwischenrisselement aufnehmbaren Verbundkräfte  $\Delta F_{f,i}$  in Abhängigkeit der Verbundlängen und unterschiedlicher Zugkräfte  $F_{f,i}$  berechnet werden.



**Abbildung 7.8:** Kräfte am Zwischenrisselement

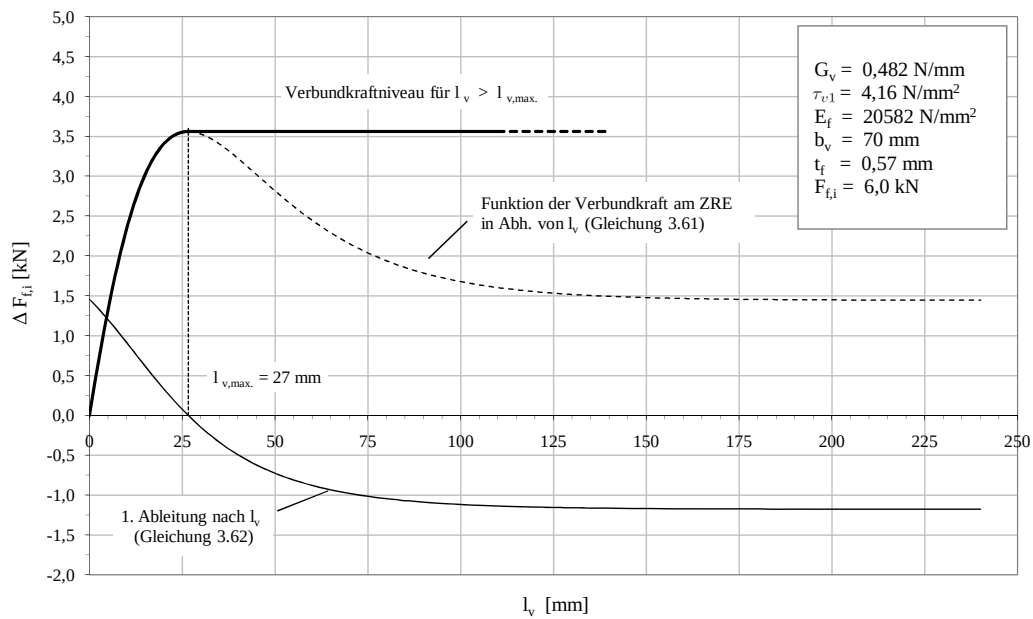
Hierbei war zu erwarten, dass die aufnehmbaren Verbundkräfte gegen einen maximalen Grenzwert streben, also konvergieren. In Abbildung 7.9 sind beispielhaft die am Zwischenrisselement aufnehmbaren Verbundkräfte  $\Delta F_{f,i}$  in Abhängigkeit der Verbundlänge für unterschiedliche  $F_{f,i}$  aufgetragen. Hier zeigt sich, dass die Verbundkräfte einzig für den Endverankerungsfall ( $F_{f,i} = 0$ ) gegen einen Maximalwert streben. Alle weiteren Kurven ( $F_{f,i} \neq 0$ ) zeigen nach dem Erreichen der maximalen Verbundkraft ein Absinken. Im ungünstigsten Fall führt dies bei anwachsenden Verbundlängen zu sinkenden rechnerischen Verbundbruchkräften. Dieses Verhalten erscheint zunächst widersprüchlich. Für die Herleitung des Verbundbruchmodells wurde in Gleichung 3.50 definiert, dass sich am Verbundende immer die Relativverformung von  $\delta_v(x = l_v) = \delta_{v1}$  einstellt. Dies lässt sich mit Gleichung 3.54 auch zeigen, worauf hier jedoch verzichtet werden soll. Im Gegensatz dazu ergibt sich die Relativverformung der Fügeiteile zu  $\delta_v(x = 0) = 0$ , wenn die maximale Verbundlänge  $l_{v,max}$  erreicht wird. Genau hier ergibt sich das Verbundkraftmaximum mit einem Gleichgewichtsverbund, in Abbildung 7.9 als Punkte gekennzeichnet. Die Herleitung des Verbundbruchmodells erfolgte, aufgrund der eingeführten Randbedingungen, einzig für den Bereich von  $0 \leq l_v \leq l_{v,max}$ . Eine Anwendung über die Verbundlänge von

$l_{v,max}$ . hinaus ist somit nicht zulässig und rechnerisch nicht richtig. Gleichwohl sollte es möglich sein das Verbundmodell mit den eingeführten Randbedingungen auch für Verbundlängen größer  $l_{v,max}$ . anzuwenden. Dies gelingt, wenn stillschweigend auf den Grenzwert der Lösung zurückgegriffen wird, wobei von einem Gleichgewichtsverbund ausgegangen wird (vgl. [Hol94, Nie00, Sch05]). Für die Zwischenrisselemente erfordert dies jedoch eine Relativverformung der einzelnen am Abtrag beteiligten Elemente. Diese Nachgiebigkeit wurde aufgrund der experimentellen Beobachtungen für die Herleitung des Verbundmodells unterstellt und gilt es zukünftig gegebenenfalls für dickere Mauerwerkswände zu prüfen. Für Verbundlängen kleiner  $l_{v,max}$ . können die Verbundbruchkräfte mit Gleichung 3.61 berechnet werden. Erreicht oder überschreitet die Verbundlänge die maximale Verbundlänge, ergeben sich die Verbundkräfte als Grenzwerte nach Gleichung 3.68 (vgl. Abb. 7.10). Somit muss für die Berechnung der Verbundkräfte eine Fallunterscheidung in Abhängigkeit zur Verbundlänge erfolgen.

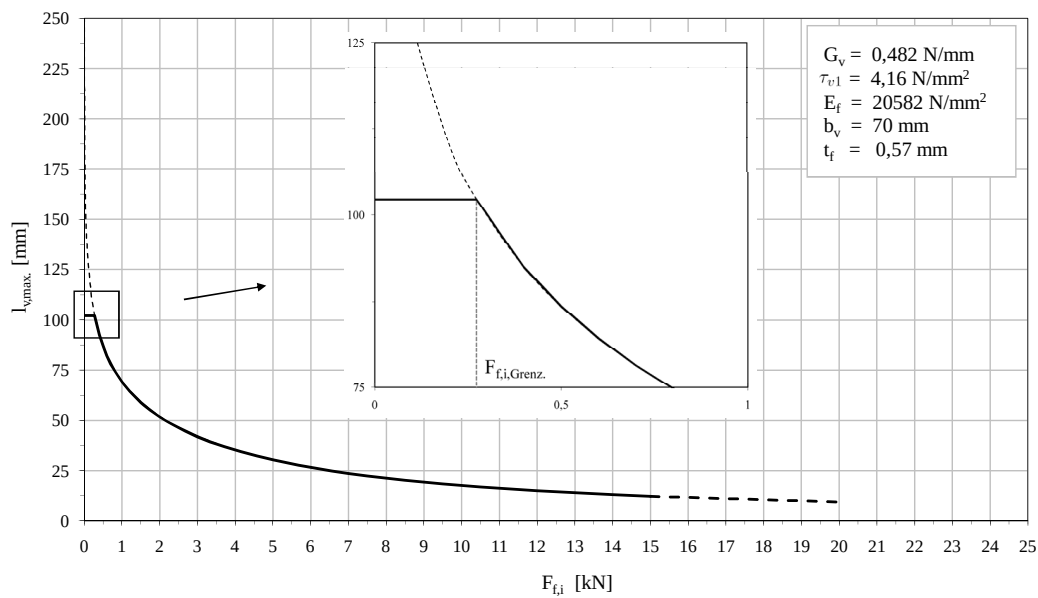


**Abbildung 7.9:** Verbundkräfte nach Gleichung 3.61 am Zwischenrisselement in Abhängigkeit der Verbundlänge für unterschiedliche  $F_{f,i}$  (Punkte: Verbundbruchkräfte bei  $l_{v,max}$ .)

Die maximalen Verbundlängen für die zugehörigen Verbundbruchkräfte können für das Zwischenrisselement mit Gleichung 3.65 berechnet werden. In Abbildung 7.11 sind beispielhaft die maximalen Verbundlängen in Abhängigkeit der Kraft  $F_{f,i}$  aufgetragen. So fällt auf, dass für „kleine“  $F_{f,i}$  die maximalen Verbundlängen stark ansteigen und letztlich gegen unendlich streben. Dieses Verhalten ist dadurch zu erklären, dass sich die maximale Verbundlänge der Situation eines Endverankerungselementes annähert, für welches sich die maximale Verbundlänge nach Gleichung 3.81 ergibt. Jedoch unter der Bedingung, dass der Ausdruck  $\tanh(\omega \cdot l_v)$  den Wert 1,0 annimmt. Dies geschieht



**Abbildung 7.10:** Ermittlung der Verbundkräfte am Zwischenrisselement für Verbundlängen  $l_v > l_{v,max}$ .



**Abbildung 7.11:** Maximale Verbundlänge in Abhängigkeit von der Zugkraft  $F_{f,i}$  nach Gleichung 3.65

jedoch nur für unendlich große Verbundlängen. Aus diesem Grund wurde für die Endverankerung ein Grenzwert mit  $\arctanh(1) \approx 4$  eingeführt, was genau genommen  $\arctanh(0,9993)$  entspricht. Somit ergeben sich die maximalen Verbundlängen für „kleine“ Kräfte von  $F_{f,i}$  nach Gleichung 3.81 und für „große“  $F_{f,i}$  nach Gleichung 3.65. Nach Gleichsetzen dieser und der Berücksichtigung der Gleichungen 3.46 und 3.82 erhält man den Umschlagspunkt zu:

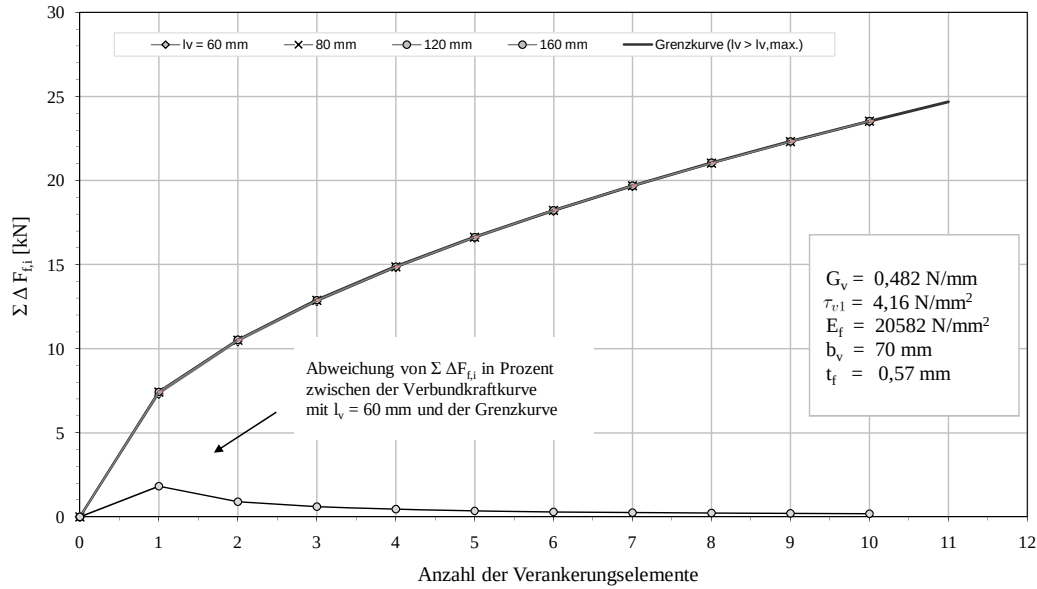
$$F_{f,i,Grenz.} = 2 \cdot F_{f,EVE} \cdot \frac{e^{-\omega \cdot l_{v,EVE}}}{1 + e^{-2 \cdot \omega \cdot l_{v,EVE}}} \quad (7.8)$$

Auch wenn die mit Gleichung 7.8 zu errechnenden Grenzkkräfte  $F_{f,i,Grenz.}$  oft schon mit der Verankerung am Endverankerungselement überschritten werden und sich hier die Berechnung der maximalen Verbundlänge nach Gleichung 3.81 verhältnismäßig einfach vornehmen lässt, muss streng genommen eine weitere Fallunterscheidung durchgeführt werden.

Vielleicht wird man sich spätestens ab diesem Punkt fragen, ob der Berechnungsalgorithmus nicht vereinfacht werden kann. Zur Klärung dieser Frage sind in Abbildung 7.12 die rechnerischen Verbundkräfte in Abhängigkeit von der Anzahl der Verankerungselemente aufgetragen. Für die Verbundlängen zwischen 60 mm und 160 mm wurde der zuvor beschriebene Rechenalgorithmus unter Berücksichtigung der Gleichungen 3.61 und 3.68 angewendet, wobei sich die Summen der Verbundkräfte über  $n$  Verankerungselemente wie folgt ergeben:

$$F_{f,u} = \sum_{i=1}^n \Delta F_{f,i} \quad (7.9)$$

Erreicht oder überschreitet die vorhandene Verbundlänge  $l_v$  die maximale Verbundlänge  $l_{v,max.}$ , so ergibt sich für die Verbundkräfte ein Maximalwert. Die Verbundkräfte können dann mit Gleichung 3.68 berechnet werden und sind in Abbildung 7.12 als „Grenzkurve“ bezeichnet. Für die Anwendung der Grenzkurve auf die Bemessung würde sich formal eine Vereinfachung ergeben, wenn diese mit wenigen Schritten hergeleitet werden könnte. Setzt man Gleichung 3.68 für mehrere Verankerungselemente in Gleichung 7.9 ein, so lässt sich die Verbundkraft  $F_f$  nach einer Umstellung als eine Reihe in Abhängigkeit zur Verbundbruchkraft am Endverankerungselement  $F_{f,EVE}$  (vgl. Gl. 3.82) und der Anzahl der Verankerungselemente  $n$  darstellen.  $F_{f,u}$  ergibt sich somit als vielfaches der Endverankerungskraft  $F_{f,EVE}$ , wobei die Faktoren unabhängig

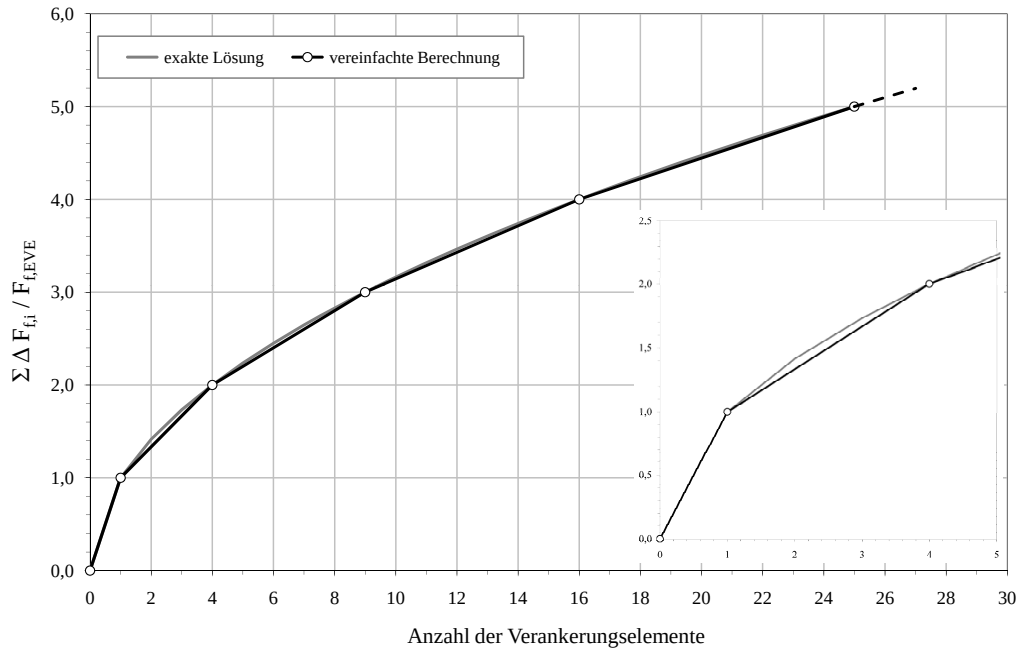


**Abbildung 7.12:** Verbundkraftkurven in Abhängigkeit der Verankerungselemente für unterschiedliche Verbundlängen (nach Gl. 7.9)

von den Materialparametern sind. Die Materialparameter gehen gleichwohl in die Berechnung der Endverankerungskraft mit ein. An dieser Stelle wäre es wünschenswert gewesen, die Reihe mit einer mathematischen Gleichung anzugeben. Diese wird nach der Berücksichtigung weniger Verankerungselemente jedoch so komplex, dass ein späterer Nutzen für die praktische Anwendung eher fraglich erschien. Auch wenn die Herleitung der Reihe aufgrund des Umfangs hier nicht dokumentiert werden soll, kann man unter zu Hilfenahme eines computeralgebra basierten Berechnungsprogramms zeigen, dass sich folgende Faktoren ergeben ( $F_{f,u} = 1,0/1,41/1,73/2,0 \cdot F_{f,EVE}$  für  $n = 1/2/3/4$  Verankerungselemente usw.). Diese sind für bis zu 25 Verankerungselemente als „exakte Lösung“ in Abbildung 7.13 dargestellt.

Formal wäre es möglich gewesen für jedes Verankerungselement einen Faktor anzugeben. Im Sinne der Vereinfachung wurde sich hier jedoch auf die ganzzahligen Faktoren beschränkt. Diese sind in Abbildung 7.13 mit einem weißen Punkt gekennzeichnet und werden im Folgenden als „Stützstellen“ bezeichnet. Mit diesem Wissen lässt sich nun die Grenzkurve vereinfacht als vielfaches der Endverankerungskraft aufstellen. Die hierfür erforderlichen Stützpunkte sind in Tabelle 7.2 festgehalten. Eine vereinfachte Berechnung der Grenzkurven kann mit Gleichung 7.10 erfolgen. Hierbei werden die Verbundkräfte aufgrund der konvexen Form der Grenzkurve eher unterschätzt, da die zwischen den Stützstellen liegenden Werte linear interpoliert werden.

$$F_{f,u} = \psi_v \cdot F_{f,EVE} \quad (7.10)$$



**Abbildung 7.13:** Vereinfachte Berechnung der Grenzkurve

mit:

$$\psi_v = \lambda_{inf.} + \frac{n - i_{inf.}}{i_{sup.} - i_{inf.}} \cdot (\lambda_{sup.} - \lambda_{inf.}) \quad (7.11)$$

|                  |                                                            |
|------------------|------------------------------------------------------------|
| $n$              | Anzahl der Verankerungselemente                            |
| $i_{inf.}$       | Anzahl der Verankerungselemente für die untere Stützstelle |
| $i_{sup.}$       | Anzahl der Verankerungselemente für die obere Stützstelle  |
| $\lambda_{inf.}$ | unterer Stützwert                                          |
| $\lambda_{sup.}$ | oberer Stützwert                                           |

Da die Grenzkurven auf diese Art und Weise vereinfacht berechnet werden können, wird dieses Vorgehen im Folgenden als „vereinfachtes Verfahren“ bezeichnet. Im Gegensatz dazu wird die exakte Ermittlung der Verbundkräfte als „genaues Verfahren“ bezeichnet. Für das in Abbildung 7.12 gezeigte Beispiel ergeben sich schon bei Verbundlängen von 38 mm geringe Differenzen (Fehler) zwischen den nach dem genauen Verfahren und dem vereinfachten Verfahren (Grenzkurve) errechneten Verbundkräften. Dies kann jedoch nicht verallgemeinert werden. Die Differenzen der Verfahren

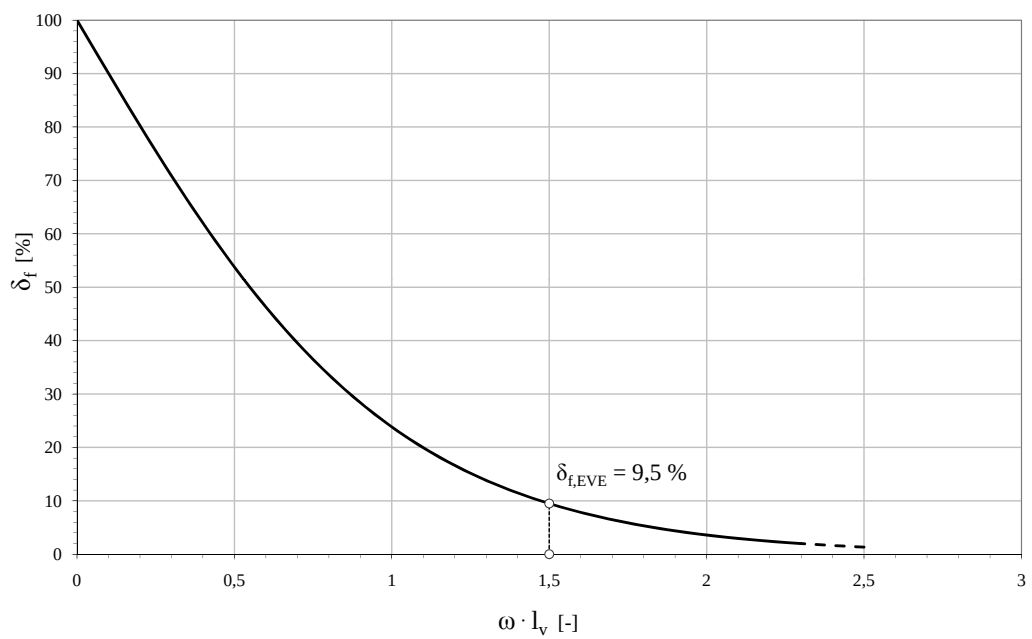
| Anzahl der<br>Verankerungselemente | Stützwert<br>$\lambda$ [-] |
|------------------------------------|----------------------------|
| 1                                  | 1,0                        |
| 4                                  | 2,0                        |
| 9                                  | 3,0                        |
| 16                                 | 4,0                        |
| 25                                 | 5,0                        |
| 36                                 | 6,0                        |

**Tabelle 7.2:** Stützwerte  $\lambda$  in Abhängigkeit der Verankerungselemente

ergeben sich in Abhängigkeit zum Ausdruck  $\omega \cdot l_v$ , wobei sich der größte Fehler am Endverankerungselement ergibt. Die Größe des Fehlers kann nach Gleichsetzen der Gleichungen 3.79 und 3.82 wie folgt angegeben werden:

$$\delta_{f,EVE} = \frac{\Delta F_{f,1}}{F_{f,EVE}} = 1 - \tanh(\omega \cdot l_v) \quad (7.12)$$

Der verursachte Fehler bei der Anwendung des vereinfachten Verfahrens ist für das Endverankerungselement in Abbildung 7.14 graphisch aufgetragen. Die Schwierigkeit besteht nun darin, einen für die spätere Anwendung maximal zulässigen Fehler der errechneten Verbundkräfte für die Anwendung des vereinfachten Verfahrens festzulegen. Wird dieser bei der Anwendung erreicht, muss die Verbundkraftberechnung nach dem genauen Verfahren erfolgen. Da bekannt ist, dass der größte Fehler am Endverankerungselement auftritt, wird der Ausdruck  $\omega \cdot l_v$  nach Gleichung 7.12 für die Anwendung des vereinfachten Verfahrens auf  $\geq 1,5$  begrenzt. Der größte Fehler ergibt sich demnach am Endverankerungselement zu 9,5 %, wobei die Verbundbruchkräfte überschätzt werden und nimmt für die weiteren Elemente rasch und deutlich ab (Abb. 7.12).



**Abbildung 7.14:** maximaler Fehler nach Gleichung 7.12 bei der Anwendung des vereinfachten Verfahrens zur Berechnung der Verbundkräfte

Für die vereinfachte Berechnung der Verankerungskräfte nach Gleichung 7.10 müssen somit weder

1. eine Fallunterscheidung für die Verbundlängen  $l_{v,max.}$ ,
2. eine weitere Fallunterscheidung für die Verankerungskräfte  $F_{f,i}$
3. sowie eine iterative Berechnung vorgenommen werden.

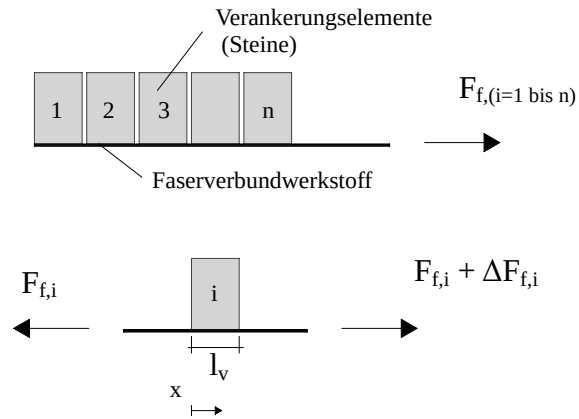
Die Verbundbruchkräfte können für eine beliebige Anzahl von Verankerungselementen (hier bis 36 angegeben) direkt mit wenigen Schritten errechnet werden. Ein iteratives Vorgehen ist hierfür nicht erforderlich. Jedoch kann das vereinfachte Verfahren nur eingeschränkt für Systeme mit  $\omega \cdot l_v$  Werten  $\geq 1,5$  angewendet werden. Letztendlich lassen sich mit dem vereinfachten Verfahren die Verbundbruchkräfte für auf Mauerwerk aufgeklebte Faserverbundwerkstoffe einfach, schnell und übersichtlich berechnen.

## 7.3 Zusammenfassung des Verbundmodells

In den Abbildungen 7.16 und 7.17 ist der hergeleitete Algorithmus für die Berechnung der Verbundbruchkräfte von auf Mauerwerk aufgeklebten Faserverbundwerkstoffen übersichtlich und unter Angabe aller erforderlichen Gleichungen dargestellt. Für die Berechnung der Verbundkräfte ist die Kenntnis über folgende Eingangsgrößen erforderlich:

|              |                                                                         |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $l_v$        | Verbundlänge                                                            |
| $b_v$        | Verbundbreite                                                           |
| $b_{v,sup.}$ | Breite des Verankerungskörpers nach Abschnitt 7.1.2                     |
| $t_f$        | Dicke des Faserverbundwerkstoffes nach Abschnitt 4.3                    |
| $E_f$        | Elastizitätsmodul des Faserverbundwerkstoffes nach Abschnitt 4.3        |
| $f_{st}$     | Steindruckfestigkeit senkrecht zur Verbundfläche nach Abschnitt 4.4     |
| $f_{st,t}$   | Oberflächenzugfestigkeit senkrecht zur Verbundfläche nach Abschnitt 4.4 |
| $c_v$        | Kalibrierungsfaktor nach Abschnitt 7.1.3                                |

Zum besseren Verständnis seien in Abbildung 7.15 nochmals die am Verankerungselement angreifenden Kräfte dargestellt. Für die Berechnung der Verbundtragfähigkeit muss stets am Endverankerungselement mit  $F_{f,i}(i = 1) = F_{f,1} = 0$  kN begonnen werden. Der im Struktogramm verwendete Index  $i$  stellt eine Zählvariable für das berücksichtigte Verankerungselement dar. Diese kann die Werte  $i = 1$  für das Endverankerungselement bis  $i = n$  für das letzte Verankerungselement annehmen. Somit ist



**Abbildung 7.15:** Kräfte am Zwischenrisselement

neben den Eingangsgrößen die Kenntnis über die beanspruchten Verankerungselemente erforderlich. Die Anzahl der Elemente ergibt sich letztendlich aus dem Strukturmodell am Wandknoten. Hierfür kann die Theorie der Spannungsfelder herangezogen werden (vgl. Abs. 3.1).

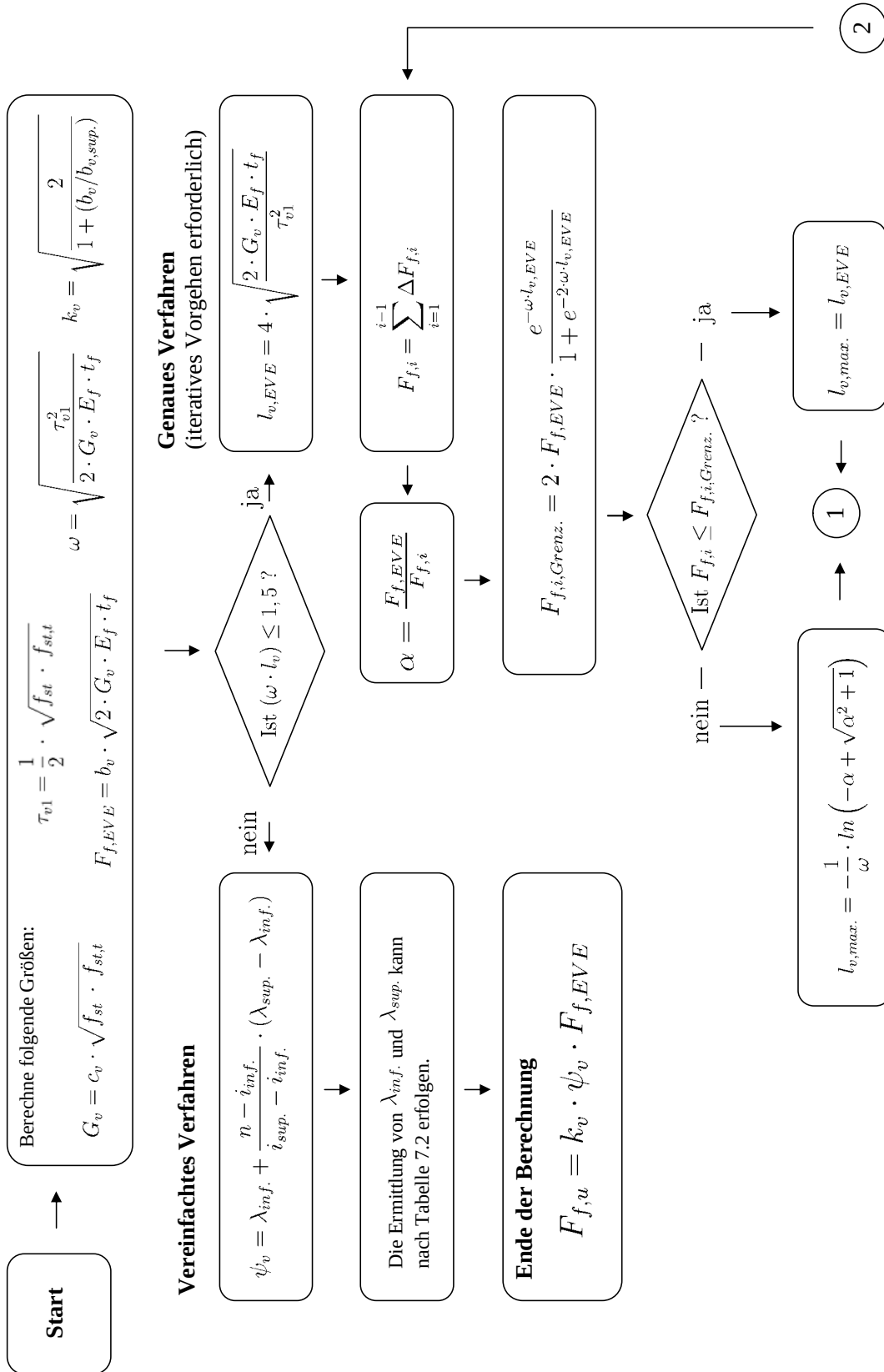


Abbildung 7.16: Bemessung der Verbundtragfähigkeit (1/2)

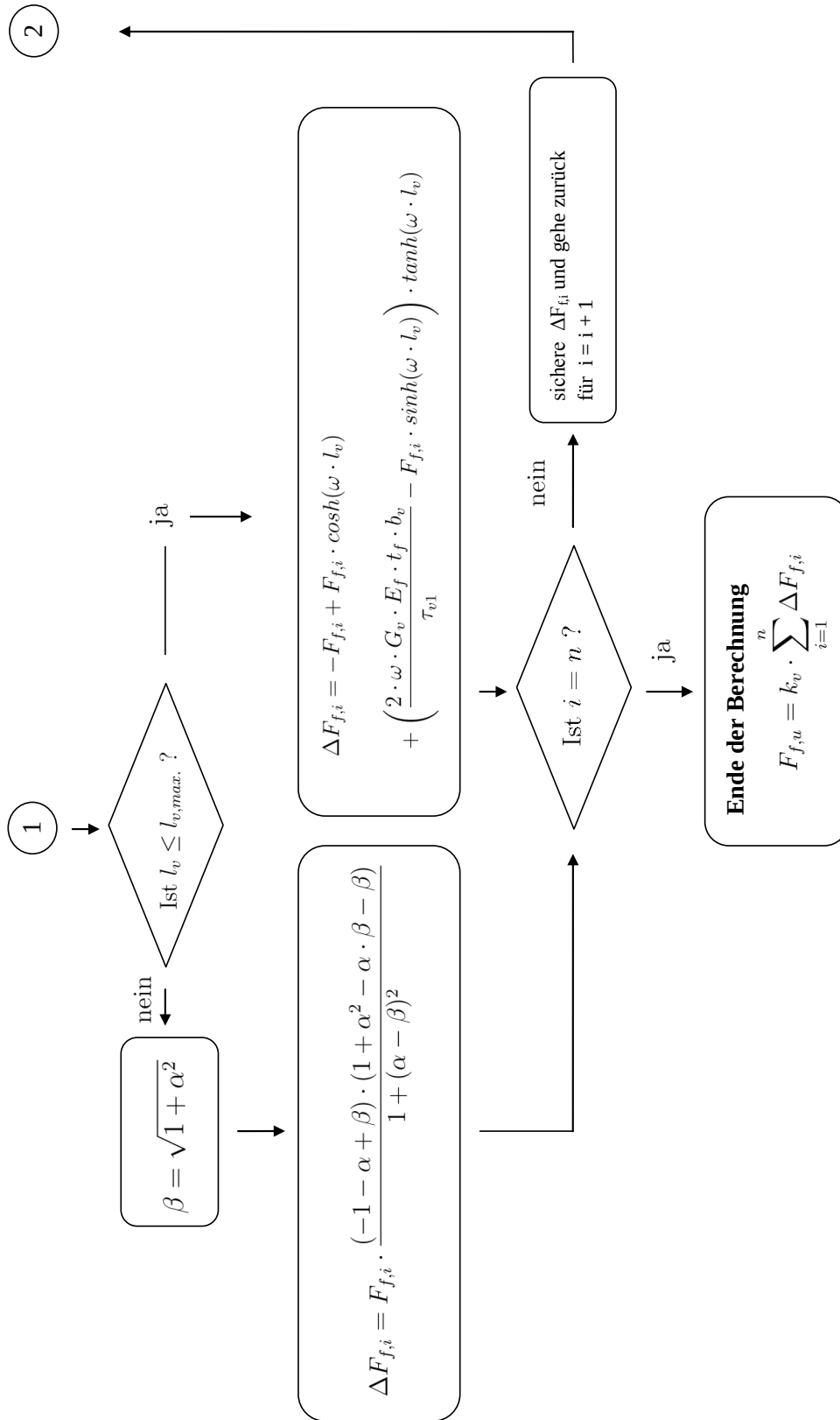


Abbildung 7.17: Bemessung der Verbundtragfähigkeit (2/2)

## 8 Verifizierende Berechnungen

Im folgenden Kapitel soll die Zuverlässigkeit des entwickelten Verbundmodells aufgezeigt werden. Hierzu werden die experimentellen Untersuchungsergebnisse mit den rechnerischen Lösungen des Verbundmodells verglichen und eine Bewertung der Ergebnisse vorgenommen. Es sei noch angemerkt, dass die verifizierenden Berechnungen mit den mittleren Festigkeitswerten der Werkstoffe durchgeführt wurden.

### 8.1 Anwendung des Modells auf die eigenen Versuche

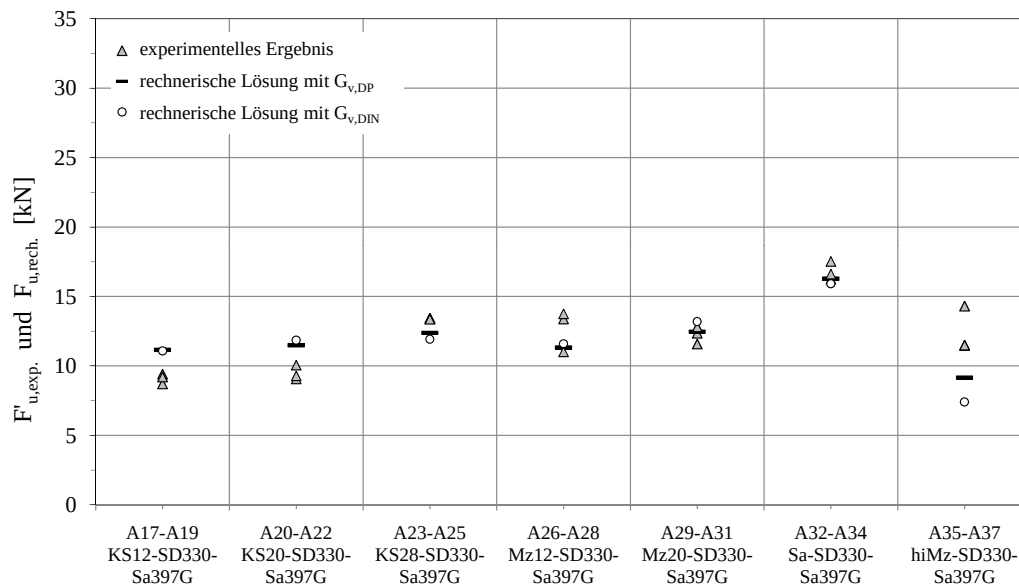
#### 8.1.1 Serie A

Mit der Serie A sollte der Einfluss der Steinart, der Klebstoffe und der Faserverbundwerkstoffe auf das Verbundbruchverhalten untersucht werden. Hierbei betrugen die Verbundlängen einheitlich 240 mm, was der Länge eines normalformatigen Mauersteins entspricht. Die Berechnung der Verbundbruchkräfte am Endverankerungselement kann mit Gleichung 7.7 und den in Tabelle 8.1 angegebenen Eingangsgrößen erfolgen. Der Beiwert  $k_v$  zur Berücksichtigung der Kraftausbreitung am Verankerungskörper ergibt sich einheitlich zu 1,0. Für den Vergleich der experimentellen mit den rechnerischen Verbundbruchkräften (Abb. 8.1 bis 8.3) wurden die in den Tabellen 5.3 und 5.4 enthaltenen Verbundbruchkräfte  $F_{u,exp.}$  wie in Abschnitt 7.1.1 angegeben auf die Verbundkräfte bei Entkoppelungsbeginn  $F'_{u,exp.}$  überführt.

Der Verbundansatz wurde mit den Versuchen A17 bis A58 kalibriert. Bleiben die Bestandsziegel vorläufig unberücksichtigt, so ergibt sich die größte Abweichung zwischen der experimentellen und der rechnerischen Verbundbruchkraft für die Versuche A20 bis A22 zu 25%. Bezieht man die Versuche A1 bis A16 mit ein, hier kamen andere Glasfasergelege zur Anwendung, so ergeben sich auch hier gute Übereinstimmungen der Verbundbruchkräfte. Größere Abweichungen gegenüber den experimentellen Verbundbruchkräften zeigen sich bei der Verwendung des Kohlenstofffasergeleges der Versuche A62 bis A67. Dies lässt den Schluss zu, dass die Kalibrierung des Verbundmodells für die Kombination aus Klebstoff (vgl. Abs. 7.1.3) und den Gelegen erfolgen muss. Ist dies erfolgt, können die Verbundbruchkräfte für unterschiedliche Steinarten unter Verwendung der Druck- und Oberflächenzugfestigkeiten berechnet werden.

| Versuch | Stein | Klebstoff | Gelege   | $\bar{f}_{st,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{st,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{st,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $b_v$<br>[mm] | $E_f$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $t_f$<br>[mm] | $c_{v,DP}$<br>[-] | $c_{v,DIN}$<br>[-] |
|---------|-------|-----------|----------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|-------------------|--------------------|
| A1-A4   | KS20  | SD330     | SW430G   | 2,62                                         | 2,32                                          | 26,16                                    | 70            | 13060                         | 1,35          | 0,030             | 0,034              |
| A5-A8   | KS20  | SP55      | SW430G   | 2,64                                         | 2,13                                          | 26,16                                    | 70            | 12999                         | 1,13          | 0,058             | 0,075              |
| A9-A12  | KS20  | SD330     | SP90/10G | 2,62                                         | 2,32                                          | 26,16                                    | 70            | 14014                         | 1,13          | 0,030             | 0,034              |
| A13-A16 | KS20  | SP55      | SP90/10G | 2,64                                         | 2,13                                          | 26,16                                    | 70            | 12077                         | 1,05          | 0,058             | 0,075              |
| A17-A19 | KS12  | SD330     | Sa397G   | 2,35                                         | 1,78                                          | 25,98                                    | 70            | 19345                         | 0,70          | 0,030             | 0,034              |
| A20-A22 | KS20  | SD330     | Sa397G   | 2,62                                         | 2,32                                          | 26,16                                    | 70            | 19345                         | 0,70          | 0,030             | 0,034              |
| A23-A25 | KS28  | SD330     | Sa397G   | 2,70                                         | 1,81                                          | 34,27                                    | 70            | 19345                         | 0,70          | 0,030             | 0,034              |
| A26-A28 | Mz12  | SD330     | Sa397G   | 2,07                                         | 1,78                                          | 31,22                                    | 70            | 19345                         | 0,70          | 0,030             | 0,034              |
| A29-A31 | Mz20  | SD330     | Sa397G   | 2,35                                         | 2,30                                          | 40,43                                    | 70            | 19345                         | 0,70          | 0,030             | 0,034              |
| A32-A34 | Sa    | SD330     | Sa397G   | 3,21                                         | 2,28                                          | 86,47                                    | 70            | 19345                         | 0,70          | 0,030             | 0,034              |
| A35-A37 | hiMz  | SD330     | Sa397G   | 1,67                                         | 0,56                                          | 22,19                                    | 65            | 19345                         | 0,70          | 0,030             | 0,034              |
| A38-A40 | KS12  | SP55      | Sa397G   | 2,75                                         | 1,62                                          | 25,98                                    | 70            | 20582                         | 0,57          | 0,058             | 0,075              |
| A41-A43 | KS20  | SP55      | Sa397G   | 2,64                                         | 2,13                                          | 26,16                                    | 70            | 20582                         | 0,57          | 0,058             | 0,075              |
| A44-A46 | KS28  | SP55      | Sa397G   | 2,84                                         | 1,80                                          | 34,27                                    | 70            | 20582                         | 0,57          | 0,058             | 0,075              |
| A47-A49 | Mz12  | SP55      | Sa397G   | -                                            | 1,68                                          | 31,22                                    | 70            | 20582                         | 0,57          | 0,058             | 0,075              |
| A50-A52 | Mz20  | SP55      | Sa397G   | 2,30                                         | 2,03                                          | 40,43                                    | 70            | 20582                         | 0,57          | 0,058             | 0,075              |
| A53-A55 | Sa    | SP55      | Sa397G   | 3,69                                         | 2,49                                          | 86,47                                    | 70            | 20582                         | 0,57          | 0,058             | 0,075              |
| A56-A58 | hiMz  | SP55      | Sa397G   | 2,11                                         | 0,97                                          | 22,19                                    | 65            | 20582                         | 0,57          | 0,058             | 0,075              |
| A62-A64 | KS20  | SP55      | SP240C   | 2,96                                         | 2,82                                          | 29,11                                    | 70            | 35398                         | 1,09          | 0,058             | 0,075              |
| A65-A67 | Mz20  | SP55      | SP240C   | 2,30                                         | 2,03                                          | 40,43                                    | 70            | 35398                         | 1,09          | 0,058             | 0,075              |

Tabelle 8.1: Eingangsgroßen



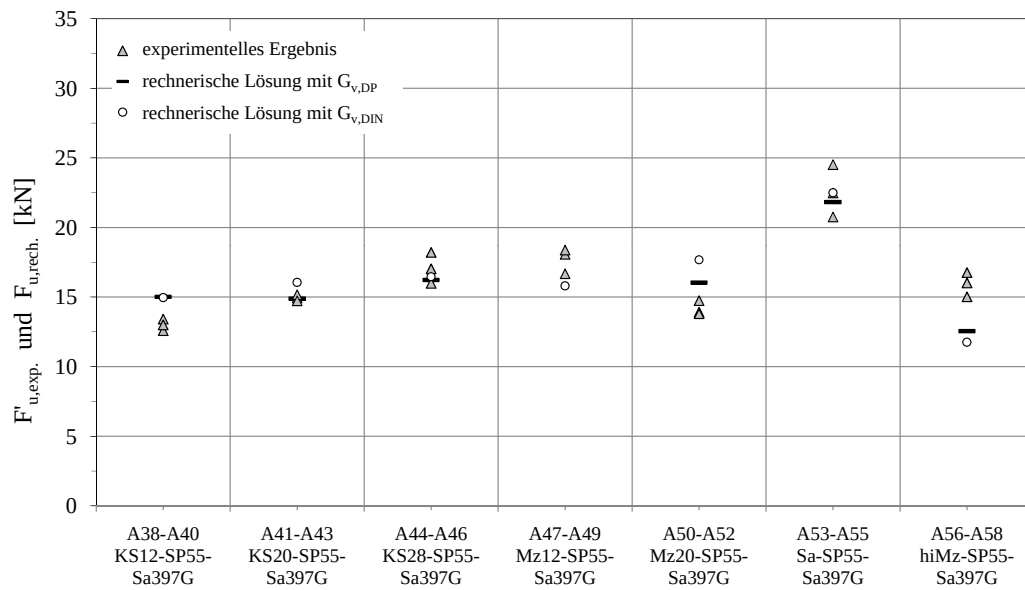
**Abbildung 8.1:** Versuche A17 bis A37: Vergleich der experimentellen und rechnerischen Verbundbruchkräfte

Zu den Bestandsziegeln sei noch angemerkt, dass hier die Verbundbruchkräfte unterschätzt werden. Dies deutete sich schon im Vorfeld der verifizierenden Berechnungen durch die im Vergleich zu den Steinfestigkeiten hohe Bruchenergie an (vgl. Abb. 7.5). Hierzu können derzeit keine abschließenden Aussagen getroffen werden. Die Ursache könnte jedoch in der vergleichsweise porösen Steinstruktur oder im Herstellungsverfahren (Handformverfahren) liegen. Beide Ursachen könnten ein stärkeres Eindringen der Klebstoffe in die Steinoberfläche begünstigen, was in der Folge zu einer Verfestigung führen könnte. Dies wiederum ermöglicht höhere Verbundbruchkräfte.

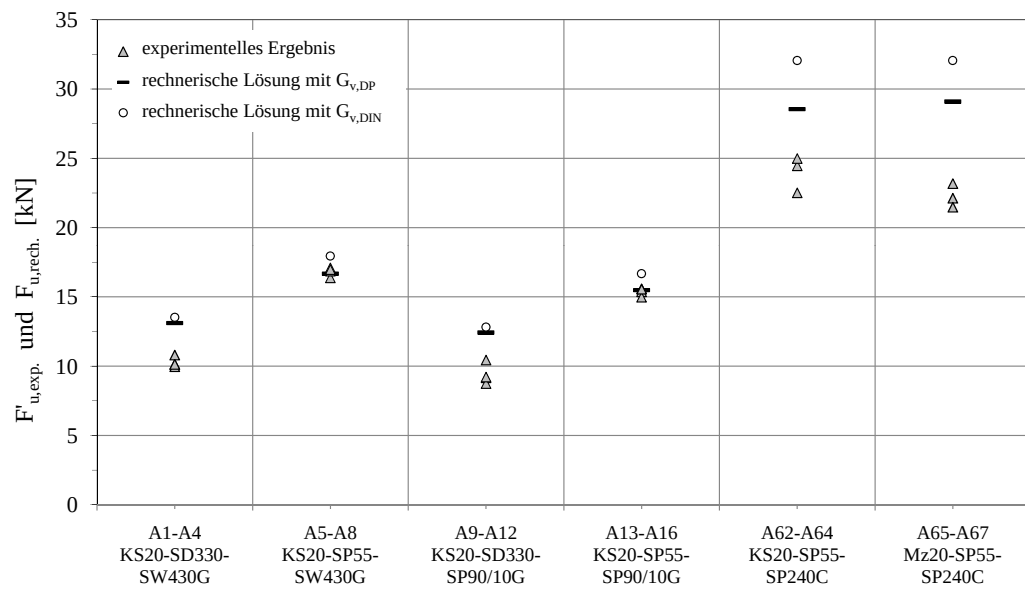
### 8.1.2 Serie B

Mit der Serie B galt es das Verbundbruchverhalten für unterschiedliche Verbundlängen zu untersuchen. So wurden stellvertretend für den Ziegel (Mz20) und den Kalksandstein (KS20) die Verbundlängen am Endverankerungselement (NF-Stein) um jeweils 60 mm von 240 mm auf 180 mm, 120 mm und 60 mm reduziert. Hiermit sollten drei Fragen beantwortet werden. Lässt sich mit Gleichung 3.81 die maximale Verbundlänge zutreffend berechnen? Sind die mit Gleichung 7.7 für unterschiedliche Verbundlängen berechneten Verbundbruchkräfte nahe am experimentellen Ergebnis und ist der in Abschnitt 7.1.1 gewählte Ansatz zur Reduzierung der Verbundbruchkräfte sinnvoll?

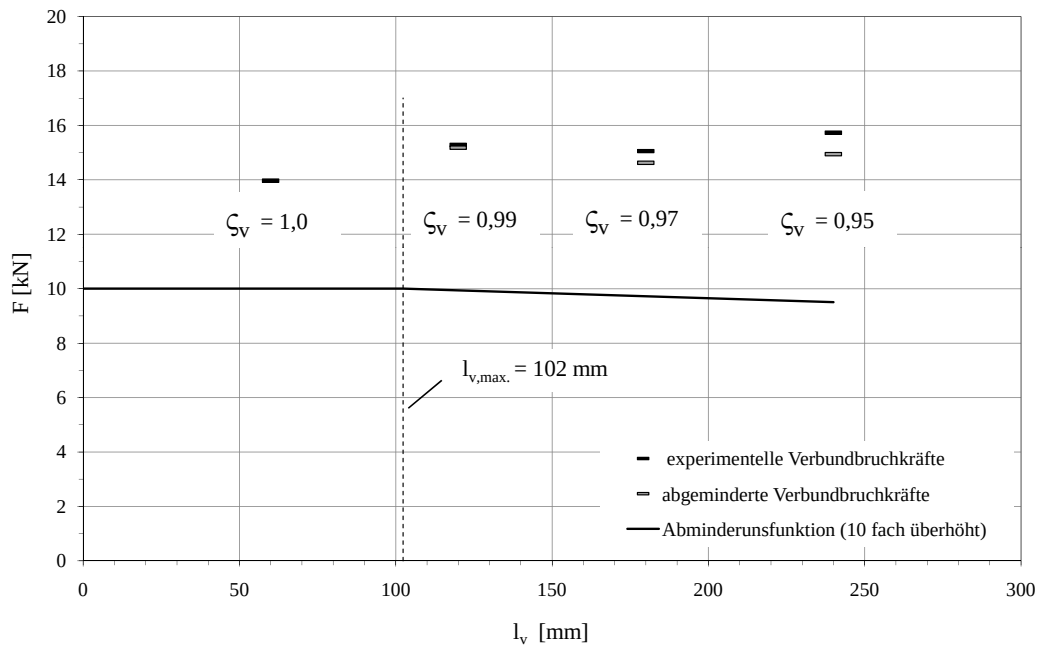
In den Abbildungen 8.4 und 8.6 wurden die experimentellen Verbundbruchkräfte  $F_{u,exp.}$  aus Tabelle 5.5 nach dem in Abschnitt 7.1.1 angegebenen Verfahren auf die



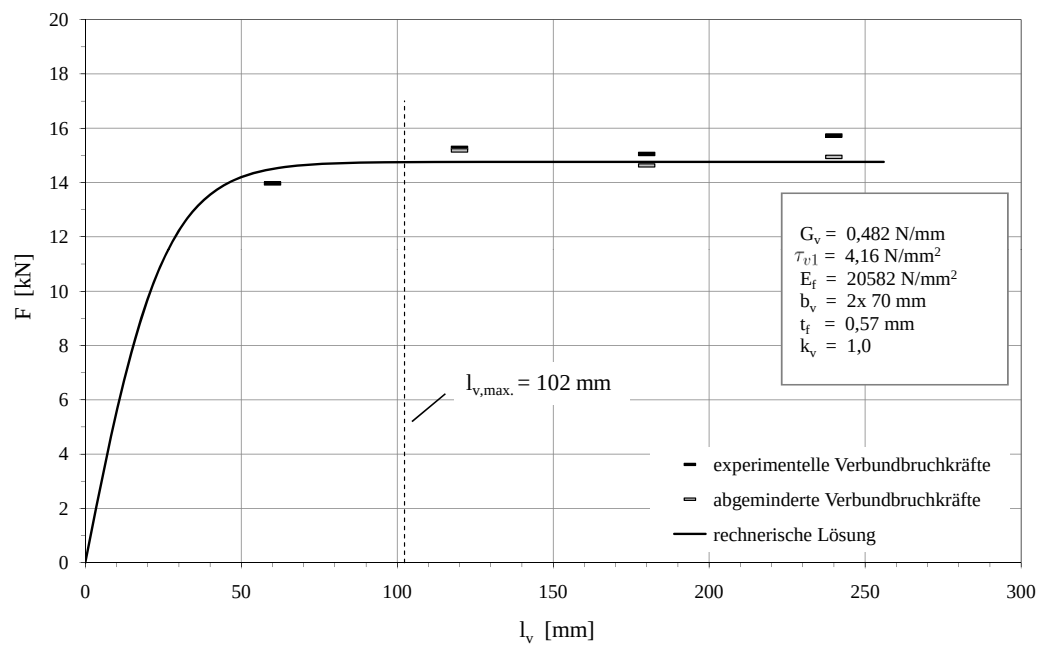
**Abbildung 8.2:** Versuche A38 bis A58: Vergleich der experimentellen und rechnerischen Verbundbruchkräfte



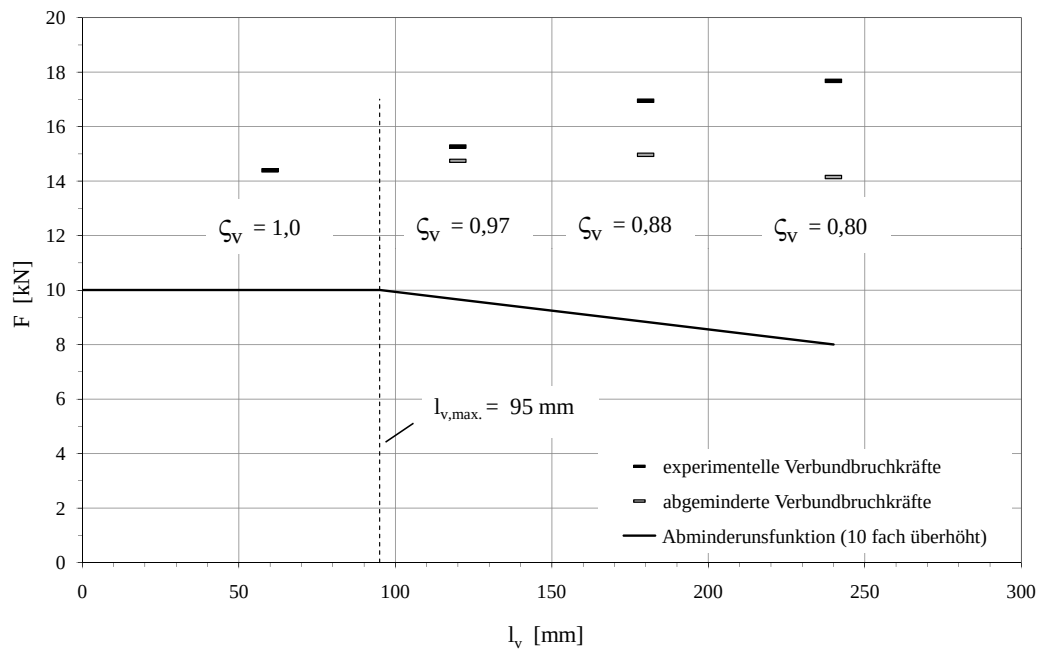
**Abbildung 8.3:** Versuche A1 bis A16 und A62 bis A67: Vergleich der experimentellen und rechnerischen Verbundbruchkräfte



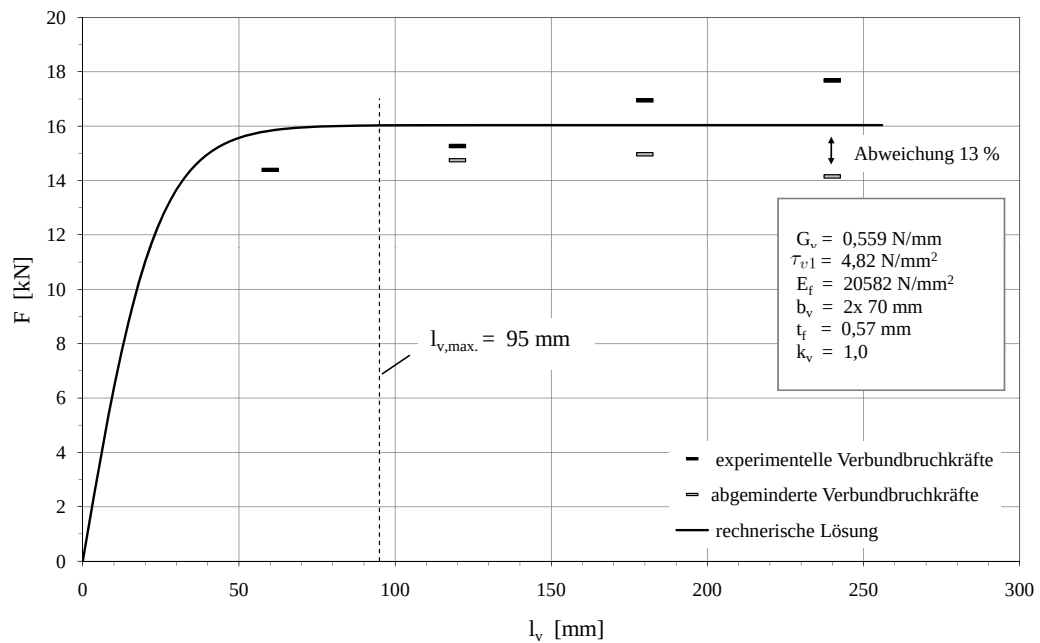
**Abbildung 8.4:** Versuche A41-A43 und B1-B9: Abminderung der Verbundbruchkräfte nach Abs. 7.1.1 für KS20



**Abbildung 8.5:** Versuche A41-A43 und B1-B9: Vergleich der Verbundbruchkräfte für KS20



**Abbildung 8.6:** Versuche A50-A52 und B10-B18: Abminderung der Verbundbruchkräfte nach Abs. 7.1.1 für Mz20



**Abbildung 8.7:** Versuche A50-A52 und B10-B18: Vergleich der Verbundbruchkräfte für Mz20

Verbundbruchkräfte bei Entkoppelungsbeginn  $F'_{u,exp.}$  überführt. Vergleicht man nun in den Abbildungen 8.5 und 8.7 die abgeminderten Verbundbruchkräfte miteinander, so zeigt sich über die Verbundlänge hinweg eine näherungsweise Linearität der Bruchkräfte. Dies lässt den Schluss zu, dass der gewählte Ansatz der linearen Abminderung das Reibverhalten zutreffend erfasst. Weiter ist in den Abbildungen 8.5 und 8.7 eine Reduzierung der Verbundbruchkraft bei 60 mm gegenüber der Verbundbruchkraft bei 120 mm zu erkennen. Auch wenngleich für beide Materialien (KS20 und Mz20) nur eine Bruchkraft unterhalb der maximalen Verbundlänge liegt, erscheint die rechnerische Lösung der Verbundbruchkräfte aber auch der maximalen Verbundlänge plausibel.

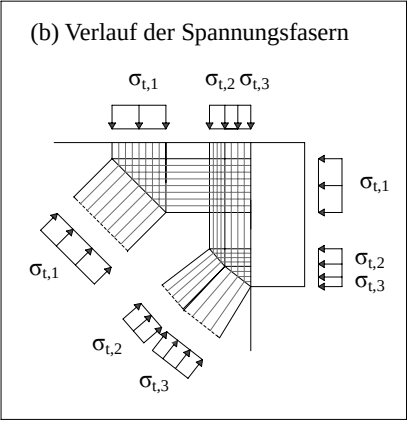
Es sei noch angemerkt, dass sich für den Ziegel im Vergleich zum Kalksandstein größere Abweichungen zwischen der rechnerischen Lösung und dem experimentellen Ergebnis (vgl. Abb. 8.7) ergeben. Diese Abweichung ist jedoch weder auf die Abminderung noch auf die rechnerische Lösung im Allgemeinen zurückzuführen. Vielmehr ergab sich die Abweichung von 13% für den Ziegel schon mit der Kalibrierung des Verbundansatzes auf sechs Steinarten (vgl. Abs. 7.1.3). Abschließend soll festgehalten werden, dass sich die Verbundbruchkräfte über die Verbundlänge für die hier untersuchten Werkstoffkombinationen mit dem hergeleiteten Verbundmodell - im Rahmen der Streuungen - zutreffend berechnen lassen. Das schließt das Verbundmodell als auch die lineare Abminderung der Verbundbruchkräfte über die Verbundlänge mit ein.

### 8.1.3 Serie C

Für die Verifizierung der Versuchsergebnisse der Serie C reicht es nicht mehr aus, einzig ein Verbundmodell anzuwenden. Vielmehr muss die Berechnung der Verbundbruchkräfte unter Zuhilfenahme eines Strukturmodells erfolgen. Die Strukturmechanik soll mit Spannungsfeldern und die Bruchmechanik der Klebverbindung mit dem in Abschnitt 7.3 zusammengefassten Verbundmodell abgebildet werden. Zur Absicherung des Struktur- und des Verbundmodells, wurden sechs Verbundflächengeometrien ( $490 \text{ cm}^2$  bis  $1480 \text{ cm}^2$ ) in Kombination mit unterschiedlichen Faserverbundwerkstoffdicken (2 bis 4 Gelegelagen) für zwei Steinarten und zwei unterschiedliche Winkel ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ) zwischen den Fasern und der Lagerfuge untersucht (vgl. Tab. 6.2).

In Abbildung 8.8 sei beispielhaft ein Wandknoten mit den angreifenden äußeren Kräften dargestellt. Zur Modellierung des inneren und äußeren Kraftabtrags sind im Wesentlichen drei Schritte erforderlich. Zuerst gilt es die Verbundkräfte zu berechnen. Anschließend kann der innere Kraftabtrag im Wandknoten mit Spannungsfeldern erklärt und abschließend das äußere Gleichgewicht gebildet werden.

Die Berechnung der Verbundbruchkräfte erfolgte mit den in Tabelle 8.2 angegebenen Kenngrößen für das *genaue* und *vereinfachte* Berechnungsverfahren (vgl. Abb. 7.16 und 7.17) und den mittleren Festigkeitskennwerten. Da die Faserverbundwerkstoffe



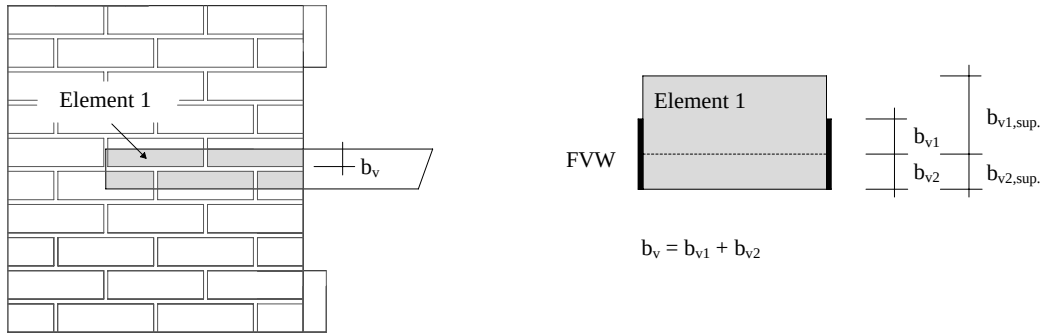
| Versuche  | $\bar{f}_{st,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{st,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{E}_f$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{t}_f$<br>[mm] | $c_{v,DP}$<br>[-] | $G_{v,DP}$<br>[N/mm] |
|-----------|----------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|-------------------|----------------------|
| C1 - C3   | 2,98                                         | 37,76                                    | 22548                               | 1,14                | 0,058             | 0,615                |
| C4 - C6   | 2,98                                         | 37,76                                    | 22548                               | 1,14                | 0,058             | 0,615                |
| C7 - C9   | 2,66                                         | 26,64                                    | 22548                               | 1,14                | 0,058             | 0,488                |
| C10 - C12 | 2,66                                         | 26,64                                    | 22548                               | 1,14                | 0,058             | 0,488                |
| C13 - C15 | 2,66                                         | 26,64                                    | 24253                               | 1,55                | 0,058             | 0,488                |
| C16 - C18 | 2,60                                         | 25,40                                    | 24253                               | 1,55                | 0,058             | 0,471                |
| C19 - C21 | 2,60                                         | 25,40                                    | 25616                               | 2,08                | 0,058             | 0,471                |
| C22 - C24 | 2,60                                         | 25,40                                    | 24253                               | 1,55                | 0,058             | 0,471                |

in der Regel nicht mittig sondern vielmehr versetzt auf die Steine aufgeklebt wurden, wurde der Beiwert  $k_v$  bezogen auf den Schwerpunkt der Faserverbundwerkstoffe (vgl. Abb. 8.9) wie folgt berechnet:

$$k_v = \frac{k_{v1} + k_{v2}}{2} \quad (8.1)$$

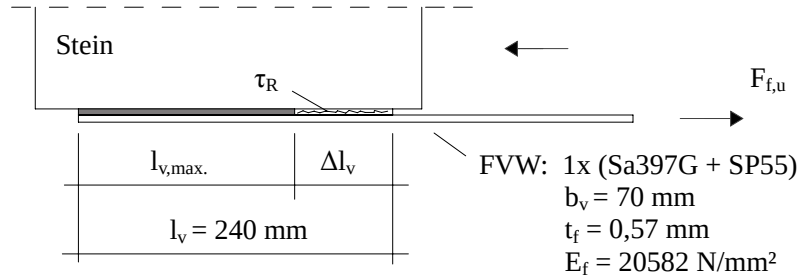
$$k_{v1} = \sqrt{\frac{2}{1 + (b_{v1}/b_{v1,sup.})}} \quad (8.2)$$

$$k_{v2} = \sqrt{\frac{2}{1 + (b_{v2}/b_{v2,sup.})}} \quad (8.3)$$



**Abbildung 8.9:** Größen für die Berechnung des Beiwerts  $k_v$

Im Zuge der Verbunduntersuchungen am Endverankerungselement wurde deutlich, dass sich die Verbundbruchkraft  $F_{f,u}$  (vgl. Abb. 8.10) aus einem Verbundkraftanteil  $F_f$  und einem Reibungsanteil  $F_R$  - welcher aus dem aneinander Reiben der Füge Teile Stein und Faserverbundwerkstoff nach dem Entkoppeln resultiert (vgl. Abb. 5.9 und 5.10) - ergibt. Auch bei den experimentellen Untersuchungen am Wandknoten konnte ein Risswachstum zwischen Faserverbundwerkstoffen und Steinen kurz vor dem Verbundversagen beobachtet werden. Hieraus kann geschlussfolgert werden, dass sich auch am Wandknoten Reibungsanteile der Verbundkräfte ergaben. Für eine Berücksichtigung der Reibung bei der Verifizierung der Ergebnisse der Serie C wird der Spannungswert der Reibung  $\tau_R$  benötigt. Ist diese Größe bekannt, können die Reibungsanteile  $F_R$  für die Endverankerungs- und Zwischenrisselemente berechnet werden.



$l_{v,max.}$  - Länge die erforderlich ist um die Verbundkraft  $F_f$  abzutragen  
 $\Delta l_v$  - Länge auf der die Fügeile nach dem Entkoppeln aneinander Reiben, mit der Spannung  $\tau_R$  ergibt sich die Kraft  $F_R$

**Abbildung 8.10:** Ermittlung der Reibungsanteile

In der Serie A wurden die Gelege einlagig auf die Steine aufgebracht. Somit erfolgt die Abschätzung der Reibungsanteile auch hier für eine Lage der Gelege mit den Gleichungen 8.4 bis 8.6. Die verwendeten Kennwerte können Tabelle 8.3 und Abbildung 8.10 entnommen werden.

$$\tau_R = \frac{F_R}{\Delta l \cdot b_v} \quad (8.4)$$

$$F_R = \frac{F_f}{\zeta_v} \cdot (1 - \zeta_v) \quad (8.5)$$

$$F_f = b_v \cdot \sqrt{2 \cdot G_v \cdot E_f \cdot t_f} \cdot \tanh(\omega \cdot l_v) \quad (8.6)$$

Letzlich wird am Verankerungselement der Länge  $l_v$  die Verbundlänge  $l_{v,max.}$  für den Abtrag der Verbundkraft  $F_f$  benötigt, wobei diese Größe mit dem hergeleiteten Verbundmodell (vgl. Abs. 7.3) für die Endverankerungs- und die Zwischenrisselemente berechnet werden kann. Zusätzlich lässt sich mit der verbleibenden Länge ( $l_v - l_{v,max.}$ ) ein Reibungsanteil  $F_R$  aktivieren. Somit folgt für jedes Verankerungselement:

$$F_{f,u} = F_f + F_R \quad (8.7)$$

$$F_R = \tau_R \cdot b_v \cdot (l_v - l_{v,max.}) \quad (8.8)$$

| Versuche  | $G_{v,DP}$<br>[N/mm] | $F_f$<br>[kN] | $l_{v,max.}$<br>[mm] | $\Delta l$<br>[mm] | $\zeta_v$<br>[-] | $F_R$<br>[kN] | $\tau_R$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-----------|----------------------|---------------|----------------------|--------------------|------------------|---------------|----------------------------------|
| C1 - C3   | 0,615                | 8,40          | 91                   | 149                | 0,95             | 0,442         | 0,042                            |
| C4 - C6   | 0,615                | 8,40          | 91                   | 149                | 0,95             | 0,442         | 0,042                            |
| C7 - C9   | 0,488                | 7,49          | 102                  | 138                | 0,80             | 1,873         | 0,194                            |
| C10 - C12 | 0,488                | 7,49          | 102                  | 138                | 0,80             | 1,873         | 0,194                            |
| C13 - C15 | 0,488                | 7,49          | 102                  | 138                | 0,80             | 1,873         | 0,194                            |
| C16 - C18 | 0,471                | 7,35          | 104                  | 136                | 0,80             | 1,838         | 0,193                            |
| C22 - C24 | 0,471                | 7,35          | 104                  | 136                | 0,80             | 1,838         | 0,193                            |
| C19 - C21 | 0,471                | 7,35          | 104                  | 136                | 0,80             | 1,838         | 0,193                            |

**Tabelle 8.3:** Kennwerte und Berechnung der Spannung  $\tau_R$

Die Berechnung der Verbundbruchkräfte am Wandknoten kann nicht unabhängig vom Strukturmodell erfolgen. Streng genommen verlangt die Verbundberechnung ein iteratives Vorgehen, wobei nach der Ermittlung der Verbundkräfte der innere Kraftabtrag und letztlich die Beanspruchung des Mauerwerks überprüft werden muss.

Da sich die Verbundkraft eines nachfolgenden Zwischenrisselementes in Abhängigkeit zur Verbundkraft am Element davor ergibt, muss die Berechnung stets am Endverankerungselement beginnen. Hieraus folgt, dass beispielsweise die Berechnung für den Wandknoten C1-C3 (vgl. Abb. 8.11b) getrennt für die zwei Steinschichten im Folgenden mit „Verankerungsspur“ bezeichnet erfolgen muss. Die Verbundbreite ergibt sich mit der überklebten Steinfläche, ohne Fugenanteil. Für besagtes Beispiel reduziert sich somit die Verbundbreite von 100 mm auf 2x 44 mm. Nun ergibt sich aus dem Steinversatz bezogen auf die Schwerpunktlinie der Faserverbundwerkstoffe eine Asymmetrie der zwei Verankerungsspuren, woraus sich geringe Unterschiede der Verbundkräfte  $F_{s1}$  und  $F_{s2}$  (vgl. Abb. 8.11c) einstellen. Bei der Versuchsdurchführung erfolgte jedoch eine gelenkige Lagerung der Faserverbundwerkstoffe an der Versuchseinrichtung (vgl. Abb. 6.2). Somit muss sich für die Verbundkräfte der beiden Spuren eine Symmetrie bezogen auf die Schwerpunktlinie der Faserverbundwerkstoffe ergeben. Die Verbundbruchkraft für das beschriebene Beispiel wurde mit  $F_{u,rech.} = 2 \cdot \min(F_{s1}, F_{s2})$  definiert. Für die Versuche C4-C6 (vgl. Abb. 8.11d) ergeben sich aufgrund der Symmetrie der Verankerungselemente zur Schwerpunktlinie des Faserverbundwerkstoffes auch symmetrische Verankerungskräfte. Somit erfolgte die Berechnung für das beschriebene Beispiel mit einer Verankerungsspur, jedoch unter Berücksichtigung variierender Verbundbreiten für Verankerungselemente mit Fugen im Bereich der Verbundfläche  $b_v = 90$  mm und ohne Fugen  $b_v = 100$  mm. Da sich für das vereinfachte Berechnungsverfahren auf eine Verbundbreite festgelegt werden musste, wurde hier mit dem Mittelwert  $b_v = 95$  mm gerechnet.

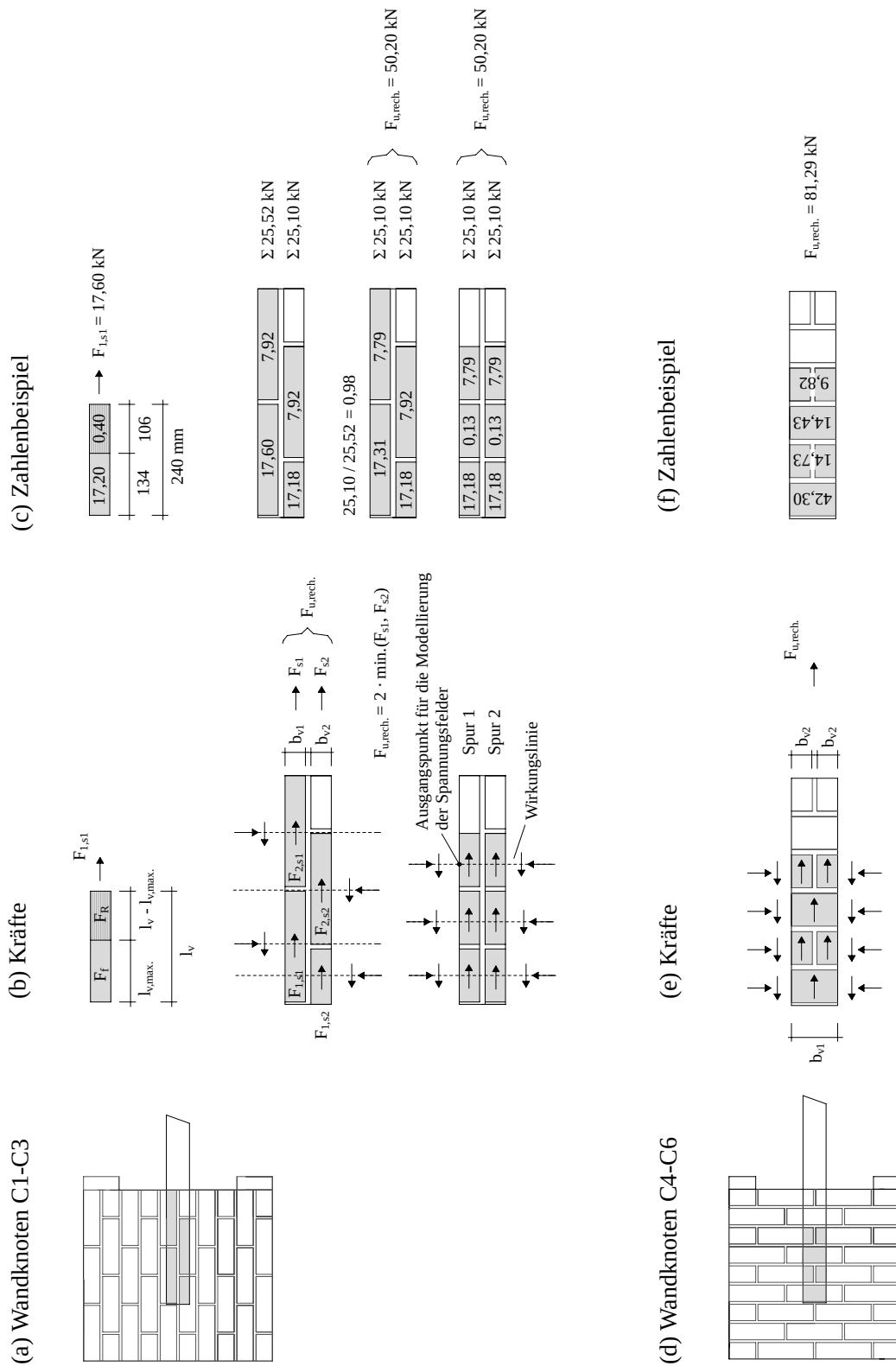


Abbildung 8.11: Berechnung und Aufteilung der Verbundbruchkräfte

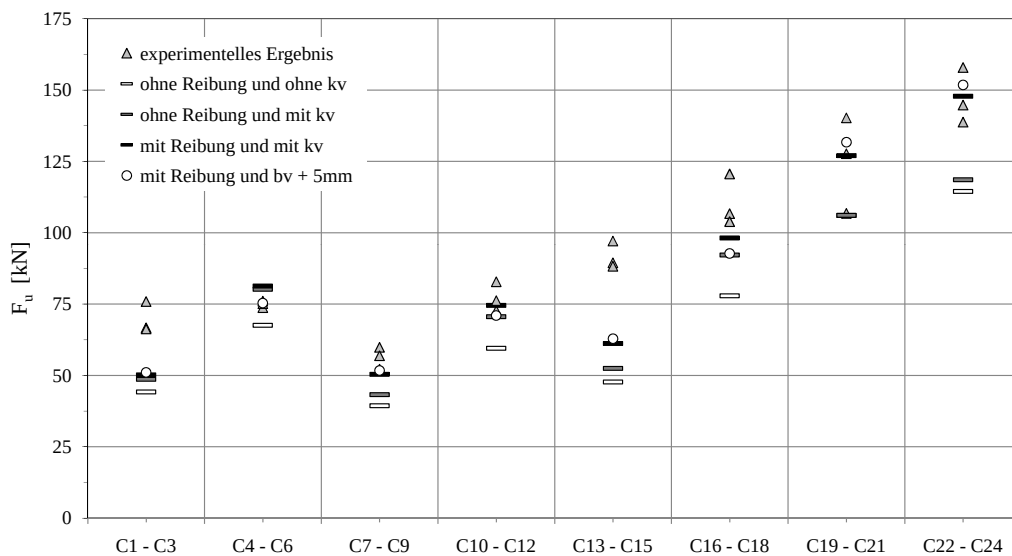
|           | $\bar{F}_{u,exp.}$<br>[kN] | genaues Verfahren                |                                 |                                |                                     | vereinfachtes Verfahren          |                                 | Faktor<br>Spalte 2/5<br>[-] |
|-----------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
|           |                            | ohne $k_v$<br>ohne $F_R$<br>[kN] | mit $k_v$<br>ohne $F_R$<br>[kN] | mit $k_v$<br>mit $F_R$<br>[kN] | mit $b_v+5$ mm<br>mit $F_R$<br>[kN] | ohne $k_v$<br>ohne $F_R$<br>[kN] | mit $k_v$<br>ohne $F_R$<br>[kN] |                             |
| Spalte    | 2                          | 3                                | 4                               | 5                              | 6                                   | 7                                | 8                               | 9                           |
| C1 - C3   | 69,62                      | 44,20                            | 48,62                           | 50,20                          | 51,02                               | 41,54                            | 45,70                           | 1,39                        |
| C4 - C6   | 74,98                      | 67,55                            | 80,18                           | 81,29                          | 75,34                               | 65,65                            | 77,80                           | 0,92                        |
| C7 - C9   | 56,32                      | 39,34                            | 43,28                           | 50,38                          | 51,70                               | 36,92                            | 40,61                           | 1,12                        |
| C10 - C12 | 77,24                      | 59,45                            | 70,56                           | 74,57                          | 70,96                               | 57,50                            | 68,13                           | 1,04                        |
| C13 - C15 | 91,60                      | 47,68                            | 52,44                           | 61,22                          | 62,84                               | 44,85                            | 49,33                           | 1,50                        |
| C16 - C18 | 110,39                     | 77,88                            | 92,18                           | 98,12                          | 92,73                               | 71,67                            | 84,93                           | 1,13                        |
| C19 - C21 | 124,89                     | 106,06                           | 106,06                          | 127,00                         | 131,72 <sup>1</sup>                 | 100,15                           | 100,15                          | 0,98                        |
| C22 - C24 | 147,12                     | 114,45                           | 118,54                          | 147,77                         | 151,76                              | 109,74                           | 113,65                          | 1,00                        |

<sup>1</sup>  $b_v+2$  mm, womit die Verbundbreite gleich der Steinbreite betrug

<sup>1</sup>  $b_v+2$  mm, womit die Verbundbreite gleich der Steinbreite betrug

**Tabelle 8.4:** Vergleich der rechnerischen Verbundbruchkräfte  $F_{u,rech.}$  nach dem *genauen* und dem *vereinfachten* Berechnungsverfahren

Somit ergeben sich die in Tabelle 8.4 angegebenen und in Abbildung 8.12 nochmals graphisch dargestellten rechnerischen Verbundbruchkräfte. Bei den experimentellen Untersuchungen zeigte sich zudem ein oberflächennahes Zugversagen der Steine in einem Bereich von durchweg mehr als 10 mm über den Rand der Faserverbundwerkstoffe hinaus. Aus diesem Grund wurde alternativ zum eingeführten Beiwert  $k_v$  für eine Berechnung die Verbundbreite  $b_v$  um 5 mm für jeden Rand erweitert. Beispielsweise erhöhten sich somit die Verbundbreiten für die Wandknoten C1-C3 von 2x 44 mm auf 2x 49 mm.



**Abbildung 8.12:** Vergleich der experimentellen und rechnerischen Verbundbruchkräfte am Wandknoten

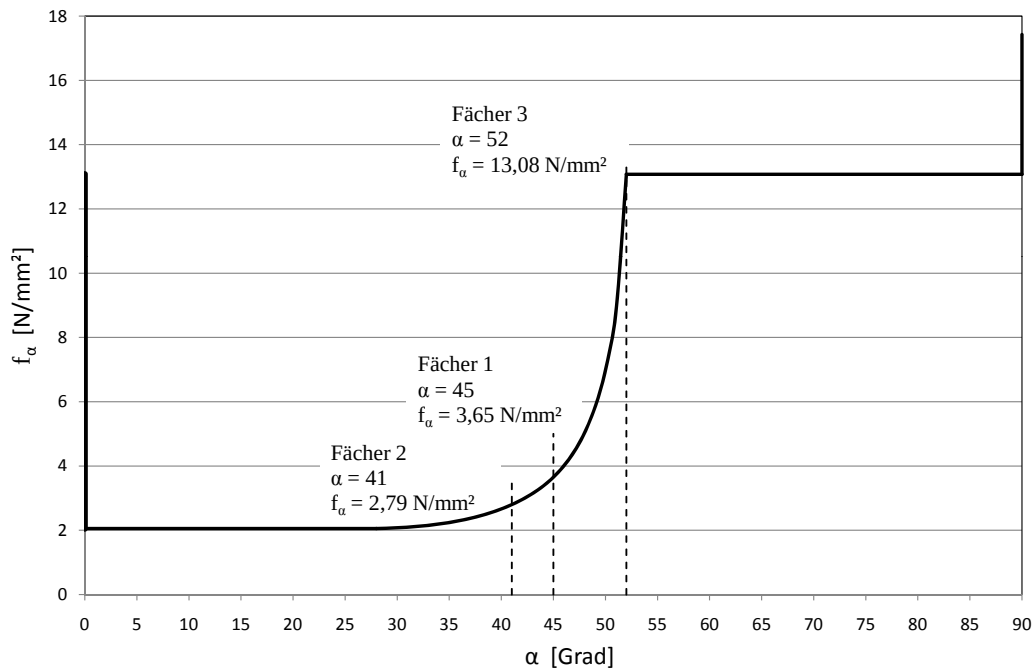
Ein Vergleich der rechnerischen und experimentellen Verbundbruchkräfte zeigt bis auf zwei Versuchsanordnungen (C1-C3 und C13-C15) eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Hierbei liegen die Abweichungen der Berechnung in einem Bereich von unter 13% (vgl. Tab. 8.4, Spalte 9). Die Differenzen der Verbundbruchkräfte nach dem genauen (Spalte 4) und dem vereinfachten (Spalte 8) Verfahren resultieren nicht etwa aus einer prinzipiell schlechteren Genauigkeit des vereinfachten Berechnungsverfahrens. Zwar ergibt sich der Berechnungsfehler in Abhängigkeit zur Größe  $(\omega \cdot l_v)$  sowie der Anzahl der Verbundelemente, beides führt für die hier berechneten Beispiele zu geringen Fehlern. Die Differenzen ergeben sich vielmehr mit der Bildung der Stützweite in Tabelle 7.2. Diese wurden als Sekante der exakten Lösung hergeleitet (vgl. Abb. 7.13), woraus gegenüber dem genauen Verfahren eine rechnerische Unterschätzung der Verbundbruchkräfte folgt. Eine abschließende Erklärung warum die Verbundkräfte der Versuche C1-C3 und C13-C15 rechnerisch unterschätzt werden kann mit dem derzeitigen Wissen nicht gegeben werden.

Mit Kenntnis der Verbundkräfte am jeweiligen Verbundelement und der Anwendung

| Versuch   | Stein | $\bar{f}_{st,x}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{mo}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_x$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_y$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\mu$<br>[-] | $f_v$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-----------|-------|------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|
| C1 - C3   | KS20  | 37,88                                    | 12,20                                  | 17,43                         | 13,08                         | 0,71         | 0,53                          |
| C4 - C6   | KS20  | 37,88                                    | 12,58                                  | 17,55                         | 13,16                         | 0,71         | 0,53                          |
| C7 - C9   | Mz20  | 41,24                                    | 11,90                                  | 16,39                         | 12,29                         | 0,73         | 0,90                          |
| C10 - C12 | Mz20  | 41,24                                    | 11,92                                  | 16,39                         | 12,30                         | 0,73         | 0,90                          |
| C13 - C15 | Mz20  | 41,24                                    | 13,27                                  | 16,68                         | 12,51                         | 0,73         | 0,90                          |
| C16 - C18 | Mz20  | 39,26                                    | 11,39                                  | 15,70                         | 11,78                         | 0,73         | 0,90                          |
| C19 - C21 | Mz20  | 39,26                                    | 12,39                                  | 15,91                         | 11,94                         | 0,73         | 0,90                          |
| C22 - C24 | Mz20  | 39,26                                    | 12,71                                  | 15,98                         | 11,98                         | 0,73         | 0,90                          |

**Tabelle 8.5:** Kenngrößen für die Berechnung der Mauerwerksfestigkeiten

der Spannungsfelder lässt sich nun der innere Kraftabtrag im Wandknoten modellieren. Bei der Versuchsanordnung der Wandknoten wurde gezielt darauf geachtet, dass die Auflager nicht in der selben Ebene wie die Verbundelemente liegen, was zwangsläufig zu einer Spreizung der Verbundkräfte in Richtung der vertikalen Auflager (vgl. Abb. 8.8a) führt. Somit ist es erforderlich die inneren Kräfte, in Richtung der horizontalen Auflager zu führen, woraus sich geneigte Spannungsfelder ergeben. Nun stellt sich die Frage, wie bei der Modellierung der Spannungsfelder vorzugehen ist. Eine Verankerung der Verbundkräfte über mehrere hintereinander folgende Verbundelemente ist nur dann möglich, wenn sich diese in Richtung der Faserverbundwerkstoffe im Bereich der senkrecht zur Verbundstrecke befindlichen Fugen auseinander bewegen können. Es bilden sich im Verbundbereich zwischen den Trennfugen so genannte Zwischenrisselemente aus (vgl. Kap. 7). Ein Kraftübertrag über die vertikalen Stoß- bzw. Lagerfugen hinweg ist nicht möglich. Hieraus folgt, dass die Spannungsfelder an den seitlichen Begrenzungslinien der Faserverbundwerkstoffe anzusetzen sind. Aufgrund der symmetrischen Anordnung der Auflager müssen die Spannungsfelder und somit auch die inneren Kräfte eine Symmetrie zur Schwerpunktkline der Faserverbundwerkstoffe aufweisen. Das kann einzig erreicht werden, wenn sich wie in Abbildung 8.11b gezeigt die aus den Spannungsfeldern resultierenden vertikalen Kräfte auf einer Wirkungslinie befinden. Dies führt zwangsläufig zu einer Aufteilung der Verbundkräfte auf die halbe Länge des Verbundkörpers (vgl. Abb. 8.11c). Der Ausgangspunkt für den diagonalen Fächer befindet sich somit im Schwerpunkt der eingeteilten Verbundflächen auf dem Rand der Faserverbundwerkstoffe. Im Weiteren ist es ratsam mit dem vordersten und beispielhaft für den in Abbildung 8.8a gezeigten Wandknoten, mit Fächer 3 zu beginnen. Der Spannungsnachweis im Mauerwerk erfolgt für die kleinste Fläche senkrecht zur Kraftrichtung der Fächer. Dieser kann somit in Richtung des horizontalen Auflagers so stark verjüngt werden, bis sich die vorhandene Spannung  $\sigma_t$  gleich der Mauerwerksdruckfestigkeit  $f_\alpha$  ergibt. Diese kann mit den Gleichungen 3.6 bis 3.10 und den in Tabelle 8.5 dokumentierten Kenngrößen berechnet werden und ist beispielhaft in Abbildung 8.13 für den Wandknoten C1-C3 dargestellt.



**Abbildung 8.13:** Mauerwerksdruckfestigkeit in Abhängigkeit zur Neigung der Lagerfuge, exemplarisch für den in Abbildung 8.8 gezeigten Wandknoten C1-C3

Im Bereich der Auflager werden die aus den Spannungsfeldern resultierenden Kräfte in vertikaler und horizontaler Richtung umgelenkt (vgl. Abb. 8.8b), hieraus resultieren ein- und biachsiale Spannungszustände. Für die einachsiale Beanspruchung ergeben sich aufgrund der geometrischen Zusammenhänge die selben Spannungen  $\sigma_t$  wie im Umlenkungsbereich der Spannungsfelder. Da die Mauerwerksdruckfestigkeit senkrecht und vertikal zur Lagerfuge höher oder gleich der Festigkeit des Spannungsfeldes angesetzt werden kann, ist der Nachweis indirekt geführt. Für Bereiche mit biachsialen Spannungszuständen ist streng genommen ein Nachweis mit den Gleichungen 3.1 bis 3.5 erforderlich. Dieser ist jedoch aufgrund der durch die biachsiale Beanspruchung resultierenden Steigerung der Druckfestigkeit unkritisch.

Wurden beispielhaft für den in Abbildung 8.8 dargestellten Wandknoten die Spannungsfelder 3 und 2 modelliert kann die Lage des „Fächers 1“ durch seine Neigung oder sein Ende so variiert werden, dass sich der Schwerpunkt der aus den drei Spannungsfeldern resultierenden horizontalen Kräfte in der Mitte des horizontalen Auflagers ergibt. In der Folge lassen sich die Exzentrizitäten  $e_{v,1}$  bis  $e_{v,3}$  der aus den Spannungsfeldern resultierenden vertikalen Kräfte bestimmen. Aus den Gleichgewichtsbedingungen am Wandkopf und -fuß erhält man:

$$M_a = F_a \cdot e_a = F_{1,v} \cdot e_1 - F_2 \cdot e_2 \quad (8.9)$$

$$F_a = F_{1,v} + F_2 \quad (8.10)$$

$$F_{1,v} = F_{1,v1} + F_{1,v2} + F_{1,v3} \quad (8.11)$$

$$F_{1,v} \cdot e_1 = F_{1,v1} \cdot e_{1,v1} + F_{1,v2} \cdot e_{1,v2} + F_{1,v3} \cdot e_{1,v3} \quad (8.12)$$

Aus Gleichung 8.9 ergeben sich genau zwei unbekannte Größen,  $M_a$  und  $e_2$ . Das Kopfmoment im Versuch ergibt sich aus den Messdaten der Kraftmessdosen  $M_{a,exp.} = \bar{F}_{a,exp.} \cdot \bar{e}_{a,exp.}$  nach Tabelle 6.3. Die Exzentrizität der Kraft  $F_2$  lässt sich nach einer Umstellung von Gleichung 8.9 wie folgt berechnen:

$$e_2 = \frac{F_{1,v} \cdot e_1 - \bar{F}_{a,exp.} \cdot \bar{e}_{a,exp.}}{\bar{F}_{a,exp.} - F_{1,v}} \quad (8.13)$$

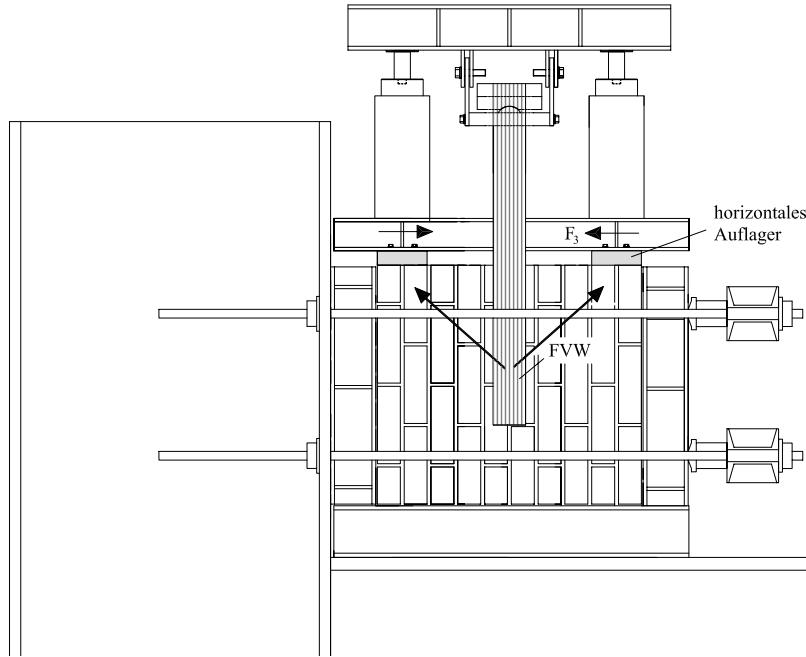
Nun erschien es wenig sinnvoll am Wandkopf als Vergleichsgrößen die experimentellen Kräfte heranzuziehen und bei den Verbundkräften mit den rechnerischen Größen zu arbeiten. Aus diesem Grund wurde die Verifizierung für alle Wandknoten mit den experimentellen Kopfmomenten  $\bar{M}_{a,exp.}$  und Verbundbruchkräften  $\bar{F}_{u,exp.}$  vorgenommen. Da gleichwohl die Verteilung der experimentellen Verbundkräfte über die Verbundlänge hinweg messtechnisch nicht erfasst werden konnte, wurden die rechnerischen Verbundkräfte für jedes Verbundelement mit dem in Tabelle 8.4 (Spalte 9) angegebenen Faktoren umgerechnet. Für den Wandknoten C1-C3 ergab sich somit am ersten Verbundelement eine Verbundbruchkraft von  $F_{1,s1} = 1,39 \cdot 17,18 kN = 23,88 kN$  (vgl. Abb. 8.11c mit Abb. 8.17).

Führt man für den in Abbildung 8.8 gezeigten Wandknoten C1-C3 die Berechnung von  $e_2$  durch, so ergibt sich  $F_2$  außerhalb des Wandquerschnitts ( $e_2 = 539 mm > l_w/2 = 370 mm$ ). Dies ist dadurch zu begründen, dass vertikale Reibungskräfte über die „horizontalen Auflager“ abgetragen und mit der Messeinrichtung nicht erfasst wurden (Abb. 8.14). Diese Größe wird im Folgenden mit  $F_3$  bezeichnet. Letztlich resultiert aus dieser Größe ein „Schubfächer“ welcher zu einer Reduzierung der Kraft  $F_{1,v}$  führt. Hieraus ergeben sich folgende mathematische Zusammenhänge:

$$e_2 = \frac{F_{1,v} \cdot e_1 - \bar{F}_{a,exp.} \cdot \bar{e}_{a,exp.}}{F_2} \quad (8.14)$$

$$F_2 = \bar{F}_{a,exp.} - F_{1,v} \quad (8.15)$$

$$F_{1,v} = F_v - F_{3,v} \quad (8.16)$$



**Abbildung 8.14:** Versuchsanordnung der Serie C

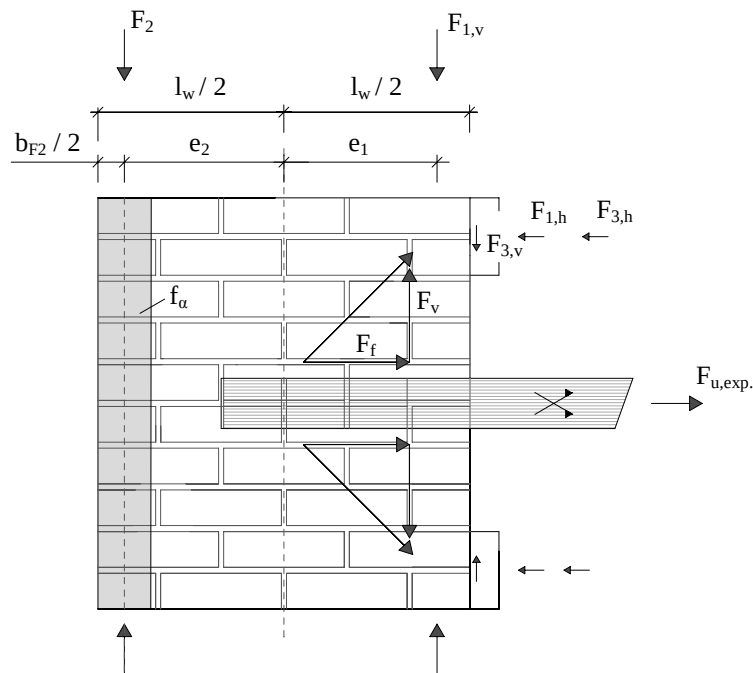
woraus folgt:

$$e_2 = \frac{(F_v - F_{3,v}) \cdot e_1 - \bar{F}_{a,exp.} \cdot \bar{e}_{a,exp.}}{\bar{F}_{a,exp.} - F_v + F_{v,3}} \quad (8.17)$$

Die Größe  $F_v$  ergibt sich aus der Spreizung der Verbundkräfte. Hierbei empfiehlt es sich auf den zuvor beschriebenen Algorithmus zurückzugreifen, wobei es sinnvoll und hilfreich ist auf die im ersten Schritt entwickelten Spannungsfelder aufzubauen (vgl. Abb. 8.8). Gleichung 8.17 enthält genau zwei Unbekannte. Die Kraft  $F_{3,v}$  und die Exzentrizität  $e_2$ . Die Größe  $e_2$  ergibt sich rechnerisch mit der Breite des Spannungsfeldes  $b_{F2}$  der Kraft  $F_2$ , der Dicke  $t_w$  und der Länge  $l_w$  des Wandknotens wie folgt (vgl. Abb. 8.15):

$$e_2 = \frac{l_w}{2} - \frac{b_{F2}}{2} = \frac{l_w}{2} - \frac{F_2}{2 \cdot t_w \cdot f_\alpha} \quad (8.18)$$

Setzt man die Gleichungen 8.17 und 8.18 gleich, ergibt sich für  $F_{3,v}$  ein Minimum. Der Schubspannungsfächer (S1) (vgl. Abb. 8.17) überlagert sich zwangsläufig mit

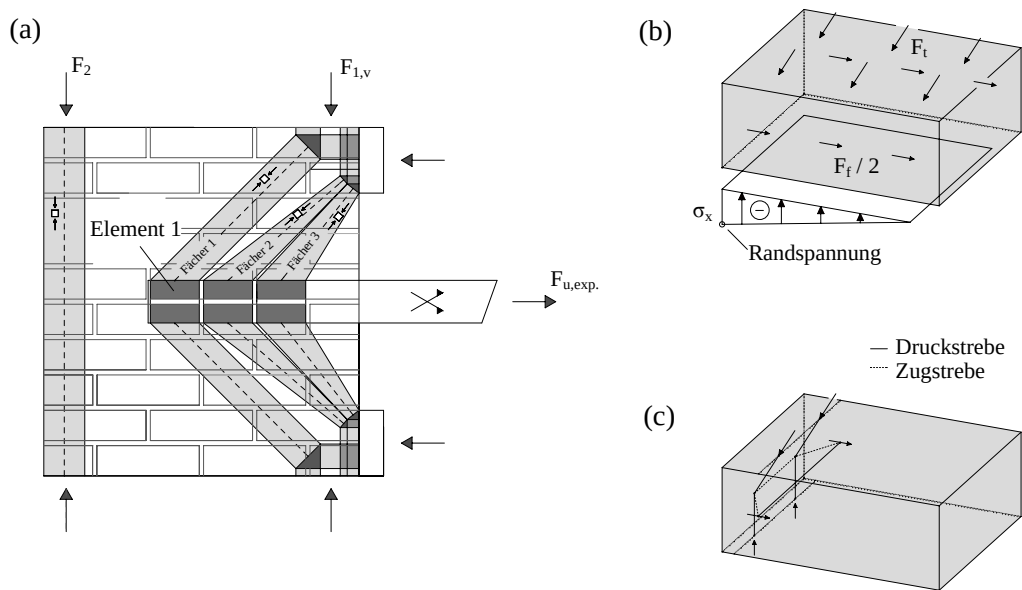


**Abbildung 8.15:** stark abstrahierte Darstellung des Kraftabtrags mit den wesentlichen Kräften

den zuvor erzeugten Fächern (F1 bis F3). Der Tragfähigkeitsnachweis kann für die Überlagerung der einzelnen Felder an den maßgebenden Punkten in einem orthogonalen Koordinatensystem erfolgen, wobei die Bruchbedingung (Gl. 3.1 bis 3.5) an keinem Punkt verletzt werden darf. Dieses Vorgehen ist vergleichsweise aufwendig. Alternativ kann jedem Fächer eine individuelle Fächertiefe (erf.  $t$ ) innerhalb des Wandknotens zugewiesen werden. Der Spannungsnachweis kann dann für die am stärksten beanspruchte Fläche senkrecht zur Kraftrichtung erfolgen. Der Nachweis ist geführt, wenn die im Fächer vorhandene Kraft kleiner oder gleich der zulässigen Kraft ist oder die Spannungsfächer innerhalb des Wandquerschnitts bleiben. Für die hier durchgeführten verifizierenden Berechnungen (vgl. Abb. 8.17 bis 8.24) wurde die Dicke der Spannungsfächer nachgewiesen. Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass sich mit den Schubfächern Schubkräfte zwischen dem Wandknoten und dem „horizontalen“ Auflager ergeben. Zum Nachweis des Abtrags wurde der Reibungsbeiwert  $\mu$  des Mauerwerks ohne eine zusätzliche Haftscherfestigkeit angesetzt.

Für die Modellierung des inneren Kraftabtrags wurden die aus den Fächern resultierenden Kräfte am Rand der Faserverbundwerkstoffe auf den Verankerungselementen angesetzt. In Abbildung 8.16 ist beispielhaft ein solches Verankerungselement mit gleichmäßig verteilten Kräften aus dem Fächer  $F_t$  und dem Faserverbundwerkstoff  $F_f$  dargestellt. Lässt man ein Klaffen zu, ergibt sich eine dreiecksförmige Spannungsverteilung in der Lagerfuge. Überschreitet die Spannung  $\sigma_x$  die Mauerwerks-

druckfestigkeit  $f_\alpha$  stellt sich ein Versagen ein, wobei aufgrund der unterschiedlichen Elastizitätsmodule von Mörtel und Stein mit einem Querkzugversagen der Steine zu rechnen ist. Da gleichwohl die Steine durch den Abtrag der Verbundkräfte in Querrichtung zugbeansprucht werden (Abb. 8.16c) ergibt sich formal eine Reduzierung der zulässigen Mauerwerksfestigkeit. Wie stark diese anzusetzen ist, konnte im Rahmen der Arbeit nicht abschließend geklärt werden und sollte somit Bestandteil weiterer Forschungsvorhaben sein. Für die hier durchgeführten verifizierenden Berechnungen wurden die zulässigen Randspannungen je Anwendungsfall in den Fugen auf 50% der Mauerwerksdruckfestigkeiten  $f_x$  oder  $f_y$  reduziert. Für eine Verklebung der Faserverbundwerkstoffe senkrecht zu den Lagerfugen ergeben sich zudem Verankerungselemente ohne Fugenanteile im Verankerungsbereich. Hier wurde die Steinzugfestigkeit auf 50% reduziert wobei diese nach [Sei08] in guter Näherung zu  $1,17 \cdot \bar{f}_{st,t,DP}$  abgeschätzt werden kann. Die Annahme eines Klaffens in den Fugen ist eher konservativ, da schon der Klebstoff mit seiner vergleichsweise hohen Zugfestigkeit von 35 N/mm<sup>2</sup> dem entgegen wirkt. Unter Berücksichtigung weiterer Normalkräfte oder dem Aufbringen von Faserverbundwerkstoffen senkrecht zur klaffenden Fuge kann dieses Verhalten zudem reduziert werden.



**Abbildung 8.16:** Kräfte am Verankerungselement: (a) Lage, (b) äußerer Kraftabtrag und (c) reduzierter und stark vereinfachter innerer Kraftabtrag

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Verbundmodell in Kombination mit dem hier gewählten Strukturmodell in der Lage ist die experimentellen Ergebnisse zuverlässig abzubilden.

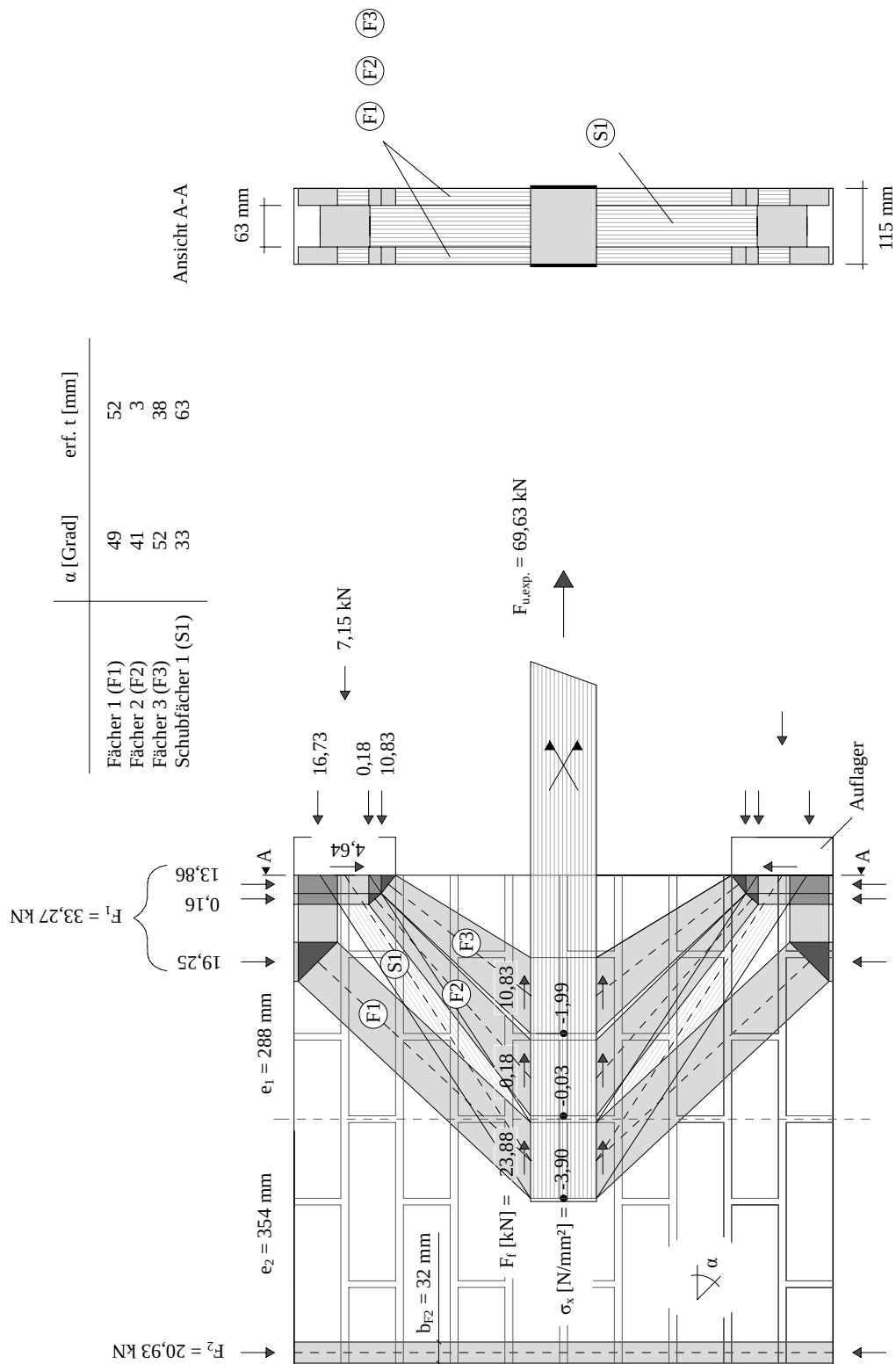


Abbildung 8.17: Wandknoten C1-C3

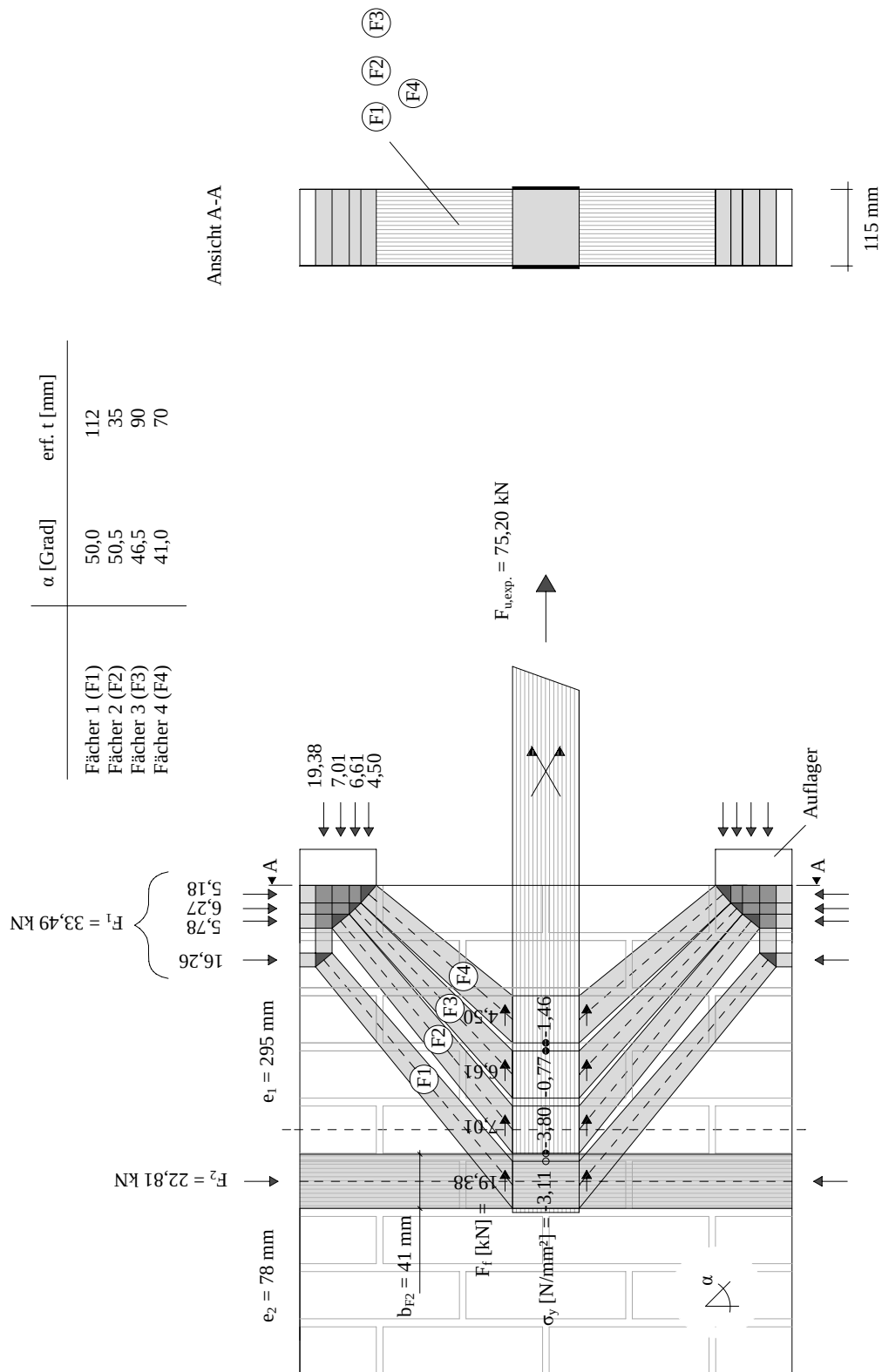
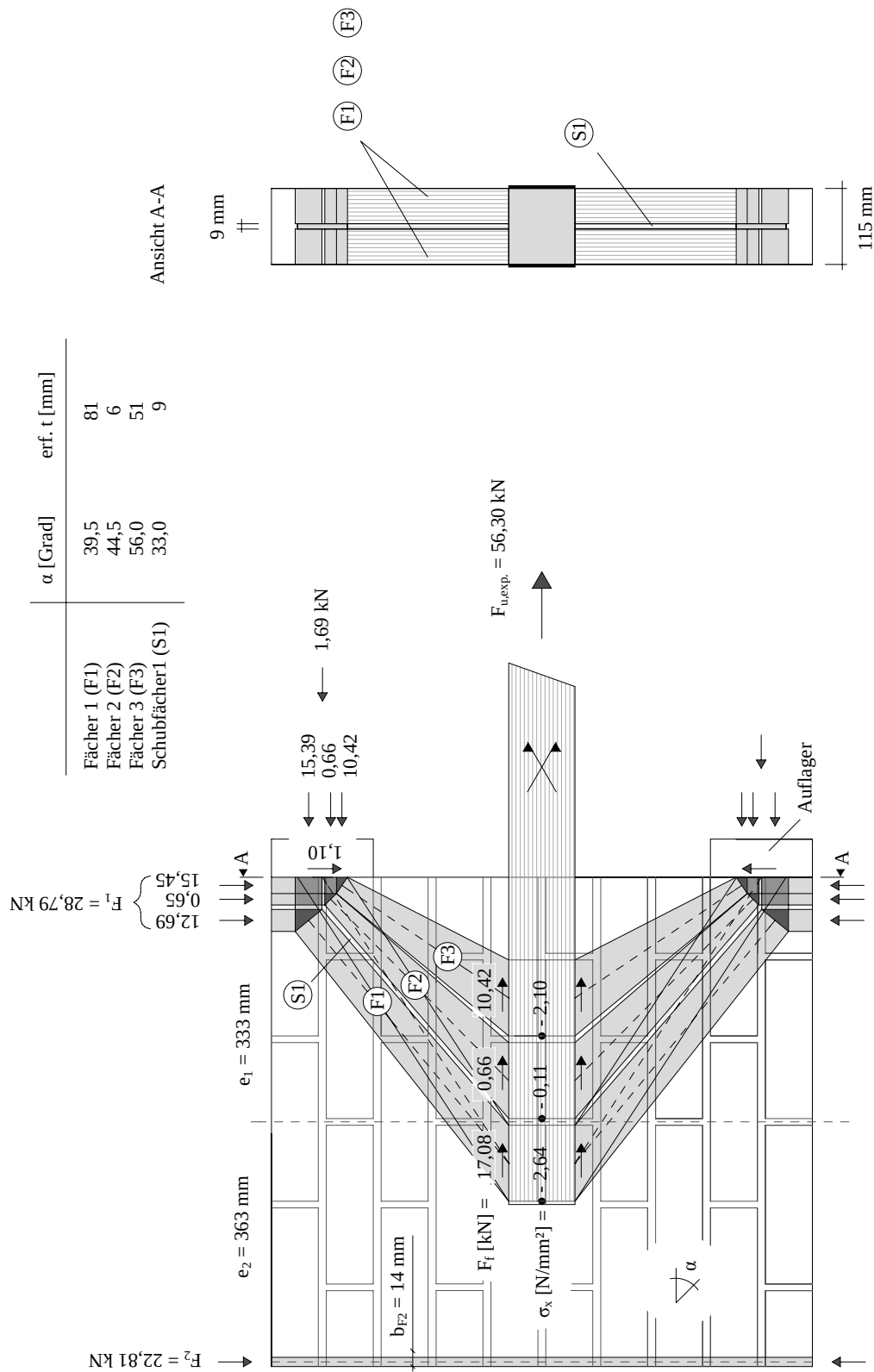


Abbildung 8.18: Wandknoten C4-C6



**Abbildung 8.19:** Wandknoten C7-C9

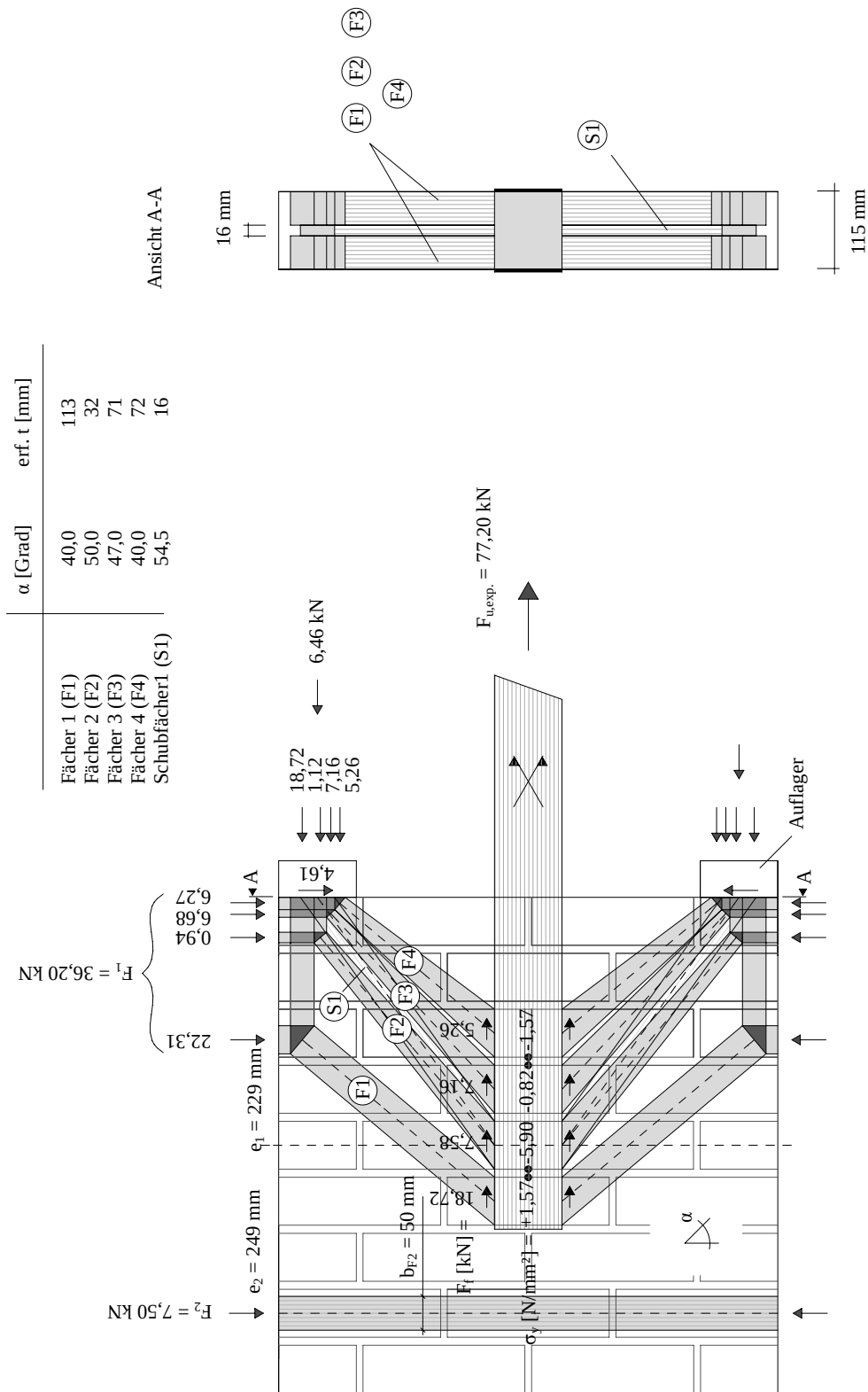


Abbildung 8.20: Wandknoten C10-C12

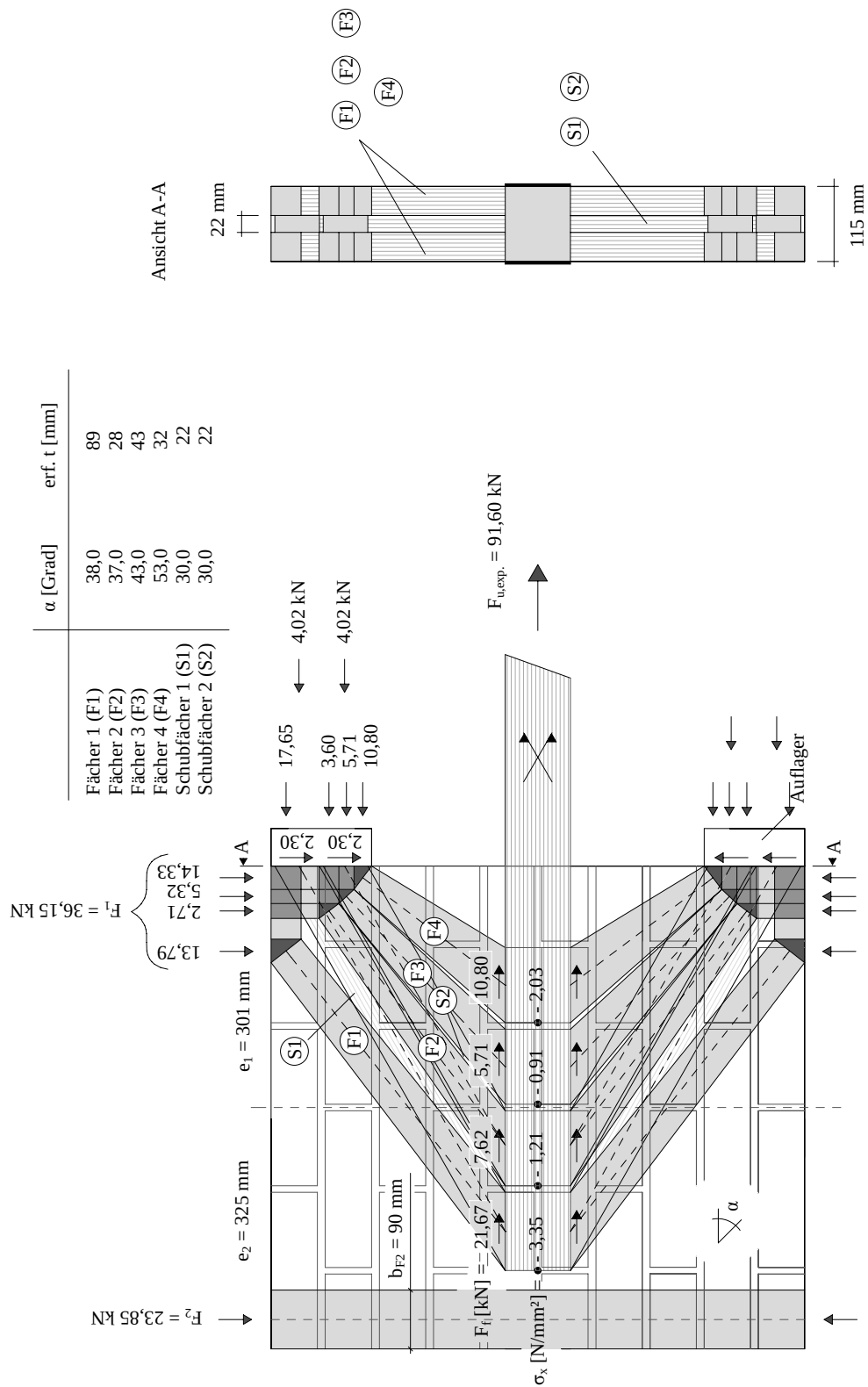
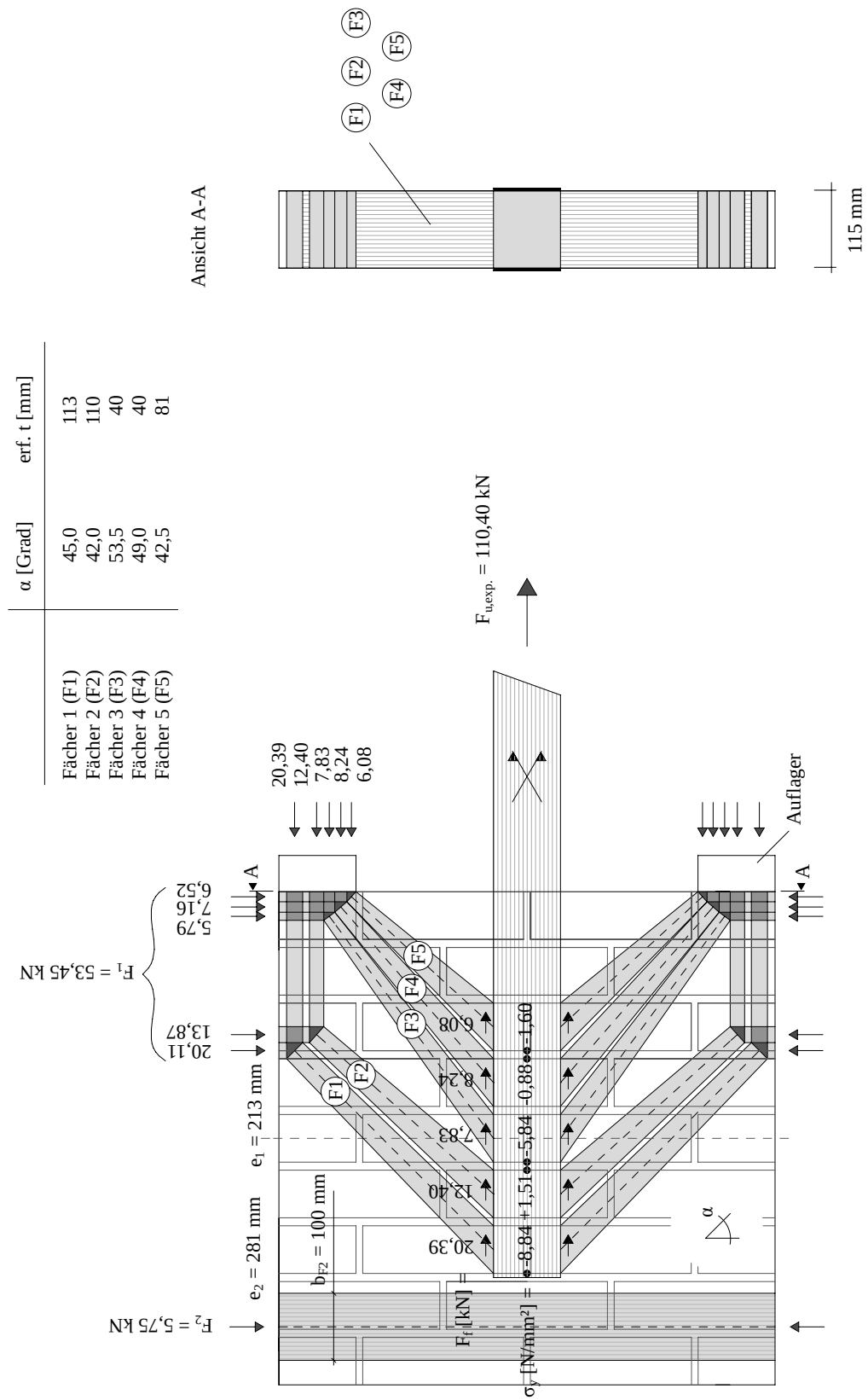


Abbildung 8.21: Wandknoten C13-C15



**Abbildung 8.22:** Wandknoten C16-C18

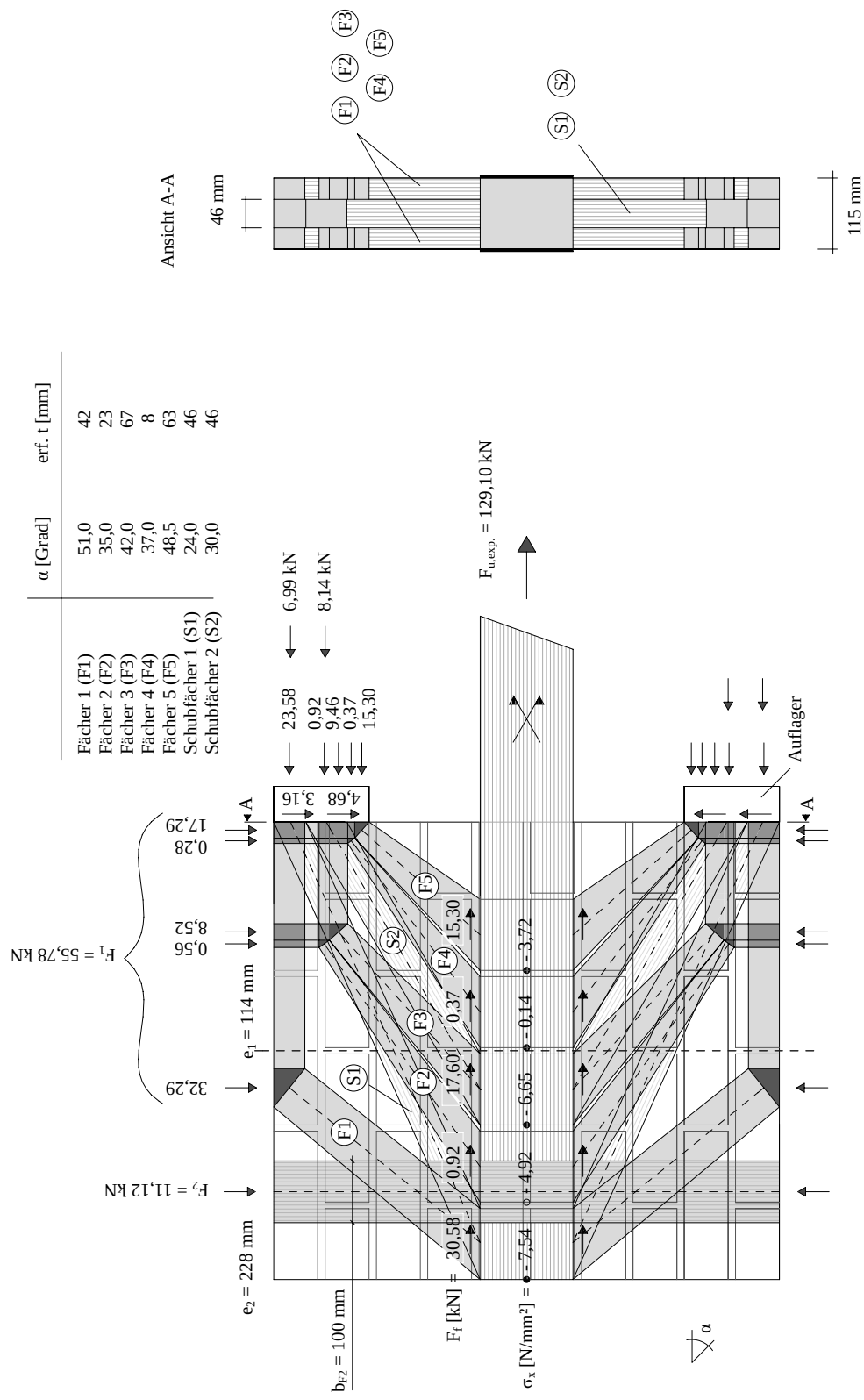


Abbildung 8.23: Wandknoten C19-C21

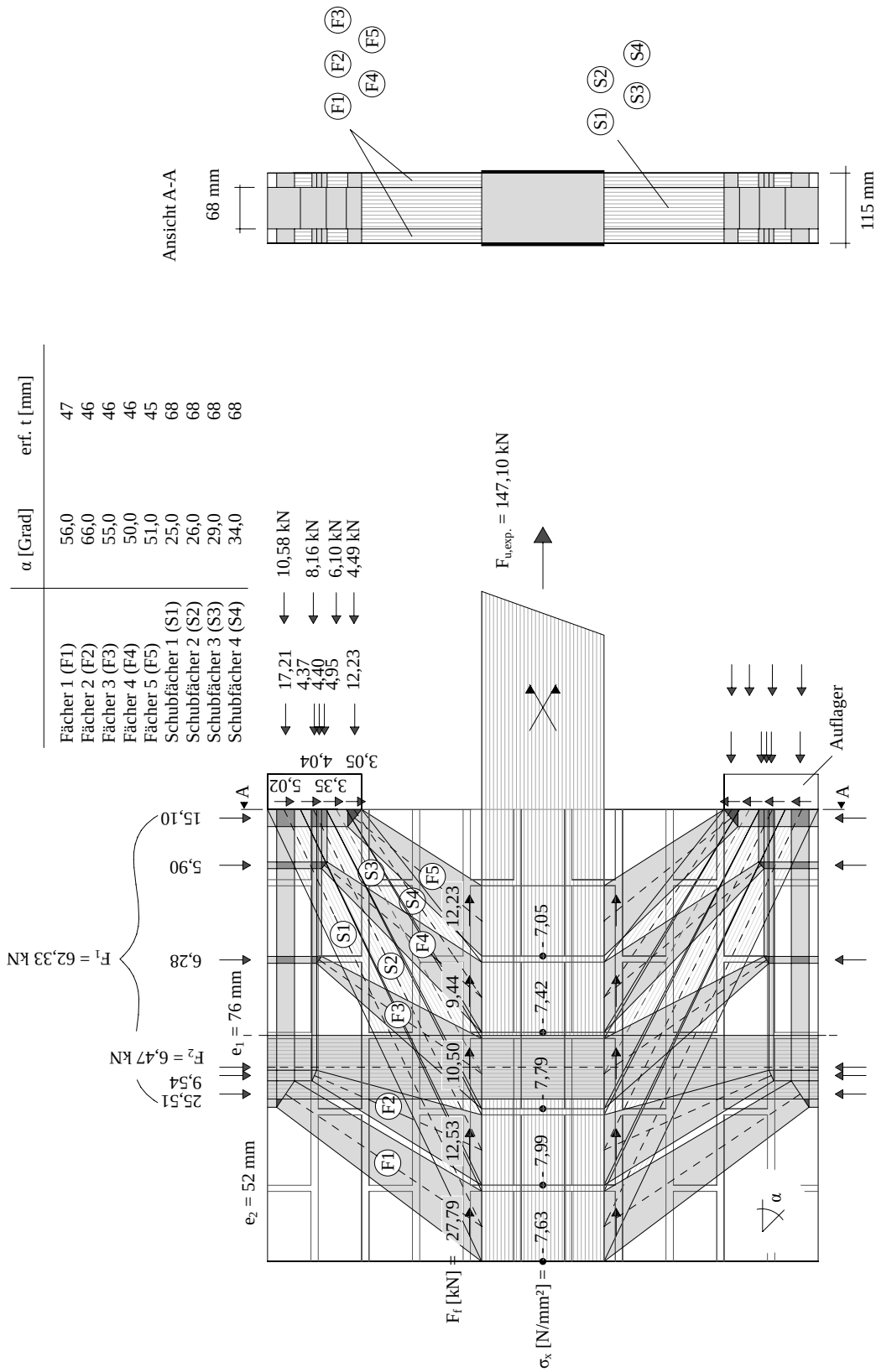
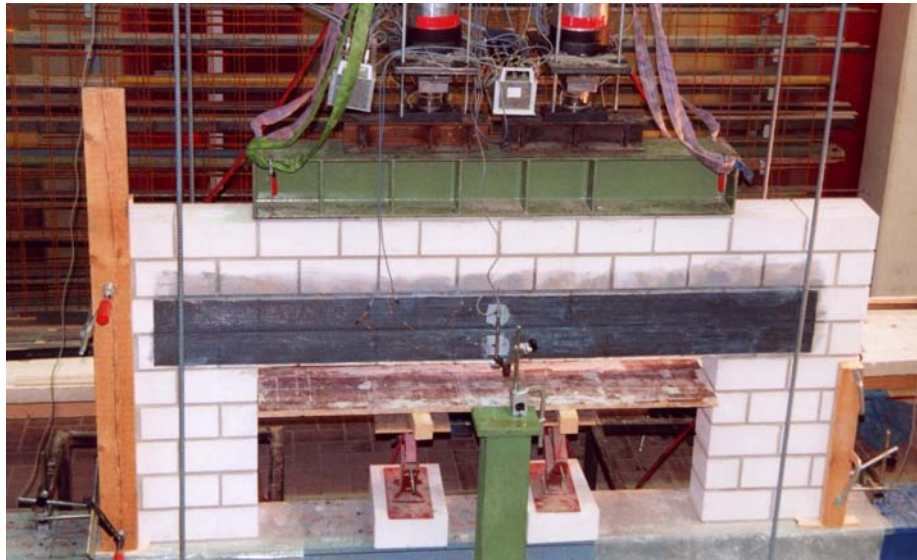


Abbildung 8.24: Wandknoten C22-C24

## 8.2 Anwendung des Modells auf einen Versuch von Seim et al.

*Seim et al.* [Sei03] führte zwei Tragfähigkeitsversuche an je mit einer Öffnung versehenen Wänden durch (Abb. 8.25). Für die Durchführung und die Ergebnisse der Untersuchungen sei auf Abschnitt 2.4.6 dieser Arbeit verwiesen.



**Abbildung 8.25:** experimentelle Untersuchung von *Seim et al.* [Sei03]

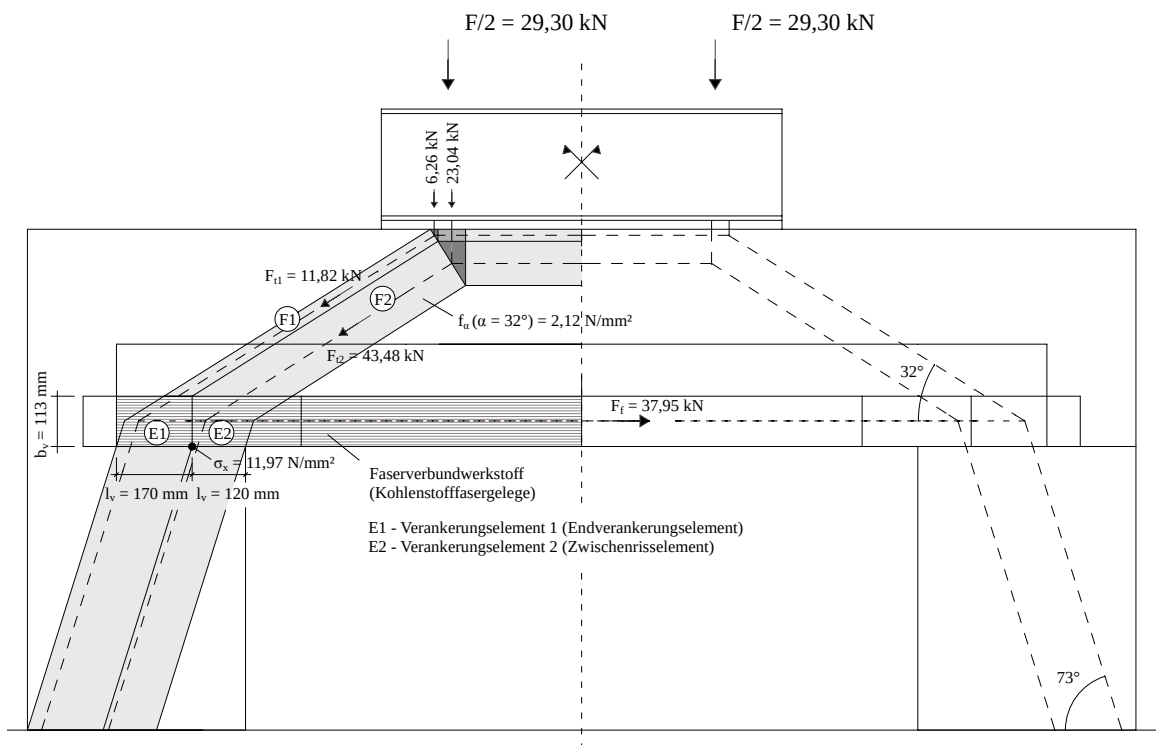
Zur Nachweisführung kann die Mauerwerksdruckfestigkeit  $f_\alpha$  mit den Gleichungen 3.1 bis 3.5 berechnet werden. In [Sei03] wurde die Fugendruckfestigkeit der Mörtel nach [DIN 18555-9] bestimmt. Für die Berechnung der Mauerwerksdruckfestigkeit wird jedoch die Prismendruckfestigkeit nach [DIN EN 1015-11] benötigt. Die Wände wurden wie bei den eigenen Versuchen am Wandknoten mit einem Normalmörtel der Mörtelgruppe *MGIIa* hergestellt. Für die Verifizierung der Ergebnisse wurde somit auf einen Mittelwert der Mörteldruckfestigkeiten aus Tabelle 8.5 zurückgegriffen. Die weiteren Kennwerte ergeben sich nach *Hofmann, Stöckl* [Hof88] und die Berechnung der Mauerwerksdruckfestigkeiten  $f_x$  sowie  $f_y$  nach Abschnitt 4.6.

|                                                                    |              |                         |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------|
| Kenngrößen für<br>die Berechnung der<br>Mauerwerksdruckfestigkeit: | $f_{st,x} =$ | 29,90 N/mm <sup>2</sup> |
|                                                                    | $f_{mo} =$   | 12,30 N/mm <sup>2</sup> |
|                                                                    | $f_x =$      | 14,65 N/mm <sup>2</sup> |
|                                                                    | $f_y =$      | 10,99 N/mm <sup>2</sup> |
|                                                                    | $\mu =$      | 0,71                    |
|                                                                    | $f_v =$      | 0,53 N/mm <sup>2</sup>  |

Die Berechnung der Verbundbruchkraft kann mit dem in Abschnitt 7.3 zusammengefassten Verbundmodell erfolgen. Da zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung kein gesichertes Verbundmodell für auf Mauerwerk aufgeklebte Faserverbundwerkstoffe existierte, blieb die Ermittlung der Druck- und Oberflächenzugfestigkeit senkrecht zur Steinlängsseite aus. Bei der Festigkeitsermittlung für die eigenen Untersuchungen an Kalksandsteinen haben sich jedoch nur geringe Richtungsunterschiede gezeigt. Somit wurde hier in guter Näherung für die Druckfestigkeit in Richtung der Steinlängsseiten die der Lagerfugenrichtung angesetzt. Die Oberflächenzugfestigkeit wurde zu 8% der Steindruckfestigkeit berechnet.

Kenngrößen für  
die Berechnung der  
Verbundbruchkraft:

$$\begin{aligned} f_{st} &= 29,90 \text{ N/mm}^2 \\ f_{st,DP} &= 0,08 \cdot f_{st} = 2,39 \text{ N/mm}^2 \\ E_f &= 37700 \text{ N/mm}^2 \\ t_f &= 0,87 \text{ mm} \\ k_v &= 1,0 \\ c_{v,SD330} &= 0,030 \end{aligned}$$



**Abbildung 8.26:** Modellbildung

Das rechnerische Versagen bei der Modellierung tritt als Gleiten der Lagerfugen in den Spannungsfeldern (F1) und (F2) ein (Abb. 8.26). Hieraus folgt eine Auflast  $F =$

2·29,30 kN, was 86% der experimentellen Auflast entspricht. Mit dem Strukturmodell ergibt sich am Endverankerungselement (E1) eine erforderliche Verbundbruchkraft von 8,12 kN und am Zwischenrisselement (E2) von 29,83 kN (Summe 37,95 kN). Aus der Verbundberechnung ergibt sich eine rechnerische Verbundbruchkraft von  $F_{f,rech.} = 8,12 + 30,26 = 38,38 \text{ kN} > F_{f,vorh.} = 37,95 \text{ kN}$ . Lässt man ein Klaffen in der Lagerfuge unterhalb des Verankerungselementes (E2) zu, so ergibt sich eine maximale senkrechte Randspannung von  $\sigma_x = 11,97 \text{ N/mm}^2 < f_x = 14,65 \text{ N/mm}^2$ .



## 9 Hinweise für die Anwendung

### 9.1 Wahl der Werkstoffe

Zur Verstärkung von Mauerwerk nach dem in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren werden zwei Werkstoffe - Faserwerkstoff und Klebstoff - benötigt. Die Auswahl der Werkstoffe obliegt letztlich dem Anwender. Um die Wahl zu erleichtern, sollen hier einige Hinweise gegeben werden.

Bei einer Vielzahl von Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Anwendung von Faserwerkstoffen mit höheren Dehnsteifigkeiten zu einer Steigerung der Verbundbruchkräfte führt (vgl. Abb. 5.14). Maßgebend ist hierfür das Produkt aus Elastizitätsmodul  $E_f$  und Dicke der Faserverbundwerkstoffe  $t_f$ , da die Verbundbruchkräfte in einem linearen Zusammenhang zur Verbundbreite stehen. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen am Wandknoten haben sich Steifigkeiten von  $E_f \cdot t_f \geq 25 \cdot 10^3 \text{ N/mm}$  bewährt und können somit für eine baupraktische Anwendung empfohlen werden. Bei der Verwendung von Glasfaserwerkstoffen muss auf die Alkalibeständigkeit geachtet werden.

Zum Verkleben der Faserwerkstoffe auf dem Mauerwerk sollten vorzugsweise niedrigviskose Epoxidharzklebstoffe verwendet werden. Diese lassen sich gut verarbeiten und führen im Vergleich zu höherviskosen Klebstoffen zu einer Steigerung der Verbundbruchkräfte.

### 9.2 Ermittlung von Materialkennwerten

Die Ermittlung der Druckfestigkeits- und Oberflächenzugfestigkeitskennwerte der Mauersteine kann wie im Abschnitt 4.4 angegeben erfolgen. Die Elastizitätsmodule und Dicken der Faserverbundwerkstoffe sind vom jeweiligen Anbieter des Verstärkungssystems anzugeben oder in Vorversuchen zu ermitteln.

## 9.3 Bemessung

Im Vorfeld der Bemessung von mit Faserverbundwerkstoffen verstärkten Mauerwerkscheiben sollte zuerst über das prinzipielle Tragverhalten nachgedacht werden. Die aus den Einwirkungen angreifenden äußeren Kräfte müssen sicher und zuverlässig zu den Auflagern geführt werden (vgl. auch Abs. 8.2). Hierfür ist ein Strukturmodell erforderlich, wobei auf einfache Stabwerksmodelle (respektive Fachwerkmodelle) zurückgegriffen werden kann. Fachwerkmodelle zeichnen sich durch Normalkraftstäbe mit einachsialer Zug- und Druckbeanspruchung aus. Die Druckbeanspruchung kann vom Mauerwerk aufgenommen werden, wobei jedoch dem anisotropen Festigkeitsverhalten Rechnung zu tragen ist. Insofern kann der bruchmechanische Nachweis des Mauerwerks mit der Theorie der Spannungsfelder in Kombination mit der Bruchbedingung von *Ganz* [Gan85] (vgl. Abs. 3.1.3) erfolgen. Dieses Berechnungsverfahren findet, zur Bemessung von Mauerwerksbauten, in der Schweiz seit geraumer Zeit seine Anwendung und hat sich vielfach bewährt. Da Mauerwerk nur eine begrenzte Zugfestigkeit aufweist, kann der Zugstab vom Faserverbundwerkstoff gebildet werden. Der Nachweis der Zugfestigkeit kann mit Kenntnis entsprechender Materialkennwerte, wie dem Elastizitätsmodul und der Grenzdehnung, sowie der Definition eines Sicherheitsniveaus erfolgen. Hinweise hierzu werden von *Seim* [Sei07] gegeben. Von *Huster* und *Seim* [Hus08] wurden darüber hinaus Verfahren zur nachträglichen Ermittlung charakteristischer Materialfestigkeitswerte zusammengestellt. Eine umfassende Aufarbeitung möglicher Bemessungskonzepte für auf Betonbauteile aufgeklebte Faserverbundwerkstoffe findet sich darüber hinaus im *fib Bulletin 14* [Tas01].

Für den Anschluss einer Zugstrebe (Faserverbundwerkstoff) an die Druckstreben (Mauerwerk) im Knotenbereich des Fachwerks, kann das vorgeschlagene Verbundmodell (Abs. 7.3) verwendet werden. Hier ergibt sich ein Wandknoten, weshalb im Folgenden speziell für diesen Bereich einige wichtige Hinweise zur Anwendung des Verbundmodells und der damit verbundenen Nachweisführung gegeben werden sollen. Hierfür sollen beispielhaft die schon im Abschnitt 8.1.3 dokumentierten Wandknoten C1-C3 und C4-C6 (vgl. Abb. 8.17 und 8.18), jedoch nun mit teils vereinfachten Materialkenngrößen (Reibungsbeiwert  $\mu = 0,60$  und Haftscherfestigkeit  $f_v = 0$ ), bemessen werden.

Der Nachweis der Knotenbereiche (Wandknoten) kann in drei Schritten erfolgen: Der Ermittlung der Kräfte am Knoten, der Berechnung der Verbundkräfte und dem Nachweis der Mauerwerksdruckfestigkeit.

Das Modellieren mit Spannungsfeldern setzt ein starr-idealplastisches Materialverhalten des Mauerwerks voraus, was zu einer Diskontinuität am Feldrand parallel zur Beanspruchungsrichtung führt. Die Mauerwerksbereiche ausserhalb der Spannungsfelder bleiben spannungsfrei (vgl. Abs. 3.1.4). Mit dem Reibungsbeiwert von  $\mu = 0,6$  und der Haftscherfestigkeit von  $f_v = 0$  (vgl. Tab. 9.2) ergibt sich ein innerer

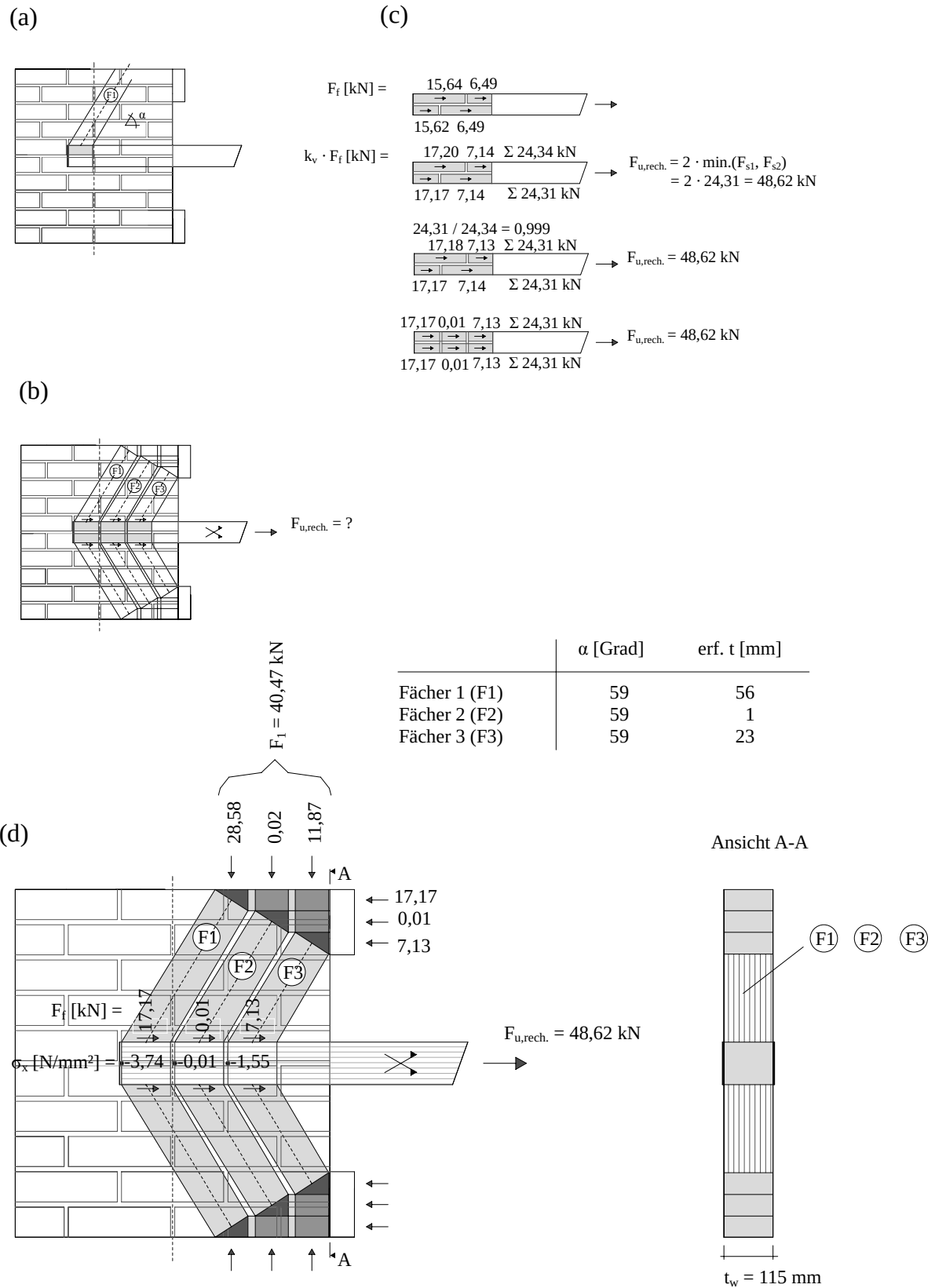
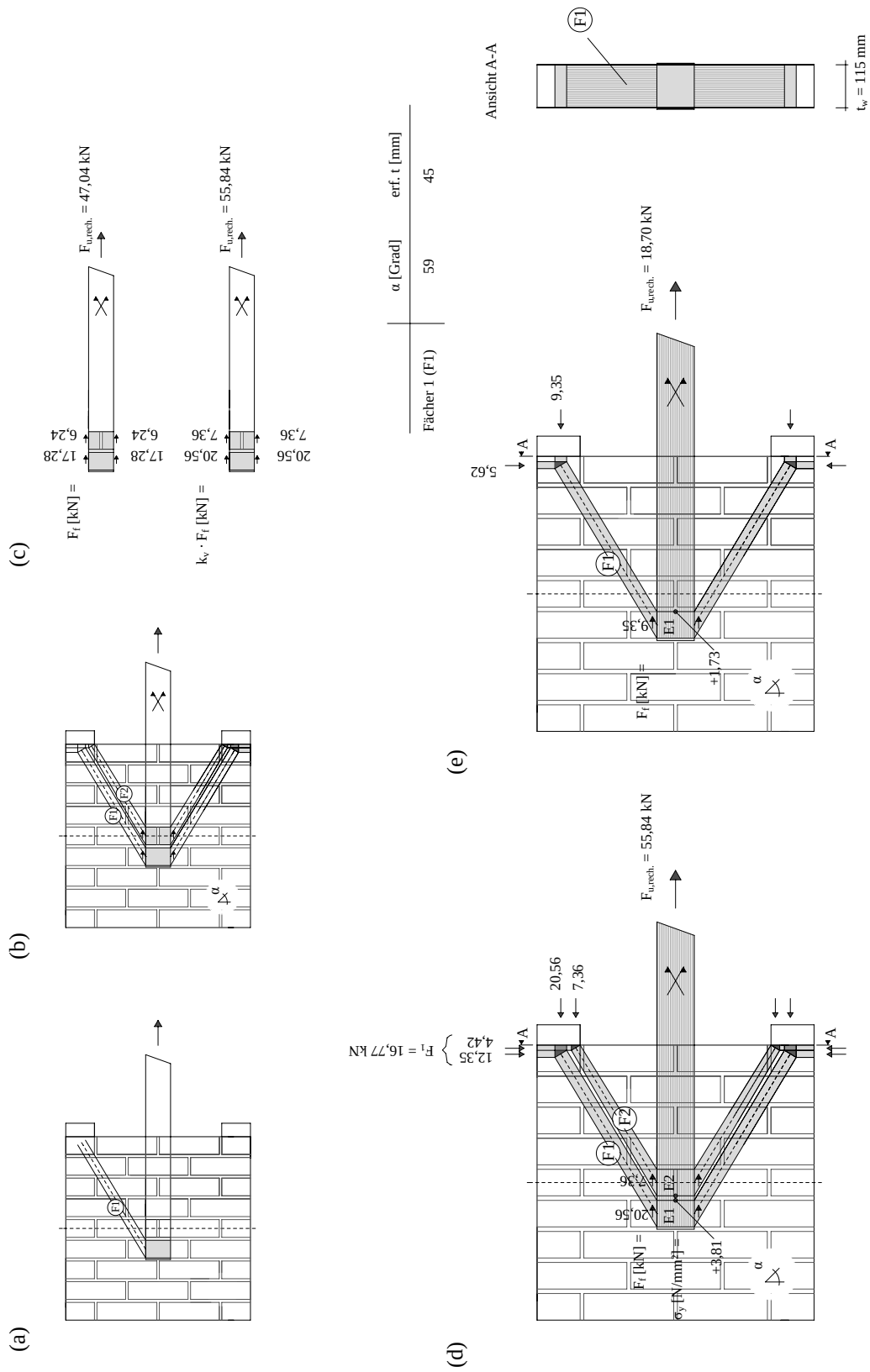


Abbildung 9.1: Wandknoten C1-C3



| Versuche | $\bar{f}_{st,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{st,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{E}_f$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{t}_f$<br>[mm] | $c_v$<br>[-] | $G_v$<br>[N/mm] | $\tau_R$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|----------|----------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|--------------|-----------------|----------------------------------|
| C1 - C3  | 2,98                                         | 37,76                                    | 22548                               | 1,14                | 0,058        | 0,615           | 0                                |
| C4 - C6  | 2,98                                         | 37,76                                    | 22548                               | 1,14                | 0,058        | 0,615           | 0                                |

**Tabelle 9.1:** Kennwerte für die Berechnung der Verbundbruchkräfte

Reibungswinkel des Mauerwerks von 59°. Die Spannungsfelder können in der Folge ausgehend vom Rand der Faserverbundwerkstoffe modelliert werden (Abb. 9.1a und Abb. 9.2a). Erfolgt die Verklebung der Faserverbundwerkstoffe über zwei Steinschichten (vgl. Abb. 9.1) parallel zu den Lagerfugen so empfiehlt es sich, das über die Steinlänge angreifende Spannungsfeld auf zwei Felder je Stein (vgl. Abb. 9.1b) aufzuteilen. Dieses Vorgehen führt zu einer symmetrischen Aufteilung der aus den Verbundkräften resultierenden Spreizkräfte (vgl. hierzu Abb. 8.11). Bei einer Verklebung der Faserverbundwerkstoffe senkrecht zu den Lagerfugen, können die Spannungsfelder am jeweiligen Stein angesetzt werden (Abb. 9.2b). Im Bereich der Auflager erfolgt eine Umlenkung der Kräfte, woraus sich Mauerwerksbereiche mit biachsialen Beanspruchungen ergeben.

Die Verbundkräfte können mit dem in Abschnitt 7.3 aufgeführten Verbundmodell berechnet werden. Hierbei kann die Berechnung beginnend mit dem Endverankerungselement für beliebig viele Zwischenrisselemente erfolgen. Die Zwischenrisselemente bilden sich zwischen den Stoss- (parallele Verklebung der FVW, vgl. Abb. 9.1c) oder Lagerfugen (senkrechte Verklebung der FVW, vgl. Abb. 9.2) aus. Das Verbundmodell benötigt zur Aktivierung der Zwischenrisselemente eine Relativverformung der Verankerungselemente in der Beanspruchungsrichtung der Faserverbundwerkstoffe, was durch das Öffnen der Fugen zwischen den Elementen gewährleistet wird. Für dünne Wandscheiben haben die eigenen Untersuchungen das geforderte Verhalten bestätigt. Für dickere Wandscheiben, wie sie gerade im Bestand vorzufinden sind, besteht weiterer Forschungsbedarf. Da die Herleitung der Verbundbruchkraft eine „Grenzlösung“ darstellt, könnten sich hier geringere Verbundbruchkräfte einstellen. Die Berechnung der Verbundkräfte erfolgt mit den in Tabelle 9.1 angegebenen Materialkennwerten für in der Beanspruchungsrichtung der Faserverbundwerkstoffe hintereinander liegende Verankerungselemente. Für das in Abb. 9.1c gezeigte Beispiel ergeben sich aufgrund der Verklebung der Faserverbundwerkstoffe über zwei Steinlagen zwei „Verankerungsspuren“ (obere und untere Steinlage, vgl. auch Abs. 8.1.3), für die zunächst eine getrennte Verbundkraftberechnung durchzuführen ist. Da sich die rechnerischen Verbundkräfte auf dem Bruchniveau befinden und eine Steigerung nicht möglich ist, wird die geringere Bruchkraft der zwei Spuren maßgebend. Als rechnerische Verbundbruchkraft wird das doppelte der geringeren Verbundkraft angesetzt. Für eine Verklebung der Faserverbundwerkstoffe parallel zu den Lagerfugen, sollte eine Aufteilung der Verbundkräfte gemäß Abbildung 9.1c auf die jeweilige Steinhälfte erfolgen. Die

Druckkräfte der Spannungsfelder ergeben sich mit der Umlenkung der Verbundkräfte in die Richtung der Felder.

| Versuche | $\bar{f}_{st,x}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{mo}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_x$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_y$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\mu$<br>[-] | $f_v$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|----------|------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|
| C1 - C3  | 37,88                                    | 12,20                                  | 17,43                         | 13,08                         | 0,60         | 0                             |
| C4 - C6  | 37,88                                    | 12,58                                  | 17,55                         | 13,16                         | 0,60         | 0                             |

**Tabelle 9.2:** Kennwerte für die Berechnung der Mauerwerksfestigkeiten

Der Nachweis der Mauerwerksdruckfestigkeit hat für die Spannungsfelder und die Verankerungselemente selbst auf der Grundlage des 1. Grenzwertsatzes der Plastizitätstheorie (vgl. 3.1.2) zu erfolgen. Demnach muss unter Beachtung der statischen Randbedingungen ein äusseres und inneres Gleichgewicht gefunden werden. Zudem darf die für das Mauerwerk verwendete Bruchbedingung (z. Bsp. von Ganz [Gan85]) an keinem Punkt im Tragwerk verletzt werden. Somit darf die in Abhängigkeit der Beanspruchungsrichtung rechnerisch anzusetzende Mauerwerksdruckfestigkeit  $f_\alpha$  nach Gleichungen 3.6 bis 3.10 an keinem Punkt im Tragwerk überschritten werden (vgl. auch Abb. 8.13). Für den hier gezeigten Fall ergibt sich aufgrund der Haftscherfestigkeit von  $f_v = 0$  formal eine Vereinfachung der Bruchbedingung mit der Reduzierung auf zwei Mauerwerksfestigkeiten  $f_x$  und  $f_y$  (vgl. Abb. 3.7). Die Ermittlung der Mauerwerksfestigkeit  $f_x$  kann mit Kenntnis der Stein- und Mörteldruckfestigkeit nach Abschnitt 4.6 erfolgen. Der Nachweis gelingt, wenn eine ausreichende Druckfläche im Spannungsfeld zur Verfügung steht. Für die in den Abbildungen 9.1 und 9.2 gezeigten Beispiele wurden die für den Nachweis erforderlichen Breiten der Spannungsfelder (erf. t) angegeben. Aufgrund der unterschiedlichen Elastizitätsmodule von Mörtel und Stein ist mit einem Querkzugversagen der Steine - speziell der Verankerungselemente - zu rechnen. Zudem werden die Verankerungselemente durch den Abtrag der Verbundkräfte in Querrichtung zugbeansprucht (vgl. auch Abb. 8.16c). Somit ergibt sich für den Bereich der Verankerung formal eine Reduzierung der zulässigen Mauerwerksfestigkeit. Wie stark diese anzusetzen ist, konnte im Rahmen der Arbeit nicht abschließend geklärt werden und sollte somit Bestandteil weiterer Forschungsvorhaben sein. Für die hier durchgeführten verifizierenden Berechnungen wurden die zulässigen Mauerwerksdruckfestigkeiten im Bereich der Verankerung auf 50% reduziert.

In Abbildung 9.2d ergeben sich aufgrund ihrer Neigungen in Richtung der Auflager zwei Spannungsfelder. Die verhältnismäßig flache Neigung des Feldes (F2) führt am Verankerungselement (E2) zu einer geringen Normalkraft. Lässt man wie in Abschnitt 8.1.3 beschrieben ein Klaffen der Fugen zu, so würde das Verbundelement E2 kippen. In der Folge könnte das Spannungsfeld für einen rechnerischen Abtrag der Verbundbruchkräfte nicht herangezogen werden. Jedoch ist die Annahme eines Klaffens in den Fugen eher konservativ, da schon der Klebstoff mit seiner vergleichsweise hohen Zugfestigkeit von 35 N/mm<sup>2</sup> dem entgegen wirkt. Unter Berücksichtigung wei-

terer Normalkräfte oder dem Aufbringen von Faserverbundwerkstoffen senkrecht zur klaffenden Fuge kann dieses Phänomen beherrscht werden.

## 9.4 Kleben am Bau

Die Mauerwerksoberflächen müssen staub- und fettfrei sein. Lose Teile sind zu entfernen. Scharfe oder hervorstehende Kanten sind zu begradigen. Das Verkleben der Faserwerkstoffe hat bei trockener Witterung zu erfolgen. Für die bei der Verarbeitung einzuhaltenden Bauteil- und Außentemperaturen sind Angaben des Herstellers erforderlich.

## 9.5 Dauerhaftigkeit

Die Klebverbindung sollte vor direkter Sonneneinstrahlung, Feuchteeinwirkung und mechanischen Einflüssen geschützt werden. Dies kann beispielhaft durch einen Verputz gesichert werden. Der Tauwechsel stellt sich als unkritisch dar. *Green et. al.* [Gre00] konnten an Verbundproben die bis zu 300 Frost-Tauwechsel ( $-18^{\circ}\text{C}$  bis  $+15^{\circ}\text{C}$ ) ausgesetzt wurden zeigen, dass die Verbundfestigkeit der Klebverbindung sogar leicht ansteigt.



## 10 Zusammenfassung und Ausblick

Im Kern der Dissertation steht die Entwicklung eines Verbundmodells (Kap. 7) für auf Mauerwerk mit Epoxidharzklebstoffen aufgeklebte unidirektionale faserverstärkte Kunststoffe. Dieses eröffnet erstmalig die Möglichkeit die Verbundcharakteristik zwischen Mauerwerk und Faserverbundwerkstoffen rechnerisch zu erfassen und in Kombination mit einem Strukturmodell (Abs. 3.1) den inneren Kraftabtrag im Verankerungsbereich von in ihrer Scheibenebene beanspruchten Mauerwerkswänden zu erklären. Für eine Plattenbeanspruchung kann das Verbundmodell, aufbauend auf den Untersuchungen von *Triantafillou* (Abs. 2.4.3) ebenfalls angewendet werden.

Im ersten Teil der Arbeit (Kap. 2) sind die derzeit vorhandenen wissenschaftlichen Erkenntnisse zu mit Faserverbundwerkstoffen verstärkten Mauerwerkswänden umfassend zusammengestellt und systematisch aufbereitet. Hier zeigt sich, dass in den letzten Jahren eine Vielzahl von experimentellen und theoretischen Untersuchungen durchgeführt wurden, jedoch gerade die Frage der Verbundcharakteristik unbeantwortet blieb. Ein Verbundmodell für auf Mauerwerk aufgeklebte Faserverbundwerkstoffe fehlte. In Kapitel 3 sind die für die Arbeit notwendigen mechanischen Grundlagen dokumentiert. Dies betrifft insbesondere die *Theorie der Spannungsfelder* für das Strukturmodell und den *Ansatz des verschieblichen Verbundes* zur Herleitung eines Verbundmodells. Gerade für letzteres erfolgte die Dokumentation, aufgrund der Erfordernis für ein besseres Verständnis, umfassend. Für das entwickelte Verbundmodell ist es von entscheidender Bedeutung, wie die Materialkennwerte der Werkstoffe ermittelt werden. Eine ausführliche Dokumentation der verwendeten Verfahren und des Vorgehens findet sich in Kapitel 4. Hier zeigte sich speziell bei der Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeiten der Mauersteine, dass ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes neues Prüfverfahren (Abb. 4.9) zu einer teils deutlichen Reduktion der Festigkeitsstreuungen (Abb. 4.10) führte.

In Kapitel 5 sind die experimentellen Verbunduntersuchungen an normalformatigen Steinen der Serien A und B dokumentiert. Zur breiten Absicherung des entwickelten Verbundmodells wurden 91 Endverankerungsversuche durchgeführt, wobei vier Gelegarten, drei Klebstoffe und acht Steinsorten miteinander kombiniert wurden. Das Verbundversagen trat bei nahezu allen Versuchen als schlagartiger Kohäsionsbruch der oberflächennahen Steinbereiche ein. Bei konstanter Verbundlänge wurden die Verbundbruchkräfte sowohl durch die Steinfestigkeit als auch durch die Dehnsteifigkeit der Faserverbundwerkstoffe beeinflusst. Höhere Festigkeiten und Steifigkeiten führten

im Allgemeinen zu einer Steigerung der Verbundbruchkräfte. Gleiches gilt für die Verklebung der Gelege mit einem niedrigviskosen Epoxidharzklebstoff. Im Vergleich zum SD330 Klebstoff ergaben sich mit der Anwendung des SP55 Klebstoff im Mittel ca. 40% höhere Verbundbruchkräfte. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass die Wahl des verwendeten Epoxidharzklebstoffs einen entscheidenden Einfluss auf die Verbundbruchkräfte hat. Gleichwohl soll darauf hingewiesen werden, dass die Viskosität der Epoxidharzklebstoffe bei der Klebstoffherstellung eingestellt werden kann. Bei den Versuchen zeigte sich, dass sich die experimentellen Verbundbruchkräfte aus einem Verbundkraftanteil und einem Reibungsanteil der Füge Teile Stein und Faserverbundwerkstoff ergaben. Der Reibungsanteil konnte mit dem Beiwert  $\zeta_v$  abgeschätzt werden. Zur Absicherung der kombinierten Anwendung des Struktur- und des Verbundmodells, wurden mit der Serie C (Kap. 6) 24 Verankerungsversuche an Wandknoten durchgeführt. Hierbei wurden unterschiedliche Verbundflächengeometrien (490 cm<sup>2</sup> bis 1480 cm<sup>2</sup>) in Kombination mit variierenden Faserverbundwerkstoffdicken (2 bis 4 Gelegelagen) für zwei Steinarten und zwei unterschiedliche Winkel (0° und 90°) zwischen den Fasern und der Lagerfuge untersucht. Für den Versuch C23 ergaben sich Verbundbruchkräfte von bis zu 157,9 kN. Beim Versagen zeigten sich teils deutliche Ausbrüche der Steine im Verbundbereich von bis zu 35 mm in der Tiefe. Mit senkrecht zu den Lagerfugen verklebten Faserverbundwerkstoffen wurden tendenziell höhere Verbundbruchkräfte als mit parallel zur Lagerfuge verklebten erreicht (C1-C6, C7-C12), was auf eine höhere Anzahl an Verbundelementen zurückzuführen ist.

In Kapitel 7 wird das Verbundmodell hergeleitet, wobei ein *genaues* und ein *vereinfachtes* Berechnungsverfahren entwickelt wurde. Anschließend (Kap. 8) wird das Verbundmodell aber auch die kombinierte Anwendung mit dem Strukturmodell verifiziert. Hier zeigten sich gute Übereinstimmungen zwischen den experimentellen und den rechnerischen Verbundbruchkräften, wobei sich die größte Abweichung für die kalibrierten Versuche (A17 bis A58) mit einer Unterschätzung der Verbundbruchkraft von 25% (A20-A22) ergibt. Mit der Verifizierung der Serie B konnte zudem gezeigt werden, dass der Verbundansatz in der Lage ist, die experimentellen Verbundbruchkräfte für variierende Verbundlängen zwischen 60 mm bis 240 mm zutreffend zu berechnen. Mit der Versuchsserie C ergaben sich Abweichungen zwischen den experimentellen und rechnerischen Verbundbruchkräften von gerade einmal 13%. Die Anwendung der Theorie der Spannungsfelder für das Strukturmodell erwies sich als sinnvoll und hilfreich.

Mit den in dieser Arbeit durchgeführten theoretischen und experimentellen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass es mit dem entwickelten Verbundansatz gelingt die Verbundbruchkräfte für eine Vielzahl von Parametern zufriedenstellend zu berechnen. Gleichwohl konnten nicht alle aufkommenden Fragen beantwortet werden. So besteht weiterer Forschungsbedarf bei der Klärung des Verbundkraftabtrags innerhalb des Steins. Auch wurden im Rahmen dieser Arbeit die zwei Grenzfälle, Verklebung der Faserverbundwerkstoffe parallel und senkrecht zur Lagerfuge, untersucht. Für andere Winkel zur Lagerfuge ist eine weitere Anpassung des Strukturmodells erforderlich.

---

Die Fragen des Brand-, Temperatur- und Langzeitverhaltes von Klebeverbindungen bedürfen darüber hinaus noch einer vertieften Betrachtung.



## 11 Summary and prospects

In the focus of the dissertation stands the development of a bond model (chapter 7) for masonry post-strengthened with unidirectional fibre-reinforced polymer (FRP) material glued in connection with epoxy resin adhesives. The bond model gives the possibility for the first time to understand the bond characteristic between masonry and FRP's mathematically and explains the load transfer in the anchorage area for in plane loaded masonry walls in combination with a structural model (paragraph 3.1). The bond model can also be used for out of plane loaded walls.

In the first part of the dissertation (chapter 2) the state of the art of research in post-strengthening of masonry with FRP's is shown. Over the last few years a lot of experimental and theoretical investigations were carried out. Nevertheless the important question of the bond characteristics is unanswered. Therefore chapter 3 documents basics of structural mechanics and friction mechanics which are evident for theoretical investigations. This includes in particular the theory of stress fields for the structural model and the theory of Volkersen for the derivation of a bond model. A detailed documentation of the procedures and methods used for material testing can be found in chapter 4. Investigation of the surface tensile strength of the bricks showed, that a test procedure which was developed in the framework of this paper (fig. 4.9) led to a reduction of tension strengths scattering (fig. 4.10).

The bond test on single bricks and blocks with series A and B are documented in chapter 5. For the validation of the developed bond models, 91 anchorage tests were carried out in which four types of sheets, three adhesives and eight types of bricks were combined. The debonding occurred in nearly all tests with the abrupt cohesive failure of the areas of the bricks near the upper surface. For the constant bond length the bond strength was influenced by the bricks strength and also by the Young's modulus of elasticity of the FRP material. In general, high tensile strength and high stiffness of FRP's led to an increase in ultimate anchorage forces. The same applies for bonding the sheets with a low viscosity epoxy resin adhesive. Compared to the SD330 adhesive, using the SP55 adhesive resulted in an average approx. 40% higher ultimate anchorage forces. This leads to the conclusion that the viscosity of adhesive used has an important influence on the bond strength. Furthermore it is showed that the experimental bond forces consist of a bond strength proportion and a friction proportion. The friction proportion could be evaluated with the coefficient  $\zeta_v$ . To prove the combined use of structural model and bond model, 24 anchorage tests were carried out with series C on wall elements (chapter 6). Various bond surface area

geometries ( $490 \text{ cm}^2$  to  $1480 \text{ cm}^2$ ) in combination with varied FRP thicknesses (2 to 4 sheet layers) for two types of bricks resp. blocks and two different angles ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ) between FRP's and the horizontal bed joints were tested. For test C23 anchorage force was up to 157.9 kN. Outbursts at the bricks could be seen in the bond area from up to 35 mm deep. Wall elements with FRP's perpendicular to the horizontal bed joints tended to reach higher anchorage forces than being parallel to the horizontal bed joints (C1-C6, C7-C12). The effect occurred in the higher number of bond elements.

In chapter 7 the bond model is derived as a complete and a simplified method. Subsequently (chapter 8) the bond model but also the combined use with the structural model is verified. This showed good convergences between the experimental and the calculated results. The greatest deviation for the calibrated test (A17 to A58) resulted in an underestimation of 25% of anchorage forces. The verification of series B showed that the bond model can correctly calculate the experimental anchorage forces for various bond lengths between 60 mm and 240 mm. With test series C, deviations between experimental and calculated anchorage forces were no more than 13%. The use of stress fields for the structure model turned out to be sensible and helpful.

The comparison of the theoretical calculations with the experimental test results show that it is possible to adequately calculate the anchorage forces for different conditions. Nevertheless, not all questions which arose could be answered. Therefore further research is needed to clarify the bond strength reduction due to transverse tension stress. Two borderline cases are also examined in this dissertation, bonding of the FRP material parallel and perpendicular to the horizontal bed joints. Further adjustment of the structure model is necessary for other angles. The issues of fire, temperature and long-term characteristics of adhesive bonding also need further consideration.

# Literaturverzeichnis

- [Aie03] AIELLO, M. A.; SCOLTI, M. S.: *Masonry Structures strengthened with FRP Sheets: Experimental Investigation of Bond between FRP Laminates and Ashlars*. International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, Vol.9, No.6, S. 639-662, 2003.
- [Aie06] AIELLO, M. A.; SCOLTI, M. S.: *Bond analysis of masonry structures strengthened with CFRP sheets*. Construction and Building Materials, Vol. 20, S. 90-100, 2006.
- [Bac97] BACHMANN, H.: *Hochbau für Ingenieure - Eine Einführung*. Teubner Verlag, 2. überarbeitete Auflage, 1997.
- [Bar01] BARTSCH, H.: *Taschenbuch Mathematischer Formeln*. Fachbuchverlag Leipzig, 2001.
- [Bre71] BRESSON, J.: *Nouvelles recherches et applications concernant l'utilisation des collages dans les structures*. Beton plaque, Nr. 278, S. 22-55, 1971.
- [Böt00] BÖTTCHER, D.: *Erhaltung und Umbau historischer Tragwerke: Holz- und Steinkonstruktionen*. Ernst und Sohn Verlag, 2000.
- [Cas03] CASARETO, M.; OLIVERTI, A.; ROMELLI A.; LAGOMARSINO S.: *Bond behavior of FRP laminates adhered to masonry*. Advancing with composites, Plast 2003, Ed. J. Crivelli-Visconti, Milan, May 7-9, 2003.
- [Che94a] CHEN, W. F., SALEEB A. F.: *Constitutive Equations for Engineering Materials - Volume 1: Elasticity and Modeling*. Purdue University, West Lafayette, USA, 1994.
- [Che94b] CHEN, W. F.: *Constitutive Equations for Engineering Materials - Volume 2: Plasticity and Modeling*. Purdue University, West Lafayette, USA, 1994.
- [CNR04] CNR-DT 200/2004: *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures*. Technischer Bericht, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, 2004.
- [DGf06] DGfM: *Anteile der Konstruktionsarten an Wohnbauten 2006*. Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau, Berlin, [www.dgfm.de](http://www.dgfm.de), 2006.

- [Dia90] DIALER, C.; STÖCKL, S.; KUPFER H.: *Versuche zum Verformungs- und Bruchverhalten von schubbeanspruchtem Mauerwerk - Teil 2: Auswertung der Meßdaten und theoretische Deutung*. Technischer Bericht, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 1990.
- [Ege90] EGERMANN, R.: *Zur nachträglichen Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von Mauerziegeln*. Ernst und Sohn Verlag, Berlin, S. 159 - 182, Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Jahrbuch, 1990.
- [Ehr92] EHRENSTEIN, G. W.: *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe-Verarbeitung-Eigenschaften*. Carl Hanser Verlag München, 1992.
- [Ehr04] EHRENSTEIN, G. W.: *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*. Carl Hanser Verlag München, 2004.
- [Ehs95] EHSANI, M. R.: *Strengthening of earthquake-damaged masonry structures with composite materials*. Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, S. 680-687, 1995. RILEM Published by E & FN Spon London.
- [Ehs96] EHSANI, M. R.; SAADATMANESH, H.: *Seismic Retrofit of URM Walls with Fiber Composites*. The Masonry Society (TMS), S.63-72, December, 1996.
- [Ehs97] EHSANI, M. R.; SAADATMANESH, H.; AL-SAIDY A.: *Shear Behavior of URM Retrofitted with FRP Overlays*. Journal of Composites for Construction, S. 17-25, February, 1997.
- [Ehs99] EHSANI, M. R.; SAADATMANESH, H.; VELAZQUEZ-DIMAS J. I.: *Behavior of Retrofitted URM Walls under Simulated Earthquake Loading*. Journal of Composites for Construction, S. 134-142, August, 1999.
- [ElG04] ELGAWADY, M.: *Seismic In-Plane behavior of URM Walls Upgraded with Composites*. Dissertation, EPFL, Lausanne, 2004.
- [Erh99] ERHARD, G.: *Konstruieren mit Kunststoffen*. Carl Hanser Verlag München, 1999.
- [Fra59] FRANZ, G.: *Versuche über die Querkraftaufnahme in Fugen von Spannbe-tonträgern aus Fertigteilen*. Beton- und Stahlbetonbau, 54, Nr. 6, S. 137-140, 1959.
- [Gal02] GALATI, N.; TUMIALAN, G. J.; NANNI-A.; LA TEGOLA A.: *Influence of Arching Mechanism in Masonry Walls Strengthened with FRP Laminates*. Third International Conference on Composites in Infrastructure, San Francisco, June, 2002.
- [Gal04] GALATI, N.; TUMIALAN, G. J.; SECONDIN-S.; NANNI A.: *Strengthening with FRP-Bars of URM Walls subject to Out-of-Plane Loads*. International Conference Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction, University of Surrey, UK, 2004.

- [Gal05] GALATI, N.; GARBIN, E.; NANNI A.: *Design Guidelines for the Strengthening of Unreinforced Masonry Structures using Fiber Reinforced Polymers (FRP) Systems*. Technischer Bericht, Final Draft Report for BONDO TECHFAB, University of Missouri-Rolla, 2005.
- [Gan85] GANZ, H. R.: *Mauerwerksscheiben unter Normalkraft und Schub*. Dissertation, Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich, Birkhäuser Verlag, Basel, 1985.
- [Gli88] GLITZA, H.: *Druckbeanspruchung parallel zur Lagerfuge*. Mauerwerks-Kalender, S. 489-496, 1988.
- [Grü08] GRÜNHEID, E.: *Die demographische Lage in Deutschland 2008*. Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung (BiB), 2008.
- [Gre00] GREEN, M.; BISBY, L.; BEAUDOIN Y.; LABOSSIERE P.: *Effect of freeze-thaw cycles on the bond durability between fibre reinforced polymer plate reinforcement and concrete*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 27, S. 949-959, 2000.
- [Hab02] HABENICHT, G.: *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendung*. Springer Verlag Berlin, 2002.
- [Hof88] HOFMANN, P.; STÖCKL, S.: *Tests on the shear bond behaviour in the bed-joints of masonry. in: Proc. 8th Int. Brick/Block Masonry Conf. ed. J.W. de Courcy. Elsevier Applied Science, London, UK. pp. 292-303*. Prociding of 8th Int. Brick/Block Masonry Conf. ed. J.W. de Courcy. Elsevier Applied Science, London, UK. pp. 292-303, 1988.
- [Hol94] HOLZENKÄMPFER, P.: *Ingenieurmodell des Verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile*. Dissertation, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 108, 1994.
- [Hol97] HOLZENKÄMPFER, P.: *Ingenieurmodelle des Verbundes geklebter Bewehrung für Betonbauteile*. Technischer Bericht, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 473, Beuth Verlag Berlin, 1997.
- [Hus08] HUSTER, U.; SEIM, W.: *Mauerwerkskonstruktionen - Bewerten, Instandsetzen und Verstärken, Folge 2: Tragverhalten und Tragsicherheit*. Mauerwerksbau Aktuell, Bauwerk Verlag, Berlin, 2008.
- [Jai00a] JAI, J.; SPRINGER, G. S.; KOLLAR L. P.; KRAWINKLER H.: *Reinforcing Masonry Walls with Composite Materials - Model*. Journal of Composite Materials, Vol. 34, No.18, S. 1548-1580, 2000.
- [Jai00b] JAI, J.; SPRINGER, G. S.; KOLLAR L. P.; KRAWINKLER H.: *Reinforcing Masonry Walls with Composite Materials - Test Results*. Journal of Composite Materials, Vol. 34, No. 16, S. 1369-1381, 2000.

- [Kar92] KARANTONI, F.; FARDIS, M.: *Effectiveness of seismic strengthening techniques for masonry buildings*. Journal of Structural Engineering, 118, S.1884-1902, 1992.
- [Kra08] KRANZLER, T.: *Tragfähigkeit überwiegend horizontal beanspruchter Aussteifungsscheiben aus unbewehrtem Mauerwerk*. Dissertation, Institut für Massivbau, Universität Darmstadt, Heft 17, 2008.
- [Lau02] LAUMER, R.: *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-36.12-32: Verstärkung von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen durch schubfest angeklebte Kohlefaserlamine*. 84323 Massing, 2002.
- [Man00] MANG, H.; HOFSTETTER, G.: *Festigkeitslehre*. Springer Verlag, 2000.
- [Mar06] MARIA, H. S.; ALCAINO, P.; LUDERS C.: *Experimental Response of Masonry Walls externally Reinforced with Carbon Fiber Fabrics*. Proceeding of the 8. U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1402, San Francisco, USA, April 18-22, 2006.
- [Moj95] MOJSILOVIC, N.: *Zum Tragverhalten von kombiniert beanspruchten Mauerwerk*. Dissertation, Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1995.
- [Nan03] NANNI, A.; GALATI, N.; TUMIALAN J. G.: *Outline of Provisional Design Protocols and Field Applications of Strengthening of URM Walls*. International Conference Structural Faults+Repair, Commonwealth Institute London, 2003.
- [Neu00] NEUBAUER, U.: *Verbundtragverhalten geklebter Lamellen aus Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoff zur Verstärkung von Betonbauteilen*. Dissertation, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Heft 150, 2000.
- [Nie00] NIEDERMEIER, R. P.: *Zugkraftdeckung bei geklebten Bauteilen*. Dissertation, Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München, 2000.
- [Onk02] ONKEN, P.; VOM BERG, W.; NEUBAUER U.: *Verstärkung der West Gate Bridge, Melbourne*. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 2, S. 94-104, 2002.
- [Pör06] PÖRTNER, C.: *Untersuchungen zum Verbund zwischen eingeklebten stiftförmigen faserverstärkten Kunststoffen und Holz*. Dissertation, Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau, Universität Kassel, Heft 2, 2006.
- [Roi78] ROIK, K.: *Vorlesungen über Stahlbau: Grundlagen*. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1978.
- [Sch94] SCHWEGLER, G.: *Verstärken von Mauerwerk mit Faserverbundwerkstoffen in seismisch gefährdeten Zonen*. Dissertation, Bericht 229, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf, 1994.

- [Sch96] SCHWEGLER, G.: *Verstärkung von Mauerwerkbauten mit CFK-Lamellen*. Schweizer Ingenieur und Architektenblatt (SIA), Nr. 44, S. 14-16, 24. Oktober, 1996.
- [Sch01] SCHUBERT, P.: *Eigenschaften von Mauerwerk, Mauersteinen und Mauermörtel*. S. 5-22, Mauerwerk Kalender, 2001.
- [Sch05] SCHILDE, K.: *Untersuchungen zum Verbund zwischen Beton und nachträglich aufgeklebten Kohlefaserlamellen am Zwischenrisselement*. Dissertation, Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau, Universität Kassel, Heft 1, 2005.
- [Sei03] SEIM, W.; HUMBURG, E.; STÜRZ J.: *Local post-strengthening of masonry walls by use of fiber-reinforced polymers (FRP)*. Composites in Construction, University of Calabria, Rende, 2003.
- [Sei05] SEIM, W.: *Verstärkung von Mauerwerkskonstruktionen mit Faserverbundwerkstoffen*. in Faserverbundwerkstoffe, S. 185-193, Bauwerk-Verlag, Berlin, 2005.
- [Sei07] SEIM, W.: *Bewertung und Verstärkung von Stahlbetontragwerken*. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2007.
- [Sei08] SEIM, W.; PFEIFFER, U.; HEMPEL M.; ORSCHULOK R.: *A new way to investigate the surface tensile strength of concrete and masonry structures*. 14th Brick and Block Masonry Conference, Sydney, 2008.
- [Sik02] SIKADUR 330: *Technisches Merkblatt*. Sika GmbH Stuttgart, Dezember, 2002.
- [Stü02] STÜRZ, J.: *Nachträgliche Verstärkung gemauerter Wandscheiben mit Faserverbundwerkstoffen - Versuchsauswertung und rechnerische Modellierung mit Stabwerksmodellen*. Projektarbeit, Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau, Universität Kassel, unveröffentlicht, 2002.
- [Ste74] STEFAN, J.: *Versuche über die scheinbare Adhäsion*. Akademie der Wissenschaften Wien: Math. Naturwiss. Kl. 69, S.713-735, aus [Hab02], 1874.
- [SuP04] SUP RESIN EPOXI 55: *Technisches Merkblatt*. S&P Reinforcement GmbH Kriftel, September, 2004.
- [Tas01] TASK GROUP 9.3 FRP: *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*. Technischer Bericht, International Federation for Structural Concrete (fib), bulletin 14, Lusanne, 2001.
- [Tri98a] TRIANTAFILLOU, T. C.: *Composites: A new possibility for the shear Strengthening of Concrete, Masonry and Wood*. Composites Science and Technology, Vol. 58, S. 1285-1295, January, 1998.

- [Tri98b] TRIANTAFILLOU, T. C.: *Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates*. Journal of Composites for Construction, S. 96-104, May, 1998.
- [Tum99] TUMIALAN, J. G.; MYERS, J. J.; NANNI A.: *Field Evulation of Masonry Walls Strengthened with FRP Composites at the Malcolm Bliss Hospital*. Technischer Bericht, Department of Civil Engineering, University of Missouri-Rolla, 1999.
- [Tum01] TUMIALAN, J. G.: *Strengthening of Masonry Structures with FRP Composites*. Dissertation, University of Missouri-Rolla, 2001.
- [Tum02] TUMIALAN, J. G.; MORBIN, A.; MICELLI F.; NANNI A.: *Flexural Strengthening of URM Walls with FRP Laminates*. Third International Conference on Composites in Infrastructure, San Francisco, 2002.
- [Tum03] TUMIALAN, J. G.; GALATI, N.; NANNI A.: *Fiber-Reinforced Polymer Strengthening of Unreinforced Masonry Walls Subject to Out-of-Plane Loads*. ACI Structural Journal, S. 321-329, May-June, 2003.
- [VD00a] VELAZQUEZ-DIMAS, J.I.; EHSANI, M. R.: *Modeling Out-of-Plane Behavior of URM Walls Retrofitted with Fiber Composites*. Journal of Composites for Construction, S.172-181, November, 2000.
- [VD00b] VELAZQUEZ-DIMAS, J.I.; EHSANI, M. R.; SAADATMANESH H: *Out-of-Plane Behavior of Brick Masonry Walls Strengthened with Fiber Composites*. ACI Structural Journal, S. 377-387, May-June, 2000.
- [Vog00] VOGEL, M.: *Applikation von faserverstärkten Kunststoffen auf Mauerwerkswänden*. Diplomarbeit, Universität Kassel, unveröffentlicht, 2000.
- [Vol53a] VOLKERSEN, O.: *Die Schubkraftverteilung in Leim-, Niet- und Bolzenverbindungen*. Energie und Technik, Heft 3, S. 68-71, März, 1953.
- [Vol53b] VOLKERSEN, O.: *Die Schubkraftverteilung in Leim-, Niet- und Bolzenverbindungen*. Energie und Technik, Heft 5, S. 103-108, Mai, 1953.
- [Vol53c] VOLKERSEN, O.: *Die Schubkraftverteilung in Leim-, Niet- und Bolzenverbindungen*. Energie und Technik, Heft 7, S. 150-154, Juli, 1953.
- [Wal08] WALLNER, C.: *Erdbebugerechtes Verstärken von Mauerwerk durch Faserverbundwerkstoffe - experimentelle und numerische Untersuchungen*. Dissertation, Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 2008.
- [Wen88] WENZEL, F.: *Verpressen, Vernadeln, und Vorspannen von Mauerwerk historischer Bauten*. Technischer Bericht, Universität Karlsruhe, in: Jahrbuch 1987 des SFB 315, 1988, S. 53 – 72., 1988.

- [Wic91] WICKE, M.; PICHLER, D.: *Geklebte Bewehrung - Endverankerung mit und ohne Anpressdruck: Bemessungskonzept*. Technischer Bericht, HILTI Konzern Forschung, 1991.
- [Win06] WINKLER, J.; AURICH, H.: *Taschenbuch der technischen Mechanik*. Fachbuchverlag Leipzig, 2006.
- [Wit01] WITTENBURG, J.; PESTEL, E.: *Festigkeitslehre: Ein Lehr- und Arbeitsbuch*. Springer Verlag, 3. Auflage, 2001.
- [Zil08] ZILCH, C.; MUEHLBAUER, K.: *Joining of Ultra High Performance Concrete (UHPC) Members by Gluing*. Structures Concrete, April 24-26, 2008.
- [Zim99] ZIMMERLI, B.; SCHWARZ, J.; SCHWEGLER G.: *Mauerwerk: Bemessung und Konstruktion*. Birkhäuser Verlag, 1999.



## Normative Verweise

- [DIN 1045-1] DIN 1045-1. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. Beuth Verlag Berlin. August, 2008.
- [DIN 1048-2] DIN 1048-2. *Prüfverfahren für Beton: Festbeton in Bauwerken und Bauteilen*. Beuth Verlag Berlin. Juni, 1991.
- [DIN 1053-1] DIN 1053-1. *Mauerwerk - Teil 1: Berechnung und Ausführung*. Beuth Verlag Berlin. November, 1996.
- [DIN 18555-9] DIN 18555-9. *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln - Teil 9: Festmörtel Bestimmung der Fugendruckfestigkeit*. Beuth Verlag Berlin. 1999.
- [DIN EN 1015-11] DIN EN 1015-11. *Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 11: Bestimmung der Biegezug und Druckfestigkeit von Festmörtel*. Beuth Verlag Berlin. Oktober, 1999.
- [DIN EN 1015-3] DIN EN 1015-3. *Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel*. Beuth Verlag Berlin. Mai, 2007.
- [DIN EN 1052-1] DIN EN 1052-1. *Prüfverfahren für Mauerwerk - Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit*. Beuth Verlag Berlin. Dezember, 1998.
- [DIN EN 1052-3] DIN EN 1052-3. *Prüfverfahren für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit*. Beuth Verlag Berlin. Oktober, 2002.
- [DIN EN 13791] DIN EN 13791. *Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen: Deutsche Fassung EN13791:2007*. Beuth Verlag Berlin. Mai, 2008.
- [DIN EN 2747] DIN EN 2747. *Glasfaserverstärkte Kunststoffe: Zugversuch*. Beuth Verlag Berlin. Oktober, 1998.
- [DIN EN 998-2] DIN EN 998-2. *Festlegungen für Mörtel im Mauerwerksbau - Teil 2: Mauermörtel*. Beuth Verlag Berlin. September, 2003.
- [DIN V 105-100] DIN V 105-100. *Mauerziegel*. Beuth Verlag Berlin. Oktober, 2005.
- [DIN V 106] DIN V 106. *Kalksandsteine*. Beuth Verlag Berlin. Oktober, 2005.

- [EC6] EC6. *Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk*. Beuth Verlag Berlin. Oktober, 2006.
- [SIA 266] SIA 266. *Mauerwerk, SN 505 266*. Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich. 2003.
- [SIA166] SIA166. *Klebebewehrungen, SN Vornorm 505 166*. Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich. 2004.

# A Anhang

## A.1 Kennwerte der Faserverbundwerkstoffe

| Gelege-<br>typ | Kleb-<br>stoff | Gelege-<br>lagen | $\bar{b}_f$<br>[mm] | $F_{u,exp.}$<br>[kN]    | $\bar{F}_{u,exp.}$<br>[kN] | $\bar{f}_f$<br>[kN/cm] | $\bar{t}_f$<br>[mm] | $\bar{E}_f$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|----------------|----------------|------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| Sa397G         | SD330          | 1                | 50,45               | 13,17<br>12,91<br>11,03 | 12,37                      | 2,45                   | 0,70                | 19.345                              |
| Sa397G         | SP55           | 1                | 50,39               | 9,21<br>9,38<br>8,41    | 9,00                       | 1,79                   | 0,57                | 20.582                              |
| Sa397G         | SP55           | 2                | 50,44               | 24,08<br>26,30<br>23,51 | 24,63                      | 4,88                   | 1,14                | 22.548                              |
| Sa397G         | SP55           | 3                | 50,38               | 28,46<br>28,72<br>27,83 | 28,34                      | 5,62                   | 1,55                | 24.253                              |
| Sa397G         | SP55           | 4                | 50,38               | 35,46<br>38,25<br>36,03 | 36,58                      | 7,26                   | 2,08                | 25.616                              |

**Tabelle A.1:** Ergebnisse der Zugprüfung zum *Sa397G* Gelege

| Gelege-<br>typ | Kleb-<br>stoff | Gelege-<br>lagen | $\bar{b}_f$<br>[mm] | $F_{u,exp.}$<br>[kN]    | $\bar{F}_{u,exp.}$<br>[kN] | $\bar{f}_f$<br>[kN/cm] | $\bar{t}_f$<br>[mm] | $\bar{E}_f$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|----------------|----------------|------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| SP90/10G       | SD330          | 1                | 50,19               | 10,90<br>12,69<br>10,40 | 11,33                      | 2,25                   | 1,13                | 14.014                              |
| SP90/10G       | SP55           | 1                | 50,17               | 12,80<br>11,97<br>13,32 | 12,69                      | 2,53                   | 1,05                | 12.077                              |
| SW430G         | SD330          | 1                | 50,33               | 12,47<br>13,83<br>12,72 | 13,01                      | 2,58                   | 1,35                | 13.060                              |
| SW430G         | SP55           | 1                | 50,04               | 13,57<br>14,64<br>11,44 | 13,22                      | 2,64                   | 1,13                | 12.999                              |
| SP240C         | SP55           | 1                | 50,17               | 27,47<br>26,42<br>25,82 | 26,57                      | 5,30                   | 1,09                | 35.398                              |

**Tabelle A.2:** Ergebnisse der weiteren Zugprüfungen

## A.2 Druckfestigkeiten - Serie A bis C

| Stein | $f_{St,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | Stein | $f_{St,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-------|------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|-------|------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|
| KS 12 | 26,05                              | 25,98                                    | 0,85                               | Mz 20 | 39,51                              | 40,43                                    | 2,47                               |
|       | 27,01                              |                                          |                                    |       | 37,98                              |                                          |                                    |
|       | 24,75                              |                                          |                                    |       | 38,59                              |                                          |                                    |
|       | 25,69                              |                                          |                                    |       | 43,59                              |                                          |                                    |
|       | 26,43                              |                                          |                                    |       | 42,49                              |                                          |                                    |
| KS 20 | 25,90                              | 26,16                                    | 1,84                               | Sa    | 101,51                             | 86,47                                    | 12,00                              |
|       | 29,28                              |                                          |                                    |       | 83,13                              |                                          |                                    |
|       | 24,40                              |                                          |                                    |       | 76,95                              |                                          |                                    |
|       | 25,53                              |                                          |                                    |       | 96,47                              |                                          |                                    |
|       | 25,70                              |                                          |                                    |       | 74,30                              |                                          |                                    |
| KS 28 | 32,77                              | 34,27                                    | 2,30                               | hi Mz | 26,33                              | 22,19                                    | 3,22                               |
|       | 37,76                              |                                          |                                    |       | 18,74                              |                                          |                                    |
|       | 32,13                              |                                          |                                    |       | 24,69                              |                                          |                                    |
|       | 35,39                              |                                          |                                    |       | 21,34                              |                                          |                                    |
|       | 33,32                              |                                          |                                    |       | 19,86                              |                                          |                                    |
| Mz 12 | 32,44                              | 31,22                                    | 2,35                               |       |                                    |                                          |                                    |
|       | 32,61                              |                                          |                                    |       |                                    |                                          |                                    |
|       | 27,20                              |                                          |                                    |       |                                    |                                          |                                    |
|       | 32,78                              |                                          |                                    |       |                                    |                                          |                                    |
|       | 31,08                              |                                          |                                    |       |                                    |                                          |                                    |

Tabelle A.3: Druckfestigkeit Charge I

| Stein | $f_{St,x}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,x}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,x}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{St,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-------|------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|
| KS 20 | 37,44                              | 37,88                                    | 1,88                               | 38,29                              | 37,76                                    | 3,11                               |
|       | 39,12                              |                                          |                                    | 40,36                              |                                          |                                    |
|       | 35,84                              |                                          |                                    | 33,16                              |                                          |                                    |
|       | 40,48                              |                                          |                                    | 36,32                              |                                          |                                    |
|       | 36,64                              |                                          |                                    | 40,66                              |                                          |                                    |
| Mz 20 | 47,28                              | 41,24                                    | 6,97                               | 23,70                              | 26,64                                    | 2,32                               |
|       | 41,28                              |                                          |                                    | 24,99                              |                                          |                                    |
|       | 48,80                              |                                          |                                    | 27,44                              |                                          |                                    |
|       | 32,48                              |                                          |                                    | 29,61                              |                                          |                                    |
|       | 36,32                              |                                          |                                    | 27,44                              |                                          |                                    |

**Tabelle A.4:** Druckfestigkeit Charge II

| Stein | $f_{St,x}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,x}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,x}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{St,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,z}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-------|------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|
| KS 20 | -                                  | -                                        | -                                  | 29,18                              | 29,11                                    | 5,81                               |
|       | -                                  |                                          |                                    | 23,87                              |                                          |                                    |
|       | -                                  |                                          |                                    | 30,66                              |                                          |                                    |
|       | -                                  |                                          |                                    | 37,96                              |                                          |                                    |
|       | -                                  |                                          |                                    | 23,88                              |                                          |                                    |
| Mz 20 | 33,46                              | 39,26                                    | 3,78                               | 26,70                              | 25,40                                    | 1,96                               |
|       | 42,64                              |                                          |                                    | 24,89                              |                                          |                                    |
|       | 38,16                              |                                          |                                    | 22,83                              |                                          |                                    |
|       | 42,32                              |                                          |                                    | 27,94                              |                                          |                                    |
|       | 39,76                              |                                          |                                    | 24,78                              |                                          |                                    |

**Tabelle A.5:** Druckfestigkeit Charge III

## A.3 Oberflächenzugfestigkeiten - Serie A bis C

### A.3.1 Ergebnisse mit Verwendung des Klebstoffs SD330

| Stein | $f_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|
| KS 12 | 1,16                                    | 1,78                                          | 0,50                                    | 2,57                                   | 2,35                                         | 0,23                                   |
|       | 1,74                                    |                                               |                                         | 2,43                                   |                                              |                                        |
|       | 2,34                                    |                                               |                                         | 1,99                                   |                                              |                                        |
|       | 2,22                                    |                                               |                                         | 2,24                                   |                                              |                                        |
|       | 1,44                                    |                                               |                                         | 2,50                                   |                                              |                                        |
| KS 20 | 2,88                                    | 2,32                                          | 0,41                                    | 2,84                                   | 2,62                                         | 1,24                                   |
|       | 1,66                                    |                                               |                                         | 2,34                                   |                                              |                                        |
|       | 1,93                                    |                                               |                                         | 2,49                                   |                                              |                                        |
|       | 1,76                                    |                                               |                                         | 2,61                                   |                                              |                                        |
|       | 2,68                                    |                                               |                                         | 2,65                                   |                                              |                                        |
|       | 2,22                                    |                                               |                                         | 2,82                                   |                                              |                                        |
|       | 2,26                                    |                                               |                                         | 2,62                                   |                                              |                                        |
|       | 2,57                                    |                                               |                                         | 2,69                                   |                                              |                                        |
|       | 2,03                                    |                                               |                                         | 2,94                                   |                                              |                                        |
|       | 2,27                                    |                                               |                                         | 2,17                                   |                                              |                                        |
|       | 3,01                                    |                                               |                                         | 2,70                                   |                                              |                                        |
|       | 2,35                                    |                                               |                                         | 2,71                                   |                                              |                                        |
|       | 2,09                                    |                                               |                                         | 2,62                                   |                                              |                                        |
|       | 2,90                                    |                                               |                                         | 2,81                                   |                                              |                                        |
|       | 2,19                                    |                                               |                                         | 2,30                                   |                                              |                                        |
| KS 28 | 1,55                                    | 1,81                                          | 0,27                                    | 2,63                                   | 2,70                                         | 0,19                                   |
|       | 1,49                                    |                                               |                                         | 3,04                                   |                                              |                                        |
|       | 1,95                                    |                                               |                                         | 2,70                                   |                                              |                                        |
|       | 2,05                                    |                                               |                                         | 2,58                                   |                                              |                                        |
|       | 2,02                                    |                                               |                                         | 2,57                                   |                                              |                                        |

**Tabelle A.6:** Oberflächenzugfestigkeit Charge I (Tabelle 1/2)

| Stein | $f_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|
| Mz 12 | 1,56                                    | 1,78                                          | 0,24                                    | 2,16                                   | 2,07                                         | 0,26                                   |
|       | 1,71                                    |                                               |                                         | 1,96                                   |                                              |                                        |
|       | 1,50                                    |                                               |                                         | 2,08                                   |                                              |                                        |
|       | 1,38                                    |                                               |                                         | 1,77                                   |                                              |                                        |
|       | 1,81                                    |                                               |                                         | 2,45                                   |                                              |                                        |
|       | 1,80                                    |                                               |                                         | 1,97                                   |                                              |                                        |
|       | 1,95                                    |                                               |                                         | 2,03                                   |                                              |                                        |
|       | 2,14                                    |                                               |                                         | 2,21                                   |                                              |                                        |
|       | 2,22                                    |                                               |                                         | 1,84                                   |                                              |                                        |
|       | 1,78                                    |                                               |                                         | 2,51                                   |                                              |                                        |
|       | 1,94                                    |                                               |                                         | 2,57                                   |                                              |                                        |
|       | 1,90                                    |                                               |                                         | 1,80                                   |                                              |                                        |
|       | 1,75                                    |                                               |                                         | 1,93                                   |                                              |                                        |
|       | 1,46                                    |                                               |                                         | 2,00                                   |                                              |                                        |
|       | 1,86                                    |                                               |                                         | 1,80                                   |                                              |                                        |
| Mz 20 | 2,48                                    | 2,30                                          | 0,61                                    | 2,52                                   | 2,35                                         | 0,60                                   |
|       | 2,25                                    |                                               |                                         | 3,30                                   |                                              |                                        |
|       | 3,35                                    |                                               |                                         | 2,98                                   |                                              |                                        |
|       | 2,11                                    |                                               |                                         | 1,69                                   |                                              |                                        |
|       | 3,30                                    |                                               |                                         | 3,12                                   |                                              |                                        |
|       | 2,88                                    |                                               |                                         | 2,75                                   |                                              |                                        |
|       | 2,14                                    |                                               |                                         | 2,07                                   |                                              |                                        |
|       | 1,86                                    |                                               |                                         | 2,79                                   |                                              |                                        |
|       | 1,44                                    |                                               |                                         | 1,51                                   |                                              |                                        |
|       | 2,84                                    |                                               |                                         | 2,50                                   |                                              |                                        |
|       | 2,19                                    |                                               |                                         | 1,79                                   |                                              |                                        |
|       | 2,29                                    |                                               |                                         | 2,42                                   |                                              |                                        |
|       | 2,36                                    |                                               |                                         | 2,61                                   |                                              |                                        |
|       | 1,66                                    |                                               |                                         | 1,76                                   |                                              |                                        |
|       | 1,32                                    |                                               |                                         | 1,51                                   |                                              |                                        |
| Sa    | 1,91                                    | 2,28                                          | 0,73                                    | 3,03                                   | 3,21                                         | 0,21                                   |
|       | 2,41                                    |                                               |                                         | 2,97                                   |                                              |                                        |
|       | 3,04                                    |                                               |                                         | 3,30                                   |                                              |                                        |
|       | 2,81                                    |                                               |                                         | 3,48                                   |                                              |                                        |
|       | 1,24                                    |                                               |                                         | 3,25                                   |                                              |                                        |
| hi Zi | 0,40                                    | 0,56                                          | 0,21                                    | 1,81                                   | 1,67                                         | 0,23                                   |
|       | 0,49                                    |                                               |                                         | 1,33                                   |                                              |                                        |
|       | 0,47                                    |                                               |                                         | 1,54                                   |                                              |                                        |
|       | 0,92                                    |                                               |                                         | 1,81                                   |                                              |                                        |
|       | 0,54                                    |                                               |                                         | 1,85                                   |                                              |                                        |

**Tabelle A.7:** Oberflächenzugfestigkeit Charge I (Tabelle 2/2)

### A.3.2 Ergebnisse mit Verwendung des Klebstoffs SP55

| Stein | $f_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|
| KS 12 | 1,33                                    | 1,62                                          | 0,45                                    | 3,16                                   | 2,75                                         | 0,31                                   |
|       | 1,40                                    |                                               |                                         | 2,53                                   |                                              |                                        |
|       | 1,39                                    |                                               |                                         | 2,56                                   |                                              |                                        |
|       | 1,57                                    |                                               |                                         | 2,48                                   |                                              |                                        |
|       | 2,42                                    |                                               |                                         | 3,00                                   |                                              |                                        |
| KS 20 | 2,01                                    | 2,13                                          | 0,38                                    | 2,43                                   | 2,64                                         | 0,24                                   |
|       | 2,46                                    |                                               |                                         | 2,61                                   |                                              |                                        |
|       | 2,39                                    |                                               |                                         | 2,71                                   |                                              |                                        |
|       | 2,02                                    |                                               |                                         | 2,65                                   |                                              |                                        |
|       | 2,20                                    |                                               |                                         | 2,44                                   |                                              |                                        |
|       | 2,66                                    |                                               |                                         | 2,75                                   |                                              |                                        |
|       | 1,63                                    |                                               |                                         | 2,83                                   |                                              |                                        |
|       | 2,01                                    |                                               |                                         | 2,57                                   |                                              |                                        |
|       | 2,21                                    |                                               |                                         | 2,10                                   |                                              |                                        |
|       | 2,72                                    |                                               |                                         | 3,04                                   |                                              |                                        |
|       | 2,21                                    |                                               |                                         | 2,92                                   |                                              |                                        |
|       | 2,42                                    |                                               |                                         | 2,77                                   |                                              |                                        |
|       | 1,56                                    |                                               |                                         | 2,43                                   |                                              |                                        |
|       | 2,07                                    |                                               |                                         | 2,53                                   |                                              |                                        |
|       | 1,39                                    |                                               |                                         | 2,87                                   |                                              |                                        |
| KS 28 | 1,63                                    | 1,80                                          | 0,40                                    | 3,01                                   | 2,84                                         | 0,28                                   |
|       | 1,20                                    |                                               |                                         | 3,23                                   |                                              |                                        |
|       | 2,22                                    |                                               |                                         | 2,72                                   |                                              |                                        |
|       | 2,07                                    |                                               |                                         | 2,51                                   |                                              |                                        |
|       | 1,87                                    |                                               |                                         | 2,75                                   |                                              |                                        |

**Tabelle A.8:** Oberflächenzugfestigkeit Charge I (Tabelle 1/2)

| Stein | $f_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|
| Mz 12 | 1,51                                    | 1,68                                          | 0,27                                    | -                                      | -                                            | -                                      |
|       | 1,33                                    |                                               |                                         | -                                      |                                              |                                        |
|       | 1,43                                    |                                               |                                         | -                                      |                                              |                                        |
|       | 1,49                                    |                                               |                                         | -                                      |                                              |                                        |
|       | 1,84                                    |                                               |                                         | -                                      |                                              |                                        |
|       | 1,46                                    |                                               |                                         | -                                      |                                              |                                        |
|       | 1,90                                    |                                               |                                         | -                                      |                                              |                                        |
|       | 1,80                                    |                                               |                                         | -                                      |                                              |                                        |
|       | 1,59                                    |                                               |                                         | -                                      |                                              |                                        |
|       | 2,13                                    |                                               |                                         | -                                      |                                              |                                        |
|       | 1,58                                    |                                               |                                         | -                                      |                                              |                                        |
|       | 1,56                                    |                                               |                                         | -                                      |                                              |                                        |
|       | 1,85                                    |                                               |                                         | -                                      |                                              |                                        |
|       | 2,20                                    |                                               |                                         | -                                      |                                              |                                        |
|       | 1,43                                    |                                               |                                         | -                                      |                                              |                                        |
| Mz 20 | 2,48                                    | 2,03                                          | 0,58                                    | 2,61                                   | 2,30                                         | 0,34                                   |
|       | 2,68                                    |                                               |                                         | 2,62                                   |                                              |                                        |
|       | 1,28                                    |                                               |                                         | 2,49                                   |                                              |                                        |
|       | 2,78                                    |                                               |                                         | 2,23                                   |                                              |                                        |
|       | 1,41                                    |                                               |                                         | 2,20                                   |                                              |                                        |
|       | 1,53                                    |                                               |                                         | 2,41                                   |                                              |                                        |
|       | 2,18                                    |                                               |                                         | 2,05                                   |                                              |                                        |
|       | 1,98                                    |                                               |                                         | 3,01                                   |                                              |                                        |
|       | 2,36                                    |                                               |                                         | 1,70                                   |                                              |                                        |
|       | 1,46                                    |                                               |                                         | 1,81                                   |                                              |                                        |
|       | 1,17                                    |                                               |                                         | 2,43                                   |                                              |                                        |
|       | 1,86                                    |                                               |                                         | 2,41                                   |                                              |                                        |
|       | 2,71                                    |                                               |                                         | 2,50                                   |                                              |                                        |
|       | 2,76                                    |                                               |                                         | 2,07                                   |                                              |                                        |
|       | 1,86                                    |                                               |                                         | 2,00                                   |                                              |                                        |
| Sa    | 2,44                                    | 2,49                                          | 0,44                                    | 3,58                                   | 3,69                                         | 0,08                                   |
|       | 1,83                                    |                                               |                                         | 3,73                                   |                                              |                                        |
|       | 2,66                                    |                                               |                                         | 3,66                                   |                                              |                                        |
|       | 3,06                                    |                                               |                                         | 3,69                                   |                                              |                                        |
|       | 2,48                                    |                                               |                                         | 3,78                                   |                                              |                                        |
| hi Zi | 0,72                                    | 0,97                                          | 0,41                                    | 2,13                                   | 2,11                                         | 0,20                                   |
|       | 1,59                                    |                                               |                                         | 1,91                                   |                                              |                                        |
|       | 1,01                                    |                                               |                                         | 2,45                                   |                                              |                                        |
|       | 0,50                                    |                                               |                                         | 2,02                                   |                                              |                                        |
|       | 1,02                                    |                                               |                                         | 2,06                                   |                                              |                                        |

Tabelle A.9: Oberflächenzugfestigkeit Charge I (Tabelle 2/2)

### A.3 Oberflächenzugfestigkeiten - Serie A bis C

| Stein | $f_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|
| KS 20 | 2,42                                    | 2,76                                          | 0,22                                    | 2,93                                   | 2,98                                         | 0,22                                   |
|       | 2,92                                    |                                               |                                         | 2,79                                   |                                              |                                        |
|       | 2,80                                    |                                               |                                         | 3,26                                   |                                              |                                        |
|       | 2,69                                    |                                               |                                         | 2,77                                   |                                              |                                        |
|       | 2,99                                    |                                               |                                         | 3,15                                   |                                              |                                        |
| Mz 20 | 2,15                                    | 2,35                                          | 0,46                                    | 2,90                                   | 2,66                                         | 0,37                                   |
|       | 2,74                                    |                                               |                                         | 2,00                                   |                                              |                                        |
|       | 2,05                                    |                                               |                                         | 2,84                                   |                                              |                                        |
|       | 2,92                                    |                                               |                                         | 2,82                                   |                                              |                                        |
|       | 1,87                                    |                                               |                                         | 2,76                                   |                                              |                                        |

**Tabelle A.10:** Oberflächenzugfestigkeit Charge II

| Stein | $f_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,tz,DIN}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{St,tz,DP}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|-------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|
| KS 20 | 2,96                                    | 2,82                                          | 0,12                                    | 2,86                                   | 2,96                                         | 0,19                                   |
|       | 2,91                                    |                                               |                                         | 3,21                                   |                                              |                                        |
|       | 2,65                                    |                                               |                                         | 3,11                                   |                                              |                                        |
|       | 2,79                                    |                                               |                                         | 2,79                                   |                                              |                                        |
|       | 2,80                                    |                                               |                                         | 2,81                                   |                                              |                                        |
| Mz 20 | 2,41                                    | 2,12                                          | 0,22                                    | 2,97                                   | 2,60                                         | 0,35                                   |
|       | 2,02                                    |                                               |                                         | 2,95                                   |                                              |                                        |
|       | 2,01                                    |                                               |                                         | 2,32                                   |                                              |                                        |
|       | 1,87                                    |                                               |                                         | 2,53                                   |                                              |                                        |
|       | 2,27                                    |                                               |                                         | 2,21                                   |                                              |                                        |

**Tabelle A.11:** Oberflächenzugfestigkeit Charge III

## A.4 Mörtelfestigkeiten

| Proben zu Versuch | Alter<br>[Tagen] | Biegezugfestigkeit                  |                                           |                                     | Druckfestigkeit                  |                                        |                                  |
|-------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|
|                   |                  | $f_{mo,bz}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{mo,bz}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{mo,bz}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{mo}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{mo}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{mo}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
| C1                | 34               | -                                   | 2,30                                      | 0,18                                | 11,82                            | 12,04                                  | 0,19                             |
|                   |                  | 2,18                                |                                           |                                     | 12,12                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,43                                |                                           |                                     | 12,18                            |                                        |                                  |
| C2                | 34               | 2,07                                | 1,93                                      | 0,12                                | 11,83                            | 11,59                                  | 0,25                             |
|                   |                  | 1,88                                |                                           |                                     | 11,34                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 1,85                                |                                           |                                     | 11,59                            |                                        |                                  |
| C3                | 33               | 2,88                                | 3,07                                      | 0,17                                | 13,40                            | 12,97                                  | 0,41                             |
|                   |                  | 3,20                                |                                           |                                     | 12,92                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 3,13                                |                                           |                                     | 12,59                            |                                        |                                  |
| C4                | 34               | 2,51                                | 2,23                                      | 0,26                                | 13,75                            | 13,14                                  | 0,53                             |
|                   |                  | 2,00                                |                                           |                                     | 12,85                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,18                                |                                           |                                     | 12,82                            |                                        |                                  |
| C5                | 33               | 2,63                                | 2,41                                      | 0,19                                | 13,30                            | 12,88                                  | 0,38                             |
|                   |                  | 2,26                                |                                           |                                     | 12,55                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,34                                |                                           |                                     | 12,81                            |                                        |                                  |
| C6                | 33               | 1,64                                | 1,87                                      | 0,20                                | 12,19                            | 11,73                                  | 0,49                             |
|                   |                  | 2,01                                |                                           |                                     | 11,78                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 1,97                                |                                           |                                     | 11,21                            |                                        |                                  |
| C7                | 52               | 2,63                                | 2,67                                      | 0,05                                | 11,93                            | 12,03                                  | 0,74                             |
|                   |                  | 2,65                                |                                           |                                     | 11,35                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,73                                |                                           |                                     | 12,82                            |                                        |                                  |
| C8                | 52               | 2,47                                | 2,47                                      | 0,03                                | 11,73                            | 11,52                                  | 0,27                             |
|                   |                  | 2,50                                |                                           |                                     | 11,61                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,45                                |                                           |                                     | 11,21                            |                                        |                                  |
| C9                | 51               | 2,62                                | 2,61                                      | 0,17                                | 12,55                            | 12,15                                  | 0,35                             |
|                   |                  | 2,77                                |                                           |                                     | 11,93                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,44                                |                                           |                                     | 11,96                            |                                        |                                  |

**Tabelle A.12:** Mörtelfestigkeiten am Prisma zu Versuchsserie C (Tabelle 1/3)

| Proben zu Versuch | Alter<br>[Tagen] | Biegezugfestigkeit                  |                                           |                                     | Druckfestigkeit                  |                                        |                                  |
|-------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|
|                   |                  | $f_{mo,bz}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{mo,bz}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{mo,bz}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{mo}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{mo}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{mo}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
| C10               | 48               | 2,45                                | 2,54                                      | 0,10                                | 11,67                            | 11,68                                  | 0,32                             |
|                   |                  | 2,51                                |                                           |                                     | 12,00                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,64                                |                                           |                                     | 11,37                            |                                        |                                  |
| C11               | 48               | 2,80                                | 2,72                                      | 0,24                                | 11,55                            | 11,72                                  | 0,64                             |
|                   |                  | 2,45                                |                                           |                                     | 12,43                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,92                                |                                           |                                     | 11,19                            |                                        |                                  |
| C12               | 48               | 2,62                                | 2,76                                      | 0,19                                | 12,40                            | 12,36                                  | 0,12                             |
|                   |                  | 2,69                                |                                           |                                     | 12,22                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,97                                |                                           |                                     | 12,45                            |                                        |                                  |
| C13               | 62               | 2,63                                | 2,55                                      | 0,11                                | 13,77                            | 14,39                                  | 0,65                             |
|                   |                  | 2,59                                |                                           |                                     | 14,35                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,43                                |                                           |                                     | 15,06                            |                                        |                                  |
| C14               | 59               | 2,32                                | 2,37                                      | 0,06                                | 11,79                            | 12,09                                  | 0,26                             |
|                   |                  | 2,44                                |                                           |                                     | 12,23                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,36                                |                                           |                                     | 12,24                            |                                        |                                  |
| C15               | 59               | 2,73                                | 2,76                                      | 0,10                                | 13,68                            | 13,33                                  | 0,36                             |
|                   |                  | 2,87                                |                                           |                                     | 12,97                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,68                                |                                           |                                     | 13,35                            |                                        |                                  |
| C16               | 77               | 2,53                                | 2,45                                      | 0,08                                | 12,03                            | 11,35                                  | 0,68                             |
|                   |                  | 2,40                                |                                           |                                     | 11,35                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,40                                |                                           |                                     | 10,68                            |                                        |                                  |
| C17               | 77               | 2,17                                | 2,25                                      | 0,09                                | 11,22                            | 11,08                                  | 0,14                             |
|                   |                  | 2,34                                |                                           |                                     | 11,09                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,24                                |                                           |                                     | 10,95                            |                                        |                                  |
| C18               | 77               | 2,17                                | 2,25                                      | 0,09                                | 12,03                            | 11,74                                  | 0,39                             |
|                   |                  | 2,34                                |                                           |                                     | 11,89                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,24                                |                                           |                                     | 11,30                            |                                        |                                  |
| C19               | 61               | 2,94                                | 2,67                                      | 0,24                                | 12,89                            | 12,63                                  | 0,47                             |
|                   |                  | 2,51                                |                                           |                                     | 12,08                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,56                                |                                           |                                     | 12,91                            |                                        |                                  |
| C20               | 61               | 2,54                                | 2,49                                      | 0,05                                | 12,15                            | 12,33                                  | 0,45                             |
|                   |                  | 2,45                                |                                           |                                     | 12,84                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,47                                |                                           |                                     | 12,00                            |                                        |                                  |
| C21               | 61               | 2,54                                | 2,49                                      | 0,05                                | 12,13                            | 12,20                                  | 0,31                             |
|                   |                  | 2,45                                |                                           |                                     | 12,54                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,47                                |                                           |                                     | 11,94                            |                                        |                                  |

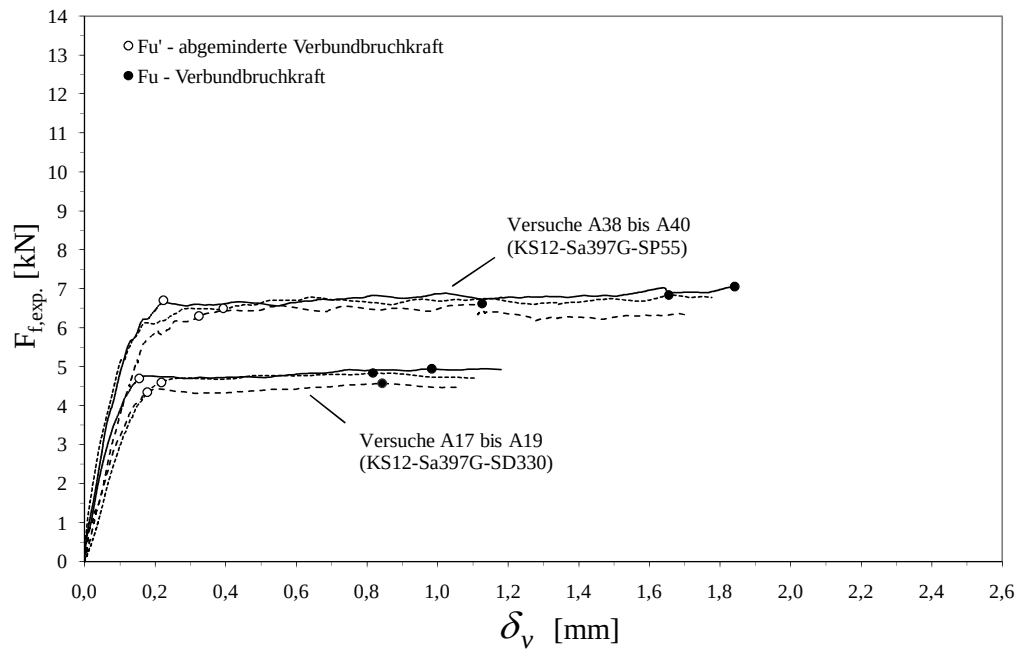
**Tabelle A.13:** Mörtelfestigkeiten am Prisma zu Versuchsserie C (Tabelle 2/3)

| Proben zu Versuch | Alter<br>[Tagen] | Biegezugfestigkeit                  |                                           |                                     | Druckfestigkeit                  |                                        |                                  |
|-------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|
|                   |                  | $f_{mo,bz}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{mo,bz}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{mo,bz}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $f_{mo}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $\bar{f}_{mo}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | $s_{mo}$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
| C22               | 68               | -                                   | 2,43                                      | 0,01                                | 11,76                            | 12,06                                  | 0,27                             |
|                   |                  | 2,42                                |                                           |                                     | 12,12                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,44                                |                                           |                                     | 12,29                            |                                        |                                  |
| C23               | 68               | 2,64                                | 2,49                                      | 0,13                                | 12,99                            | 13,06                                  | 0,09                             |
|                   |                  | 2,41                                |                                           |                                     | 13,03                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,41                                |                                           |                                     | 13,17                            |                                        |                                  |
| C24               | 68               | 2,64                                | 2,49                                      | 0,13                                | 13,09                            | 13,01                                  | 0,07                             |
|                   |                  | 2,41                                |                                           |                                     | 12,97                            |                                        |                                  |
|                   |                  | 2,41                                |                                           |                                     | 12,97                            |                                        |                                  |

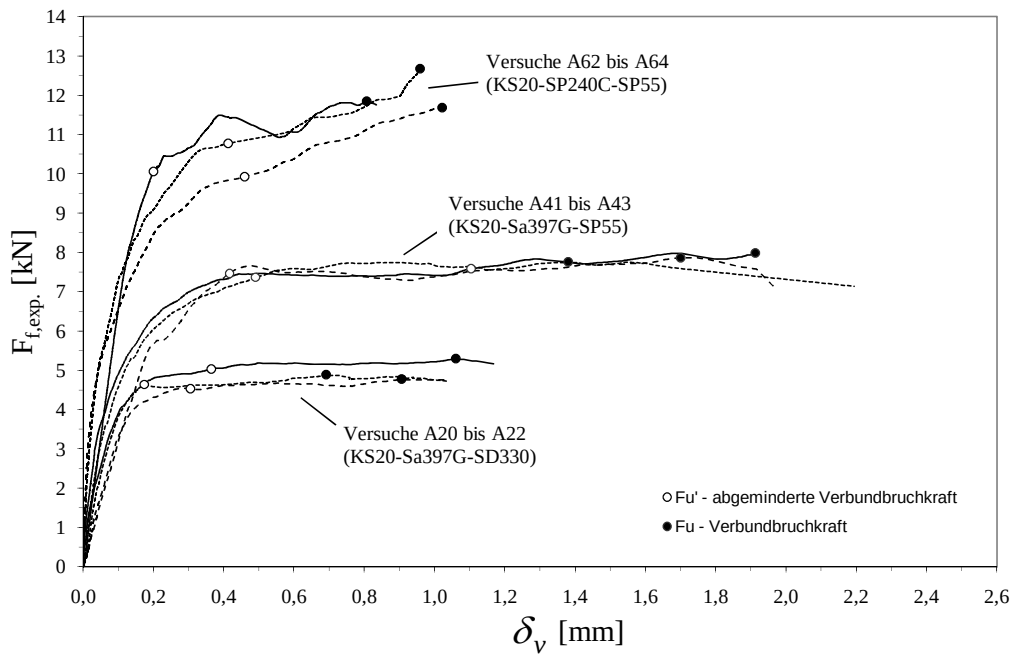
**Tabelle A.14:** Mörtelfestigkeiten am Prisma zu Versuchsserie C (Tabelle 3/3)

## A.5 Ergebnisse - Serie A

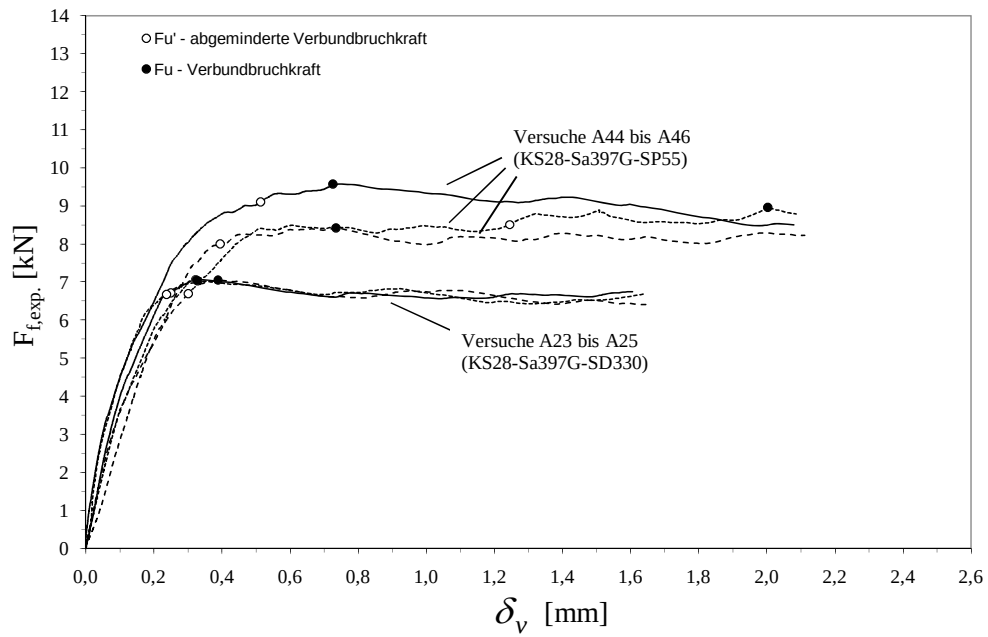
Im vorliegenden Abschnitt sind die Verbundkraft-Relativverformungskurven dokumentiert. Hierbei stellt  $F_{f,exp.}$  die Zugkraft im Faserverbundwerkstoff dar und ergibt sich zu  $F_{u,exp.}/2$ . Dies entspricht zugleich der Verbundkraft in der Verbundfuge.  $\delta_v$  wurde am Verbundende, bei  $x = l_v$  gemessen (vgl. Abb. 3.10 und Abs. 5.2). Die Kraft  $F_u$  stellt die maximale Verbundkraft, welche zugleich als Verbundbruchkraft bezeichnet wird, dar. Die Verbundkraft  $F'_u$  wurde mit Gleichung 7.3 berechnet und gibt den Punkt des Entkoppelungsbeginns an. Aus Vergleichsgründen wurden in den Diagrammen die Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlicher Klebstoffanwendung (SD330, SP55) abgebildet. Die Kraft-Verformungskurven sind bis zum Erreichen des Sprödbruchs dokumentiert.



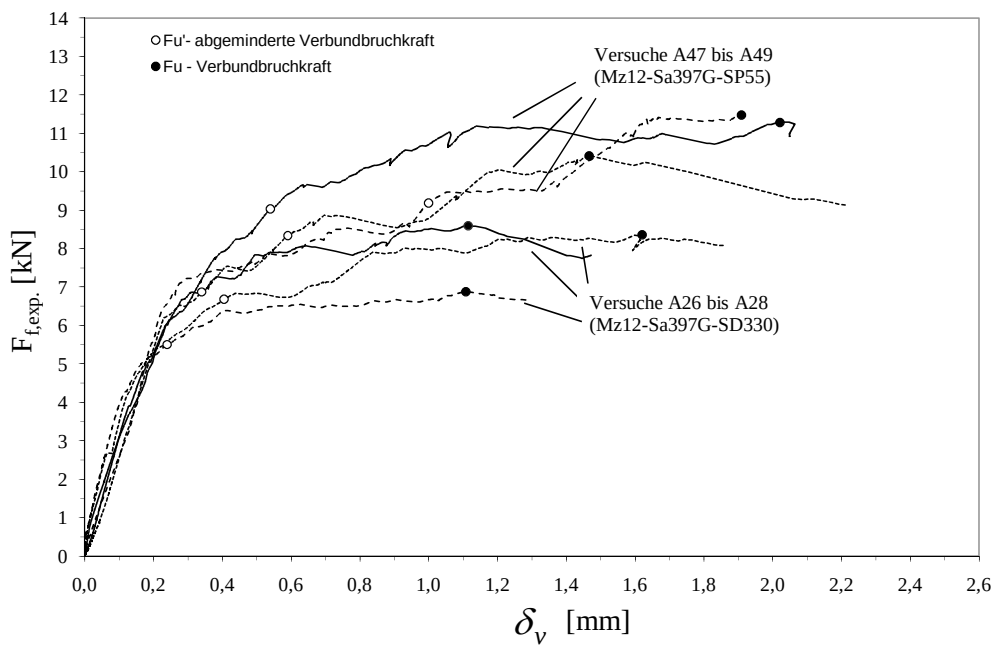
**Abbildung A.1:** Kraft-Verformungskurve A17 bis A19 und A38 bis A40



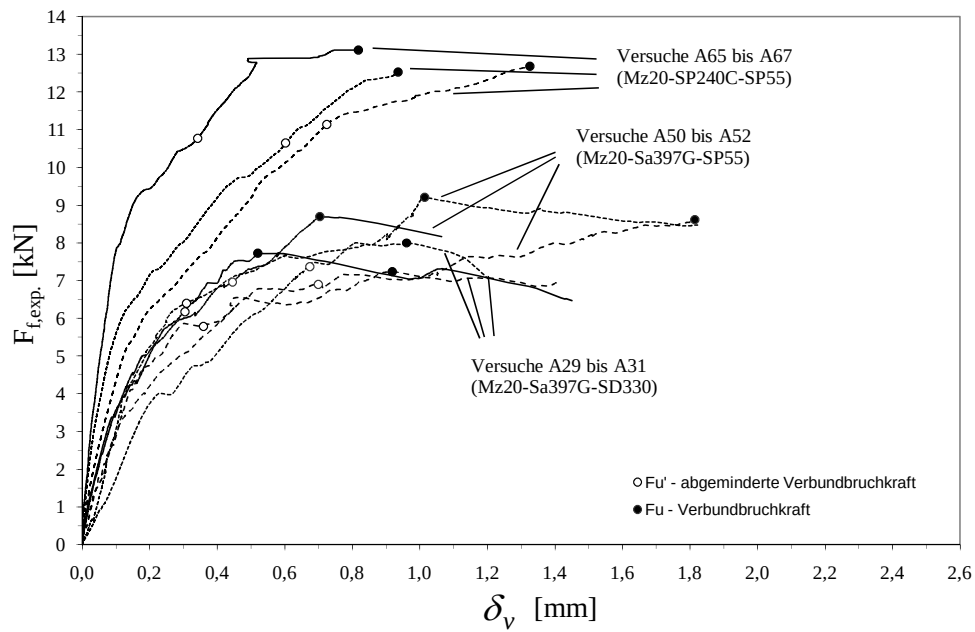
**Abbildung A.2:** Kraft-Verformungskurve A20 bis A22, A41 bis A43 und A62 bis A64



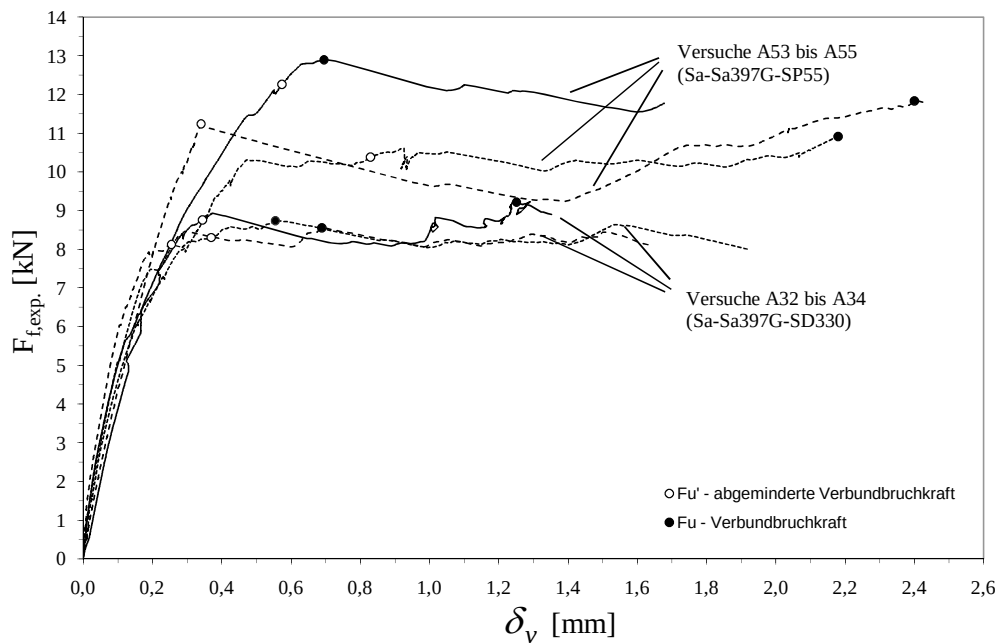
**Abbildung A.3:** Kraft-Verformungskurve A23 bis A25 und A44 bis A46



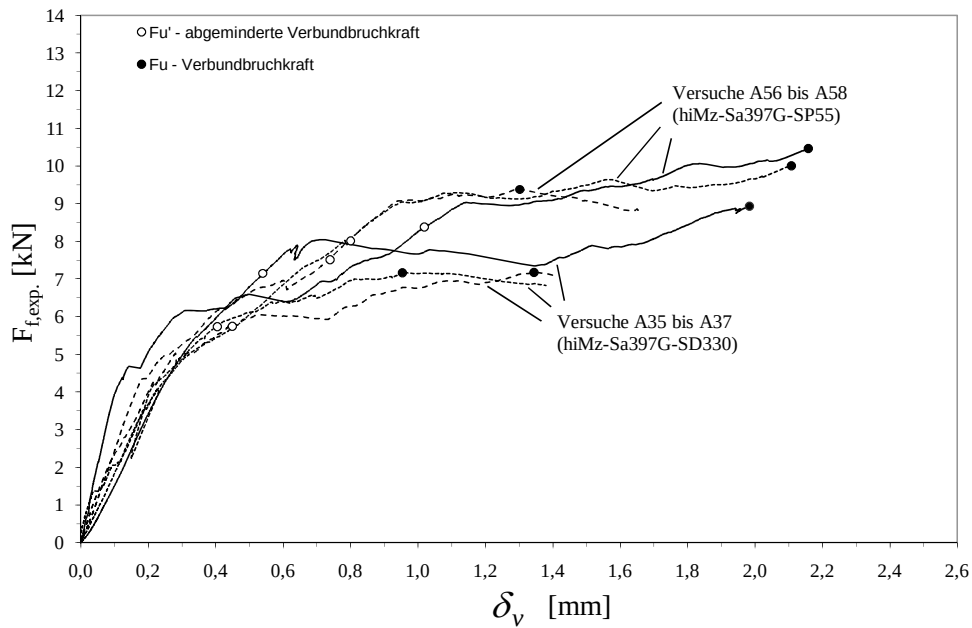
**Abbildung A.4:** Kraft-Verformungskurve A26 bis A28 und A47 bis A49



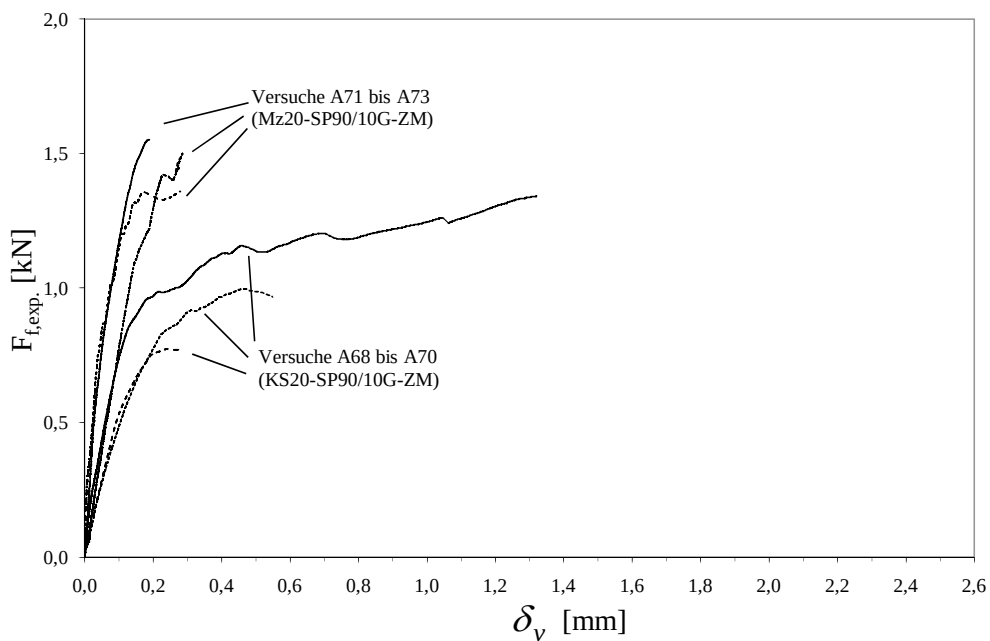
**Abbildung A.5:** Kraft-Verformungskurve A29 bis A31, A50 bis A52 und A65 bis A67



**Abbildung A.6:** Kraft-Verformungskurve A32 bis A34 und A53 bis A55



**Abbildung A.7:** Kraft-Verformungskurve A35 bis A37 und A56 bis A58



**Abbildung A.8:** Kraft-Verformungskurve A68 bis A70 und A71 bis A73

## A.6 Ergebnisse - Serie B

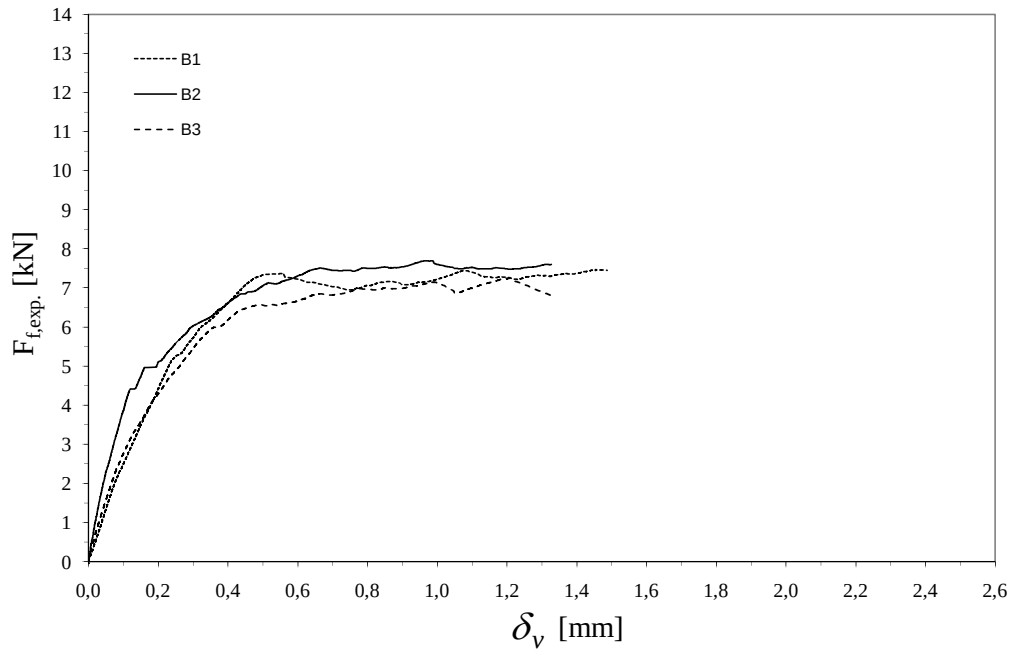


Abbildung A.9: Kraft-Verformungskurve B1 und B3

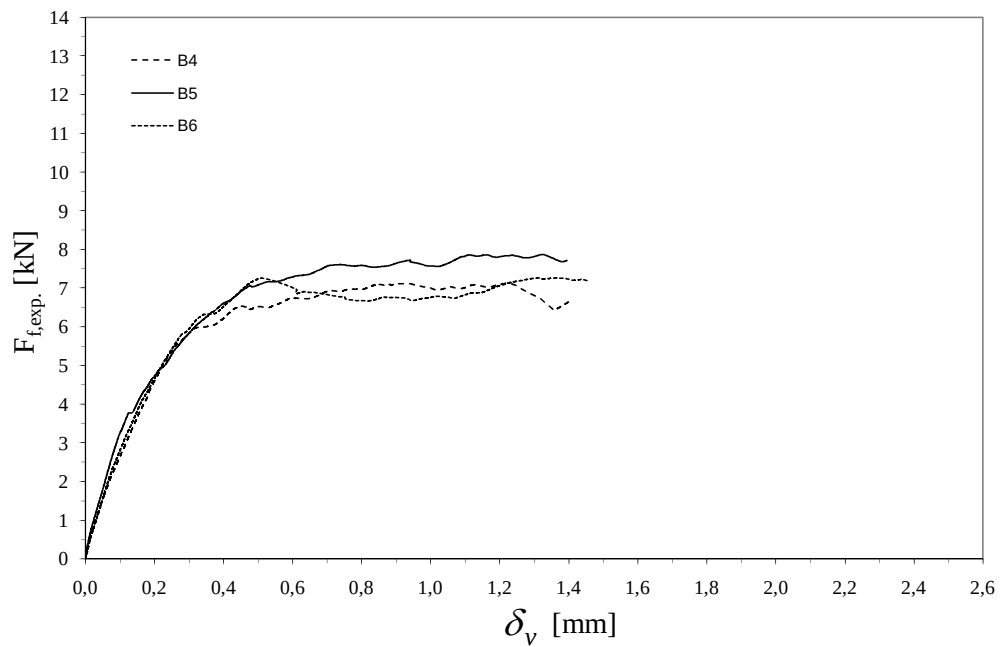
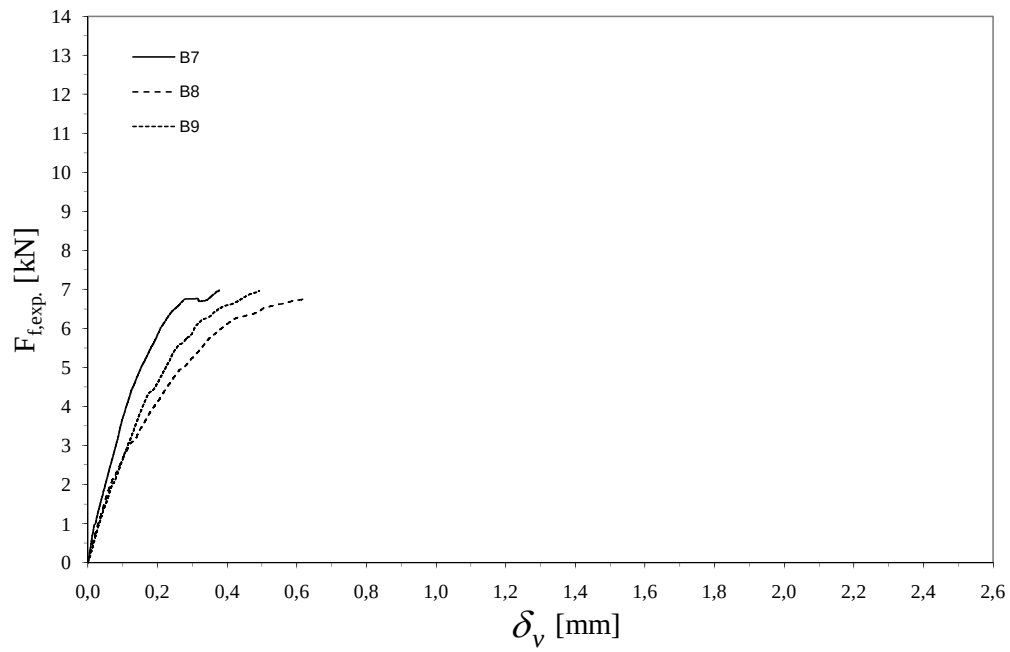
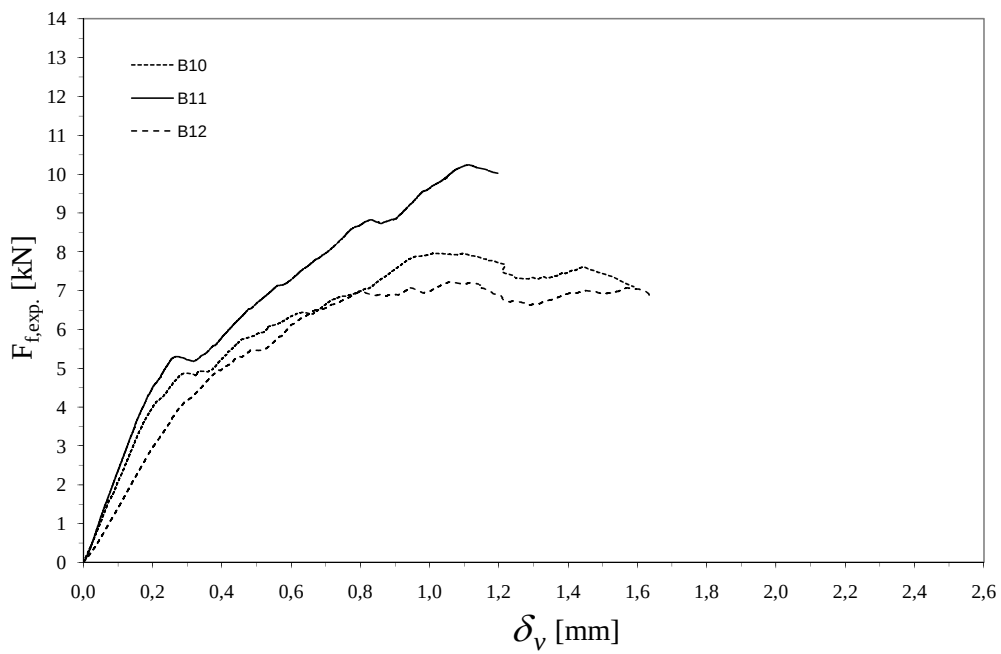


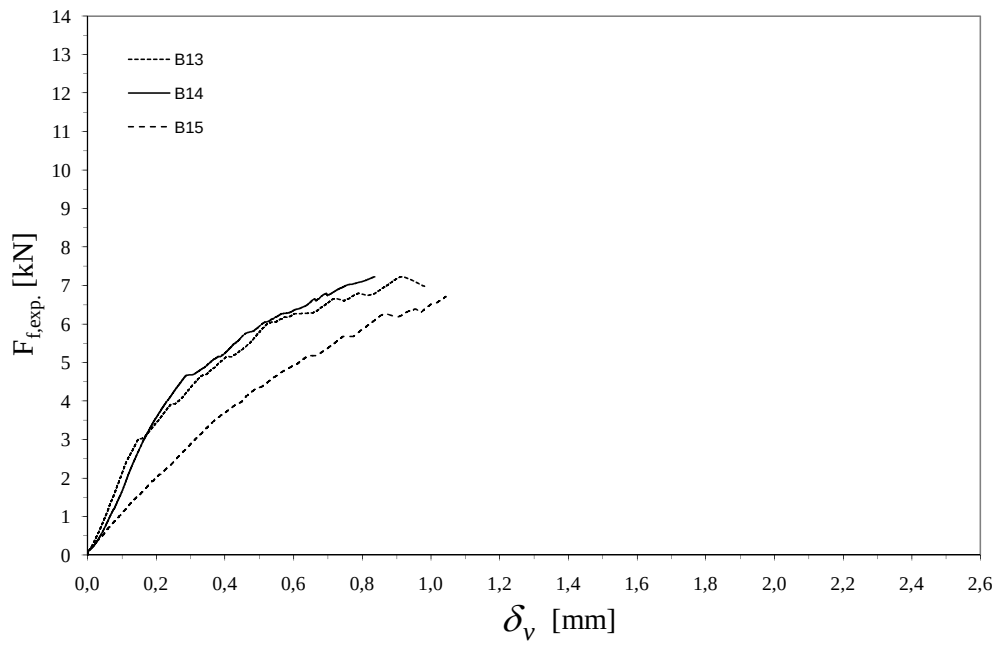
Abbildung A.10: Kraft-Verformungskurve B4 bis B6



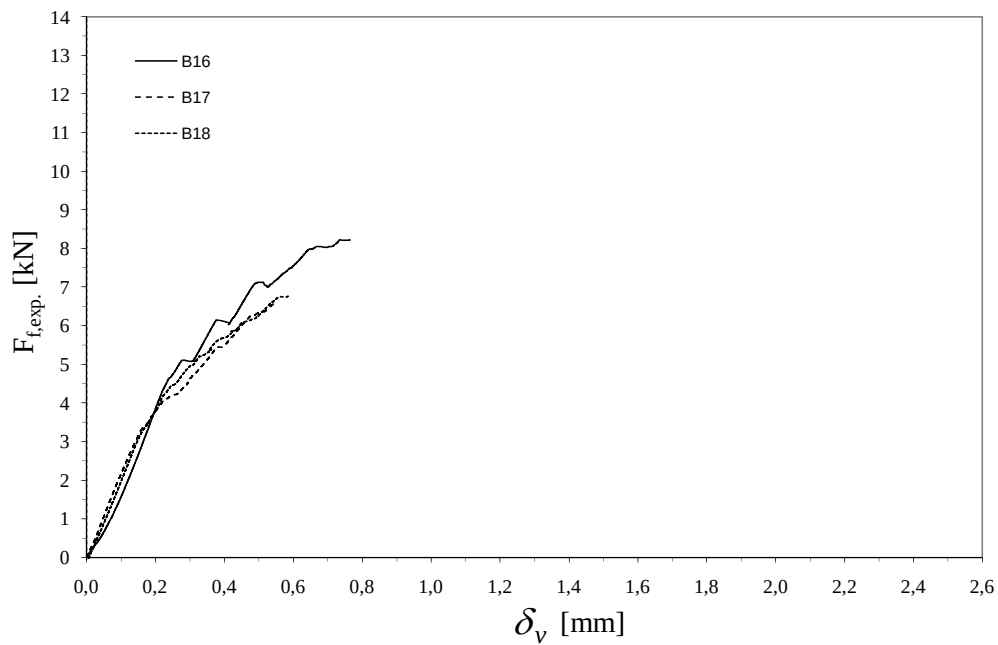
**Abbildung A.11:** Kraft-Verformungskurve B7 bis B9



**Abbildung A.12:** Kraft-Verformungskurve B10 bis B12

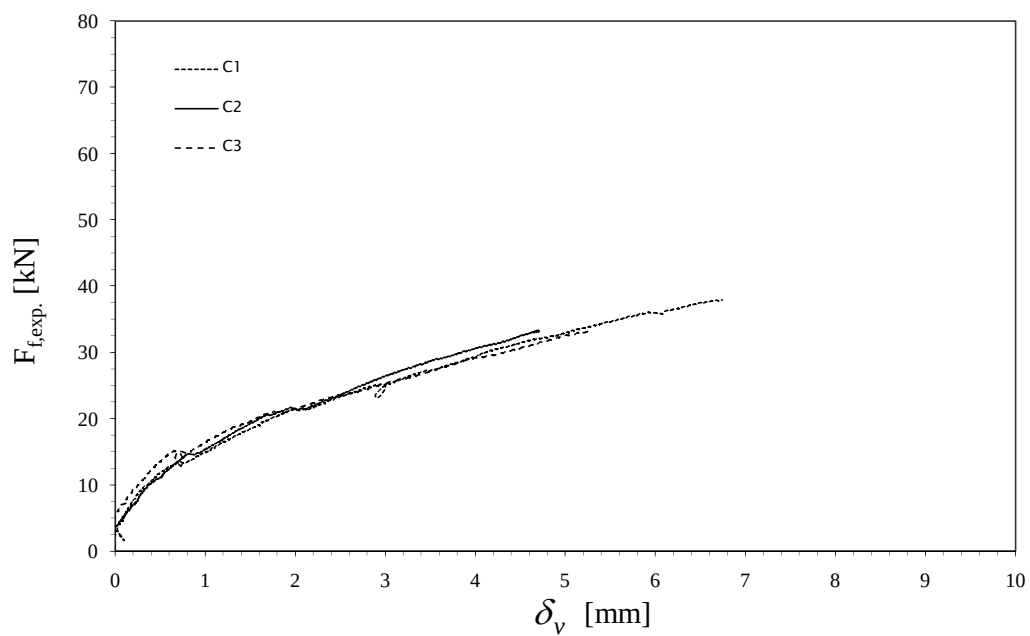


**Abbildung A.13:** Kraft-Verformungskurve B13 bis B15

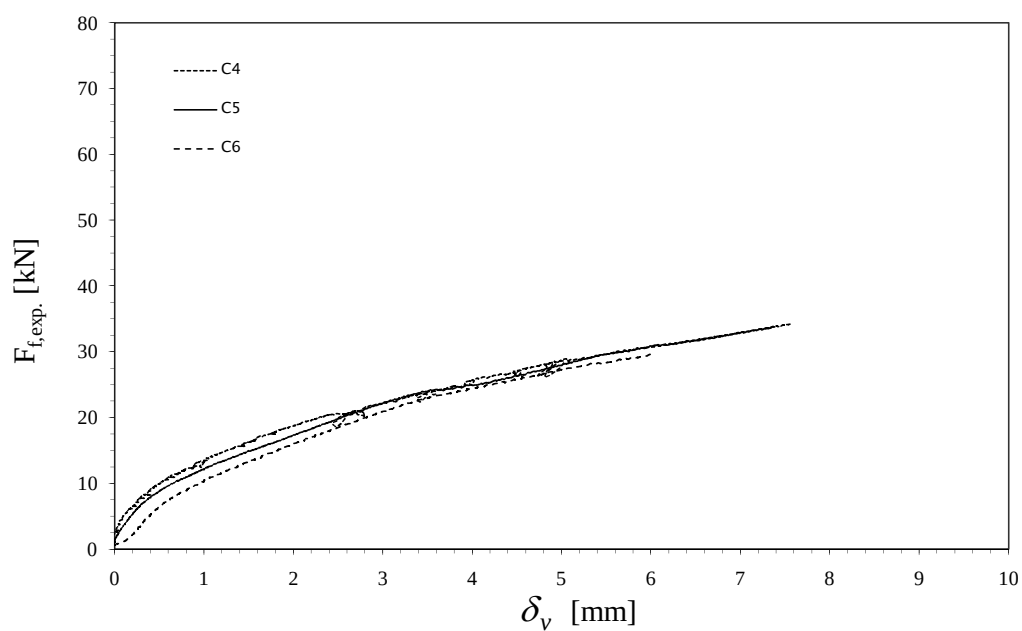


**Abbildung A.14:** Kraft-Verformungskurve B16 bis B18

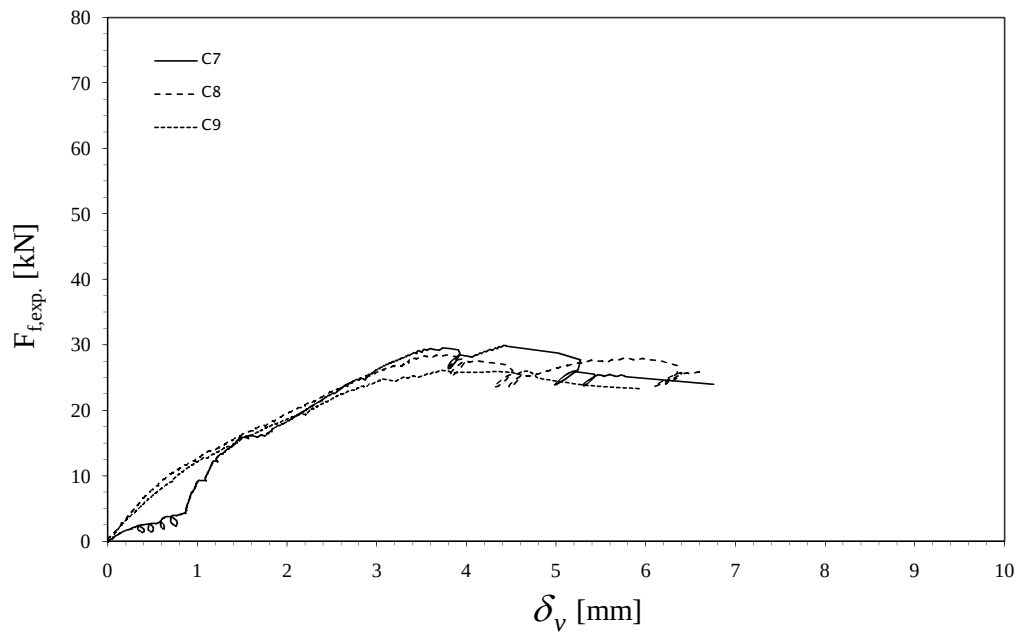
## A.7 Ergebnisse - Serie C



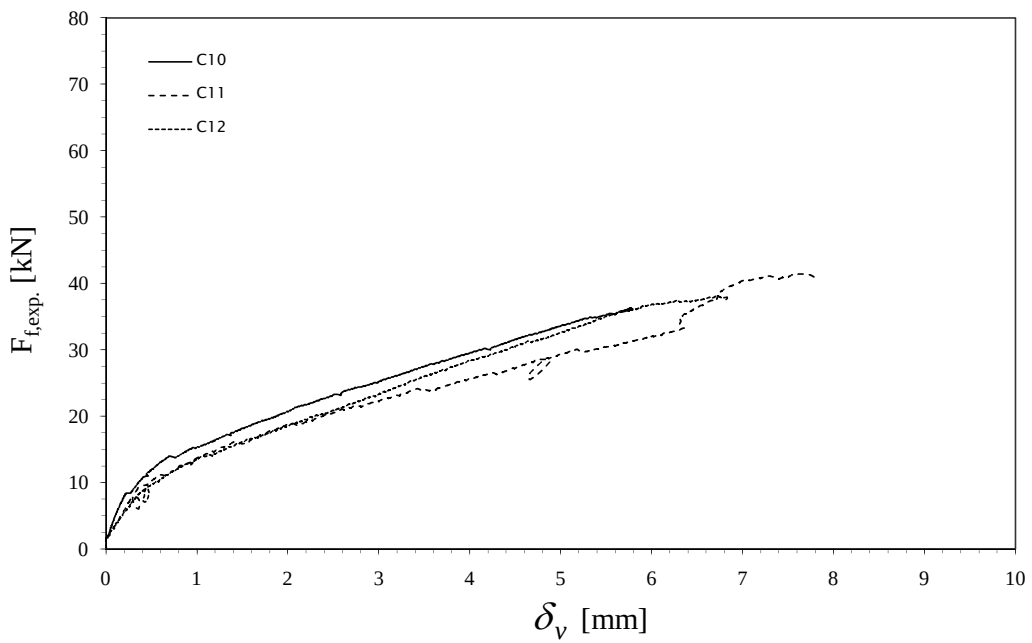
**Abbildung A.15:** Kraft-Verformungskurve C1 bis C3



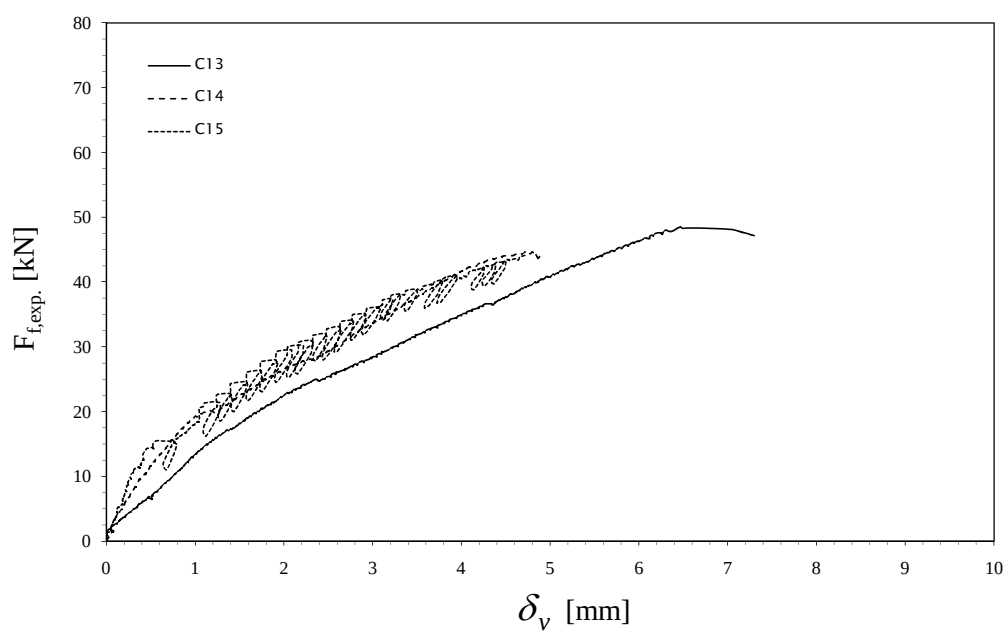
**Abbildung A.16:** Kraft-Verformungskurve C4 bis C6



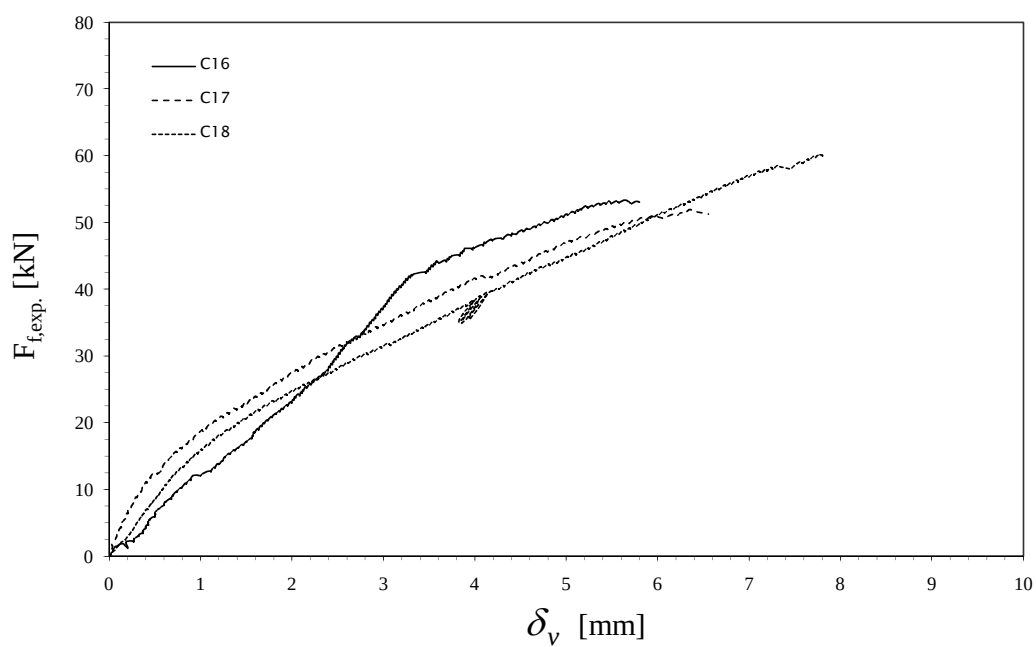
**Abbildung A.17:** Kraft-Verformungskurve C7 bis C9



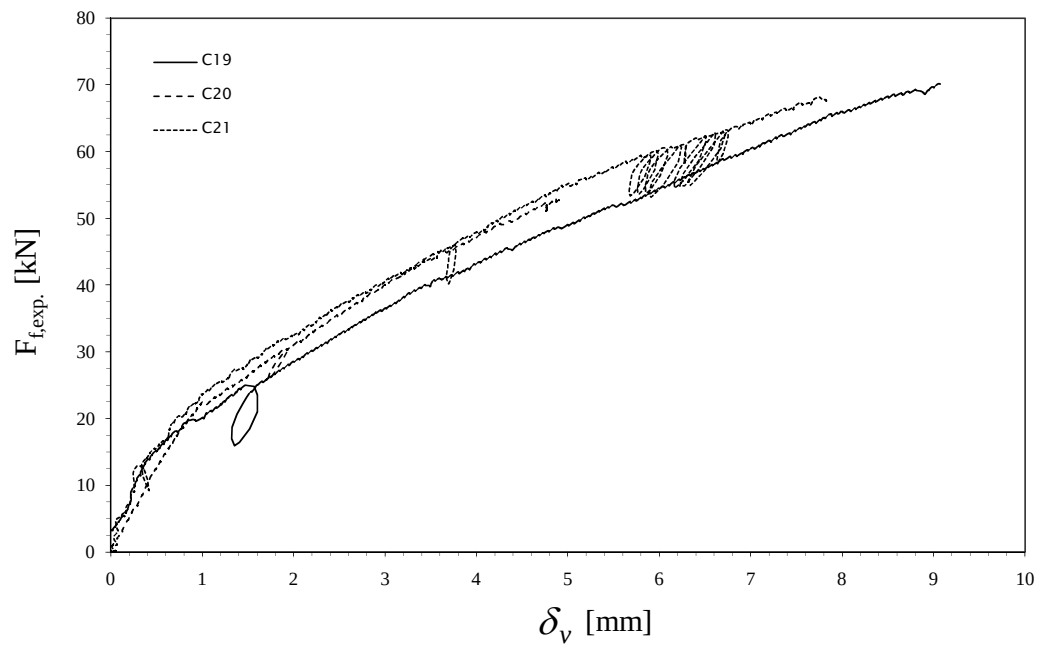
**Abbildung A.18:** Kraft-Verformungskurve C10 bis C12



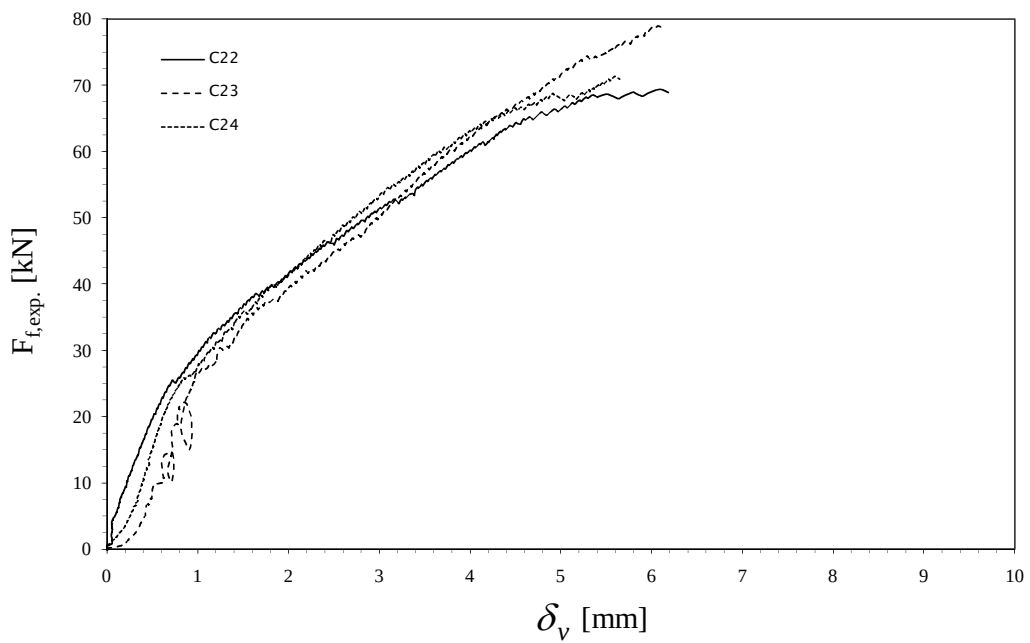
**Abbildung A.19:** Kraft-Verformungskurve C13 bis C15



**Abbildung A.20:** Kraft-Verformungskurve C16 bis C18

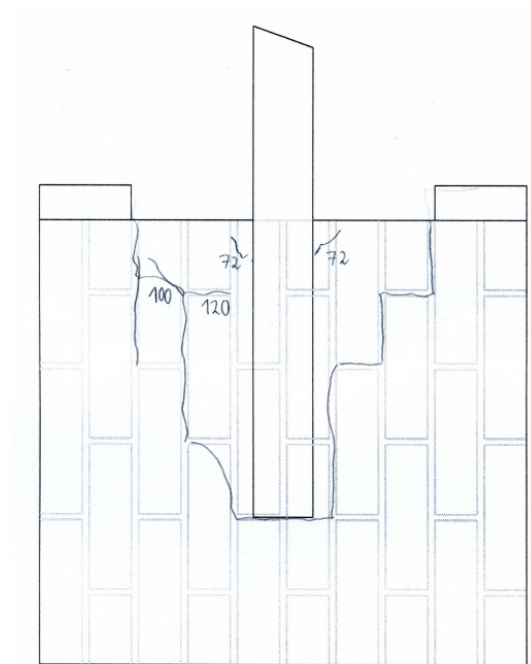


**Abbildung A.21:** Kraft-Verformungskurve C19 bis C21

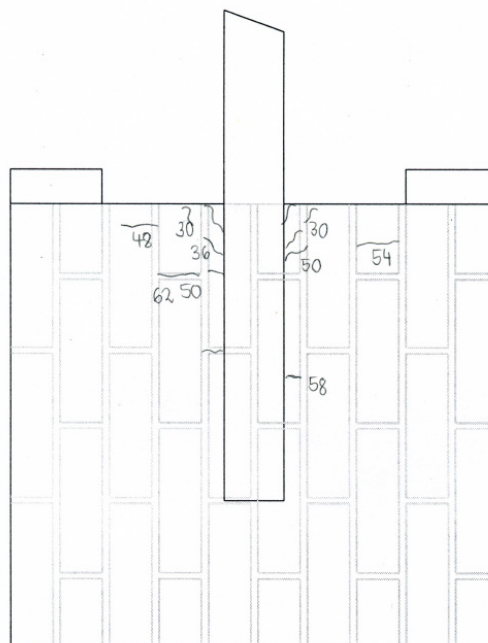


**Abbildung A.22:** Kraft-Verformungskurve C22 bis C24

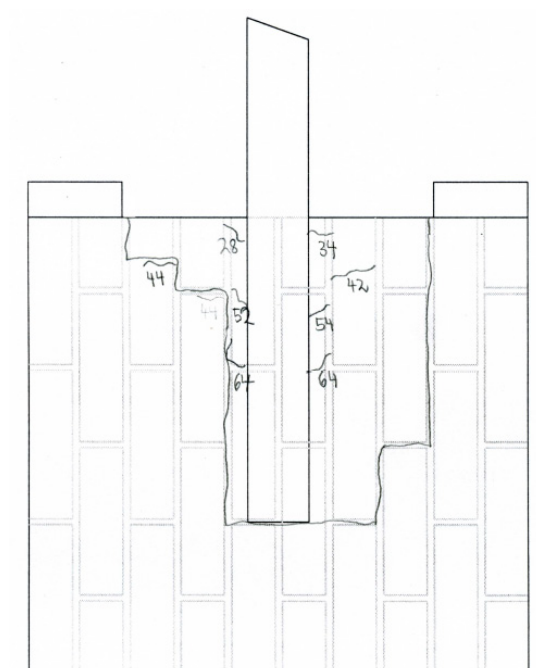
## A.8 Rissbilder Serie C



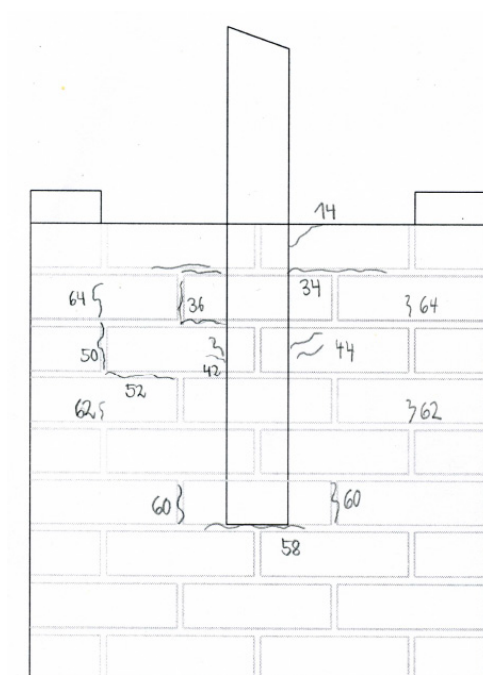
**Abbildung A.23:** Rissbildung Wandknoten C1 mit Kräften in [kN]



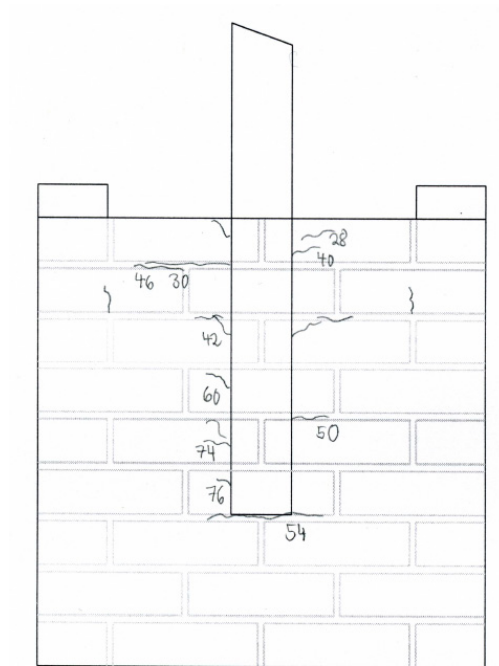
**Abbildung A.24:** Rissbildung Wandknoten C2 mit Kräften in [kN]



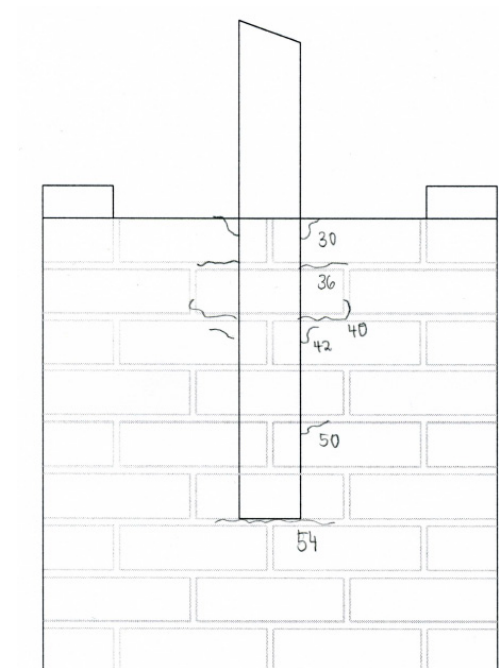
**Abbildung A.25:** Rissbildung Wandknoten C3 mit Kräften in [kN]



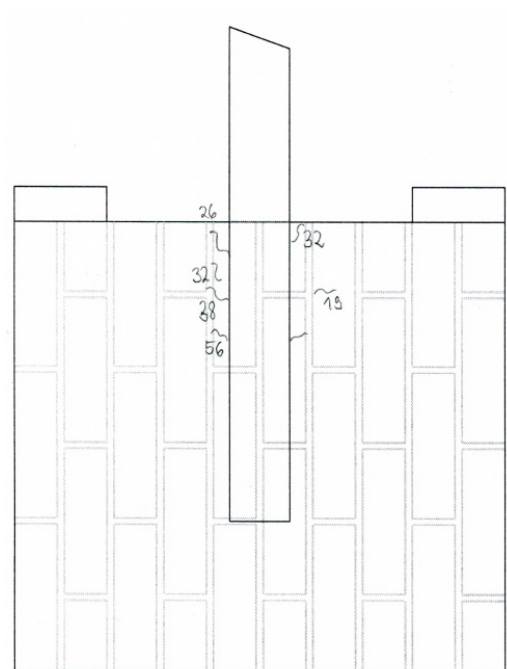
**Abbildung A.26:** Rissbildung Wandknoten C4 mit Kräften in [kN]



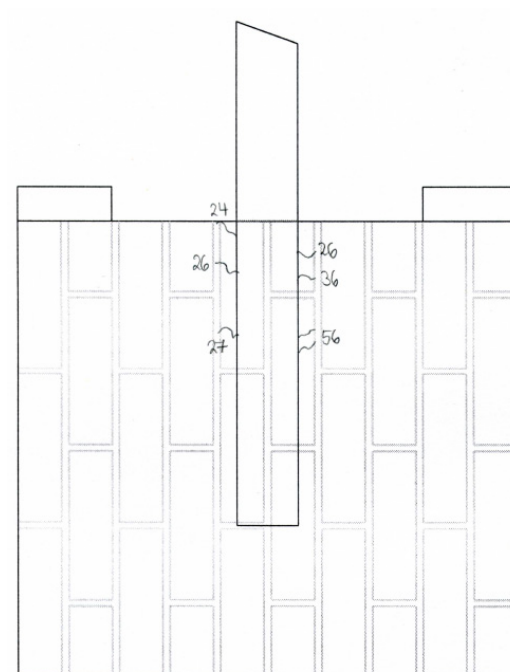
**Abbildung A.27:** Rissbildung Wandknoten C5 mit Kräften in [kN]



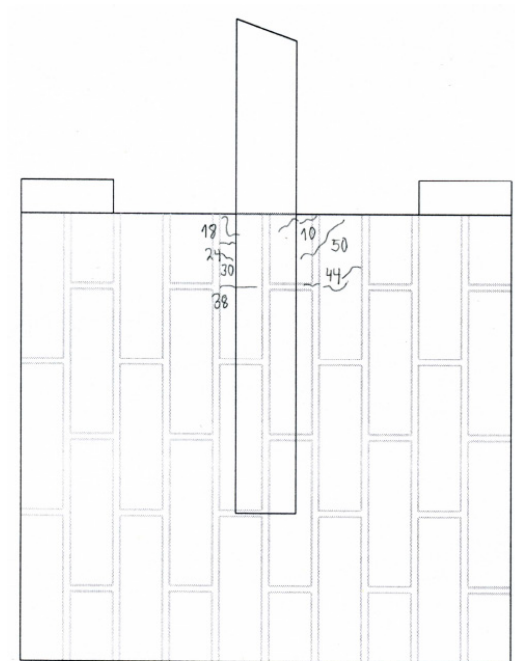
**Abbildung A.28:** Rissbildung Wandknoten C6 mit Kräften in [kN]



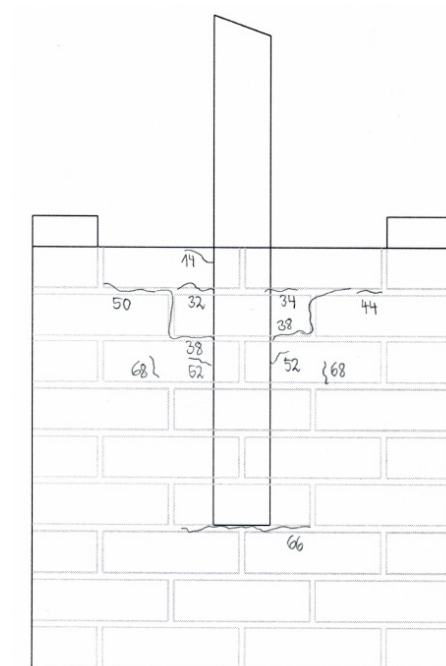
**Abbildung A.29:** Rissbildung Wandknoten C7 mit Kräften in [kN]



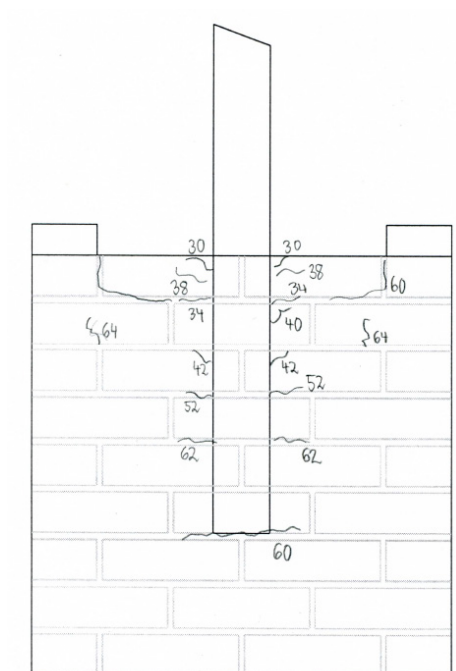
**Abbildung A.30:** Rissbildung Wandknoten C8 mit Kräften in [kN]



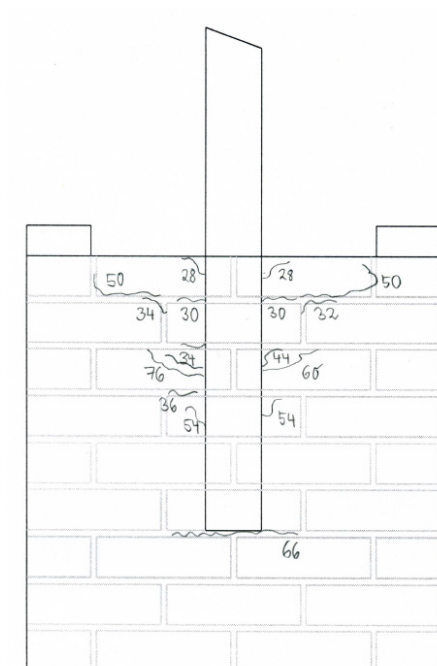
**Abbildung A.31:** Rissbildung Wandknoten C9 mit Kräften in [kN]



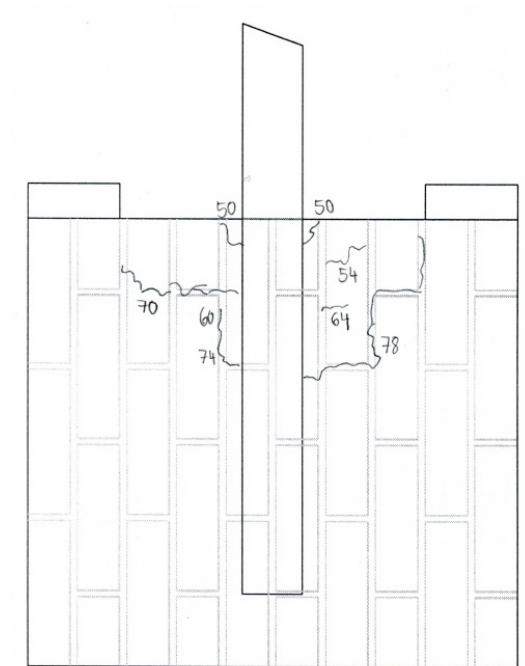
**Abbildung A.32:** Rissbildung Wandknoten C10 mit Kräften in [kN]



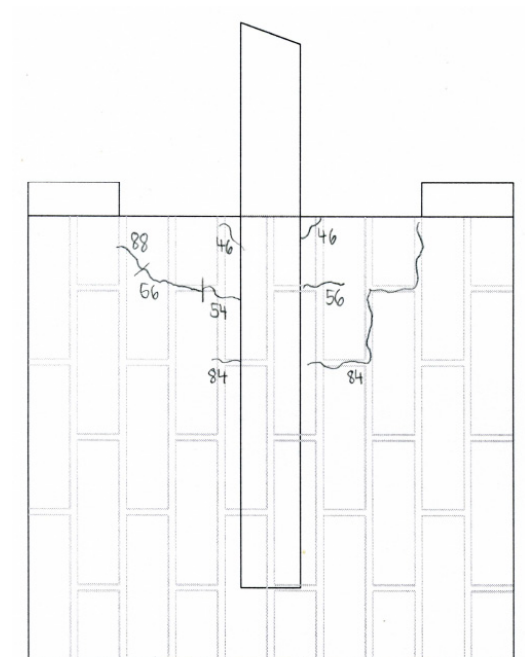
**Abbildung A.33:** Rissbildung Wandknoten C11 mit Kräften in [kN]



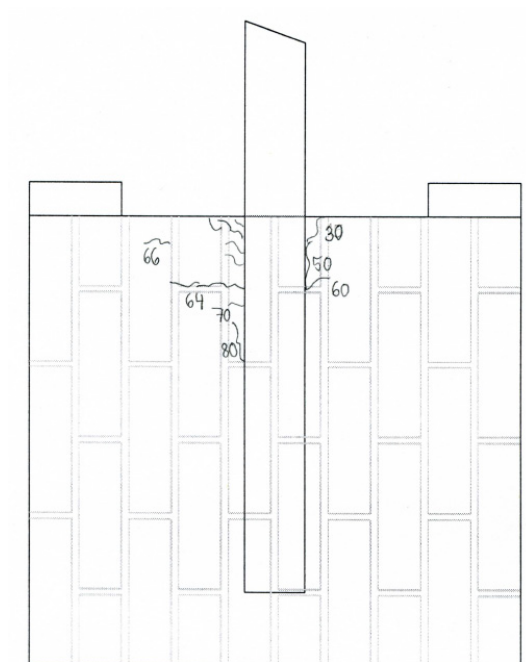
**Abbildung A.34:** Rissbildung Wandknoten C12 mit Kräften in [kN]



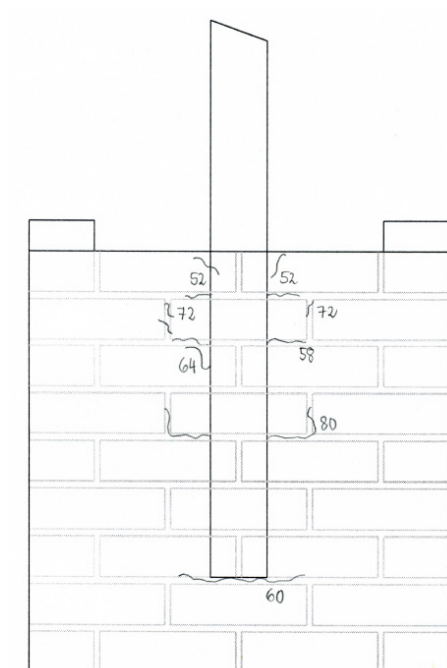
**Abbildung A.35:** Rissbildung Wandknoten C13 mit Kräften in [kN]



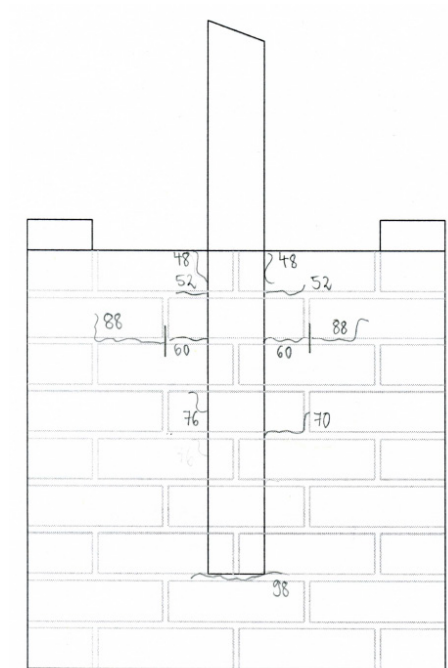
**Abbildung A.36:** Rissbildung Wandknoten C14 mit Kräften in [kN]



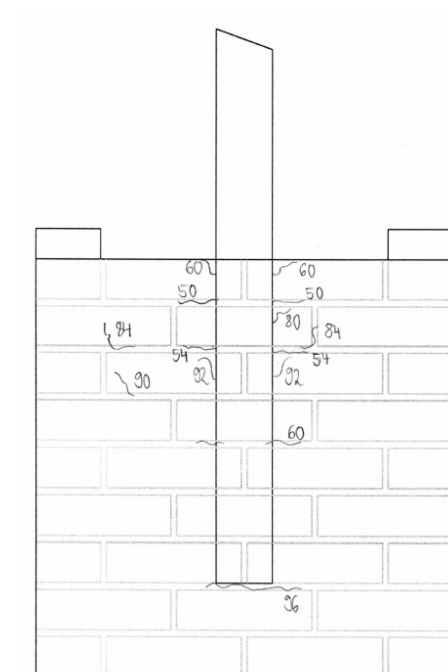
**Abbildung A.37:** Rissbildung Wandknoten C15 mit Kräften in [kN]



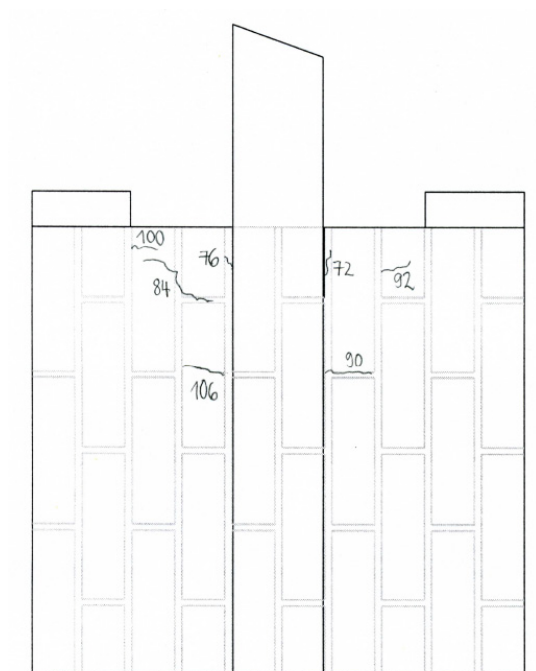
**Abbildung A.38:** Rissbildung Wandknoten C16 mit Kräften in [kN]



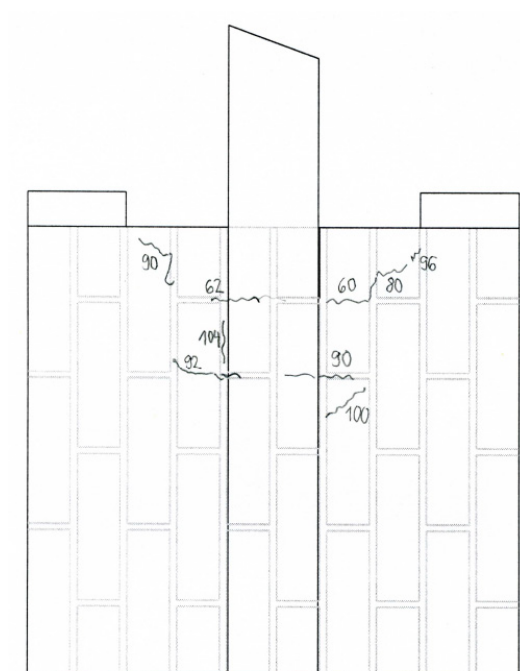
**Abbildung A.39:** Rissbildung Wandknoten C17 mit Kräften in [kN]



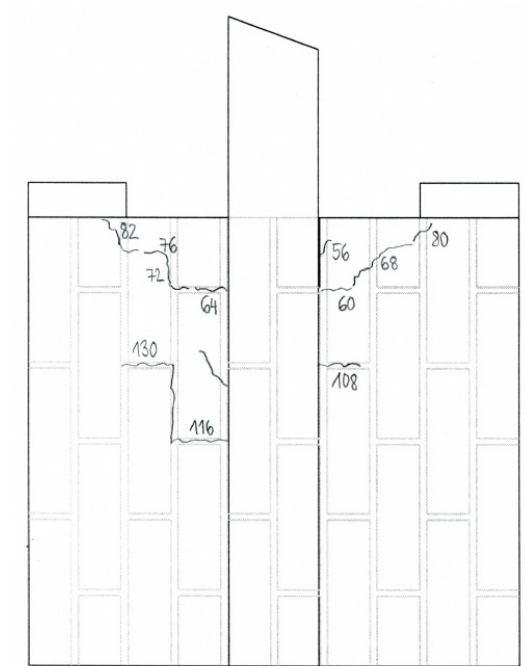
**Abbildung A.40:** Rissbildung Wandknoten C18 mit Kräften in [kN]



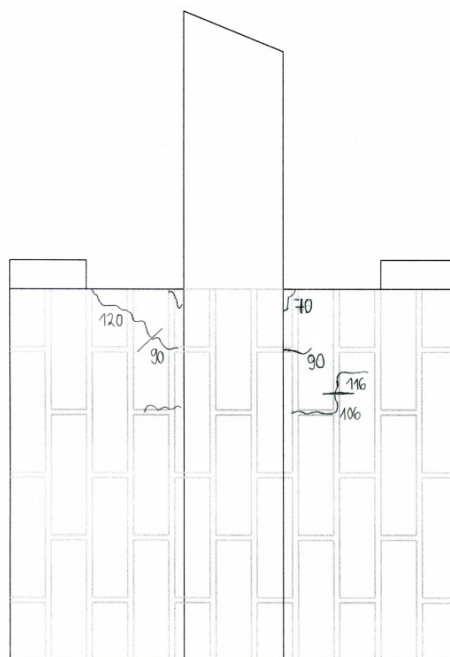
**Abbildung A.41:** Rissbildung Wandknoten C19 mit Kräften in [kN]



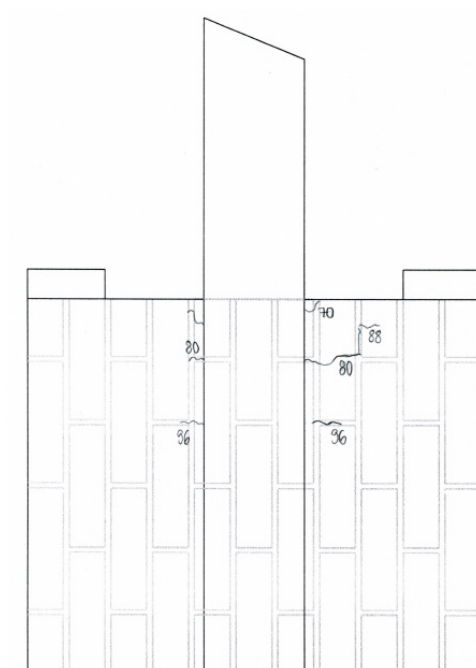
**Abbildung A.42:** Rissbildung Wandknoten C20 mit Kräften in [kN]



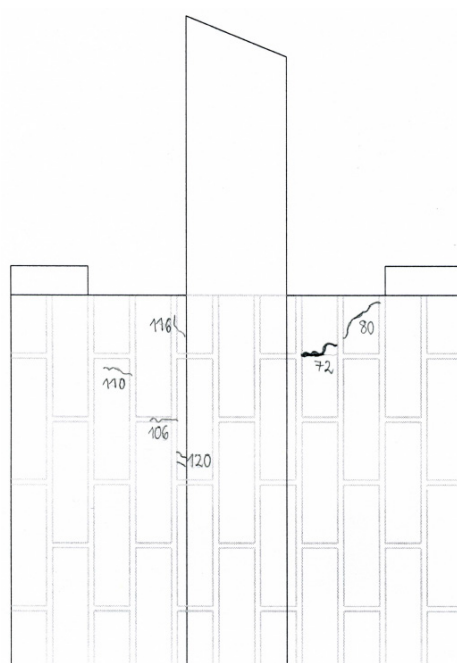
**Abbildung A.43:** Rissbildung Wandknoten C21 mit Kräften in [kN]



**Abbildung A.44:** Rissbildung Wandknoten C22 mit Kräften in [kN]



**Abbildung A.45:** Rissbildung Wandknoten C23 mit Kräften in [kN]



**Abbildung A.46:** Rissbildung Wandknoten C24 mit Kräften in [kN]

# Schriftreihe

## Bauwerkserhaltung und Holzbau

### Universität Kassel

---

- Heft 1 Karsten Schilde: *Untersuchungen zum Verbund zwischen Beton und nachträglich aufgeklebten Kohlefaserlamellen am Zwischenrisselement*. Universität Kassel, 2005. ISBN 3-89958-149-0.
- Heft 2 Carsten Pörtner: *Untersuchungen zum Verbund zwischen eingeklebten stiftförmigen faserverstärkten Kunststoffen und Holz*. Universität Kassel, 2005. ISBN 3-89958-191-1.
- Heft 3 Uwe Pfeiffer: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Klebeverbund zwischen Mauerwerk und Faserverbundwerkstoffen*. Universität Kassel, 2009. ISBN 978-3-89958-780-7.





