

**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Regine Ortlepp

**UNTERSUCHUNGEN ZUR
VERBUNDVERANKERUNG
TEXTILBEWEHRTER
FEINBETONVERSTÄRKUNGS-
SCHICHTEN FÜR BETONBAUTEILE**

**Untersuchungen zur Verbundverankerung textildbewehrter
Feinbetonverstärkungsschichten für Betonbauteile**

Investigations for the Bond Anchoring of Textile Reinforced
Fine-grained Concrete Strengthening Layers of RC-Members

Von der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Regine Ortlepp

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach

Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine

Dr.-Ing. Christoph Hankers

Eingereicht am: 22.12.2006

Tag der Verteidigung: 13.07.2007

„Du fragst, Freund ,Was ist Theorie?’,
wenn's stimmen soll, und stimmt doch nie!
,Was Praxis ist?’, frag nicht so dumm!
Wenn's stimmt und keiner weiß warum!“

Volksmund

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau in den Jahren 2002–2006.

Das Thema dieser Arbeit ist aus dem Teilprojekt C1 des Sonderforschungsbereiches 528 an der TU Dresden hervorgegangen, welcher von der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) in dankenswerter Weise gefördert wurde.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Curbach, der mir dieses Projekt nach dem Ausscheiden meines Vorgängers Lars Baumann zur selbständigen Bearbeitung übertragen hat, sowohl für seine fachliche als auch seine organisatorische Unterstützung. Die gute Arbeitsatmosphäre in dem von ihm geleiteten Institut war eine wichtige Basis für das Gelingen dieser Arbeit.

In diesem Sinne danke ich auch allen Mitarbeitern dieses Instituts für ihre stete Diskussionsbereitschaft. Insbesondere den Mitarbeitern des Otto-Mohr-Labors möchte ich an dieser Stelle für ihre gute Zusammenarbeit und kompetente Unterstützung von der Versuchsvorbereitung bis hin zur Versuchsdurchführung danken.

Mein Dank gilt ferner meinen studentischen Hilfskräften für ihre Mitarbeit bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche.

Für die messtechnische Begleitung der Schubversuche bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Hampel vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung und seinen studentischen Hilfskräften.

Mein wissenschaftliches Interesse und mein Wille, diese Arbeit in angemessener Zeit fertig zu stellen, waren es, die ich mich dazu bewogen haben, mich auch während meiner einjährigen Elternzeit, so oft es mir möglich war, mit diesem Thema zu beschäftigen. Bei meiner Familie möchte ich mich dafür bedanken, dass sie mir durch ihre organisatorische und ideelle Unterstützung die dafür erforderlichen Freiräume geschaffen hat.

Dresden, im Dezember 2006

Regine Ortlepp

Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung.....	3
1.3	Inhaltliche Übersicht.....	4
2	Überblick zum Stand des Wissens bei Verbundproblemen.....	6
2.1	Eingebettete (Stab-)Bewehrung.....	6
2.1.1	Verbundtragverhalten von einbetoniertem Rippenstahl	6
2.1.2	Verbundtragverhalten von Faserbewehrung im Beton	8
2.2	Klebelamellen	9
2.2.1	Stahllaschen	9
2.2.2	CFK/GFK-Lamellen	12
2.2.3	CFK-Lamine	13
2.2.4	In Schlitze geklebte CFK-Lamellen	13
2.3	Verbund zwischen altem und neuem Beton	13
2.3.1	Allgemeines	13
2.3.2	Spritzbetonverstärkung	16
2.3.3	Ferrozement	18
2.3.4	Haftverbund, Begriff der Rautiefe.....	19
2.4	Verbundmodelle für oberflächlich applizierte Klebelamellen	20
2.4.1	Allgemeines zur Verbundmodellierung.....	20
2.4.2	Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes	21
2.4.3	Bilinearer Verbundansatz	23
2.4.4	Zusammenfassendes zu Klebeverbundgesetzen.....	23
2.5	Verbundmodelle für Verbund zwischen altem und neuem Beton.....	24
2.6	Verstärkung mit textilbewehrtem Feinbeton	27
3	Materialeigenschaften der Verbundpartner Textilbeton und Altbetonuntergrund	30
3.1	Fasern und Textilien	30
3.2	Feinbeton	31
3.3	Verbundwerkstoff textilbewehrter Feinbeton.....	31
3.3.1	Vorbemerkungen	31
3.3.2	Spannungs-Dehnungs-Linie für einaxiale Zugbelastung	32
3.3.3	Nichtlinearität und E-Modul.....	34
3.3.4	Rissbildung	35
3.3.5	Verbundeigenschaften der Textilien in der Feinbetonmatrix	37
3.4	Altbetonuntergrund.....	38
4	Verbundbruchverhalten und Versagenskriterien	39

4.1	Verbundbruchverhalten bei Klebelamellen	39
4.2	Begriffsbestimmung Verbund und Sonderfall innerer Verbund.....	39
4.3	Theoretisch mögliche Versagensebenen.....	40
4.4	Kriterien für ein Versagen des Verbundes.....	41
4.4.1	Allgemeines	41
4.4.2	Abgrenzung der Versagensfälle.....	42
5	Verfahren zur Ermittlung des wirksamen Flächenanteiles	44
5.1	Begriff des wirksamen Flächenanteiles und seine Bedeutung.....	44
5.2	Allgemeines zu optischen Messverfahren.....	45
5.3	Optische Einflüsse auf das Messergebnis	46
5.3.1	Allgemeines	46
5.3.2	Einfluss der Bildauflösung.....	47
5.3.3	Einfluss der Projektionsart.....	52
5.3.4	Einfluss der Objektausleuchtung und Schattenbildung	53
5.3.5	Einfluss der Transparenz.....	54
5.3.6	Einfluss der Objektfarbe	55
5.3.7	Einfluss des Schwellwertes.....	56
5.4	Entwicklung und Anwendung eines geeigneten Verfahrens	57
6	Untersuchungen zum Haftverbund	65
6.1	Allgemeines zur Oberflächenhaftzugfestigkeit.....	65
6.2	Einfluss des Betongefüges des Verstärkungssystems.....	66
6.3	Versagensmechanismen/-ebenen	68
6.4	Modellierung für den Widerstand gegen Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung	69
6.5	Modellanwendung zur Vorhersage der Versagensebene und Textilauswahl	71
6.6	Eigene experimentelle Untersuchungen.....	74
6.6.1	Probekörper und Versuchsdurchführung	74
6.6.2	Versuchsprogramm und Parametervariation.....	79
6.6.3	Versuchsergebnisse – Haftzugfestigkeiten	80
6.6.4	Versagensfall Altbetonbruch.....	85
6.6.5	Versagensfall Verbundfuge.....	88
6.6.6	Versagensfall Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung	89
6.6.7	Geometrische Unsicherheiten im Versagensfall Delamination	93
6.6.8	Abgrenzung der Versagensfälle.....	100
6.6.9	Anforderungen an die textile Bewehrung	103
7	Untersuchungen zum Verbundtragverhalten unter Schubbeanspruchung.....	104
7.1	Versuchsaufbau.....	104
7.1.1	Mögliche Versuchsanordnungen für Verbunduntersuchungen.....	104
7.1.2	Versuchsaufbau für besondere Anforderungen aus dem Materialverhalten der textilbewehrten Verstärkungsschicht.....	105

7.1.3	Versuchsdurchführung.....	108
7.1.4	Messtechnik	109
7.1.5	Versuchsprogramm.....	114
7.2	Verbundbruchverhalten und Versagensmechanismen.....	115
7.2.1	Beobachtete Versagensebenen	115
7.2.2	Rissbildung in der Verstärkungsschicht	119
7.2.3	Versagensmechanismen.....	123
7.2.4	Analyse der Versagensmechanismen mit der High-Speed-Kamera.....	126
7.3	Verformungsmessung und Versuchsauswertung.....	129
7.3.1	Übliche Vorgehensweise bei Klebelamellen – Differenzenverfahren	129
7.3.2	Erweiterung des Algorithmus für nichtlineares Materialverhalten	131
7.3.3	Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Linie auf der freien Laschenlänge	131
7.3.4	Problematik bei konstanten Messintervallen.....	133
7.3.5	Lösungsvorschlag der adaptiven Intervallfestlegung	134
7.3.6	Rissbildorientierte photogrammetrische Verformungsmessung	135
7.3.7	Ergebnisse aus der rissbildorientierten photogrammetrischen Verformungsmessung	138
7.3.8	Verformungsverhalten über die Laschendicke	148
7.3.9	Ermittlung der Rissneigungswinkel.....	150
7.3.10	Diskussion der Ergebnisse.....	152
7.3.11	Verbundrissentwicklung.....	154
7.4	Verbundtragfähigkeit.....	157
7.4.1	Allgemeines	157
7.4.2	Einflussparameter auf die Tragfähigkeit des Verbundes.....	159
7.4.3	Verbundtragfähigkeit des Altbetonuntergrundes.....	161
7.4.4	Verbundtragfähigkeit der textilen Bewehrungsebene	163
7.4.5	Verbundtragfähigkeit am Gesamtsystem.....	167
7.4.6	Anforderungen an die textile Bewehrung.....	169
8	Untersuchungen zum Versagen des inneren Verbundes	170
8.1	Notwendigkeit der Untersuchungen	170
8.2	Versuchsaufbau zum Filamentgarnauszug	170
8.3	Versuchsergebnisse	173
8.3.1	Filamentgarnauszugslängen.....	173
8.3.2	Kraft-Rissöffnungsverhalten am Einzelriss.....	176
8.3.3	Anforderungen an die textile Bewehrung.....	178
9	Modellierung des Verbundverhaltens.....	180
9.1	Allgemeines	180
9.2	Verbundtragfähigkeit unter Haftzugbeanspruchung.....	180
9.3	Verbundtragfähigkeit unter Schubbeanspruchung	181
9.4	Interaktion von Schub- und Haftzugbeanspruchung	184

9.4.1	Allgemeines	184
9.4.2	Erweiterter Schub-Haftzug-Ansatz	184
9.4.3	Stabwerkmodell	185
9.4.4	Einfluss der Rissneigungswinkel	187
9.4.5	Stabwerkmodell mit veränderlicher Druckstrebenneigung.....	189
9.4.6	Mechanische Zusammenhänge der Verbundkraftübertragung	191
9.5	Berechnungsmodell zur Ermittlung der Verankerungslänge	193
10	Zusammenfassung und Ausblick	196
10.1	Zusammenfassung.....	196
10.2	Ausblick und mögliche Anwendungsgebiete.....	199
11	Literatur.....	201
12	Bezeichnungen und Abkürzungen	211
13	Anhang.....	213
Anhang 1	Übersicht der verwendeten Baustoffe	215
A 1.1	Betoneigenschaften	215
A 1.2	Bewehrungstextilien.....	217
Anhang 2	Ermittlung des wirksamen Flächenanteiles der Textilien.....	228
A 2.1	Scanmethode nach CURBACH, BAUMANN & BEYER [17]	228
A 2.2	Subjektive Auswertemethoden	228
A 2.3	Darstellung der Scanmethoden und Histogrammanalyseverfahren	229
A 2.4	Ergebnisse des Histogrammanalyseverfahrens mit Durchlichtscan	230
Anhang 3	Probekörperherstellung und Versuchsdurchführung	232
A 3.1	Haftzugversuche.....	232
A 3.2	Verbundversuche unter Schubbeanspruchung	233
A 3.3	Filamentgarnauszugsversuche	236
Anhang 4	Versuchsdaten	238
A 4.1	Haftzugversuche.....	238
A 4.2	Verbundversuche unter Schubbeanspruchung	278
A 4.3	Filamentgarnauszugsversuche	288
Anhang 5	Ergebnisse der photogrammetrischen Verformungsmessung.....	289
A 5.1	Versuch C1-31-3	289
A 5.2	Versuch C1-31-4	299
A 5.3	Versuch C1-T-26-3	307

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Tatsache, dass sich der Schwerpunkt der Bautätigkeit vermehrt von Neubauten zum Bauen im Bestand hin verlagert, hat der nachträglichen Verstärkung vorhandener Tragwerke eine große Bedeutung verliehen. So kommt es beispielsweise durch Umnutzung vorhandener Gebäude zu Erhöhungen der vorhandenen Ausbau- und Verkehrslasten. Diese können von der vorhandenen Bewehrung oftmals nicht aufgenommen werden, so dass eine Erhöhung der Tragfähigkeit erforderlich wird. Nach der Wirkungsweise der Verstärkung wird unterschieden zwischen:

- Verstärkung für Biegung,
- Verstärkung für Querkraft,
- Verstärkung für Torsion und
- Verstärkung für Normalkraft.

Zur Verstärkung von Stahlbetonbauteilen existieren vielfältige Möglichkeiten (HANKERS [38]). Stahlbetonbauteile werden beispielsweise durch einen zusätzlich aufgetragenen stahlbewehrten Spritzbeton oder seit einigen Jahren auch durch Aufkleben einer zusätzlichen äußeren Bewehrung verstärkt. Klebeverstärkungen bieten aufgrund ihrer geometrischen Eigenschaften gegenüber einer bewehrten Spritzbetonverstärkungsschicht gewisse Vorteile wie z. B. eine geringere Einschränkung des Lichtraumprofils und eine geringere Erhöhung des Bauteilgewichts. Durch eine solche nachträglich aufgetragene äußere Bewehrung kann nicht nur die Tragfähigkeit sondern auch die Gebrauchstauglichkeit vorhandener Bauteile erhöht werden. Das Verbundsystem aus Verstärkungsschicht, Kleber und Untergrundbeton wird durch Zugspannungen und Verbundschubspannungen in der Ebene der Verstärkungsschicht sowie ggf. Zug- und Druckspannungen senkrecht zur Verstärkungsschicht beansprucht. Für geklebte Bewehrung aus Stahl und faserverstärkten Kunststoffen ist bereits ein breites Wissen über den Versagensmechanismus des Verbundes vorhanden (vgl. Abschnitt 2.2).

Eine neuere Entwicklung zur Verstärkung von Betonbauteilen stellt der textilbewehrte Beton dar (vgl. hierzu BRÜCKNER, ORTLEPP & CURBACH [9], [10], BRÜCKNER ET AL. [11], [12], CURBACH & BRÜCKNER [18], FRANZKE ET AL. [34], MÖLLER ET AL. [60], OFFERMANN ET AL. [70], WEILAND, ORTLEPP & CURBACH [105]). Bei textilbewehrtem Beton werden anstelle der im Spritzbeton üblichen Stahlbewehrung sogenannte textile Strukturen als Bewehrungsmaterial verwendet. Diese bestehen aus endlosen Hochleistungsfasern, die mit Hilfe eines Nähfadens zu textilen Gelegestrukturen verwirkt werden. Als Fasermaterialien kommen beispielsweise alkaliresistente Glasfasern (AR-Glasfasern), Karbonfasern oder Polypropylenfasern zur Anwendung (HEMPEL ET AL. [43], JESSE [45], MOLTER [61]). Im Vergleich zu einer Verstärkung aus stahlbewehrtem Spritzbeton bietet der textilbewehrte Beton entscheidende Vorteile. Da die nichtmetallischen Fasern im Beton nicht rosten, entfällt die übliche erforderliche Betondeckung zum Schutz der Bewehrung. Somit wird die Applikation von extrem dünnen Betonverstärkungsschichten möglich (Bild 1.1).

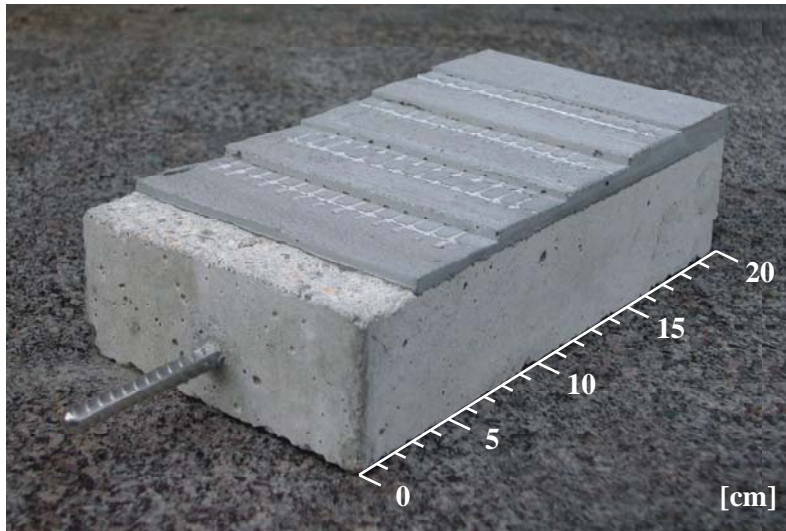


Bild 1.1 Muster einer textilbewehrten Feinbetonverstärkung

Aufgrund der geringen geometrischen Abmessungen der textilbewehrten Verstärkungsschicht kommen die Vorteile wie bei den Klebeverstärkungen – die geringe Einschränkung des Lichtraumprofils sowie die geringe Eigengewichtserhöhung – auch hier zum Tragen. Die bei geklebten Verstärkungen bekannte Problematik der Anfälligkeit des Klebstoffes gegenüber hohen Temperaturen (BERGMEISTER [3]), z. B. im Brandfall, tritt bei einer Verstärkung mit textilbewehrtem Beton nicht auf, da die Verstärkung ohne Klebstoffinterfaceschicht direkt auf den Untergrundbeton aufgebracht wird.

Die Ähnlichkeit zu Klebelamellen darf jedoch nicht zu sehr in den Vordergrund gerückt werden. Es ist zu berücksichtigen, dass es sich hierbei lediglich um geometrische Ähnlichkeiten handelt (vgl. Abschnitt 2.6). Die Materialeigenschaften von textilbewehrtem Beton sind nicht mit den linear-elastischen Eigenschaften von Stahl oder faserverstärktem Kunststoff vergleichbar. Der Werkstoff *Textilbeton* unterliegt wie jeder andere bewehrte Beton auch der Zustandsänderung infolge Rissbildung, was zu Veränderungen der Steifigkeit führt. Auch zeichnet sich die Verbindung zum Altbetonuntergrund infolge der direkten Aufbringung ohne Kleber durch einen starken Formschluss aus. Bei ausreichend stark aufgerautem Betonuntergrund entsteht eine feste Verzahnung mit der Verstärkungsschicht. Aus der Nichtlinearität des textilbewehrten Betons und der formschlüssigen Verzahnung zum Untergrundbeton resultieren gravierende Unterschiede im Verbundverhalten gegenüber geklebten, linear-elastischen Verstärkungsmaterialien.

Für die Bemessung einer Bauteilverstärkung ist u. a. das Tragverhalten im Verankerungsbereich von großer Bedeutung. Die sichere Vorhersage eines Verbundversagens, wie beispielsweise das Ablösen der Verstärkungsschicht an den Balkenstegen eines für Querkraft verstärkten Plattenbalkens, erfordert ein genaues Verständnis über das Verbundverhalten im Verankerungsbereich. Insbesondere hier, da ein Umgreifen der Druckzone nicht mehr möglich ist, steht z. B. die Frage, ob eine ausreichende Verankerung im Bereich des Balkensteges gegeben ist, um die Zugkraft aus der textilbewehrten Verstärkungsschicht sicher in den Altbeton einzuleiten (Bild 1.2, rechts). Auch bei einer Biegeverstärkung muss die Einleitung der

Kräfte in die vor dem Auflager endende Verstärkungsschicht (Bild 1.2, oben) durch einen Verankerungsnachweis sichergestellt werden. Die Fragen zu den Mechanismen der Kraftübertragung von der textilbewehrten Verstärkungsschicht in den Altbeton werden im Rahmen dieser Arbeit an separaten Haftzugprobekörpern sowie Schubprobekörpern (Bild 1.2, unten) untersucht.

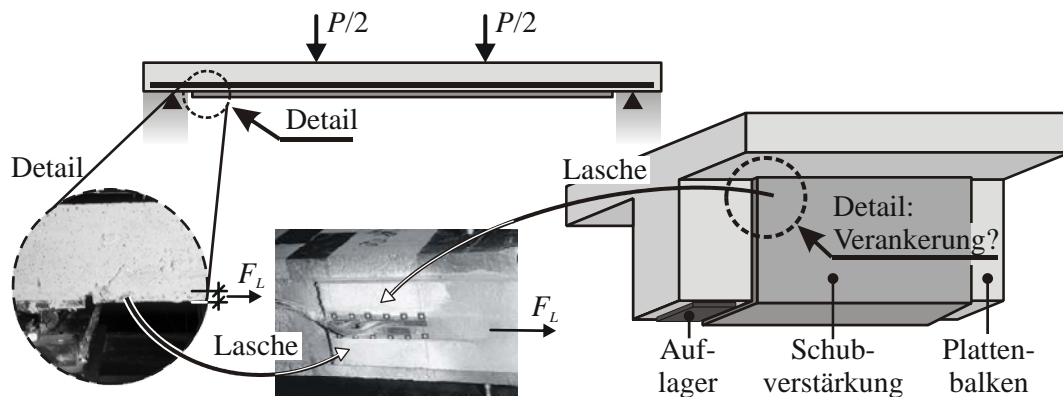


Bild 1.2 Verankerungsproblem bei Biege- und Schubverstärkung

1.2 Zielsetzung

Für Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton liegen bisher noch keine ausreichenden Kenntnisse zum Verbundverhalten im Verankerungsbereich vor. Aus der einschlägigen Literatur sind der Autorin außer den an der TU Dresden durchgeführten Untersuchungen keine nennenswerten Veröffentlichungen zu diesem Thema bekannt. Aufgrund der Materialeigenschaften des textilbewehrten Betons ergeben sich spezielle Problemstellungen bei der Messdatenerfassung der Verbundversuche und der Auswertung der Ergebnisse. Effekte wie die Rissbildung der Verstärkungsschicht im Verbundbereich sind speziell zu untersuchen. Zur Berechnung der Verbundtragfähigkeit und der erforderlichen Verankerungslängen existiert für dieses Material nach Kenntnis der Verfasserin bisher noch kein Modellansatz.

Die vorliegende Arbeit soll einen Einstieg in die Thematik des Verbundverhaltens textilbewehrter Betonverstärkungsschichten für Stahlbetonbauteile schaffen. Ziel ist es, mittels experimenteller und theoretischer Untersuchungen zu einer abgesicherten Aussage über die Verbundtragfähigkeit von Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton zu kommen und ferner den Versagensmechanismus des Verbundsystems aus Altbeton und textilbewehrter Feinbetonverstärkungsschicht modellhaft zu beschreiben. Da Versuchsbeobachtungen zeigen, dass das Versagen in jedem der Verbundpartner, sowohl im Altbetonuntergrund als auch in der textilbewehrten Feinbetonverstärkungsschicht, auftreten kann, müssen jeweils zugehörige Versagenskriterien bereitgestellt werden.

Eine direkte mechanische Modellbildung zur Berechnung der Verbundkräfte scheint nach heutigem Stand der Technik nicht möglich zu sein. Zu komplex sind die Zusammenhänge der einzelnen Einflussfaktoren auf das Tragverhalten des Verstärkungsmaterials Textilbeton (JESSE [45]). Da hier noch ein großer Forschungsbedarf besteht, soll die vorliegende Arbeit insbesondere eine solide Grundlage für weitere Untersuchungen zu diesem Thema bilden. Da

materialbedingte Besonderheiten wie die Rissbildung innerhalb der textilbewehrten Betonverstärkungsschicht teilweise zu nicht mehr anwendbaren Algorithmen im Zuge der Versuchsauswertung führen, sollen im Rahmen dieser Arbeit auch besonders nicht beschreibbare Wege aufgezeigt werden. Damit soll einer Wiederholung nicht erfolgversprechender Lösungsansätze in nachfolgenden Forschungsarbeiten vorgebeugt werden.

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit beschränken sich auf das Verhalten des Verbundes im Endverankerungsbereich von Textilbetonverstärkungen mit Bewehrungstextilien aus AR-Glasfilamentgarnen unter statischer Kurzzeitbelastung.

1.3 Inhaltliche Übersicht

Kapitel 2 gibt einen allgemeinen Überblick über den Stand des Wissens bei Verbundproblemen – angefangen vom Bewehrungsstahl, über die verschiedenen Möglichkeiten der Klebeverstärkung, Verbindungen zwischen altem und neuem Beton bis hin zu der hier betrachteten Verstärkung aus textilbewehrtem Beton.

Im Kapitel 3 werden zunächst die Materialeigenschaften der einzelnen Verbundpartner der textilbewehrten Feinbetonverstärkungsschicht sowie des Altbetonuntergrundes näher beleuchtet und ein kleiner Überblick zum Tragverhalten des textilbewehrten Betons gegeben.

Im Kapitel 4 werden die grundlegenden Phänomene beim Verbundbruchverhalten von Verstärkungsschichten und zugehörige Versagenskriterien erläutert.

Im Kapitel 5 wird ein geeignetes Verfahren zur Ermittlung des wirksamen Flächenanteiles von textilen Bewehrungsstrukturen entwickelt, welches die Grundlage für die weiterführenden Betrachtungen zum Verbundversagen durch Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung bildet.

Kapitel 6 beschäftigt sich mit dem Verbundtragverhalten unter Haftzugbeanspruchung. Aufbauend auf dem Flächenermittlungsverfahren wird ein Modell für den Widerstand gegen Delamination vorgeschlagen und mit Ergebnissen aus eigenen experimentellen Untersuchungen belegt sowie Abgrenzungsbedingungen zwischen den Versagensfällen angegeben.

Kapitel 7 befasst sich mit dem Verbundtragverhalten unter Schubbeanspruchung und bildet somit den Kern der vorliegenden Arbeit. Spezielle Eigenheiten des textilbewehrten Betons werden aufgezeigt und Lösungsvorschläge erarbeitet. Anhand eines Beispielversuchs wird die neu entwickelte Methode der rissbildorientierten photogrammetrischen Verformungsmessung vorgestellt und verbleibende Problempunkte diskutiert. Als Ergebnis der eigenen experimentellen Untersuchungen wird ein Zusammenhang zwischen Verankerungslänge und verankerbarer Kraft angegeben.

Im Kapitel 8 wird kurz auf die Tragfähigkeit des inneren Verbundes zwischen den Fäden der textilen Bewehrung und der umgebenden Feinbetonmatrix eingegangen. Es werden notwendige Maßnahmen erläutert, die dazu beitragen, ein Versagen des inneren Verbundes auszuschließen.

Im Kapitel 9 werden einige Modellvorschläge für die Verbundtragfähigkeit unter Haftzugbeanspruchung und unter Schubbeanspruchung gegeben und in einem weiteren Schritt zu einer

Interaktion zusammengeführt. Diesem werden weitere alternative Modellvorschläge wie z. B. die Betrachtung als Stabwerk mit veränderlicher Druckstrebenneigung gegenübergestellt.

Kapitel 10 gibt eine Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit mit einer Übersicht über mögliche Anwendungsgebiete sowie einen Überblick über noch notwendige Arbeiten und weiteren Forschungsbedarf auf diesem Gebiet.

2 Überblick zum Stand des Wissens bei Verbundproblemen

2.1 Eingebettete (Stab-)Bewehrung

2.1.1 Verbundtragverhalten von einbetoniertem Rippenstahl

Ein schon seit langer Zeit bekanntes Verbundproblem betrifft die Verankerung einbetonierter Stahlbewehrungsstäbe im Beton. Hierzu sind bereits seit vielen Jahrzehnten eine Reihe von Forschungsarbeiten zum Verbundtragverhalten durchgeführt worden und die Ergebnisse zum großen Teil in die nationale und internationale Normung integriert.

An dieser Stelle soll nur ein kurzer Überblick zur generellen Wirkungsweise des Lastabtrages im Verbundbereich gegeben werden, um den Unterschied in den Mechanismen der Kraftübertragung gegenüber der im nachfolgenden Kapitel aufgeführten äußeren Bewehrung aufzuzeigen. Für genauere Betrachtungen der Verbundproblematik von innerer Stabstahlbewehrung wird auf die einschlägige, umfangreiche Literatur zu diesem Thema verwiesen.

Der Verbund zwischen den einbetonierten Stäben und dem sie umgebenden Beton ist die Grundvoraussetzung für das Zusammenwirken von Beton und Bewehrung. Die dafür erforderlichen Verbundkräfte lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

1. Haftung des Betons auf dem Bewehrungsstab (chemische Adhäsion),
2. Reibung zwischen Bewehrungsstab und Beton (Kraftschluss) und
3. mechanische Verzahnung der Rippen des Bewehrungsstabes mit dem Beton (Formschluss).

Die Haftung des Betons auf dem Stahl ist stark von dessen Oberflächenbeschaffenheit abhängig und wird schon bei einer relativ geringen Beanspruchung zerstört. Infolge Querdruck im Beton werden Reibungskräfte zwischen Bewehrungsstab und dem umgebenden Beton aktiviert. Querkzug hingegen wirkt sich nachteilig auf den Verbund aus, weil dadurch die Ausbildung von Reibungskräften unmöglich wird. Die Verzahnung zwischen den Rippen des Bewehrungsstabes und dem Beton stellt die bedeutendste Komponente der Verbundwirkung von einbetoniertem Rippenstahl dar.

Nach SCHLAICH & SCHÄFER [92] kann das Tragverhalten in Anlehnung an den Verlauf der Hauptspannungstrajektorien durch ein Stabwerkmodell mit Zug- und Druckspannungen charakterisiert werden (Bild 2.1, a). Die von den Betonstahlrippen ausgehenden Druckkräfte breiten sich im umgebenden Beton aus. Durch die Umlenkung werden zum einen hohe Querdruckpressungen an der Stahloberfläche und zum anderen ringförmige Querkzugspannungen im den Bewehrungsstahl umgebenden Beton erzeugt (Bild 2.1, b).

Während die Querdruckspannungen die Druckfestigkeit auf ein Vielfaches der einaxialen Prismenfestigkeit steigern können, wodurch die erforderliche Rippenfläche sehr klein bleibt, können die radialen Zugspannungen zu von innen ausgehenden Spaltrissen, sog. Verbundrisse, entlang des Bewehrungsstabes führen. Diese Gefahr des Verbundbruchs besteht insbesondere, wenn die Betondeckung sehr gering ist oder wenn der Stabdurchmesser im Verhält-

nis zur Betondicke sehr groß ist. In diesen Fällen entstehen sehr hohe Spannungen im Zugring. Überschreiten diese Spannungen die Betonzugfestigkeit, so führt das zu einem Verbundriss entlang des Bewehrungsstabes, was ein sprödes Versagen zur Folge haben kann. Zusätzlich zur Lastabtragung in der Hauptebene ist bei dieser Art der Verankerung durch die räumliche Wirkung auch die Ausbreitung der Verankerungskräfte in Dickenrichtung, d. h. senkrecht zur Haupttragebene, zu beachten. Hieraus ergeben sich z. B. erforderliche Mindestbetonüberdeckungen zur Aufnahme der aus dem Verbund herrührenden Betonzugspannungen.

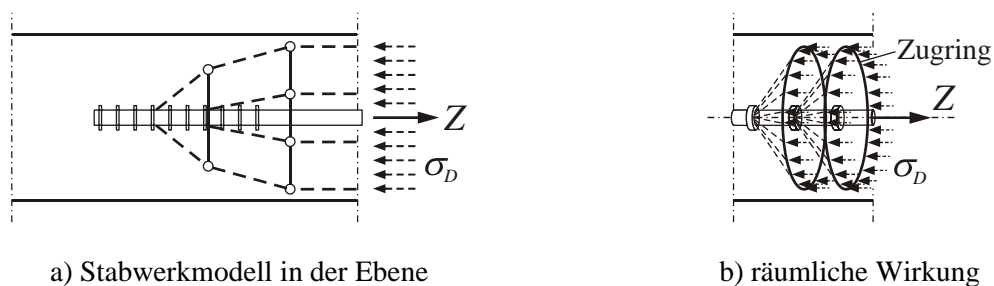


Bild 2.1 Stabwerkmodell eines mittig in einem Betonkörper verankerten Bewehrungsstabes aus SCHLAICH & SCHÄFER [92]

Bei höherer Beanspruchung des Verbundes (Schlupf) entstehen infolge der hohen Abstützkräfte an den Rippen im Beton schräge Sekundärrisse entsprechend der Hauptspannungstrajektorien, wodurch sich die Druckstreben als „Betonzähne“ entlang der Stablängsachse ausbilden. Bei weiter steigendem Schlupf kommt es zum Abscheren der Betonzähne von den Rippen, so dass nur noch geringere Verbundkräfte über Rissreibung übertragen werden können. Die weitere Öffnung des Verbundrisses wird hierbei durch den umgebenden Beton behindert, so dass aufgrund dieser dreidimensionalen Wirkungsweise ein Querdruck entsteht, der Reibungskräfte entlang der Rissufer des Verbundrisses mobilisiert.

Mit Hilfe der oben beschriebenen Modellbetrachtung können die wirkenden Verbundmechanismen gut dargestellt werden. Zur quantitativen Berechnung von Verbundproblemen wird jedoch üblicherweise eine idealisierte Betrachtungsweise verwendet. Die Verbundwirkung zwischen den beiden Werkstoffen Stahl und Beton wird durch Verbundgesetze beschrieben, in denen der Zusammenhang zwischen einer fiktiven, gleichmäßig um den Umfang des Bewehrungsstabes verteilten Verbundschubspannung und dem Schlupf, d. h. der Differenz der lokalen Verschiebungen von Stahlbewehrung und Beton, verwendet wird. Die Verbundschubspannung wird zum größten Teil über Scherkräfte der Rippen des Bewehrungsstahls, aber auch als Haft- und Reibungskräfte in den Beton übertragen. Die Summation dieser Kräfte wird gewöhnlich als Verbund bezeichnet. Als Maß für die Höhe der Beanspruchung wird i. d. R. die gemittelte, über die Verankerungslänge und den Stabumfang konstante Verbundschubspannung τ nach Gl. (2.1) verwendet.

Parallel zur Bewehrungsstabachse sind Beton und Bewehrung bei dieser idealisierten Betrachtung um den Betrag des Schlupfes verschoben. Aufgrund dieser Relativverschiebung wird diese Betrachtungsweise auch als *verschieblicher Verbund* bezeichnet. Der Schlupf

umfasst dabei sowohl echte Relativverschiebungen zwischen Stahlbewehrung und Beton als auch Verformungen des den Bewehrungsstahl umgebenden Betons.

$$\tau = \frac{T}{\pi \cdot d_s \cdot l_b} \quad (2.1)$$

mit τ Verbundschubspannung
 T über die Verankerungslänge l_b übertragene Kraft
 $\pi \cdot d_s$ Umfang des Bewehrungsstabes
 l_b Verankerungslänge

Die Formulierung einer solchen Verbundschubspannungs-Schlupf-Beziehung als Verbundgesetz bzw. Stoffgesetz ist für die Modellbildung erforderlich. Die Problematik besteht in der Frage nach einer möglichst einfachen Beziehung, welche dennoch die wesentlichen Verbundparameter enthält. Das Finden einer solchen zweckmäßigen Beziehung war und ist Gegenstand vieler Forschungsarbeiten (z. B. ULAGA [100]).

2.1.2 Verbundtragverhalten von Faserbewehrung im Beton

Die Verwendung von Fasern als Bewehrung für Beton gehört schon seit langer Zeit zum Stand der Technik. Auch hierbei handelt es sich um stabförmige, in den Beton eingebettete Bewehrungselemente. Am bekanntesten ist die Verwendung von Kurzfasern aus Stahl. In den vergangenen drei Jahrzehnten hat auch der Glasfaserbeton eine bemerkenswerte Verbreitung erfahren (MEYER [59]). Bei Kurzfaserbeton ist bezüglich einer bestimmten Belastung i. d. R. nur ein geringer Teil der Fasern optimal ausgerichtet, was dazu führt, dass sich auch nur ein Teil der Fasern wirksam am Lastabtrag beteiligen kann. Die Wirkung der Kurzfasern liegt vor allem darin, dass die Fasern bei Entstehung eines Risses im Beton herausgezogen und dabei u. a. plastisch verformt werden (Bild 2.2). Dieser Auszugswiderstand, den die Kurzfasern dem Herausziehen aus der Betonmatrix entgegensetzen, führt zu einer höheren Duktilität und zu einer Verbesserung des Nachbruchverhaltens beim Faserbeton (MARKOVIC, WALRAVEN & VAN MIER [53]).

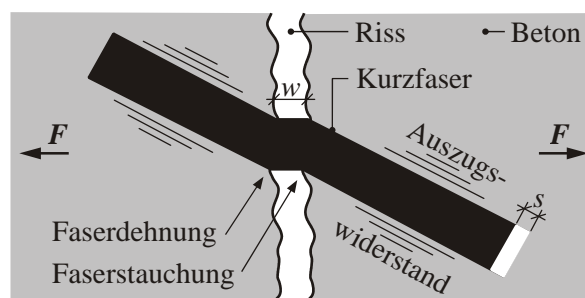


Bild 2.2 Faserauszug bei Kurzfaserbeton

Wesentlich effektiver bezüglich der Tragfähigkeit ist der Einsatz von Endlosfasern. Im Unterschied zu Kurzfasern haben die sogenannten Multifilamentgarne, z. B. aus alkaliresistentem

chen chemische Adhäsion, Reibung und mechanische Verzahnung zurückgeführt werden (HOLZENKÄMPFER [44]).

Die Applikation von Stahllamellen auf Betonbauteile erfolgt i. d. R. mittels eines Zweikomponentenklebers, welcher nach der Erhärtung einen Adhäsionsverbund zwischen dem Beton und der Lamelle herstellt. Die Verbundkräfte werden also nicht direkt zwischen den Verbundpartnern Stahllasche und Beton sondern über das Hilfsmittel Klebstoffschicht übertragen. Die Relativverschiebung zwischen den Verbundpartnern wird deshalb durch die Schubsteifigkeit der Klebstoffschicht beeinflusst. Bei sachgemäß präparierten Oberflächen von Altbetonuntergrund und Stahllasche kann durch diese Klebstoffschicht eine sehr feste Verbindung erzielt werden. Die ausnutzbare Festigkeit einer solchen Verbindung wird sowohl durch die Tragfähigkeit des Verbundpartners (Beton) als auch durch die Tragfähigkeit des Verbindungsmittels (Klebstoff) bestimmt, wobei durch Auswahl eines geeigneten, ausreichend tragfähigen Verbindungsmittels bei geklebten Stahllamellen i. d. R. die Tragfähigkeit des Altbetonuntergrundes maßgebend wird.

HOLZENKÄMPFER [44] stellte fest, dass sich nach Überschreiten der Betonzugfestigkeit im Beton schräge Sekundärrisse ausbilden. Diese bewirken eine Schwächung des Verbundes und leiten somit einen Entfestigungsprozess ein. Die dabei ablaufenden Mechanismen wurden von ULAGA [100] skizzenhaft in sehr übersichtlicher Form zusammengestellt (Bild 2.4).

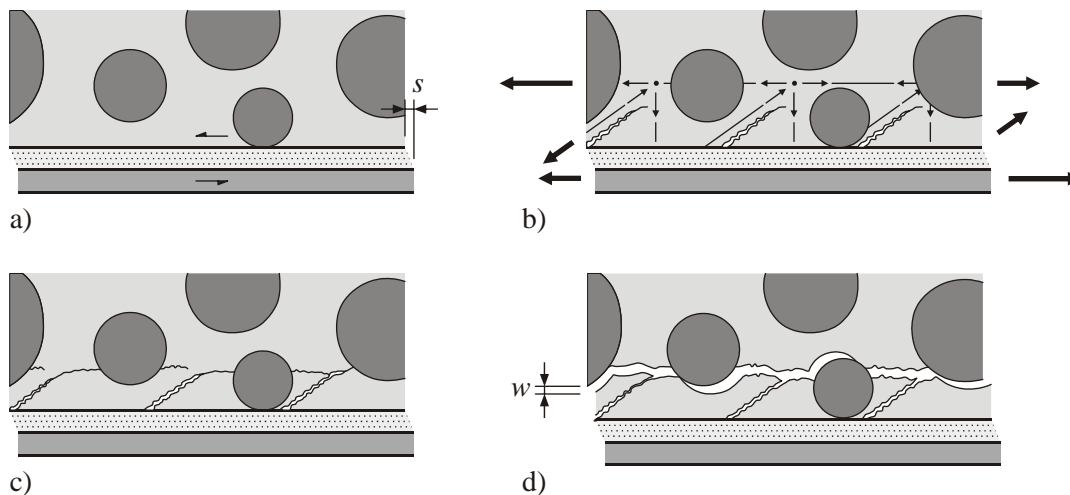


Bild 2.4 Verbundrisse bei Klebelamellen aus ULAGA [100]
a) linear-elastische Klebstoffverformung, b) Sekundärrisse und Fachwerk,
c) Trennebene, d) steigende Relativverschiebung

Die Zugkraft aus der Lamelle wird in diesem Zustand über die Betondruckstreben in das Altbetonbauteil übertragen, welche durch die Sekundärrisse voneinander getrennt sind (NEUBAUER [66]). Dieser Mechanismus lässt sich mit einem Fachwerkmodell ähnlich dem bei der Verankerung bzw. Übergreifung von Bewehrungsstäben nach SCHLAICH & SCHÄFER [92] beschreiben (Bild 2.4b). Bei weiterer Steigerung der Belastung beginnen sich die Sekundärrisse zu krümmen, bis diese schließlich zu einem finalen Verbundriss zusammenlaufen und somit eine Verbundbrüchebene parallel zur Klebefuge bilden (Bild 2.4c), welche die Verstärkungslasche vom Altbetonbauteil trennt. Da diese Brüchebene bei einem üblichen

Altbetonbauteil aus Normalbeton infolge herausstehender Zuschlagkörner eine große Rauigkeit besitzt, können bei steigendem Schlupf infolge weiterer Belastung noch Verzahnungskräfte mobilisiert werden (Bild 2.4d). Anders als bei der in Beton eingebetteten Stabbewehrung ist jedoch bei Klebelamellen kein ringsumgebender Beton vorhanden, der durch seine räumliche Wirkung Querdruckspannungen hervorrufen könnte. Aus diesem Grund fällt die durch Reibung bzw. Verzahnung der Verbundrissufer übertragbare Kraft bei aufgeklebter Bewehrung deutlich geringer aus als bei einer eingebetteten Stabbewehrung. Zudem führt die fehlende Querpressung neben dem Schlupf parallel zur Lamelle auch zu senkrechten Verschiebungsanteilen, d. h. zu einer zunehmenden Öffnung des Verbundrisses, so dass sich die Verbundpartner Altbeton und Stahllasche voneinander entfernen.

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Stahllaschen kann, ebenso wie bei eingebetteter Stabstahlbewehrung als linear elastisch-plastisch angenommen werden, wobei i. d. R. ein Stahlfließen der äußeren Bewehrung vermieden werden soll (Bild 2.5). D. h., es wird ein reines elastisches Verhalten der aufgeklebten Stahlbewehrung angestrebt, um einer Verbundentkopplung vorzubeugen (KUNTZ [52]). Die von HOLZENKÄMPFER [44] für Verbundversuche eingesetzten Lamellen wurden zu diesem Zweck vorgereckt. Es ist somit von einem linear elastischen Verhalten des Verbundpartners geklebte Stahllamelle auszugehen. Der E-Modul wird im Regelfall zu 210.000 N/mm^2 angesetzt. Er ist damit weitaus höher als der E-Modul eines handelsüblichen Klebers, welcher mit ca. 6.000 bis 11.000 N/mm^2 angegeben wird (HANKERS [39]). Aus diesem Grund wird sich die verbindende Kleberschicht wesentlich mehr verformen (vgl. Bild 2.4a). Zur Umsetzung in Rechenmodelle wird diese Kleberschicht üblicherweise als Schlupfebene idealisiert, auf welche sämtliche Verschiebungen zwischen Beton und Lamelle bezogen werden (Bild 2.6). Im Abschnitt 2.4.1 wird darauf noch genauer eingegangen.

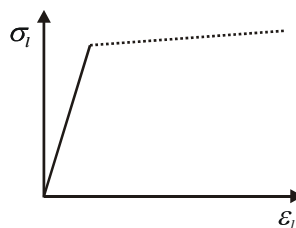


Bild 2.5 Spannungs-Dehnungs-Linie von Stahllamellen (idealisiert)

Ein Verbundbruch bei auf Beton aufgeklebten Stahllaschen kann sich zum einen in der oberflächennahen Altbetonschicht und zum anderen in der Klebschicht als Kohäsionsbruch oder aber auch in der Grenzschicht zwischen beiden als Adhäsionsbruch ereignen. Ein Kohäsionsbruch in der Klebschicht ist jedoch durch Wahl eines geeigneten Klebstoffes auszuschließen – ebenso ein Adhäsionsbruch in der Grenzschicht durch ausreichende Untergrundvorbehandlung. Ein Kohäsionsbruch in der oberflächennahen Altbetonschicht entsteht durch einen fortschreitenden Verbundriss innerhalb des Altbetonuntergrundes wenige Millimeter unter dessen Oberfläche (HOLZENKÄMPFER [44]). Diese Versagensart bildet auch die Grundlage für die bisher entwickelten Verbundmodelle für auf Beton aufgeklebte Stahllaschen, welche beispielsweise bei HOLZENKÄMPFER [44] oder ULAGA [100] nachzulesen sind.

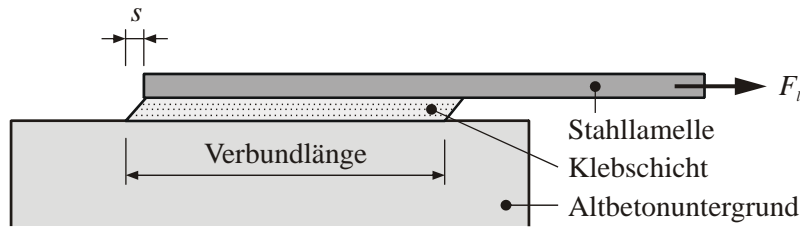


Bild 2.6 Schlupf bei Klebelamellen nach BRESSON [8]

2.2.2 CFK/GFK-Lamellen

Zum Verbundtragverhalten auf Beton aufgeklebter Faserverbundkunststofflamellen existieren ebenfalls zahlreiche Forschungsarbeiten aus dem In- und Ausland, u. a. auch einige Dissertationen (KAISER [48], NEUBAUER [66], NIEDERMEIER [67], ULAGA [100], ZEHETMAIER [110], SCHILDE [91]).

Die im vorhergehenden Abschnitt genannten Unterschiede von geklebten Stahllaschen gegenüber innenliegender Stabstahlbewehrung gelten sinngemäß auch für geklebte Faserverbundkunststofflamellen, da diese in derselben Weise wie Stahllaschen oberflächlich auf den Beton appliziert werden. Lamellen aus Kohlenstofffaserverbundkunststoff (CFK) oder Glasfaserverbundkunststoff (GFK) verhalten sich annähernd linear elastisch bis zum Bruch (Bild 2.7). Allerdings weisen die Faserverbundkunststofflamellen im Gegensatz zu Stahllaschen ein sprödes Bruchverhalten auf, da der plastische Bereich in der Spannungs-Dehnungs-Linie entfällt. Die E-Moduli von Faserverbundkunststofflamellen schwanken in Abhängigkeit von den verwendeten Fasern. Von BIZINDAYI & NEALE [6] wird ein E-Modul für CFK-Lamellen zwischen 75.000 N/mm² und 1.000.000 N/mm² angegeben. Bei GFK-Lamellen wurde der E-Modul von ROSTASY & RANISCH [86] zu 30.000 – 40.000 N/mm² ermittelt. Der E-Modul von Faserverbundkunststofflamellen ist somit (insbesondere bei CFK-Lamellen) ebenfalls wesentlich höher als der E-Modul des Klebers, so dass sich auch hier die verbindende Kleberschicht wesentlich mehr verformen wird als die Verstärkungslamelle (siehe auch Bild 2.6).

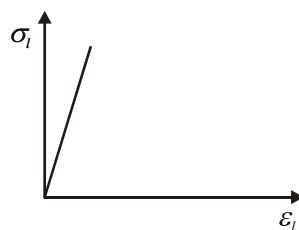


Bild 2.7 Spannungs-Dehnungs-Linie von Faserkunststofflamellen

Gegenüber aufgeklebten Stahllaschen kann bei Faserverbundkunststofflamellen eine weitere Verbundversagensart auftreten. Da es sich bei dieser Lamellenart um einen Verbundwerkstoff handelt, besteht die Möglichkeit eines interlaminaeren Versagens entlang der Fasern innerhalb der Lamelle. Von NEUBAUER [66] wird diese Versagensart auch als „Zwischenfaserbruch“ bezeichnet und ein Modellansatz gegeben. Als Voraussetzung für die Anwen-

dung der klassischen Lamellenverbundmodelle wird jedoch, ebenfalls wie bei Stahllaschen, von einem oberflächennahen Betonversagen ausgegangen (ULAGA [100]).

2.2.3 CFK-Lamine

CFK-Lamine, auch CFK-Sheets genannt, unterscheiden sich von den CFK-Lamellen hauptsächlich darin, dass die CFK-Sheets flächig auf den Untergrund aufgebracht und erst beim Applizieren mit einer Epoxidharzmatrix imprägniert werden. Währenddessen werden CFK-Lamellen als fertiger Verbundwerkstoff in Streifen von Breiten bis ca. 10-15 cm auf die Baustelle geliefert. Bei CFK-Sheets hingegen handelt es sich i. d. R. um vorimprägnierte Kohlefasern mit Breiten von ca. 30 cm. Die Sheets können in mehreren Lagen übereinander laminiert werden. Durch Kreuzen der unidirektionalen Sheets können mehrere Wirkungsrichtungen der Verstärkungsfasern aktiviert werden. CFK-Sheets sind mit unterschiedlichen E-Moduli zwischen 240.000 und 640.000 N/mm² erhältlich.

Durch das Laminieren auf der Baustelle ist der Querschnitt von CFK-Sheets jedoch nicht so gleichmäßig wie bei vorgefertigten CFK-Lamellen. Punktuelle Epoxidharzüberschüsse und -einschlüsse unter bzw. zwischen den Faserlagen führen zu einer gewissen Welligkeit der Fasern. Auch ist das Verbundverhalten über die Sheetbreite ungleichmäßiger als bei CFK-Lamellen (CURBACH, JESSE & ORTLEPP [20]). Im Allgemeinen handelt es sich jedoch bei CFK-Laminaten genau wie bei Stahllaschen und Faserkunststofflamellen um oberflächlich applizierte Bewehrungselemente, bei denen i. Allg. kein Querdruck durch umgebenden Beton vorhanden ist. Somit fällt die über Rissreibung bzw. Rissuferverzahnung im Altbeton übertragbare Verbundkraft auch hier eher gering aus.

2.2.4 In Schlitze geklebte CFK-Lamellen

Der Vollständigkeit halber sollen an dieser Stelle noch die in Schlitze geklebten CFK-Lamellen genannt werden. Diese werden, im Unterschied zu flach aufgeklebten CFK-Lamellen, senkrecht in die zuvor in den Altbetonuntergrund eingesägten Schlitze eingeklebt. Diese Art der Verbindung bietet den Vorteil, dass wiederum ein gewisser Querdruck aus dem den Schlitz umgebenden Beton zur Erhöhung der übertragbaren Verbundspannungen aktiviert werden kann, da in diesem Fall kein Abheben der Lamelle möglich ist. Diese Form der Verstärkung ist ausführlich in BLASCHKO [7] beschrieben und soll hier nicht weiter behandelt werden.

2.3 Verbund zwischen altem und neuem Beton

2.3.1 Allgemeines

Das nachträgliche kraftschlüssige Anbetonieren an bestehende Bauteile oder auch an Teilfertigteile aus Beton hat sich mittlerweile zu einer Standardaufgabe im Bauwesen entwickelt, die bereits bei jeder Arbeitsfuge auftritt. Die Anwendungsgebiete reichen vom Einsatz von

Teilfertigteilen im Hochbau bis hin zur Verstärkung von Brückentragwerken (RANDL, MÜNGER & WICKE [80]). Während zu Ortbetonergänzungen an Teilfertigteilen normative Regelungen existieren, liegen zum Thema Betonergänzung an aufgerautem Altbetonuntergrund nur wenige Forschungsergebnisse vor (ZILCH & MAINZ [112]). Über die Verbindungsfugen zwischen Alt- und Neubeton müssen i. d. R. Schub- und Druckkräfte bzw. auch Zugkräfte übertragen werden. Eine große Rolle spielt in diesem Zusammenhang die Rautiefe der Verbindungsfuge (vgl. Abschnitt 2.3.4). Zur Sicherstellung der Kraftübertragung in der Verbindungsfuge zwischen altem und neuem Beton ist eine entsprechende Aufrauung der Oberfläche des Untergrundbetons erforderlich, um die übertragbaren Verzahnungskräfte zu erhöhen (ZTV-ING [13], DIN 18551 [29], MELLMANN, MEINHOLD & MAULTZSCH [56]). Zusätzlich kommen oft Verbindungselemente aus Bewehrungsstahl senkrecht zu den Fugen zum Einsatz, welche vor allem die Schubtragfähigkeit der Fuge verbessern sollen.

Der Schubwiderstand besteht nach der gängigen Modellvorstellung aus drei unterschiedlichen Traganteilen (REINECKE [85]):

- Zum ersten stellt sich nach dem Anbetonieren ein Adhäsionsverbund zwischen Altbetonuntergrund und Neubeton ein. Dies bedeutet eine Kombination aus chemischen Bindungskräften infolge einer kristallinen Struktur sowie mechanischen Bindungskräften, die sich durch eine Verzahnung auf mikroskopischer Ebene ausbildet.
- Eine zweite Tragwirkung entsteht infolge Belastung senkrecht zur Verbundfuge. Kommt es zum Aufreißen der Fuge, also zum Versagen der Adhäsion, so kann unter Einwirken einer Druckkraft senkrecht zur Fugenfläche eine Schubkraft infolge eines Reibungswiderstandes übertragen werden.
- Der dritte Traganteil resultiert aus dem Widerstand einer die Fuge kreuzenden Bewehrung. Diese wirkt in Abhängigkeit von der wirkenden Belastung als Scher- oder Zugdübel.

Die jeweiligen Anteile von Adhäsion, Reibung und Dübelwirkung an der Schubübertragung hängen von der Rauigkeit der Fuge sowie dem Bewehrungsgrad der Verbindungselemente ab. Insbesondere beim Beton ist ein großer Einfluss der Festigkeit sowie der Art und Größe der Zuschlagkörner zu verzeichnen.

Neuere Untersuchungen zu diesem Thema wurden u. a. von MOMAYEZ ET AL. [62], MÜLLER [63], RANDL [79], RANDL & WICKE [81], ZILCH & MAINZ [112] sowie ZILCH & MÜLLER [113] durchgeführt. Ein typischer Versuchskörper zur experimentellen Untersuchung dieser Problematik besteht aus einem prismatischen Betonkörper mit einer geneigten Fuge zwischen Altbeton und Neubetonergänzung (Bild 2.8). Die Herstellung solcher Probekörper erfolgt dabei in zwei Betonierabschnitten. Beim Aufbringen einer lotrechten Druckbelastung werden in der Fuge eine Schubkraft und eine Normalkraft gleichzeitig erzeugt. Das Verhältnis dieser beiden Kräfte ist abhängig vom Fugenneigungswinkel. Hieraus wird im Allgemeinen auf die Reibungszahl geschlossen.

RANDL [79] verwendet einen Scherkörper, in welchen die resultierende Scherkraft mittels eines „Kniehebels“ genau auf Höhe der Fuge eingeleitet wird. Untersuchungsgegenstand ist ebenfalls die Übertragung von Schub- und Druckkräften über die Fuge zwischen Alt- und Neubeton in Abhängigkeit von der Fugenrauheit und ggf. eingesetzter Verbindungsmittel. REINECKE [85] unterscheidet zwischen Schubversuchen zur Adhäsion und Schubversuchen

nach Reibungskräften, wobei für letztere wiederum ein Versuchskörper nach Bild 2.8 eingesetzt wird. Auch WALL & SHRIVE [102] verwendeten für ihre experimentellen Untersuchungen einen solchen prismatischen Versuchskörper mit schräger Fuge. In späteren Untersuchungen von REINECKE [84] wird ein zweiteiliger Schubkörper verwendet, auf welchen ein zusätzlicher Querdruck zur Erzeugung einer Reibkraft aufgebracht wird. Einen guten Überblick über experimentelle Untersuchungen zum Beton-Beton-Verbund geben MOMAYEZ ET AL. [62].

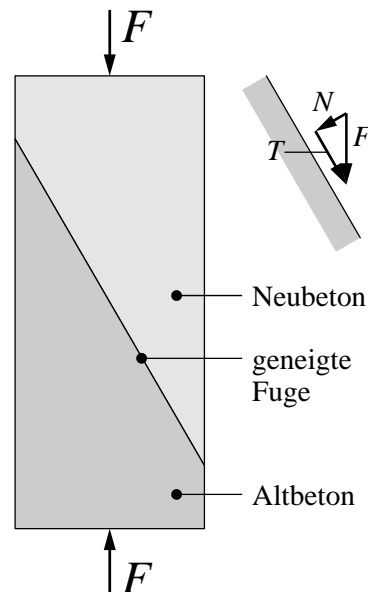


Bild 2.8 Prinzipskizze eines Versuchskörpers zur Schubübertragung

Die Übertragung reiner Schubkräfte ohne eine äußere Druckkraft senkrecht zur Verbundfuge basiert auf Haftwirkungen unterschiedlichen Ursprungs, welche maßgeblich von der Beschaffenheit der Altbetonoberfläche und der Betonfestigkeit abhängig sind (MÜLLER [64]). Diese Haftwirkungen setzen sich zusammen aus spezifischer Adhäsion infolge physikalischer und chemischer Bindungen sowie mechanischer Adhäsion, wenn Verzahnungseffekte für den Verbund verantwortlich sind. Eine Verzahnung entsteht, wenn Bestandteile des flüssigen Neubetons infolge kapillarer Kräfte in Grenzbereiche des Altbetons eindringen und sich dort nach der Aushärtung verankern. Allein durch diese Haftwirkungen können zwischen Alt- und Neubeton signifikante Zug- und Schubspannungen übertragen werden (MÜLLER [63]). ZILCH & MÜLLER [113] führten zu diesem Sachverhalt Scherversuche unter wechselnder Beanspruchung mit einem Versuchskörper analog den Adhäsionsversuchen von REINECKE [85] ohne senkrechte Druckspannungen durch. Aus diesen Untersuchungen werden Bruchschubspannungen für Verbindungsfugen zwischen Alt- und Neubeton unterschiedlicher Beschaffenheit abgeleitet.

Bei der Einleitung von Zugkräften aus einer Verstärkungsschicht in den Altbetonuntergrund eines verstärkten Bauteils kommt es zusätzlich zur reinen Schubbeanspruchung auch zu Haftzugkräften senkrecht zur Verbundfuge. Die Frage der Übertragung von Haftzugkräften wird i. Allg. mittels Haftzugversuchen separat untersucht (z. B. MOMAYEZ ET AL. [62], SCHÄFER, BLOCK & DRELL [89], Schulz [95], WINKLER & GRUNER [106]). Experimentelle Untersu-

chungen einer kombinierten Beanspruchung des Verbundes zwischen altem und neuem Beton aus Schub und Haftzugkräften, d. h. ohne Querdruck wurden von MENN [57] und MENN ET AL. [58] an mit Stahlbeton verstärkten Biegebalken untersucht. Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung der Verbundtragfähigkeit in Abhängigkeit von der Fugenrauigkeit und verschiedener Anordnungen von Verbunddübeln. Eine Beziehung zwischen Schubspannung und Schlupf in der Verbindungsfuge wurde hier nicht untersucht. Sogenannte Abzugsversuche, wie sie häufig zur Untersuchung der Verbundwirkung im Endverankerungsbereich von geklebten Verstärkungen angewendet werden, sind der Verfasserin für Beton-Beton-Verbunde nicht bekannt.

2.3.2 Spritzbetonverstärkung

Die Verstärkung mit Spritzbeton ist eine seit vielen Jahren gängige Bauweise im Stahlbetonbau. Zentrale Anwendungsgebiete sind beispielsweise die Biege- und Querkraftverstärkung von Balken (SCHÄFER ET AL. [90], WÖRNER [108]) oder die Normalkraftverstärkung von Stützen (HANKERS [37], HEGGER & KERKENI [40]). Der Baustoff Spritzbeton ist in DIN 18551 [29] genormt, welche erst kürzlich neu überarbeitet wurde. Die Norm definiert *Spritzbeton* als „Betonmischung, die aus einer Spritzdüse pneumatisch aufgetragen und durch ihre Aufprallenergie verdichtet wird“. Im Vergleich dazu wird der Begriff *Spritzmörtel* als ein „Zementmörtel mit Gesteinskörnung für Beton bis höchstens 4 mm, bei gebrochener Gesteinskörnung bis höchstens 5 mm, der wie Spritzbeton verarbeitet wird“ definiert. Bezogen auf den angegebenen Größtkorndurchmesser weist der Spritzmörtel somit die größere Ähnlichkeit zu dem im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Feinbeton auf.

SCHORN, SONNENBERG & MAURER [94] geben einen guten Überblick über den neuesten Stand der Technik beim Einsatz von Spritzbeton und eine Reihe von Anwendungsgebieten. Spritzbeton und Spritzmörtel sind aufgrund der hohen hydraulischen Drücke beim Aufbringen stets mit dem Anfall von mehr oder weniger Rückprall verbunden. Beim Rückprall handelt es sich um denjenigen Teil des Spritzgemisches, welcher nicht am Untergrund haften bleibt. Dies betrifft zumeist einen Teil der Zuschlagkörner. Der Anteil des Rückprallgutes vermindert sich mit zunehmender Dicke der Spritzbetonschicht.

Infolge des Rückpralls weist eine Spritzbetonverstärkungsschicht insbesondere auf der dem zu verstärkenden Altbetonbauteil zugewandten Seite ein erhöhtes Zementleinvolumen auf. Damit sinkt bei Normalbetonen der E-Modul, so dass die Spritzbetonverstärkungsschicht selbst bei gleicher Zusammensetzung wie der Untergrundbeton einen geringeren E-Modul besitzt (Bild 2.9). Unmittelbar an der Verbundfuge ist der E-Modul besonders gering. Die daraus resultierenden unterschiedlichen Verformungseigenschaften von Untergrund- und Spritzbeton sind insbesondere bei der Verstärkung von Druckgliedern zu beachten.

Nach der Spritzbetonnorm DIN 18551 [29] darf bei der Bemessung spritzbetonverstärkter Bauteile so vorgegangen werden, als ob der Gesamtquerschnitt von Anfang an einheitlich hergestellt worden wäre. Voraussetzung hierfür ist, dass die unter die Annahme des Zusammenwirkens von altem und neuem Beton in der Fuge wirkenden Schubkräfte aufgenommen werden können. Entsprechende Nachweise des Verbundes zwischen dem alten Betonbauteil und der neuen Spritzbetonschicht sind nach der Stahlbetonnorm DIN 1045-1 [27] zu führen.

Zur Sicherstellung des Verbundes sind nach DIN 18551 [29] grundsätzlich Verbundmittel anzuordnen, auch wenn diese rechnerisch nicht erforderlich sind. Die einzige Ausnahme bildet die Spritzbetonverstärkung von Platten. Bei Balken sind jedoch in den Endbereichen konstruktive Verbundbewehrungen vorzusehen, auch wenn diese rechnerisch nicht erforderlich sind.

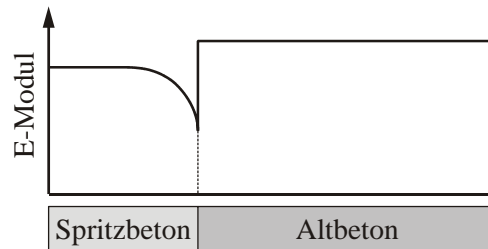


Bild 2.9 Qualitativer E-Modul-Verlauf bei einer Spritzbetonverstärkung aus SCHORN ET AL. [94]

Bei einer Schubverstärkung von Balken sind die Zulagebügel in der Druckzone zu verankern. Diese Verankerung ist so auszuführen, dass sie auch als Verdübelung des alten und neuen Querschnittes wirkt. Ein spezielles Verankerungsbauteil für diesen Zweck ist in SCHÄFER ET AL. [90] dargestellt (Bild 2.10). Auf eine alleinige Schubkraftübertragung in der Verbundfuge durch die Verzahnungswirkung zwischen altem und neuem Beton wird an dieser Stelle nicht vertraut. Experimentelle Untersuchungen zum Thema Verbund in der Fuge zwischen Altbeton und Spritzbeton fokussieren aus diesem Grunde zumeist auf die Wirkung von Verbundmitteln (z. B. MENN ET AL. [58], SCHÄFER & BÄÄTJER [88]).

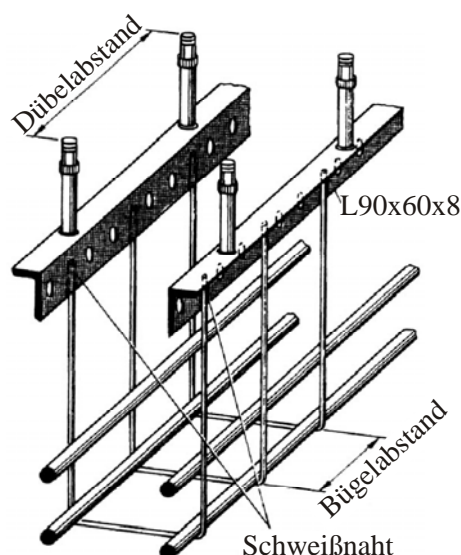


Bild 2.10 Aufhängekonstruktion für Spritzbetonverstärkungen aus SCHÄFER ET AL. [90]

Trotz konstruktiver Anordnung von Verbundmitteln wird in verschiedenen Regelwerken die Sicherstellung der Verzahnung zwischen dem Altbetonuntergrund und der neuen Schicht gefordert. Die Anforderungen an die Vorbereitung des Altbetonuntergrundes werden dabei

meist recht pauschaliert beschrieben. In der ZTV-ING [13] wird gefordert: „Der Feinmörtel des alten Betons ist soweit abzutragen, dass der Betonersatz am Grobkorn haften kann ... Die Vorbereitung der Betonunterlage muss eine raue Oberfläche ergeben. Das ist in der Regel der Fall, wenn fest eingebettetes grobes Gesteinskorn kuppenartig freiliegt.“ Eine ähnliche Beschreibung zur Fugenaufrauung zur Gewährleistung der Schubkraftübertragung in der Verbundfuge findet sich auch in DIN 18551 [29]: „Die Vorbereitung der Auftragsfläche muss eine raue und feste Oberfläche ergeben. Das ist bei Beton in der Regel der Fall, wenn fest eingebettetes Gesteinskorn sichtbar wird.“ Zudem wird eine Oberflächenzugfestigkeit des Betonuntergrundes von wenigstens $1,5 \text{ N/mm}^2$ gefordert. Die Feuchtigkeitsverhältnisse des Altbetonuntergrundes, welche ebenfalls für den Verbund der neuen Spritzbetonschicht von Bedeutung sind, werden derzeit nur empirisch beurteilt. So fordert z. B. die ZTV-ING [13]: „Die gesäuberten und ausreichend vorgehässelten Auftragsflächen müssen bei Beginn der Spritzbetonarbeiten so weit abgetrocknet sein, dass sie mattfeucht aussehen. Fließendes Wasser ist von den Auftragsflächen auf geeignete Weise fernzuhalten ...“ Untersuchungen zur Bestimmung der Rauigkeit und Feuchtemessung des Altbetonuntergrundes liegen z. B. von MELLMANN, MEINHOLD & MAULTZSCH [56] vor.

Spezielle Untersuchungen zum Verbundverhalten unter kombinierter Schub- und Haftzugbeanspruchung in der Verbundfuge, wie diese bei geklebten Verstärkungslaschen aus Stahl oder CFK beispielsweise von HANKERS [39] und NEUBAUER [66] durchgeführt wurden, sucht man für den Verstärkungswerkstoff Spritzbeton vergeblich. Neuere Untersuchungen zum Thema Verbund an spritzbetonverstärkten Bauteilen wurden von WINTSCHER [107] durchgeführt. Diese Untersuchungen beziehen sich jedoch ausschließlich auf das Verbundverhalten des Rippenstahles in der Spritzbetonschicht.

2.3.3 Ferrozement

Bei dem Werkstoff Ferrozement handelt es sich um einen mit dünnen Stahlnetzen bewehrten Feinbeton (Bild 2.11). Dabei kommen unterschiedliche Bewehrungsnetze aus Stahl in Form von Geweben, Schweißgittern, Streckmetallen, Gelegen und weiteren Varianten zum Einsatz. Der Unterschied zwischen Stahlbeton und Ferrozement liegt nach NAAMAN [65] in der Größenordnung begründet. Der verwendete Größtkorndurchmesser von Ferrozement ist wesentlich kleiner als bei Stahlbeton, damit die feingliedrigen Bewehrungsnetze vollständig umhüllen werden können. Heutige Ferrozement-Bauteile weisen Dicken von weniger als 25 mm auf. Aufgrund der geometrischen Abmessungen und der Materialeigenschaften eines bewehrten Betonbauteils ist dieser Werkstoff dem hier behandelten textilbewehrten Beton am ähnlichsten.

Ferozement eignet sich neben der Verwendung für sehr dünne und leichte Bauteile wie Schalenkonstruktionen auch zur Verstärkung bestehender Stahlbetonbauteile. NAAMAN [65] gibt als Anwendungsbeispiele die Stützenverstärkung oder auch die Verstärkung von unbewehrtem Mauerwerk für Erdbebenbeanspruchung sowie die nachträgliche Auskleidung von bestehenden Swimmingpools oder Wassertanks an. Spezielle Untersuchungen zum Verbundverhalten in der Fuge zwischen Altbeton und Ferrozementverstärkung unter Schubbeanspruchung sind der Verfasserin nicht bekannt. Wohl aber wird zur Sicherheit gegen ein interlaminares Schubversagen innerhalb des Ferrozementbauteiles zwischen Metallbewehrungsgitter

und umgebender Matrix gefordert, dass das Verhältnis der Fläche der Öffnungen des Bewehrungsgitters zur projizierten Fläche wenigstens 70 % beträgt. Dieses Verhältnis ist vergleichbar mit dem in dieser Arbeit verwendeten wirksamen Flächenanteil der textilen Bewehrungsstrukturen von $k_{A,eff} = 0,7$ (vgl. Kapitel 5).

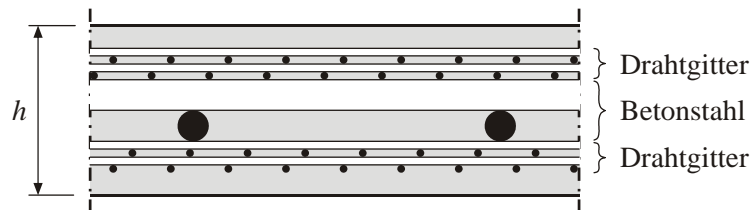


Bild 2.11 typischer Querschnitt eines Ferrozement-Bauteils nach NAAMAN [65]

2.3.4 Haftverbund, Begriff der Rautiefe

Wenn es um den Haftverbund eines Oberflächenbeschichtungssystems geht, taucht der Begriff *Rautiefe* auf. Auch bei der Verbindung von Teilfertigteilelementen mit einer Aufbetonschicht aus Ortbeton ist dieser Parameter für die Qualität des Verbundes von Bedeutung. Die Ausbildung einer genügend rauen Oberfläche des zu beschichtenden Betonbauteils ist neben der Festigkeit des Betons Voraussetzung für einen guten Haftverbund. Um die Rauigkeit einer Betonoberfläche in der praktischen Anwendung beschreiben zu können, wird ein Parameter benötigt, welcher zahlenmäßig erfassbar ist. Einschlägige Vorschriften empfehlen in diesem Zusammenhang die *Rautiefe* als Maß für die Oberflächenbeschaffenheit zu verwenden (ZTV-ING [13], Instandsetzungsrichtlinie [25]). Diese wird im Regelfall nach dem von KAUFMANN [47] entwickelten Sandflächenverfahren ermittelt. Hierzu wird eine definierte Sandmenge auf der zu prüfenden Oberfläche kreisförmig so verteilt, dass die Vertiefungen gerade gefüllt sind. Der Inhalt eines mit einem bestimmten Volumen an Quarzsand gefüllten Gefäßes wird auf die trockene, saubere Oberfläche geschüttet. Der Sand wird dann mit einer Scheibe durch kreisförmige Bewegungen ohne Druck in die Vertiefungen der Oberfläche eingerieben. Anschließend wird der Durchmesser des Kreises ausgemessen und dient zur Berechnung der Rautiefe nach Gl. (2.2).

$$R_t = \frac{40 \cdot V}{\pi \cdot d^2} \quad (2.2)$$

mit R_t Rautiefe [mm]
 V Sandvolumen [cm³]
 d Kreisdurchmesser [cm]

Die *Rautiefe* ist definiert als die Höhe des gedachten zylindrischen Körpers mit dem gemessenen Kreisdurchmesser und dem für die Messung verwendeten Sandvolumen. Dieser entspricht dem Abstand zwischen der Hülllinie und der Massenausgleichslinie (Bild 2.12). Die Hülllinie ist diejenige Linie, welche die höchsten Punkte der Oberfläche berührt. Die Massenausgleichslinie ist dadurch gekennzeichnet, dass die Summe der stoffgefüllten Volumina über ihr gleich der Summe der stofffreien Volumina unter ihr ist (KAUFMANN [47]).

Das in der Instandsetzungsrichtlinie des DAfStb [25] und der ZTV-ING [13] empfohlene Sandflächenverfahren nach KAUFMANN [47] wird bei der Auswertung der Versuche im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Bestimmung der Rautiefe des sandgestrahlten Altbetonuntergrundes der Probekörper Anwendung finden.

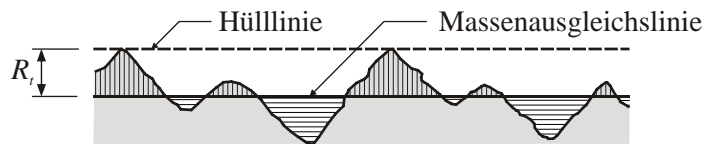


Bild 2.12 Rautiefe R_f nach KAUFMANN [47]

2.4 Verbundmodelle für oberflächlich applizierte Klebelamellen

2.4.1 Allgemeines zur Verbundmodellierung

Für die Modellierung des Verbundes nachträglich aufgeklebter Lamellen zur Verstärkung vorhandener Stahlbetonbauteile existieren in der Literatur zahlreiche Untersuchungen (z. B. HANKERS [39], HOLZENKÄMPFER [44], KAISER [48], NEUBAUER [66], NIEDERMEIER [67], PICHLER [78], RANISCH [82], ULAGA [100], ULAGA [100], SCHILDE [91], ZEHETMAIER [111], ZILCH & NIEDERMEIER [114]). Eine Übersicht über die Entwicklung der Bemessung für Klebeverstärkungen wird in KLEES [49] gegeben. Im Allgemeinen basieren diese Modellvorstellungen darauf, dass zwei *Fügeteile* (Altbeton und Klebelamelle) durch eine Interfaceschicht (Kleber) miteinander verbunden sind (Bild 2.13, b). Diese Modellvorstellung stammt ursprünglich aus dem Stahlbau und wurde erstmals 1938 von VOLKERSEN [101] für Nietverbindungen eingesetzt, indem die Niete für die Berechnung durch eine fiktive Verbindungsschicht, welche die elastischen Eigenschaften der Niete besitzt, ersetzt wurden. Dies ermöglichte eine stetige und somit mathematisch einfach ausdrückbare Modellierung für die Verbundberechnung.

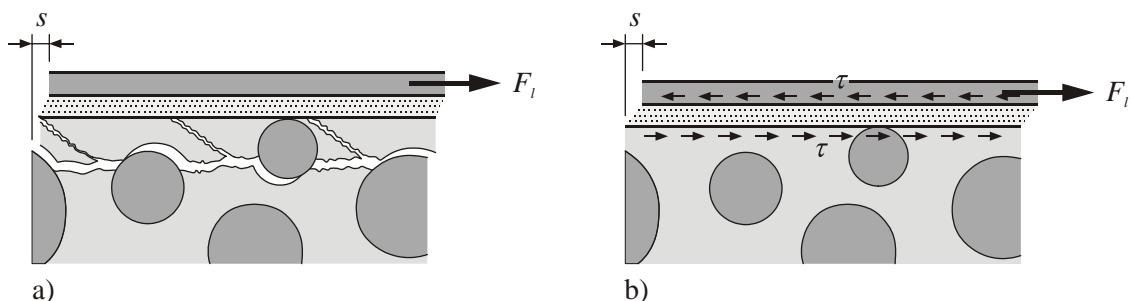


Bild 2.13 Verbund bei Klebelamellen: a) tatsächliche Verformung, b) Idealisierung

Diese Modellierungsidee wurde später auch für die Behandlung von Verbundfragen bei Klebeverbindungen eingesetzt. Sie ermöglicht eine Idealisierung des Verlaufs der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung, so dass eine analytische Berechnung mit einfachen mathematischen Funktionen gelingt. An Stelle einer expliziten Betrachtung der mechanischen Wir-

kungsweise des Verbundes wie z. B. der Verformungen der einzelnen Verbundkomponenten wird dabei üblicherweise mit gedachten Schubspannungen parallel zur Verbundfuge gearbeitet (Bild 2.13, b). Es wird also angenommen, dass entlang der Klebefuge zwischen Altbeton und Lamelle *Verbundschubspannungen* wirken, die die Übertragung von Kräften zwischen der externen Lamellenbewehrung und dem Beton ermöglichen. Dabei wird idealisiert davon ausgegangen, dass sich *Relativverschiebungen* (= Schlupf s) nur in der Klebefuge zwischen der Lamelle und dem Beton einstellen (Bild 2.13). Das Freikörperbild im Bild 2.14 zeigt die wichtigsten Annahmen, bezüglich der Kinematik und der wirkenden Spannungen eines mit Klebelamellen bewehrten Zuggliedes.

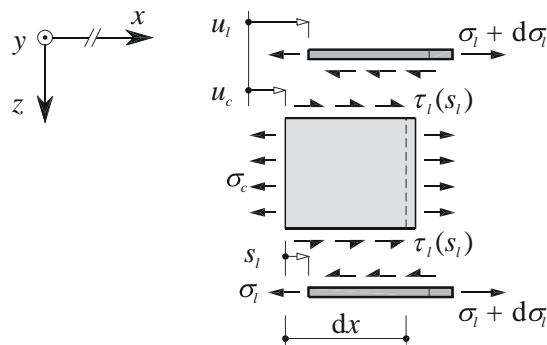


Bild 2.14 Idealisierung der Verbundtragwirkung mittels Verbundschubspannungen bei Klebelamellen aus ULAGA [100]

Die Verbundpartner Beton und Lamelle werden gedanklich getrennt. Um das Gleichgewicht zu wahren, wird die Verbundschubspannung τ_l eingeführt. Diese Schubspannungen entsprechen der lamellenparallelen Komponente der schrägen Druckstreben im Stabwerkmodell (vgl. Abschnitt 9.4.3, Bild 9.5). In Längsrichtung sind Beton und Lamelle um den Betrag des Schlupfes s_l verschoben, wobei die Querschnittsflächen beider Verbundpartner eben bleiben. Es wird angenommen, dass sowohl die Dehnungen als auch die Längsspannungen in der Lamelle über den Querschnitt konstant sind. Auf Grund des Schlupfes s_l wird diese Modellierungsart auch als *verschieblicher Verbund* bezeichnet.

2.4.2 Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes

Die für die theoretische Modellierung des Verbundes zwischen Stabstahlbewehrung und Beton empfohlene *Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes* wird im Allgemeinen auf den Verbund zwischen Beton und geklebter Lamellenbewehrung übertragen. In verschiedenen Arbeiten zum Verbund geklebter Lamellen wurde die Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes bereits mehrfach in der Literatur hergeleitet (BRESSON [8], HOLZENKÄMPFER [44], KAISER [48], RANISCH [82], ULAGA [100], ZILCH & NIEDERMEIER [114] u. v. a.). Aus diesem Grund soll hier nur ein kurzer Überblick gegeben werden – auf eine erneute ausführliche Wiederholung der Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet.

Für die Anwendung der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes wird die Zulässigkeit folgender Annahmen vorausgesetzt (HOLZENKÄMPFER [44]):

- lineares Werkstoffverhalten von Beton und Verstärkungslasche,
- Vernachlässigung der Fügeteilbiegung von Beton bzw. Verstärkungslasche und
- gleichförmige Verteilung der Normalspannungen über den gesamten Querschnitt in den Fügeteilen Beton bzw. Verstärkungslasche.

Durch Aufstellen der Gleichgewichtsbedingungen am differentiellen Element (Bild 2.15) ergibt sich die Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes nach Gl. (2.3). Diese beinhaltet zunächst einen allgemeinen Zusammenhang zwischen der Schubspannung τ_l und dem Schlupf s_l in der Klebefuge, der auch als *Schubspannungs-Schlupf-Beziehung* bezeichnet wird.

$$s_l'' - \frac{1 + \alpha_l \cdot \rho_l}{E_l \cdot t_l} \cdot \tau_l(s_l) = 0 \quad (2.3)$$

mit $\alpha_l = \frac{E_l}{E_c}$ Verhältnis der E-Moduli von Lasche und Beton

$\rho_l = \frac{A_l}{A_c}$ Verhältnis der Querschnittsflächen von Lasche und Beton

t_l Laschendicke

$\tau_l(s_l)$ Schubspannung in Abhängigkeit vom Schlupf

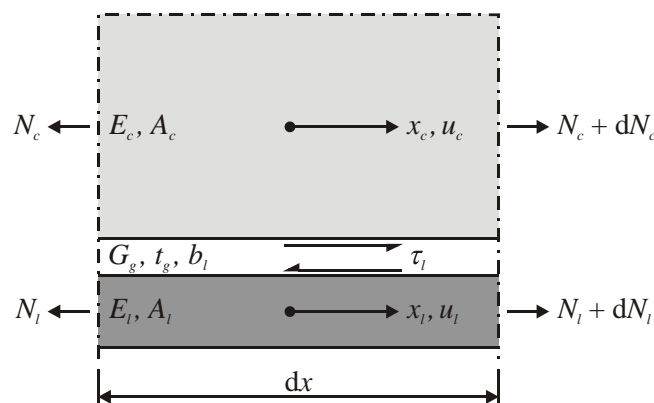


Bild 2.15 Differentielles Stabelement aus HOLZENKÄMPFER [44] – Beton, Klebstoff + Lasche

Die Differentialgleichung (2.3) kann nur für einfache Funktionsansätze $\tau_l(s_l)$ einer Schubspannungs-Schlupf-Beziehung analytisch gelöst werden. Hierzu existieren in der Literatur eine Reihe verschiedener Ansätze. Im Folgenden seien einige solcher Verbundansätze aufgelistet:

- linear-elastischer Ansatz nach BRESSON [8]
- nichtlinearer Ansatz nach PICHLER [78]
- bilinearer Ansatz nach RANISCH [82]

- linear-nichtlinear entfestigender Ansatz nach KAISER [48]
- bilinearer Ansatz nach HOLZENKÄMPFER [44]
- bilinearer Ansatz für mehrfache Belastung nach HANKERS [39]
- Ansatz für ein Zwischenrisselement nach NEUBAUER [66]
- Ansatz für ein Zwischenrisselement nach NIEDERMEIER [67]
- Ansatz für ein Zwischenrisselement mit Rissuferversatz nach SCHILDE [91]

Eine ausführliche Diskussion verschiedener Ansätze für eine Schubspannungs-Schlupf-Beziehung geklebter Lamellen wurde u. a. von ULAGA [100] und SCHILDE [91] angestellt. In der jüngsten Fachliteratur zur Verankerung von Klebeverstärkungen wird zumeist empfohlen, dass der Zusammenhang zwischen dem Schlupf und den Verbundschubspannungen mit einem bilinearen Verbundgesetz beschrieben wird.

2.4.3 Bilinearer Verbundansatz

Bei oben genannten Verbundansätzen handelt es sich genau genommen um Näherungslösungen zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Schlupf und Verbundschubspannungen in der Klebefuge bei nachträglich aufgebrachtene Klebeverstärkungen, welche eine Berechnung der übertragbaren Verbundkräfte mit Hilfe der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes ermöglichen sollen. Das bilineare Verbundgesetz eignet sich dabei besonders gut für die Berechnung von Verankerungsproblemen bei geklebten Lamellen. Da die Aussagekraft einerseits höher ist als bei einem linearen Ansatz, der anzustellende Rechenaufwand zur Auswertung der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes jedoch ungleich geringer ist als bei nichtlinearen Ansätzen, sollte der Wahl eines bilinearen Ansatzes zur Approximation der Schubspannungs-Schlupf-Beziehung in der Klebefuge der Vorzug gegeben werden (ULAGA [100]). Bei geringer Schubbeanspruchung einer geklebten Lamellenverbindung entsteht der Schlupf vor allem durch die elastische Verformung der Klebstoffschicht, so dass hier die Idealisierung durch den ansteigenden Ast des bilinearen Verbundgesetzes gerechtfertigt ist. Nach dem Erreichen einer Festigkeitsgrenze entsteht eine oberflächennahe Rissebene im Altbetonuntergrund. Die Zuschlagkörner des Beton verursachen eine Verzahnung, die weiterhin die Übertragung von Kräften ermöglicht. Es resultiert ein abnehmender Verlauf der übertragbaren Schubkräfte bei zunehmendem Schlupf, der nach ULAGA [100] in guter Näherung dem fallenden Ast des bilinearen Verbundgesetzes entspricht.

2.4.4 Zusammenfassendes zu Klebeverbundgesetzen

Die bisher für die nachträgliche Verstärkung mit Stahllaschen oder CFK-Lamellen entwickelten (Klebe-)verbundgesetze stellen bestimmte Bedingungen an die Materialeigenschaften der einzelnen Komponenten eines Verstärkungssystems. Daher funktionieren sie nur unter gewissen Voraussetzungen (ORTLEPP & CURBACH [75]). Diese seien im Folgenden kurz zusammengefasst:

- Als Grundmodell für den Verbundansatz wird der Klebeverbund vorausgesetzt. Aus einem gewählten Verbundansatz wird durch Lösung der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes das Verbundmodell entwickelt.
- Die Dehnung über den Stahllaschen- bzw. CFK-Lamellenquerschnitt wird als konstant angenommen. D. h. man geht davon aus, dass die Dehnungen an der Ober- und Unterseite der Stahllaschen- bzw. CFK-Lamellen gleich groß sind. Aus den gemessenen Dehnungen wird unter Voraussetzung dieser Annahme eine Verbundspannung berechnet. Weiterhin wird vorausgesetzt, dass der Schlupf einzig und allein in der Klebefuge auftritt, welche als Interface zwischen Altbetonuntergrund und aufgeklebter Verstärkungsschicht wirkt. Diese Annahme kann damit begründet werden, dass die E-Moduli der Stahllaschen bzw. CFK-Lamellen weitaus höher liegen als die E-Moduli der Kleberschicht. Somit wird sich die Kleberschicht bei Belastung wesentlich mehr verformen als die Stahllasche bzw. CFK-Lamelle.
- Die Berechnung von Verbundspannungen aus den gemessenen Dehnungen erfolgt mittels Differenzenverfahren (siehe Abschnitt 7.3.1). Dieses setzt voraus, dass der Verlauf der Dehnungen über die Laschenlänge monoton steigend ist, da nur über eine Differenz der gemessenen Dehnungen mit der zugehörigen (linearen) Spannungs-Dehnungs-Beziehung für das Verstärkungsmaterial Schubspannungen berechnet werden können.

Es bleibt festzuhalten, dass es sich bei den oben genannten Verbundmodellen für nachträgliche Verstärkungen grundsätzlich um Klebeverbundgesetze mit der Annahme von Schlupf in der Klebefuge handelt. Die Übertragbarkeit auf Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton ist aufgrund der getroffenen Annahmen zu prüfen.

2.5 Verbundmodelle für Verbund zwischen altem und neuem Beton

Die im Abschnitt 2.3 beschriebenen gängigen experimentellen Untersuchungen zum Thema Verbund zwischen altem und neuem Beton fokussieren i. Allg. auf die Wirkung von Reibungskräften bei der Schubübertragung in der Verbundfuge. Zur Modellierung der sogenannten *Rissverzahnung* existiert eine Vielzahl von Forschungsarbeiten – beispielsweise von NISSEN [68], REINEKE [83], WALRAVEN [103], WALRAVEN & REINHARDT [104]. Gängige Modellvorstellungen wie z. B. das Kugelmodell nach WALRAVEN [103] basieren auf einem Reibverbund mit Schubspannungen parallel und Druckspannungen senkrecht zur Verbundfuge (siehe Gl. (2.4)). Die Coulombsche Reibungshypothese bildet auch die Grundlage für die Bemessungsempfehlung für die Schubübertragung zwischen Neu- und Altbeton nach RANDL [79], RANDL, MÜNGER & WICKE [80], RANDL & WICKE [81].

$$\tau = \sigma_{pu} \cdot (A_z + \mu \cdot A_x) \quad \text{und} \quad \sigma = \sigma_{pu} \cdot (A_z - \mu \cdot A_x) \quad (2.4)$$

mit σ_{pu} Fließspannung der Zementmatrix
 $A_{x,z}$ projizierte Kontaktflächen der Kugeln

Die Beschreibung der Schubübertragung mittels Coulombscher Reibung funktioniert allerdings nur unter der Voraussetzung, dass eine Druckkraft senkrecht zur schubübertragenden Verbindungsfuge existiert. Dies ist jedoch bei der Verankerung einer textilbewehrten Verstärkungsschicht, insbesondere einer Querkraftverstärkung von Plattenbalken (vgl. Abschnitt 1.1, Bild 1.2, rechts) nicht der Fall. Aus diesem Grund sind o. g. Versuche zur Schubübertragung in Alt-Neubetonfugen sowie die darauf aufbauenden modellhaften Beschreibungen unter Zugrundelegung des Reibverbundes zur Klärung dieses Detailpunktes nicht geeignet.

Die Übertragung reiner Schubkräfte ohne Einwirkung einer zusätzlichen äußeren Druckkraft kann demnach mit der Modellvorstellung des Reibverbundes nicht erklärt werden. Sie basiert vielmehr auf unterschiedlichen Haftwirkungen wie beispielsweise einem Verzahnungseffekt (vgl. Abschnitt 2.3). Zur Beschreibung solcher Haftwirkungen existieren eine Reihe von Modellen, von denen nach MÜLLER [63] keines zur vollständigen Erklärung des Verbundes geeignet ist. Im Gegensatz zu bisherigen Normungsansätzen der älteren Fassung der DIN 1045 [26] wird in der „neuen“ DIN 1045-1 [27] der Traganteil infolge Haftwirkungen beim Schubnachweis von Fugen mit berücksichtigt, so dass Verbindungsfugen auch ohne kreuzende Bewehrung erlaubt sind. Die Größe der aufnehmbaren Schubkraft in solchen unbewehrten Fugen hängt von der Beschaffenheit der Altbetonoberfläche und der Betonfestigkeit ab, wobei die Oberflächenrauheit durch den Beiwert β_{ct} berücksichtigt wird, der im DAfStb Heft 525 [24] näher spezifiziert wird.

Nachweise zur Schubspannungsübertragung in Beton-Beton-Verbundfugen basieren auf aus Versuchen abgeleiteten Bruchschubspannungen in Abhängigkeit von bestimmten Oberflächengeometrien der Verbundfuge. So ermittelten z. B. ZILCH & MAINZ [112] Grenzwerte der Schubspannungen in aufgerauten Alt-Neubetonfugen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit. Verformungen der Verbindungsfuge werden zwar messtechnisch erfasst, im Zuge der weiteren Auswertung der Versuchsergebnisse von den Autoren jedoch lediglich zur Rekonstruktion des Ablaufes beim Fugenversagen herangezogen.

Der Frage nach einer Beziehung zwischen Schubspannung und Rissuferverschiebung (auch als Schlupf bezeichnet) in der Verbindungsfuge zwischen altem und neuem Beton wird in der Literatur zum Thema Verbundfugen zwischen altem und neuem Beton nur bei speziellen Untersuchungen zur Rissverzahnung nachgegangen. Solche Untersuchungen wurden beispielsweise von NISSEN [68] oder WALRAVEN [103] durchgeführt und zielen auf die Schubübertragung infolge Reibungswirkung rauer Betonoberflächen in Rissen ab. Zur Beschreibung der Rauigkeit wurden theoretische Oberflächenmodelle wie das Sägezahnmodell und das Kugelmodell entwickelt. Auch RUTH [87] beschränkt sich in seinen theoretischen Untersuchungen zu Grenzflächenbereichen auf die Verwendung des Zahnmodells.

Im Zuge der Erweiterung der DIN 1045-1 [27] auf hochfeste Betone wurden von REINECKE [85] Untersuchungen zum Tragverhalten der Schubfuge zwischen Fertigteilen aus hochfestem Beton und Ortbetonergänzungen aus Normalbeton durchgeführt. Bild 2.16 zeigt den qualitativen Verlauf der Schubspannungen in Abhängigkeit von der Fugenrelativverschiebung für die im Abschnitt 2.3 genannten drei Traganteile Adhäsion, Reibung und Dübelwirkung. Die Untersuchungen unbewehrter Betonschubfugen von REINECKE [83] konzentrieren sich dabei auf die beiden erstgenannten Traganteile. Die Messungen von Rissuferverschiebungen und Rissöffnungen ergab eine Unterteilung der Verschiebungsbereiche zur Differen-

zierung zwischen Haft- und Reibwirkung. REINECKE [83] stellte fest, dass der Scherverbund infolge Haftwirkungen bereits ab einer sehr geringen Relativverschiebung von 2–5 μm versagt, so dass ab diesem Verformungszustand eine weitere Kraftübertragung lediglich durch Reibung über eine Behinderung der Rissöffnung oder einen Anpressdruck auf die Fuge möglich ist.

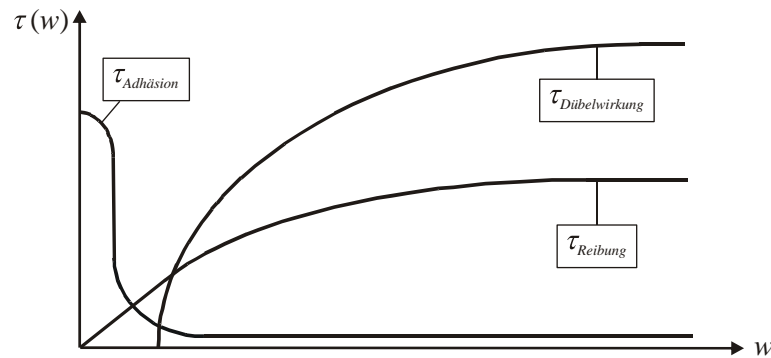


Bild 2.16 Schematische Darstellung des Schubspannungsverlaufs in Abhängigkeit von der Fugenrelativverschiebung nach REINECKE [85]

Eine direkte mechanische Modellbildung zur Bestimmung der Verbundschubkräfte aus Haftwirkung sei nach REINECKE [83] nach dem heutigen Stand der Technik nicht möglich, da die Zusammenhänge der zahlreichen einzelnen Einflussfaktoren weitestgehend unbekannt sind. Die Bestimmung der Verbundschubkräfte infolge Reibung (in der Literatur als *Rissverzahnung* bezeichnet) ist in großem Maße abhängig von der Oberflächenstruktur in der Verbundfuge. REINECKE [83] stellt in einer Parameterstudie fest, dass die theoretischen Modelle von NISSEN [68] oder WALRAVEN [103] die Charakteristika der wahren Oberfläche nicht befriedigend wiedergeben. Die Nutzung eines spekulativen Oberflächenmodells wird generell in Frage gestellt. Statt dessen wird die Verwendung tatsächlich gemessener Oberflächenstrukturen bevorzugt. Für die Erfassung der Kraftübertragung infolge Rissuferverzahnung wurde von REINECKE [83] ein numerisches Verfahren entwickelt, welches verschiedene Verschiebungspfade und Oberflächenrauheiten berücksichtigt.

Die Beziehung zwischen Schubspannung und Relativverschiebung (Schlupf) in der Verbindungsfuge wird jedoch i. Allg. nicht zur Abschätzung von Verankerungslängen nachträglicher Betonverstärkungsschichten herangezogen. Analytische Verbundansätze auf Grundlage einer aus Versuchen hergeleiteten Schubspannungs-Schlupf-Beziehung, wie diese zur Beschreibung des Verbundes von Rippenstahl in Beton oder auch für geklebte Bewehrung verwendet wird, sind bei der Modellierung von Beton-Beton-Verbunden offenbar nicht üblich. Ähnlich verhält es sich mit der Frage nach der erforderlichen Verankerungslänge einer Verstärkungsschicht aus bewehrtem Beton am Altbetonuntergrund ohne Anordnung von Verbunddübeln. In der gesichteten Literatur zum Thema Beton-Beton-Verbund konnte auf diese Frage keine Antwort gefunden werden. Offenbar liegt dies auch in der von REINECKE [83] gemachten Feststellung begründet, dass die Modellierung der Verbundschubkräfte infolge Haftwirkungen derzeit nahezu unmöglich scheint. Zur Sicherstellung der Kraftübertragung schreibt die Spritzbetonnorm DIN 18551 [29] beispielsweise für die Spritzbetonverstärkung von Stahlbetonbalken grundsätzlich die konstruktive Anordnung von Verbunddübeln vor.

Zusätzlich zu der u. a. von REINECKE [83] untersuchten reinen Schubbeanspruchung in der Verbindungsfuge werden Endverankerungsbereiche einer äußeren Verstärkung infolge der Zugkraftumlenkung auch durch Haftzugkräfte senkrecht zur Verbundfuge zum Altbetonuntergrund beansprucht. Die Wirkung solcher Haftzugkräfte wird i. d. R. von der Wirkung einer Scherbeanspruchung der Fuge getrennt untersucht. Experimentelle Haftzuguntersuchungen wie z. B. von MOMAYEZ ET AL. [62], SCHÄFER, BLOCK & DRELL [89], SCHULZ [95] und WINKLER & GRUNER [106] zielen i. Allg. auf den Einfluss unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheiten des Altbetonuntergrundes oder die Wirkung von Verbundmitteln auf die über die Verbundfuge übertragbaren Haftzugspannungen ab. In den Normen und Richtlinien finden sich zumeist nur pauschale Angaben bezüglich eines Mindestwertes der Haftzugfestigkeit des Untergrundes. Die ZTV-ING [13] schreibt beispielsweise einen Mindestwert von $1,5 \text{ N/mm}^2$ für einen Beschichtungsuntergrund vor. Selbiger Wert wird von der DIN 18551 [29] für den Untergrund einer Spritzbetonverstärkung gefordert. Die ausreichende Tragfähigkeit des Untergrundmaterials ist in der Praxis vor Ort mittels Haftzugprüfungen nachzuweisen. Analytische Berechnungsmodelle für die Bestimmung der Oberflächenzugfestigkeit beispielsweise in Abhängigkeit von der Rauigkeit sind in den einschlägigen Normen und Richtlinien nicht zu finden.

Obwohl eine umfangreiche Literatur zum Thema Beton-Beton-Verbund existiert, ist die im Endverankerungsbereich einer äußeren Verstärkung aus bewehrtem Beton vorherrschende kombinierte Beanspruchung aus Scher- und Haftzugspannungen nur in recht geringem Umfang untersucht worden. Beispielhaft seien MENN ET AL. [58] genannt, die Versuche zur Verbundwirkung an mit Stahlbeton verstärkten Biegebalken durchführten. Interessante Ergebnisse dieser Untersuchungen sind zum einen die Feststellung, dass die Verbundfestigkeit aus Kohäsion (d. h. ohne Verbunddübel) unabhängig von der Stärke der Aufrauung des Altbetonuntergrundes ist und zum anderen die Angabe einer Verbundfestigkeit aus Kohäsion für einen Beton B35/25 (nach Schweizer Norm) von ca. 2 N/mm^2 . Weitere Feststellungen betreffen die Wirkung von Verbunddübeln. Modellierungsansätze für die Ermittlung der Beanspruchbarkeit der Verbundfuge werden nicht gegeben. Die abgeleiteten Folgerungen sind nach Angaben der Autoren lediglich „als Ansätze für die Ausarbeitung theoretischer Grundlagen aufzufassen“ (MENN ET AL. [58]).

2.6 Verstärkung mit textilbewehrtem Feinbeton

Textilbewehrter Beton zur Verstärkung von Betonbauteilen ist genau genommen eine Weiterentwicklung der altbekannten Spritzbetonverstärkung. Es handelt sich hierbei ebenfalls um ein Verstärkungsmaterial aus bewehrtem Beton, wobei als Matrix ein Feinbeton mit einem niedrigen Größtkorndurchmesser zum Einsatz kommt (Bild 2.17). Textilbewehrter Beton bietet gegenüber Spritzbeton einige Besonderheiten und Vorteile. Da statt der bei Spritzbeton üblichen Stahlbewehrung textile Strukturen aus nichtrostendem Fasermaterial zum Einsatz kommen, entfällt die erforderliche Betonüberdeckung der Bewehrung zur Gewährleistung des Korrosionsschutzes. Aus diesem Grund können die Verstärkungsschichten im Vergleich zu Spritzbeton extrem dünn ausgeführt werden. Somit ist die Querschnittsvergrößerung infolge der Verstärkungsschicht erheblich kleiner.

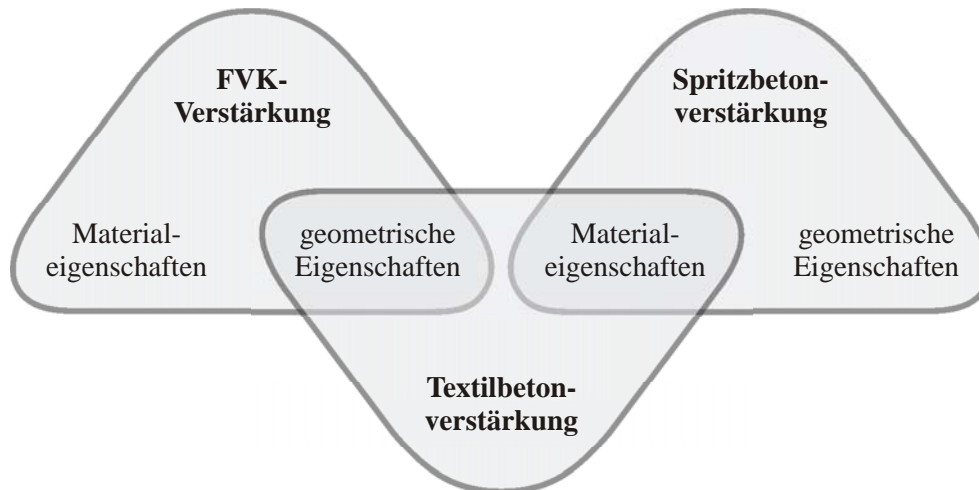


Bild 2.17 Einordnung der Textilbetonverstärkung in bisher bekannte Bauweisen

Die im Gegensatz zu Spritzbeton relativ geringe Dicke von textilbewehrten Betonverstärkungsschichten verleitet zum Vergleich mit der ebenfalls gebräuchlichen Methode der Klebeverstärkung mit Lamellen aus Stahl oder aus faserverstärktem Kunststoff. Hierbei handelt es jedoch lediglich um geometrische Ähnlichkeiten (Bild 2.17). Was die Materialeigenschaften betrifft, könnten die Gegensätze zwischen den Klebelamellen und textilbewehrtem Beton kaum größer sein. Während faserverstärkte Kunststofflamellen, sog. GFK- oder CFK-Lamellen, ein linear-elastisches Verhalten aufweisen, verhält sich der textilbewehrte Beton stark nichtlinear. Das Verhalten des textilbewehrten Betons unter einaxialer Zugbelastung ist geprägt von der Rissbildung und des damit einhergehenden Übergangs vom Zustand I in den Zustand II, wie dies auch bei Stahlbetonzuggliedern der Fall ist. Lediglich der Zustand III entfällt bei textilbewehrtem Beton, da ein Fließen der Bewehrung bei üblichen Fasermaterialien in den Bewehrungstextilien nicht auftritt. Umfangreiche Untersuchungen zum Verhalten textilbewehrten Betons unter einaxialer Zugbelastung wurden von z. B. JESSE [45] und MOLTER [61] durchgeführt. Im Abschnitt 3.3 wird hierauf noch einmal spezieller eingegangen.

Die Vergleichbarkeit von Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton mit Klebeverstärkungen aus Stahl- oder CFK ist somit durchaus in Frage zu stellen. Auch mit den geometrischen Ähnlichkeiten zwischen diesen Materialien sollte sehr zurückhaltend umgegangen werden. Textilbewehrte Feinbetonverstärkungsschichten lassen sich, in Abhängigkeit vom erforderlichen Bewehrungsgrad, mit Schichtdicken von 1–2 cm herstellen, was gegenüber einer Spritzbetonverstärkungsschicht extrem dünn ist. Betrachtet man jedoch die Dicken üblicher Klebelamellen, so ist festzustellen, dass die Schichtdicken bei Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton gegenüber geklebten Bewehrungen recht groß sind. Stahllamellen kommen mit einer Dicke von durchschnittlich 5 mm zum Einsatz (HOLZENKÄMPFER [44]). Die heutzutage üblichen Klebeverstärkungen aus CFK werden in noch geringeren Dicken hergestellt. Übliche CFK-Lamellen haben eine durchschnittliche Dicke von 1–2 mm und die vorlaminierten Gelege (CFK-Sheets) sind sogar nur ca. 0,1–0,3 mm dick (BLASCHKO [7]). Hier wird sichtbar, dass sich die Schichtdicken von textilbewehrtem Beton um Größenordnungen von denen bei CFK-Verstärkungen unterscheiden. Des Weiteren zeichnet sich die

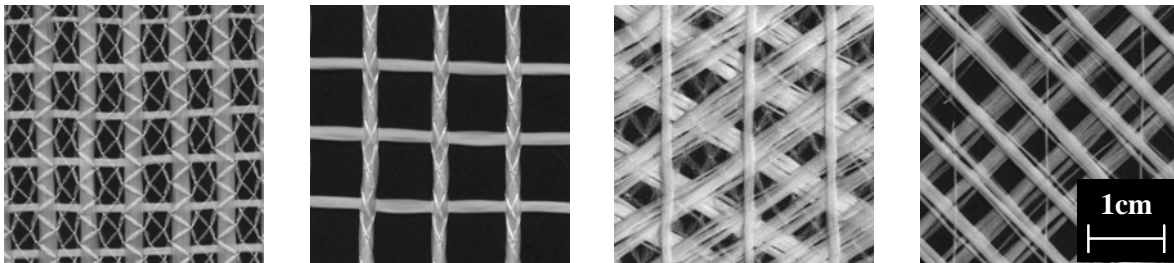
Verbindung des textilbewehrten Betons zum Altbetonuntergrund infolge der direkten Aufbringung ohne Kleber durch einen starken Formschluss aus.

Aufgrund der völlig anderen Materialeigenschaften und der ebenfalls abweichenden geometrischen Verhältnisse, sowohl von Klebeverstärkungen als auch von der Spritzbetonverstärkung, ist es erforderlich, für Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton neue, eigenständige Ansätze zur Beschreibung des Verbundverhaltens im Verankerungsbereich zu entwickeln. Verschiedene Möglichkeiten hierzu werden im Kapitel 9 vorgestellt.

3 Materialeigenschaften der Verbundpartner Textilbeton und Altbetonuntergrund

3.1 Fasern und Textilien

Im Rahmen dieser Arbeit kamen Multifilamentgarne aus alkaliresistentem Glas (AR-Glas) in Form textiler Bewehrungsstrukturen zum Einsatz. Bei einem Multifilamentgarn handelt es sich, wie der Name schon impliziert, um ein Bündel aus mehreren hundert bis tausend einzelnen Filamenten mit sehr kleinem Durchmesser von wenigen Mikrometern. Die textile Verarbeitung der Multifilamentgarne zu flächigen Strukturen ermöglicht die Herstellung von beanspruchungsgerechten Bewehrungsstrukturen für Betonbauteile (Bild 3.1).



a) biaxiale Bewehrungsstrukturen zur Biegeverstärkung

b) multi-axiale Bewehrungsstrukturen zur Querkraft- und Torsionsverstärkung

Bild 3.1 Beispiele textiler Bewehrungsstrukturen aus AR-Glas

Textile Gelegestrukturen entstehen durch lagenweises Übereinanderlegen paralleler (uniaxialer) Filamentgarnscharen in zwei oder mehr Ebenen in jeweils unterschiedlicher Richtung (bi- oder multi-axial) in der Nähwirkmaschine. Die multi-axial verlaufenden Filamentgarnscharen werden durch einen Nähfaden miteinander zur Gelegestruktur verbunden. Dabei können unterschiedliche Bindungsarten zum Einsatz kommen (Bild 3.2). Mit Hilfe der Multi-axialtechnik können in der an der TU Dresden vorhandenen Maschine vom Typ Malimo bis zu vier Lagen Fasern mit unterschiedlicher Orientierung übereinandergelegt und anschließend verbunden werden. Der Vorteil dieser gegenüber der bekannten Webtechnik ist die Anpassbarkeit an nahezu beliebige Winkel und die gestreckte Fadenlage.

Eine Übersicht über die Eigenschaften der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten textilen Gelege und der darin verarbeiteten Fasermaterialien findet sich im Anhang A 1.2.

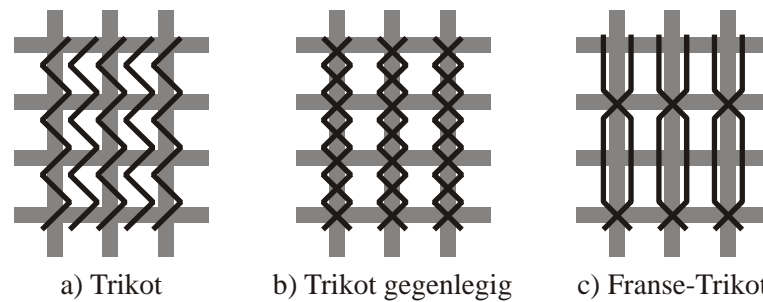


Bild 3.2 Verschiedene Nähfadenbindungsarten nähgewirkter textiler Gelegestrukturen aus OFFERMANN ET AL. [69]

3.2 Feinbeton

Für die Herstellung der Textilbetonverstärkungsschicht wurde die im SFB 528 in Dresden entwickelte Feinbetonrezeptur wie auch für die experimentellen Untersuchungen von JESSE [45] verwendet. Diese gleicht in ihren Bestandteilen Zuschlag, Bindemittel, Zusatzstoffe, Zusatzmittel und Wasser zunächst einem üblichen Beton. Wesentlicher Unterschied sind das verwendete Größtkorn von nur 1 mm gegenüber einem „normalen“ Größtkorn von 32 mm und der hohe Bindemittelanteil. Somit liegt eher die Bezeichnung als „Zementmörtel“ nahe. Aufgrund der Anwendung als Konstruktionswerkstoff und der Zusammensetzung beschreibt der Begriff „Beton“ die Funktion jedoch zutreffender (JESSE [45]). Die Besonderheit des geringen Größtkorndurchmessers wird durch den Zusatz „Fein-“ hervorgehoben und kennzeichnet den wesentlichen Unterschied gegenüber üblichen Betonen.

Die Rezeptur des Feinbetons und eine Übersicht über die wichtigsten mechanischen Eigenschaften findet sich im Anhang A 1.1. Details zur Mischungsentwicklung können bei CURBACH & JESSE [19] nachgelesen werden.

3.3 Verbundwerkstoff textilbewehrter Feinbeton

3.3.1 Vorbemerkungen

Bei textilbewehrtem Beton handelt es sich um einen Verbundwerkstoff, welcher aus den beiden Komponenten Matrix und Bewehrung besteht. Als Matrix kommt ein geeignet zusammengesetzter (Fein-)Beton zur Anwendung (vgl. Abschnitt 3.2) und als Bewehrung flächige textile Gelegestrukturen (vgl. Abschnitt 3.1). Weil die mehreren hundert bis tausend Filamente innerhalb eines Garnes der textilen Strukturen untereinander über Verbundkräfte in Kontakt stehen ist der Werkstoff Textilbeton nach JESSE [45] genau genommen ein Verbundwerkstoff im Verbundwerkstoff und somit ein äußerst komplexer Werkstoff.

Aus diesem Grund gibt es eine Vielzahl von Faktoren, die Einfluss auf das Tragverhalten des textilbewehrten Betons haben. Auf umfangreiche experimentelle Untersuchungen von JESSE [45] und MOLTER [61] zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton sei an dieser Stelle verwiesen. Ergebnis der im Jahr 2004 veröffentlichten Untersuchungen von JESSE ist „eine Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Linie auf empirischer Basis ... Zum gegenwärtigen

Zeitpunkt scheint es aufgrund der vorliegenden Informationen noch sehr schwierig, ein theoretisches Modell zu entwickeln, dass alle Einflussgrößen angemessen berücksichtigt. Zu einem späteren Zeitpunkt müssen für den täglichen Gebrauch in der Praxis einfach handhabbare Bemessungshilfen ausgearbeitet werden. Das ist Voraussetzung für eine breite Anwendung in der Praxis“ (JESSE [45]). Einen Überblick zum aktuellen Stand des Wissens über den Werkstoff Textilbeton gibt BRAMESHUBER [4].

Informationen zum Tragverhalten der Verstärkungsschicht aus textilbewehrtem Beton spielen eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung entsprechend neuer Modelle und Bemessungsregeln für die Dimensionierung einer Verstärkungsschicht für Stahlbetonbauteile oder auch die Endverankerung der Verstärkungsschicht am bestehenden Bauteil. JESSE [45] schreibt bezüglich des Werkstoffes Textilbeton: „Die Tragfähigkeit im Bruchzustand ist von besonderem Interesse für die praktische Anwendung. Die Festigkeiten der verschiedenen untersuchten Fasern überstreichen einen relativ großen Wertebereich ... Unabhängig davon ist der Versagensmechanismus bisher erst ansatzweise verstanden worden. Es ist noch nicht gelungen, die Bedeutung der verschiedenen Einflussfaktoren und ihre gegenseitige Beeinflussung in einem Modell darzustellen ... Solange ist ein Rückgriff auf die Nachrechnung vorliegender Versuchsergebnisse notwendig“ (JESSE [45]).

Auf Grund des noch lückenhaften Wissensstandes über den Werkstoff Textilbeton an sich ergibt sich als Folge eine noch größere Unsicherheit bei der Erforschung textilbetonverstärkter Stahlbetonbauteile, bei denen der an sich schon komplizierte Verbundwerkstoff Textilbeton lediglich eine Komponente des gesamten Verbundbauteiles darstellt (BRÜCKNER, ORTLEPP & CURBACH [9], [10], BRÜCKNER ET AL. [11], [12], CURBACH & BRÜCKNER [18], STRITZKE ET AL. [99]). Das betrifft in analoger Weise die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen zum Verbundtragverhalten einer Textilbetonverstärkungsschicht auf dem Untergrund aus Altbeton, da diese u. a. auf den vorhandenen Kenntnissen zum Materialverhalten der Verstärkungsschicht aufbauen.

3.3.2 Spannungs-Dehnungs-Linie für einaxiale Zugbelastung

An dieser Stelle soll keine vollständige Wiederholung der von JESSE [45] und MOLTER [61] durchgeführten Untersuchungen erfolgen; vielmehr soll ein Überblick der wichtigsten das Verbundtragverhalten beeinflussenden Eigenschaften des Werkstoffes Textilbeton gegeben werden.

Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von textilbewehrtem Beton ähnelt stark dem nichtlinearen Verhalten von Stahlbeton. Unter einaxialer Zugbelastung lassen sich am Dehnkörper drei typische Bereiche unterscheiden (Bild 3.3). In dem als Zustand I bezeichneten Bereich ist der Beton noch ungerissen und die Steifigkeit des textilbewehrten Betons entspricht näherungsweise der des unbewehrten Betons. Nach dem Überschreiten der Zugfestigkeit des Betons gehen die Versuchskörper in den Zustand IIa über. Dieser charakterisiert die stattfindende mehrfache Rissbildung. In diesem Bereich verläuft die Spannungs-Dehnungs-Linie mit einer sehr geringen Steigung. Nach Abschluss der Rissbildung erfolgt der Übergang in den Zustand IIb. Dieser charakterisiert den Zustand der abgeschlossenen Rissbildung. Die Steifigkeit steigt wieder an und die Spannungs-Dehnungs-Linie verläuft annähernd linear bis zum

Bruch. Ein Zustand III wie bei Stahlbeton kann bei den bei den für textilbewehrten Beton verwendeten Materialien AR-Glas oder Kohlefasern nicht auftreten. Aus diesem Grund handelt es sich beim Zugbruch von textilbewehrtem Beton um ein plötzliches, sprödes Versagen.

Der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie kann nach JESSE [45] mittels dreier linearer Funktionen in der Form $\sigma = m \cdot \varepsilon + n$ für die Zustände I, IIa und IIb approximiert werden (Bild 3.4). Der Anstieg m_{IIb} der Spannungs-Dehnungs-Linie nach abgeschlossener Rissbildung entspricht der Tragfähigkeit der Kernfilamente der als Bewehrung verwendeten Multifilamentgarne, da die Randfilamente bereits während der mehrfachen Rissbildung versagen. Der Anteil der wirksamer Filamente (Kernfilamente) eines Multifilamentgarnes wird durch den „Bündelfaktor“ k_B beschrieben. Dieser variiert jedoch in Abhängigkeit von der verwendeten textilen Bewehrungsstruktur.

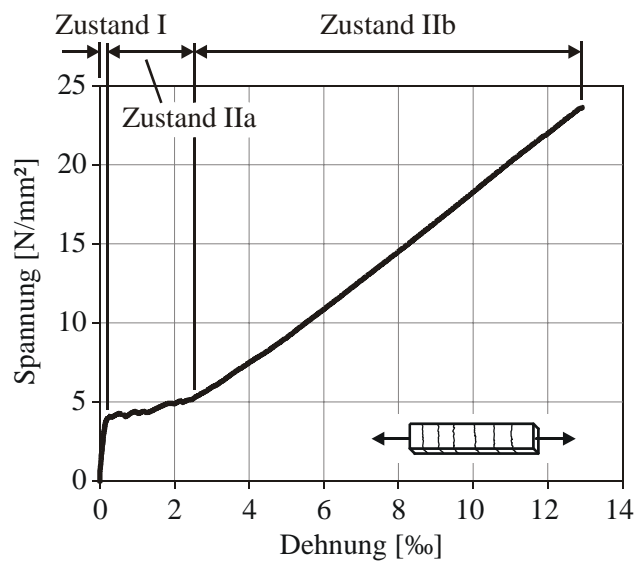


Bild 3.3 Spannungs-Dehnungs-Linie für Textilbeton

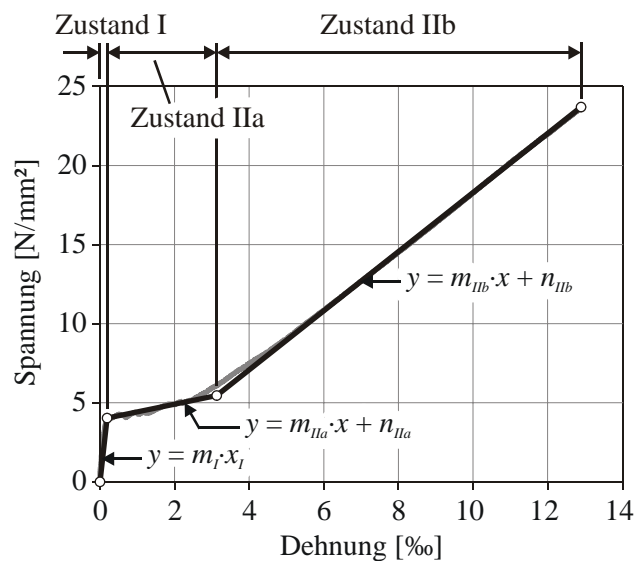


Bild 3.4 Trilineare Approximation der Spannungs-Dehnungs-Linie aus Bild 3.3 nach JESSE [45]

3.3.3 Nichtlinearität und E-Modul

Anhand der im Bild 3.3 dargestellten Spannungs-Dehnungs-Linie ist deutlich zu erkennen, dass es sich beim textilbewehrten Beton um einen stark nichtlinearen Werkstoff handelt. Eine einfache Beschreibung der Spannung aus der Dehnung mittels eines konstanten E-Moduls nach Gl. (3.1) ist daher nicht mehr möglich. Das Verhältnis zwischen Spannung und Dehnung – im linearen Bereich als E-Modul definiert – ist beim textilbewehrten Beton abhängig von der Dehnung (Bild 3.5). Wenngleich der Begriff E-Modul an dieser Stelle eigentlich nicht mehr gültig ist, da der elastische Bereich verlassen wird, wird dieser im Folgenden der Einfachheit halber im Sinne eines Sekantenmoduls durch den Ursprung der Spannungs-Dehnungs-Linie verwendet. Berücksichtigt man nun die im Bild 3.5 gezeigte Dehnungsabhängigkeit des „E-Moduls“, ergibt sich eine erweiterte Spannungs-Dehnungs-Beziehung nach Gl. (3.2).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

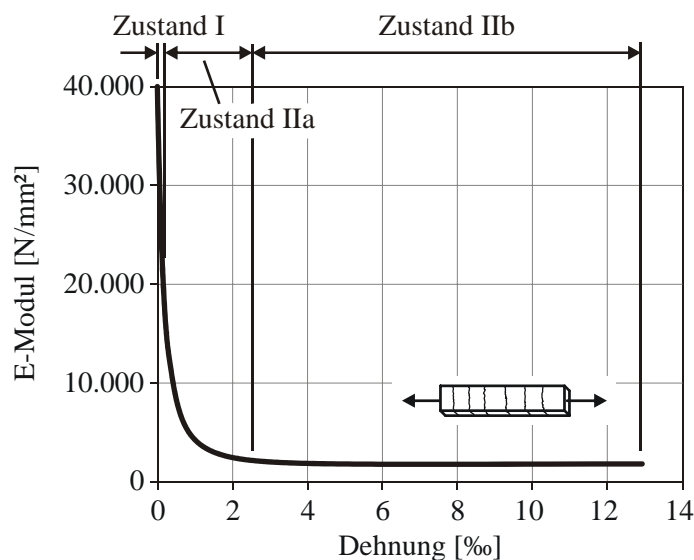


Bild 3.5 nichtlinearer Verlauf des „E-Moduls“ der Spannungs-Dehnungs-Linie aus Bild 3.3

$$\sigma = E(\varepsilon) \cdot \varepsilon \quad (3.2)$$

Die von JESSE [45] vorgeschlagene trilineare Approximation der nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeit erlaubt eine mathematische Beschreibung nach Gl. (3.3), wobei die Parameter m_i und n_i für die drei Zustände I, IIa und IIb für jedes Bewehrungstextil und jeden Bewehrungsgrad extra im Dehnkörperversuch zu ermitteln sind. Feste Rechengrößen für die Spannungs-Dehnungs-Linie von Textilbeton lagen nach JESSE [45] zum damaligen Stand des Wissens nicht vor, wohingegen MOLTER [61] für bestimmte Randbedingungen bereits erste Vorschläge für Berechnungsformeln für verschiedene Fasermaterialien angibt.

$$\sigma = \begin{cases} m_I \cdot \varepsilon \\ m_{IIa} \cdot \varepsilon + n_{IIa} \\ m_{IIb} \cdot \varepsilon + n_{IIb} \end{cases} \text{ für } \begin{cases} \text{Zustand I} \\ \text{Zustand IIa} \\ \text{Zustand IIb} \end{cases} \quad (3.3)$$

3.3.4 Rissbildung

Bei der Beurteilung des Tragverhaltens von textilbewehrtem Beton spielt die Rissbildung eine entscheidende Rolle. Infolge dieser Rissbildung zeigt der textilbewehrte Beton ein ausgeprägtes anisotropes und nichtlineares Verhalten (vgl. Abschnitte 3.3.2 und 3.3.3). Dabei stellen sich nach der Theorie von OHNO [71] unterschiedliche Dehnungen innerhalb der Filamentgarne und in der Feinbetonmatrix ein. Wie Bild 3.6 zeigt, entstehen die Risse in Belastungsrichtung (Koordinate x) in zufälligem Abstand. Der Anstieg der dargestellten Kurven gibt dabei die Verbundwirkung an. Sobald zwischen zwei Rissen die Matrixbruchdehnung erreicht wird, entsteht ein neuer Riss. Die Rissbildung schreitet solange fort, bis die Matrixbruchdehnung an keiner Stelle mehr überschritten wird (abgeschlossenes Rissbild). Der gekennzeichnete mittlere Rissabstand entspricht dem Durchschnittswert aller Rissabstände in x -Richtung am abgeschlossenen Rissbild.

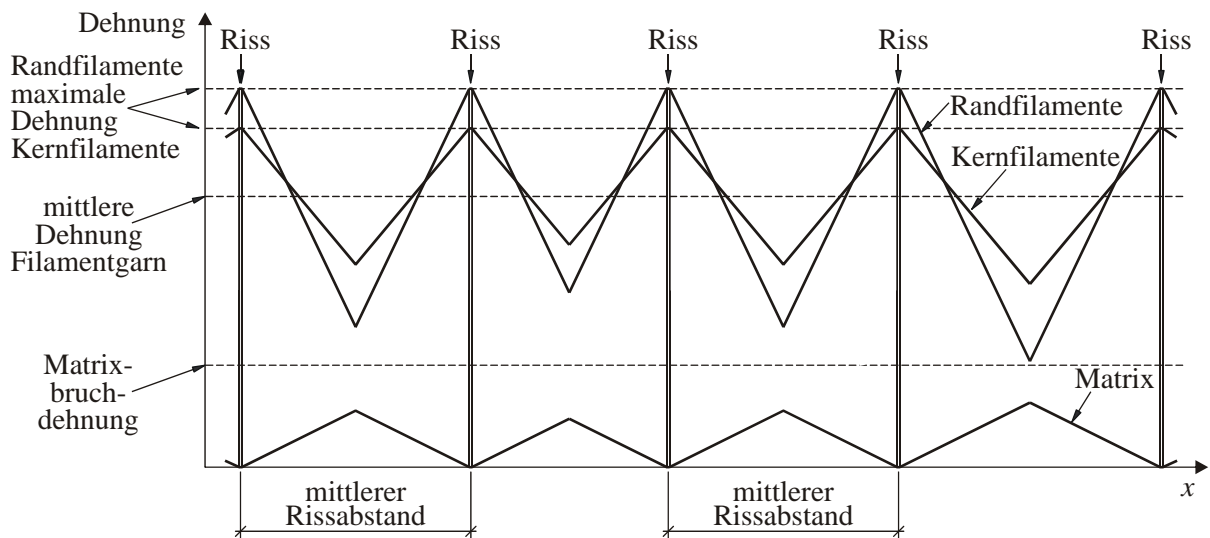


Bild 3.6 Dehnungsverteilung unter einaxialer Zugbelastung nach der Theorie von OHNO [71]

Die einzelnen Risse stellen Diskontinuitäten im Verformungsbild entlang der x -Achse dar. An der Stelle eines Risses ändert sich die Relativverschiebung infolge der Rissbreite sprunghaft, während im Bereich zwischen den Rissen wegen der geringen Matrixdehnung kaum Relativverschiebungen entstehen (Bild 3.7). Damit ist bei der Ermittlung der Dehnung die Länge der Messbasis von entscheidender Bedeutung. Wegen des großen Einflusses der Rissbreiten auf die Gesamtverformung ist eine Messung der mittleren Dehnung unter konstanter Zugbelastung nur über eine relativ große Probekörperlänge sinnvoll.

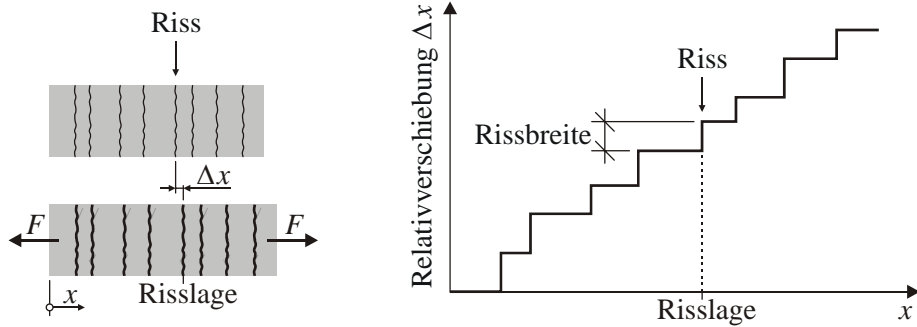


Bild 3.7 Relativverschiebungen unter einaxialer Zugbelastung infolge der Rissbildung, schematisch

Bei der Verwendung textiler Bewehrungsstrukturen ist weiterhin festzustellen, dass die Rissbildung sehr stark durch die Querfäden beeinflusst wird (Bild 3.8). Die aus den Querfäden resultierende Querschnittsschwächung setzt das Lastniveau der Erstrissspannung herab und führt zum Dominieren der sog. primären Rissbildung (JESSE [45]). Bild 3.9 zeigt das entstandene Rissbild mit Kennzeichnung der Lage der Querfäden in einem Ausschnitt der freien Laschenlänge eines Schubprobekörpers. Die deutlich sichtbar gemachten Risse verlaufen parallel und in gleichem Abstand wie die Querfäden der eingebauten Bewehrung.

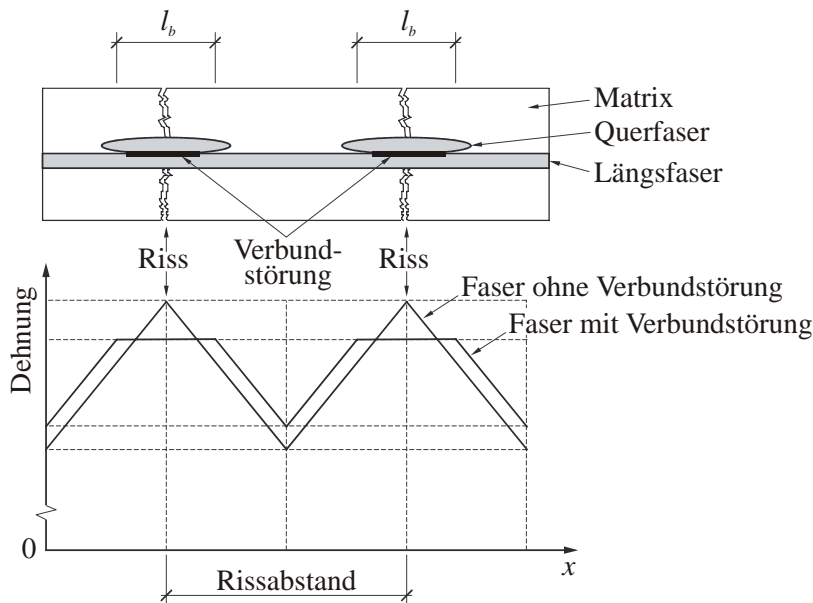


Bild 3.8 Dehnungsverteilung in den Filamentgarnen ohne und mit Verbundstörung aus JESSE [45]

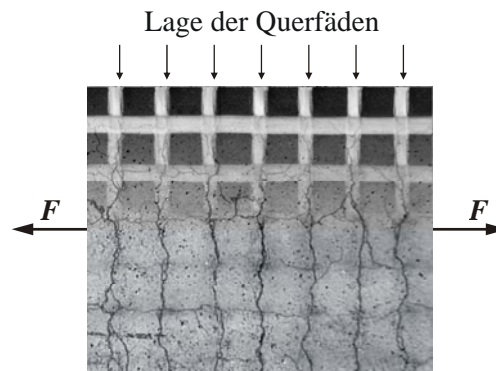


Bild 3.9 Rissbildung einer textilbewehrten Betonprobe unter einaxialer Zugbelastung

3.3.5 Verbundeigenschaften der Textilien in der Feinbetonmatrix

Das Verbundtragverhalten von Multifilamentgarnen in zementgebundener Matrix wurde bereits im Abschnitt 2.1.2 behandelt. Infolge des Schlupfes zwischen den Rand- und Kernfilamenten eines Multifilamentgarnes stellen sich unterschiedliche Dehnungen innerhalb eines solchen Garnes ein (vgl. Bild 2.3). Aufgrund des besseren Verbundes zwischen Randfilamenten und Matrix im Vergleich zum inneren Verbund der Filamente untereinander werden die Randfilamente innerhalb des Filamentgarnes am stärksten beansprucht, was zu einem Versagen der Randfilamente während der Rissbildung führt (JESSE [45]).

Der Schlupf innerhalb der Filamentgarne ist ebenfalls von großer Bedeutung bei der Endverankerung einer textilbewehrten Verstärkungsschicht an einem Stahlbetonbauteil. Die erforderliche Verankerungslänge der textilbewehrten Verstärkungsschicht als Ganzes am Altbetonbauteil wird auch durch die benötigte Lasteinleitungslänge zwischen Rand- und Kernfilamenten sowie zwischen Feinbetonmatrix und Randfilamenten bestimmt. Fällt die Lasteinleitungslänge des Filamentgarnes aufgrund schlechter innerer Verbundeigenschaften sehr groß aus, so ergibt sich ebenfalls eine sehr große Verankerungslänge der gesamten Verstärkungsschicht, wenngleich der Verbund in der Fuge zwischen der Verstärkungsschicht und dem Altbetonbauteil nur eine recht kurze Verankerungslänge erfordern würde. Die erforderliche Verankerungslänge der Filamentgarne einer textilen Bewehrung in der Feinbetonmatrix ist stark abhängig vom Garnmaterial und kann mittels Filamentgarnauszugsversuchen für jedes Textil auf versuchstechnischem Wege separat ermittelt werden (siehe Kapitel 8).

Das Verbundtragverhalten von Textilien in der Feinbetonmatrix wird noch durch weitere Randbedingungen beeinflusst. Wie im Abschnitt 3.3.4 beschrieben wurde, führen die im Textil vorhandenen Querfäden zu Verbundstörungen der tragenden Längsfäden des Bewehrungstextils. Diese Verbundstörungen beeinflussen sowohl die Kraftübertragung zwischen der Matrix und den tragenden Filamentgarnen als auch das Rissbild von textilbewehrtem Beton. Nach JESSE [45] resultieren hieraus Schwierigkeiten, bei textiler Bewehrung die Verbundeigenschaften der Bewehrung aus dem Rissbild zu bestimmen. Die aus einem solchen Rissbild ermittelbaren Verbundspannungen oder bezogenen Verbundkräfte beschreiben nicht das Verbundverhalten der Längsbewehrung, weil diese durch die an den Querschnittsschwächungen der Querfäden induzierten Risse verfälscht sind. So ergibt ein kleinerer Rissabstand rechnerisch höhere Verbundspannungen, obwohl offensichtlich ist, dass die Querfäden den

Verbund stören bzw. verringern. JESSE [45] stellte dazu fest: „Die in dieser Arbeit angewandte Methode zur Untersuchung der Verbundeigenschaften über das Rissbild und einfache Modellannahmen ist nicht in der Lage, die Verbundeigenschaften der textilen Bewehrung zu ermitteln.“

3.4 Altbetonuntergrund

Zu den Materialeigenschaften von Normalbeton existieren zahlreiche Forschungsarbeiten. Die Kenntnis über Gefügezusammensetzung, Festigkeitseigenschaften usw. gehört längst zum Grundwissen des Ingenieurs, so dass im Rahmen dieser Arbeit nur kurz auf einige die Verbundfestigkeit beeinflussenden Parameter eingegangen wird. Infolge seiner Zusammensetzung aus verschiedenen Verbundpartnern, insbesondere Zementmatrix und Zuschlagkörner, handelt es sich bei Beton um ein anisotropes Material. Sowohl die Druck- als auch die Zugfestigkeit sind dabei abhängig von der Herstellrichtung. Infolge Wasseransammlungen unter den Zuschlagkörnern ist die zentrische Zugfestigkeit in Herstellrichtung ca. um den Faktor 0,8 niedriger als senkrecht dazu (FENWICK & SUE [33]).

Für die Untersuchung des Verbundverhaltens sind insbesondere die Eigenschaften von Beton unter Zugbeanspruchung von Bedeutung. Die Zugfestigkeit, ermittelt im zentrischen Zugversuch, streut bekanntlich mehr als die Druckfestigkeit (HEILMANN [41]). Schwachstellen bezüglich der Zugfestigkeit finden sich insbesondere in den Grenzschichten zwischen Zementmatrix und Zuschlagkörnern, so dass sich beim Versagen die Bruchebene zumeist entlang der Zuschlagkörner einstellt. Große Bedeutung kommt auch dem Verhalten der oberflächennahen Betonrandzonen zu. Die Kornverteilung in der oberflächlichen Betonrandzone unterscheidet sich infolge der vorgegebenen ebenen Begrenzungsfläche der Schalung vom annähernd homogenen Kernbeton im inneren des Bauteils. Die Zuschlagkörner sind in den Randzonen leicht nach innen verschoben, gleichzeitig sammelt sich an der Oberfläche ein höherer Anteil an Feinmörtel bzw. Zementstein (SCHULZ [95], STÖCKL [98], siehe auch Abschnitt 6.2). HEILMANN, HILSDORF & FINSTERWALDER [42] äußern die Vermutung, dass die Oberfläche einer Betonprobe infolge von Schwindzugspannungen in den zementsteinreichen Randzonen eine etwas geringere Zugfestigkeit als der Kernbeton besitzt. Aus diesem Grund ist diese „minderfeste“, oberflächliche Schicht nach den einschlägigen Richtlinien durch geeignete Methoden der Oberflächenvorbehandlung, wie Sandstrahlen, vor einer Verstärkungsmaßnahme zu entfernen (z. B. ZTV-ING [13], DIN 18551 [29]).

4 Verbundbruchverhalten und Versagenskriterien

4.1 Verbundbruchverhalten bei Klebelamellen

Die Zugkräfte aus einer Klebelamelle werden in deren Endbereichen in den darunterliegenden Altbeton des verstärkten Bauteils eingeleitet. Infolge der Krafteinleitung wird der Klebeverbund an dieser Stelle besonders stark beansprucht. Bei Überlastung des verstärkten Bauteiles tritt bei oberflächlichen Verklebungen in der Regel ein Versagen des Verbundes zwischen Lamelle bzw. Lasche und Beton ein. Da die Zug- und Scherfestigkeit der Klebstoffschicht größer ist als die des Betons, tritt der Bruch im Beton ein, so dass an der Lamelle eine mehrere Millimeter dicke Betonschicht haften bleibt (SIVV-HANDBUCH [2]).

Diese Versagensart des oberflächennahen Betonbruchs bei Verbundentkopplung ist nach NEUBAUER [66] Voraussetzung für die Gültigkeit aller bis dahin bekannten Verbundansätze für Klebelamellen. Die insbesondere bei höheren Betonfestigkeiten beobachtete weitere Versagensart des sog. Zwischenfaserbruchs bei CFK-Lamellen wird demnach durch bestehende Verbundtheorien nicht abgedeckt. Die dritte mögliche Verbundversagensart bei Klebelamellen, ein Kohäsionsversagen innerhalb der Klebstoffschicht, wird durch die Verwendung von Zweikomponentenklebstoffen mit hoher Zugfestigkeit i. Allg. ausgeschlossen.

4.2 Begriffsbestimmung Verbund und Sonderfall innerer Verbund

Ein durch eine zusätzliche äußere Bewehrung verstärktes Stahlbetonbauteil bildet ein Verbundsystem, bestehend aus dem Stahlbetonteil und der Verstärkungsschicht. Bei einer Bauteilverstärkung mit textilbewehrtem Beton handelt es sich zudem um ein Verbundsystem, dessen eine Komponente, die textilbewehrte Feinbetonverstärkungsschicht, in sich wiederum ein Verbundsystem darstellt. D. h., die Fasern der textilen Bewehrung liegen im Verbund mit der sie umgebenden Matrix aus Feinbeton. Der textilbewehrte Beton wird von JESSE [45] aufgrund seiner diffizilen Verbundeigenschaften der Bewehrungsfasern als äußerst komplexer Werkstoff beschrieben (vgl. Abschnitt 3.3). Dieser an sich schon komplexe Verbundwerkstoff des textilbewehrten Feinbetons steht nun wiederum als Verstärkungsschicht im Verbund mit dem zu verstärkenden Stahlbetonbauteil. Wird die von JESSE gemachte Feststellung, dass der textilbewehrte Beton ein Verbundwerkstoff im Verbundwerkstoff ist, konsequent weitergedacht, so handelt es sich bei der Verstärkung mit textilbewehrtem Beton genau genommen um einen Verbundwerkstoff im Verbundwerkstoff im Verbundwerkstoff. Ein mit textilbewehrtem Feinbeton verstärktes Stahlbetonbauteil stellt somit einen noch wesentlich komplexeren Verbundwerkstoff dar. Hieraus ist erkennbar, dass sich, im Unterschied zu einer herkömmlichen Verstärkung wie z. B. mittels Klebelamellen aus Stahl, zusätzliche Schwierigkeiten ergeben.

Bei dieser Art von Verbundsystem kann zum einen der Verbund zwischen dem Altbetonbauteil und der aufgetragenen Verstärkungsschicht versagen. Üblicherweise wird bei Systemen aus Altbauteil und Verstärkungsschicht nur diese Art des Verbundversagens betrachtet. Zum anderen kann aber bei einem System „Verbund im Verbund“ auch der „innere“ Verbund der

Verstärkungsschicht versagen. D. h. der für die Kraftübertragung der zugbeanspruchten Textilfasern in die umgebende Feinbetonmatrix erforderliche Verbund versagt. In diesem Fall werden die Filamentgarne des Bewehrungstextils aus der Feinbetonmatrix herausgezogen (Filamentgarnauszug). Das kommt insbesondere bei sehr dicken Filamentgarnen mit geringer oder ungeeigneter Schlichte zum Tragen (ORTLEPP & CURBACH [74]). Diese Art von Verbundversagen der Filamentgarne in der Feinbetonmatrix wird im folgenden Teil dieser Arbeit als *innerer Verbund* bezeichnet. Es handelt sich dabei also nicht direkt um ein Verbundversagen zwischen der alten und der neuen Schicht.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit liegt jedoch auf der Untersuchung des Verbundes zwischen dem Altbetonbauteil und der textilbewehrten Verstärkungsschicht. Da es sich dabei um die eigentliche Fragestellung der vorliegenden Arbeit handelt, wird dieser *äußere Verbund* im Weiteren als *Verbund* bezeichnet. Der textilbewehrte Beton der Verstärkungsschicht wird dabei als im Ganzen wirkender Verbundwerkstoff betrachtet.

Die Funktionsweise des *inneren Verbundes* zwischen den Bewehrungsfasern und der Feinbetonmatrix wird im Rahmen dieser Arbeit auf theoretischem Wege nicht genauer untersucht. Erste Ansätze zur Beschreibung des Faser-Matrix-Verbundes wurden von BANHOLZER [5], JESSE [45], KONRAD & CHUDOBA [50] und SCHORN [93] geschaffen.

Da der innere Verbund ggf. als Versagensart maßgebend werden kann und somit einen direkten Einfluss auf die erforderlichen Verankerungslängen ausübt (vgl. Abschnitt 3.3.5), wurden zusätzliche experimentelle Untersuchungen zu den erforderlichen Verankerungslängen der Filamentgarne der textilen Bewehrungsstrukturen in der Feinbetonmatrix in das Versuchsprogramm aufgenommen (sog. Filamentgarnauszugsversuche, vgl. Kapitel 8). Damit wird die unabhängige Bestimmung der Faserauszugslängen verschiedener textiler Bewehrungsstrukturen ermöglicht. Ziel dieser Untersuchungen ist das Finden geeigneter textiler Bewehrungsstrukturen, bei welchen diese Versagensart nicht mehr maßgebend wird, da sonst ein wirtschaftlicher Einsatz der textilen Bewehrung nicht möglich ist und aus den experimentellen Schubuntersuchungen auch keine verwertbaren Daten gewonnen werden können.

4.3 Theoretisch mögliche Versagensebenen

Ein Versagen des Verbundes der textilbewehrten Feinbetonverstärkung kann grundsätzlich in drei verschiedenen Ebenen eintreten (Bild 4.1). Bezogen auf das Verstärkungssystem von außen nach innen betrachtet sind das:

1. Delamination in der Textilebene,
2. Versagen in der Verbundfuge und
3. Versagen des Altbetons, wobei hier sowohl die oberflächennahe Randzone versagen als auch ein tiefer Ausbruchkrater entstehen kann.

Als vierte Versagensform einer Verankerung, kann, wie bereits unter 4.2 angedeutet, auch der *innere* Verbund der Bewehrungsfasern innerhalb der Feinbetonschicht maßgebend werden. Hierbei wird das Faserende der Textilien im Verankerungsbereich bei der Laststeigerung

aus der Feinbetonmatrix herausgezogen (Bild 4.2). Eine solche Versagensform sollte in der Praxis durch Wahl von geeignetem Fasermaterial vermieden werden (vgl. Abschnitt 8.3.3).

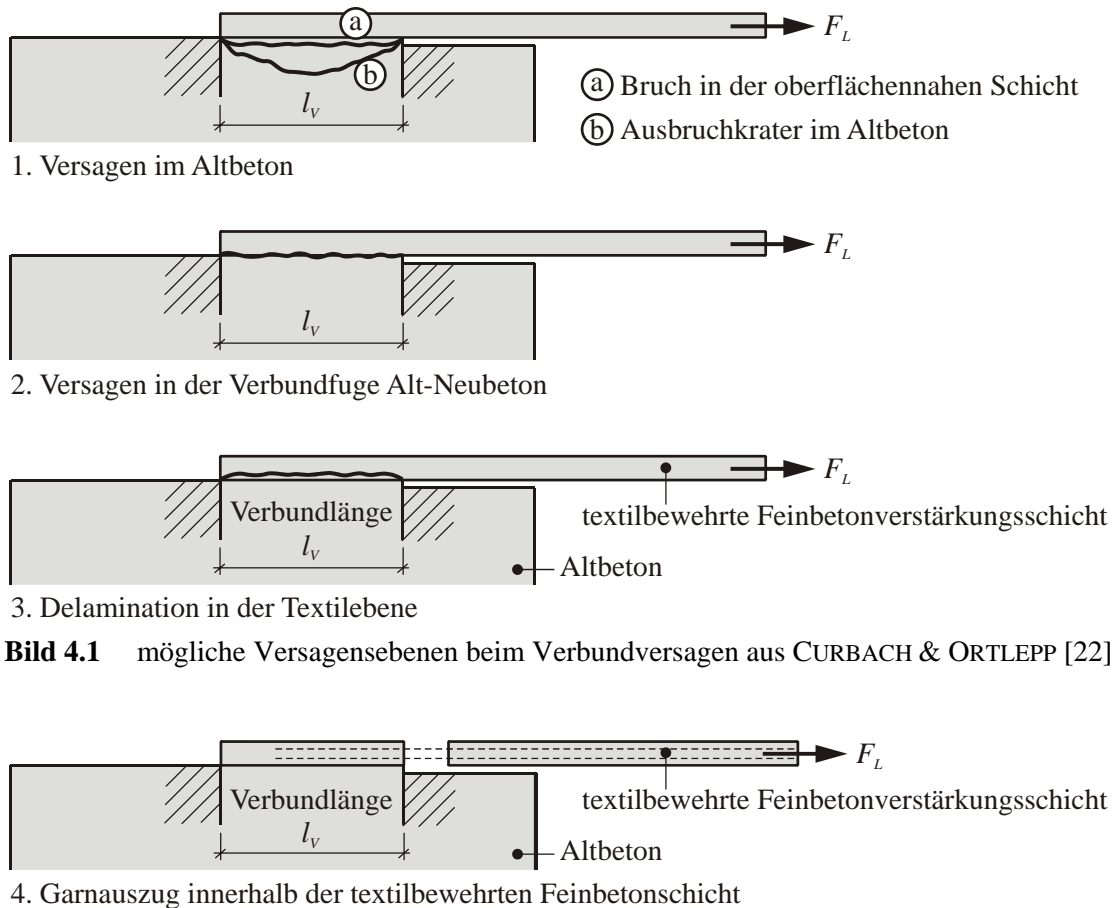


Bild 4.1 mögliche Versagensebenen beim Verbundversagen aus CURBACH & ORTLEPP [22]

Bild 4.2 inneres Verbundversagen der Verstärkungsschicht

4.4 Kriterien für ein Versagen des Verbundes

4.4.1 Allgemeines

Ein Verbundversagen kann sowohl unter Haftzug als auch unter Schubbeanspruchung eintreten. Unter beiden Beanspruchungen kann es zur Ausbildung einer der drei im Abschnitt 4.3 genannten Versagensebenen kommen. Im Verankerungsbereich kann zudem infolge der Zugbelastung in der Verstärkungsschicht der innere Verbund maßgebend werden. Welcher der möglichen Versagensfälle letztendlich maßgebend wird, hängt von den Eigenschaften der textilen Bewehrung, der Feinbetonmatrix und des vorhandenen Altbetonuntergrundes ab.

Da die Versagensebene von Fall zu Fall variieren kann, ist das Finden von Abgrenzungskriterien zwischen den einzelnen Versagensfällen von großer Bedeutung. Eine Einteilung in Versagensfälle innerhalb bestimmter Grenzen ist Voraussetzung für die sichere modellmäßige Beschreibung des Verbundversagens im Verankerungsbereich.

4.4.2 Abgrenzung der Versagensfälle

Während der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurde festgestellt, dass beim Verbundbruch der Verankerung einer textilbewehrten Feinbetonverstärkungsschicht zum Teil Versagensformen auftreten, die von traditionellen Klebeverbundwerkstoffen wie Stahl oder CFK her nicht bekannt sind. Dies betrifft insbesondere die Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung sowie den Auszug der Filamentgarne aus der Feinbetonmatrix (vgl. Abschnitt 4.3).

Für die Bemessung eines Verankerungsbereiches ist die untere Grenze der Beanspruchbarkeit des Verbundes wesentlich. Eine solche Grenze existiert theoretisch für jede Versagensart in Abhängigkeit von den Eigenschaften der verwendeten Baustoffe. Der Versagensfall, welcher zur niedrigsten Beanspruchbarkeit führt, wird letztendlich bemessungsmaßgebend. Aus diesem Grund sind alle der möglichen Versagensarten bei der Entwicklung eines Berechnungsmodells zu berücksichtigen, um den Versagensbereich vom Überlebensbereich abzugrenzen. Bild 4.3 zeigt die vier möglichen Versagensgrenzen schematisch in vereinfachter Darstellung. Die obere Grenze ⑤ wird dabei durch die maximal aufnehmbare Zugkraft der Verstärkungsschicht gebildet.

Aus wirtschaftlichen Gründen sollten einige dieser Versagensformen durch geeignete Maßnahmen vermieden werden, um die Tragfähigkeit der Verstärkungsschicht möglichst voll auszunutzen. Im Folgenden werden die im Bild 4.3 dargestellten Grenzfälle diesbezüglich einzeln betrachtet:

1. Das Versagen des Altbetons kann nicht beeinflusst werden, da es von den Eigenschaften der Altkonstruktion, die verstärkt werden soll, abhängt. Besitzt das zu verstärkende Bauteil eine vergleichsweise hohe Zugfestigkeit, so vermindert sich auch die Gefahr eines Verbundversagens im Altbeton.
2. Ein Versagen in der Verbundfuge tritt nur ein, wenn die minderfeste oberflächliche Zementleimschicht des zu verstärkenden Altbetonbauteiles versagt oder sonstige Verschmutzungen den Verbund zur Verstärkungsschicht beeinträchtigen. Ein Versagen in dieser Grenzfläche kann durch eine ausreichende Oberflächenbehandlung vermieden werden.
3. Das Versagen durch Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung ist von den Eigenschaften der Bewehrungsstrukturen abhängig. Durch Wahl geeigneter Textilien kann diese Versagensgrenze positiv beeinflusst werden. Näheres hierzu ist in den Abschnitten 6.6.6 und 7.4.4 nachzulesen.
4. Ein Versagen durch Filamentgarnauszug tritt nur bei Garnmaterial mit schlechten Verbundeigenschaften ein. Diese Versagensart sollte durch geeignete Wahl der Bewehrungsstruktur ausgeschlossen werden (vgl. Abschnitt 8.3.3).

Die obere Grenze ⑤ zum in Bild 4.3 dargestellten Versagensbereich ergibt sich aus der maximalen Zugtragfähigkeit der textilbewehrten Verstärkungsschicht, wenn diese die maximale Verbundtragfähigkeit unterschreitet. Erst bei höher bewehrten Verstärkungsschichten wird die obere Grenze durch die maximale Verbundtragfähigkeit gebildet (vgl. hierzu Abschnitt 7.4.1).

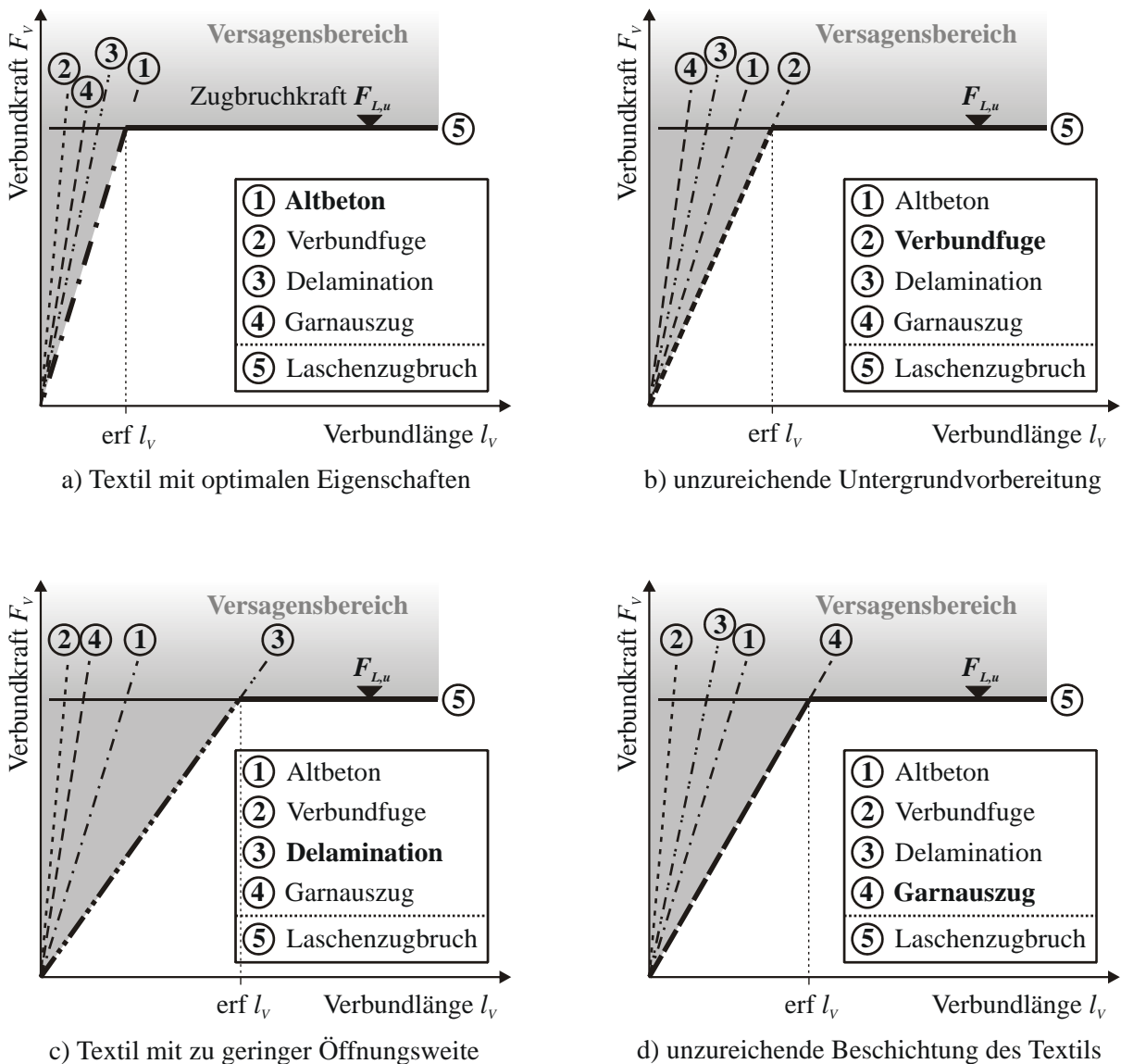


Bild 4.3 Grenzlinien für den Versagensbereich, schematisch vereinfachte Darstellung

Um der Anforderung eines möglichst hohen Ausnutzungsgrades der neu aufzubringenden Schicht gerecht zu werden, sollte die maßgebende Versagensebene im Fall eines Verbundversagens möglichst innerhalb der Altkonstruktion (1. Versagensebene) liegen. Hierzu sind an das einzusetzende Bewehrungstextil bestimmte Anforderungen zu stellen, so dass ein Versagen infolge Delamination möglichst nicht mehr maßgebend wird. Diese Anforderungen wie beispielsweise ein erforderlicher Mindestwert für den wirksamen Flächenanteil ergeben sich aus den Parameterstudien der experimentellen Untersuchungen, welche in den Kapiteln 6 und 7 genauer behandelt werden.

5 Verfahren zur Ermittlung des wirksamen Flächenanteiles

5.1 Begriff des wirksamen Flächenanteiles und seine Bedeutung

Der wirksame Flächenanteil spielt bei der Beschreibung des Versagens durch Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung eine entscheidende Rolle. Diese Versagensart kann sowohl unter reiner Schub- als auch unter reiner Haftzugbeanspruchung sowie unter kombinierter Beanspruchung auftreten. Der Anteil der wirksamen Fläche beeinflusst also u. a. die durch die Bewehrungsebene übertragbaren Schubspannungen, wie auch an anderer Stelle für den Werkstoff *Ferrozement* festgestellt wurde (NAAMAN [65]). Aus diesem Grund kommt einem zuverlässigen Verfahren zur Ermittlung dieses Wertes eine große Bedeutung zu. Der auf diese Weise ermittelte Parameter $k_{A,eff}$ für die einzelnen textilen Bewehrungsstrukturen wird zur Auswertung der experimentellen Haftzug- und Schubuntersuchungen und die anschließende Modellierung in den nachfolgenden Kapiteln benötigt (ORTLEPP, HAMPEL & CURBACH [76]).

Der wirksame Flächenanteil ergibt sich aus dem Verhältnis der wirksamen Fläche (= Matrixfläche) zur Gesamtfläche (Bild 5.1, Gl. (5.1)). Unter der Voraussetzung der von ORTLEPP & CURBACH [22] festgestellten Tatsache, dass sich am Lastabtrag durch die Textilebene hindurch ausschließlich die zwischen den Fasern verbleibenden Matrixstege beteiligen, vermindert sich die Festigkeit des reinen, ungestörten Feinbetons innerhalb der textilen Bewehrungsebene um den Faktor $k_{A,eff}$ auf einen geringeren wirksamen Wert. Die Filamentgarne führen zudem zu einer Kerbwirkung in der Ebene der textilen Bewehrung, deren Einfluss jedoch vernachlässigbar gering ist (siehe Abschnitt 6.4). In Abhängigkeit von der Größe des wirksamen Flächenanteiles kann die effektive Festigkeit in der Textilebene entweder größer oder kleiner sein als die Festigkeit des darunter liegenden Altbetons. Somit bestimmt insbesondere der wirksame Flächenanteil die maßgebende Versagensebene im Fall eines Verbundversagens.

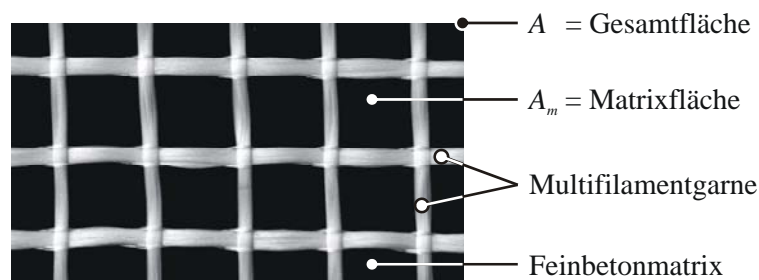


Bild 5.1 Flächenverhältnisse in der Textilebene

$$k_{A,eff} = \frac{A_m}{A} \quad (5.1)$$

Um den wirksamen Flächenanteil der Feinbetonmatrix quantifizieren zu können, muss der Flächenanteil bekannt sein, der durch das Textil abgedeckt wird. Hierzu kommen verschie-

dene Möglichkeiten der Analyse der textilen Parameter in Frage. Ein mögliches Verfahren wird von CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] beschrieben. Dabei wurden die aus Glasfaserfilamentgarnen bestehenden textilen Gelegestrukturen vor einem schwarzen Hintergrund mit einer Auflösung von 300 dpi im Auflichtverfahren gescannt und anschließend in ein Schwarzweißbild umgewandelt. Die Flächenanteile für Feinbetonmatrix und Textil werden aus diesem Schwarzweißbild durch Auszählen der schwarzen und weißen Pixel bestimmt. Die Autoren geben zu Bedenken, dass diese Methode noch von weiteren Kriterien wie z. B. der Ausleuchtung beim Scanvorgang oder der gewählten Auflösung abhängig ist. Des Weiteren ist die Zuordnung der Pixel zu den Bereichen schwarz (Feinbetonmatrix) und weiß (Textil) insbesondere in den Grauzonen an den Rändern der Filamentgarne von der subjektiven Einschätzung des Bearbeiters abhängig. Daher muss festgestellt werden, dass die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit der Messwerte bei diesem Verfahren bisher noch nicht ausreichend sind. In diesem Kapitel der vorliegenden Arbeit wird – aufbauend auf den vorgenannten Erkenntnissen – eine Methode erarbeitet, die eine zuverlässige und reproduzierbare Erfassung der Flächenanteile ermöglichen soll. Dabei sollen insbesondere solche Randbedingungen beachtet werden, die das Messergebnis maßgeblich beeinflussen.

5.2 Allgemeines zu optischen Messverfahren

Das Ziel der Untersuchungen ist die zahlenmäßige Ermittlung eines Wertes für den wirksamen Flächenanteil in der Ebene der textilen Bewehrung einer Verstärkungsschicht für die Beschreibung eines Delaminationsversagens unter Haftzug- und Schubbeanspruchung. Dazu wäre es genau genommen erforderlich, die Flächenanteile der in die Feinbetonmatrix eingebetteten textilen Strukturen zu untersuchen. Hierzu wäre es notwendig, eine Bruchfläche genau in der Ebene der textilen Bewehrung zu erzeugen, um die textile Struktur freizulegen. Da die textile Struktur dabei im Regelfall zerstört wird (Bild 5.2), ist eine sinnvolle Auswertung auf diesem Wege nicht realisierbar. Eine Analyse der textilen Strukturen im einbetonierten Zustand wird daher nicht weiter verfolgt. Stattdessen wird für die Ermittlung des Wertes für den wirksamen Flächenanteil auf die Analyse der reinen textilen Strukturen zurückgegriffen. Der wirksame Flächenanteil bzw. Flächenanteil der Feinbetonmatrixfläche entspricht hierbei dem Flächenanteil der Öffnungen zwischen den Filamentgarnen und den Nähfäden der textilen Gelegestruktur.

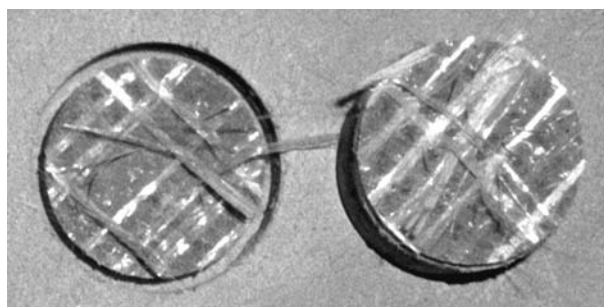


Bild 5.2 Zerstörte Textilstruktur in der Bruchfläche im Haftzugversuch

Da es verschiedene Möglichkeiten gibt, solche Flächenanteile zu bestimmen, ist zunächst die Frage zu klären, welche Varianten für das angestrebte Ziel grundsätzlich geeignet sind. Es ist dabei zum einen zwischen verschiedenen Aufnahmevarianten und zum anderen zwischen verschiedenen Möglichkeiten der Nachbearbeitung bzw. Auswertung mittels digitaler Bildbearbeitung zu unterscheiden. Beide Aspekte, die Art der Aufnahme und die anschließende Bildauswertung, sind dabei in Kombination zu betrachten. Als in der Praxis einsetzbare Möglichkeiten kommen für die digitale Aufnahme der Fläche prinzipiell vier Varianten in Frage:

1. die digitale Fotografie,
2. das Scannen im Auflichtverfahren,
3. das Scannen im Durchlichtverfahren und
4. eine Abtastung des Höhenprofils mittels digitaler Photogrammetrie.

Alle diese vier Varianten liefern zunächst eine Matrix aus Bildpunkten (Pixeln). Bei den Varianten 1.–3. ist jedem Bildpunkt ein bestimmter Grauwert zugeordnet. In Abhängigkeit von der Objektfarbe, d. h. der Farbe der Multifilamentgarne und des Nähfades des untersuchten Textils, sowie der Farbe des Hintergrundes gelingt aus diesen Bilddaten mit mehr oder weniger hoher Genauigkeit eine Zuordnung dieser Grauwerte zu einem der beiden Bereiche Textil bzw. Öffnung. Bei der 4. Variante ist jedem Bildpunkt eine Höhenkoordinate zugeordnet. In den Bereichen der Öffnungen zwischen den Multifilamentgarnen wird, in Abhängigkeit von der Lage der Hintergrundebene, eine entsprechend geringere Höhe gemessen.

Die ersten beiden Verfahren bieten zunächst einen großen Vorteil im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit: die Verfügbarkeit der erforderlichen Aufnahmegерäte. Sowohl leistungsfähige Digitalkameras als auch Flachbettscanner mit einer hohen optischen Auflösung gehören zum Stand der Technik und sind nahezu überall vorhanden. Ein Durchlichtscanner ist weniger häufig vorzufinden, dennoch ist diese Aufnahmeart relativ problemlos durchführbar. Am schwierigsten gestaltet sich die Abtastung des Höhenprofils mit Hilfe der digitalen Photogrammetrie – diese ist mit größerem Aufwand verbunden, so dass man hier schnell an Kapazitätsgrenzen stößt.

Zusätzlich zu den verschiedenen Möglichkeiten der Aufnahme bestehen weiterhin verschiedene Möglichkeiten der digitalen Bildauswertung der so gewonnenen Bilddaten. Die Wirkung verschiedener optischer Einflüsse auf das resultierende Messergebnis soll im Folgenden genauer betrachtet werden.

5.3 Optische Einflüsse auf das Messergebnis

5.3.1 Allgemeines

In Abhängigkeit von verschiedenen Parametern kann das Messergebnis der Flächenanteile bei der Verwendung optischer Verfahren in einem großen Bereich variieren. Die unterschiedlichen Parameter haben dabei jeweils einen mehr oder weniger großen Einfluss auf das zu erwartende Ergebnis. Die für die vorliegende Messaufgabe bedeutsamsten Parameter seien nachfolgend aufgelistet:

- Bildauflösung
- Projektionsart (zentral, parallel)
- Objektausleuchtung und Schattenbildung
- Transparenz
- Objektfarbe
- Schwellwert

In den nachfolgenden Abschnitten sollen diese einzelnen Einflussfaktoren genauer untersucht werden.

5.3.2 Einfluss der Bildauflösung

In Abhängigkeit von der verwendeten Bildauflösung werden filigrane Strukturen in unterschiedlicher Qualität abgebildet. Bei den untersuchten Flächenanteilen der textilen Strukturen spielen sowohl die Filamentgarne als auch die die Filamentgarne umschnürenden und durchdringenden Nähfäden eine Rolle. Besonders die Eckpunkte sich kreuzender Filamentgarne oder der Nähfadenkreuzungen werden in Abhängigkeit von der gewählten Bildauflösung in unterschiedlicher Genauigkeit abgebildet. Um die exakten Flächenanteile von Textil und Öffnung zu bestimmen, muss sich die Begrenzungslinie der Filamentgarne und Nähfäden zur dazwischenliegenden Öffnung durch einen eindeutig detektierbaren Tonwertsprung genau abzeichnen. Bei einer endlich großen Bildauflösung wird ein Teil solcher Bildpunkte entlang der Begrenzungslinien der Filamentgarne nicht mehr exakt abgebildet. Je höher bzw. genauer die Bildauflösung bei der Aufnahme der Struktur gewählt wird, desto genauer werden auch die vorgenannten Begrenzungslinien abgebildet (Bild 5.3).

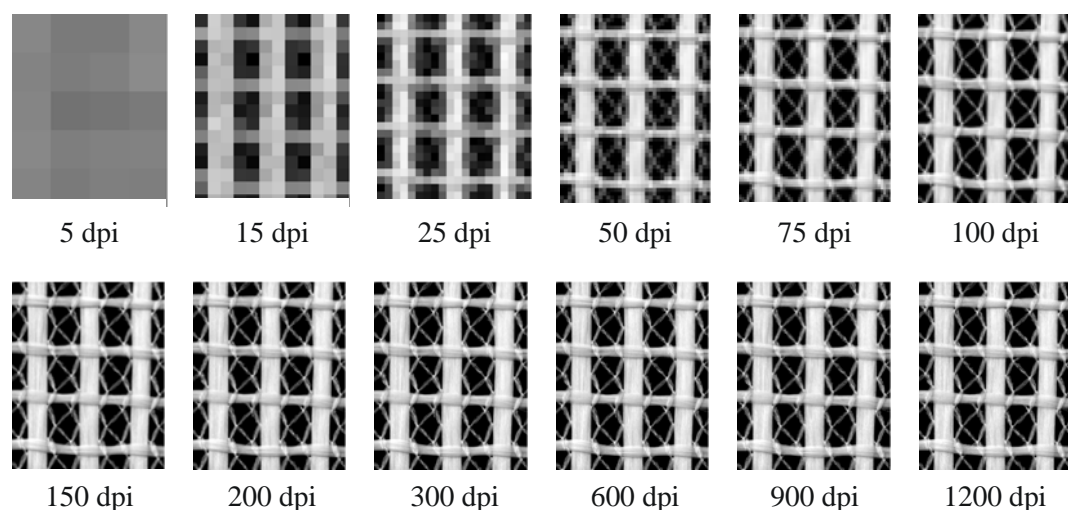


Bild 5.3 Textil NWM3-013-01 in verschiedenen Bildauflösungsstufen

Es wird sich mit zunehmender Erhöhung der Auflösung gegen unendlich ein Grenzwert einstellen, der das exakte Messergebnis repräsentiert.

Unter Annahme einer zulässigen Abweichung von diesem exakten Grenzwert kann ein Zahlenwert für die erforderliche Bildauflösung gefunden werden, ab welchem der Einfluss der Bildauflösung auf das Messergebnis vernachlässigbar gering wird. Hierzu wurde das Problem in einer einfachen Simulation untersucht. Mit Hilfe des CAD-Programmes AutoCAD[®] wurden Bildsätze von drei verschiedenen Textilproben als Vektorgrafik mit bekannter Geometrie künstlich erzeugt. Dabei wurde die Geometrie dreier repräsentativer echter Textilproben nachempfunden, indem sowohl die Filamentgarne als auch die Nähfäden mit ihren Abmessungen in Anlehnung an tatsächlich vorhandene Textilien erzeugt wurden (Bild 5.4).

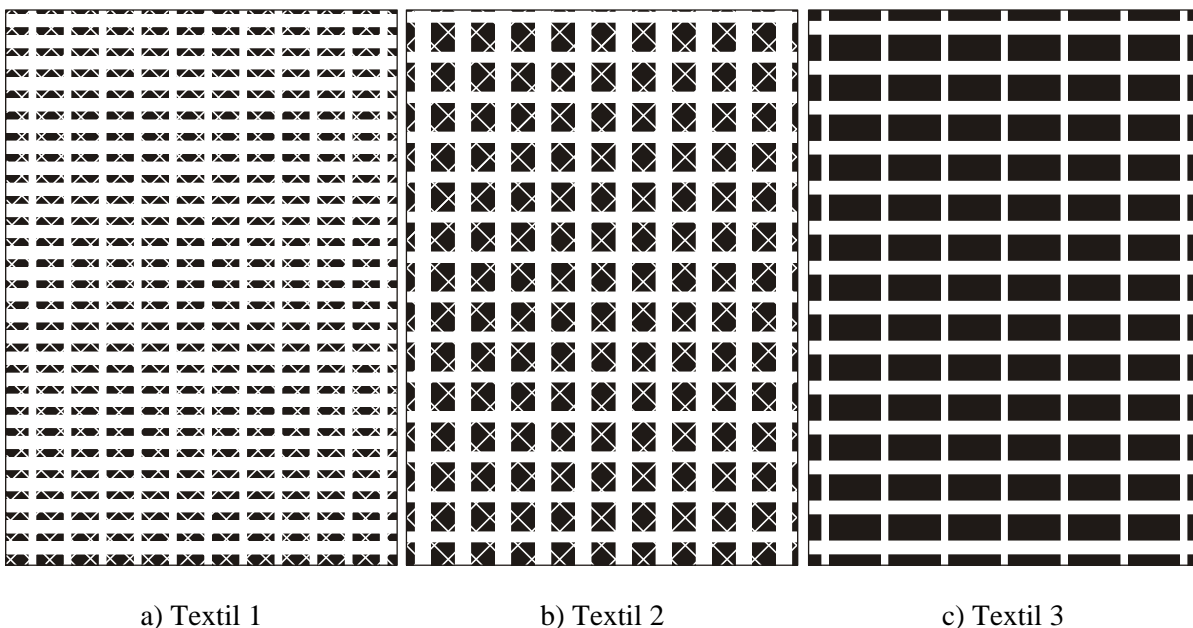


Bild 5.4 künstlich erzeugte Textilien

Die Auswertung der so erzeugten Vektorgrafiken mit bekannter Geometrie liefert den exakten Wert der Flächenanteile von Textilfasern und Matrix. Um die Abhängigkeit des Flächenanteiles von der Bildauflösung zu ermitteln, wurden die künstlich erzeugten Vektorgrafiken mit Hilfe des Zeichenprogramms CorelDraw[®] in verschiedenen Auflösungsstufen als Schwarzweiß-Pixelbilder in unkomprimierter Form exportiert. Die maximal erreichbare Auflösung der exportierten Pixelbilder wird dabei durch die maximal exportierbare Pixelanzahl des verwendeten Zeichenprogramms begrenzt. Bei der gewählten Geometrie der künstlich erzeugten Bildsätze von 7x10 cm wurde bei einer Auflösung von ca. 1.200 dpi diese Obergrenze der Exportfunktion des Zeichenprogramms erreicht. Bild 5.5 zeigt den mit Hilfe der Simulation gewonnenen Zusammenhang zwischen dem ermittelten Flächenanteil der Matrix (= wirksamer Flächenanteil $k_{A,eff}$) und der gewählten Bildauflösung.

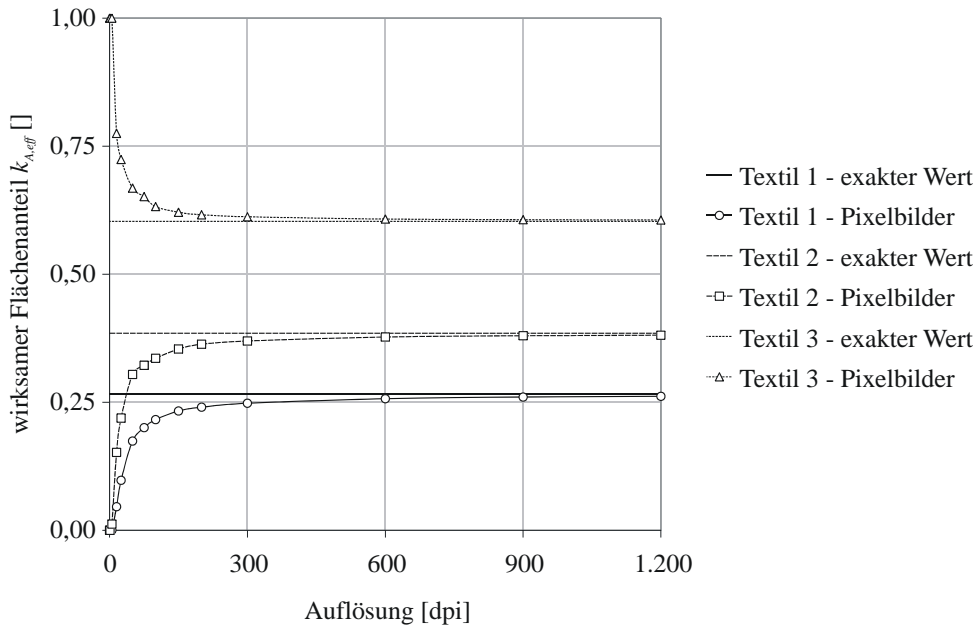


Bild 5.5 Abhängigkeit des ermittelten Flächenanteiles von der Bildauflösung

Der ermittelte Wert für den Flächenanteil beginnt bei einem theoretischen Grenzwert für die Auflösung von 0 dpi und strebt mit höher werdender Auflösung dem exakten Wert entgegen. Der theoretische Grenzwert für die Auflösung von 0 dpi entspricht einem einzigen Pixel, der sich über die gesamte Fläche erstreckt und entweder die Farbe weiß oder schwarz besitzt. Der theoretische Grenzwert wird somit durch den überwiegenden Anteil weißer bzw. schwarzer Flächen in der künstlich erzeugten Textilstruktur bestimmt. Er ergibt sich bei einem exakten Wert des Flächenanteiles der Matrix von $< 0,5$ zu Null, da hier der weiße Anteil überwiegt, bzw. bei einem exakten Flächenanteil der Matrix von $> 0,5$ zu Eins, da hier der schwarze Anteil überwiegt. Von diesem Grenzwert aus konvergiert die Kurve gegen die Linie des exakten Wertes.

Bild 5.6 zeigt den relativen Fehler des ermittelten Wertes für den Anteil der Matrixfläche in Bezug auf den exakten Wert in Abhängigkeit von der gewählten Bildauflösung. Erwartungsgemäß konvergieren die Kurven gegen den Fehlerwert Null. Wie schnell die Kurven konvergieren, wird dabei maßgeblich von dem Anteil der Farbübergänge zwischen schwarzen und weißen Pixeln der künstlich erzeugten Textilstruktur bestimmt. Speziell an den Übergangskanten zwischen Textil (weiß) und Öffnung (schwarz) führt die Zuordnung der Pixel zu den Farbwerten Schwarz oder Weiß mit geringer werdender Auflösung zu einer zunehmenden Abweichung gegenüber dem exakten Wert. Bei dem künstlich erzeugten Textil 3 ist der Anteil solcher Übergangskanten vergleichsweise gering, so dass die Fehleranfälligkeit der Bildanalyse mit sinkender Bildauflösung geringer ist als beispielsweise bei dem künstlich erzeugten Textil 1, welches relativ viele schwarz-weiße Übergangskanten aufweist. Entsprechend ergeben sich bei der Analyse der Flächenanteile des Textils 3 geringere relative Fehler, weshalb diese Kurve auch schneller als die der Textilien 1 und 2 konvergiert.

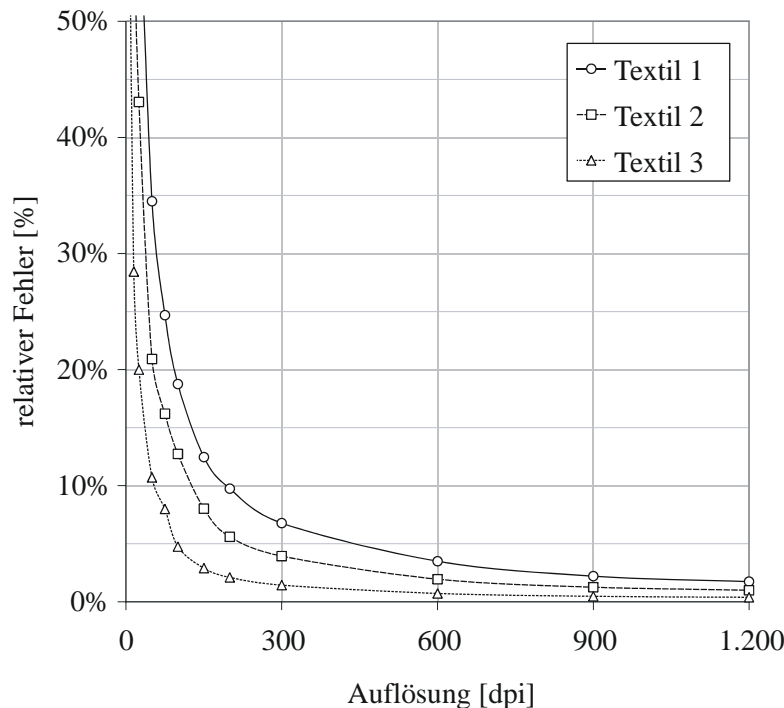


Bild 5.6 Abweichung des ermittelten Flächenanteiles vom exakten Wert in Abhängigkeit von der Bildauflösung

Insgesamt konnte für alle drei künstlich erzeugten Textilstrukturen eine schnelle Konvergenz gegen geringe Fehlerwerte mit zunehmender Auflösung nachgewiesen werden. Im Mittel sinkt der relative Fehler bereits ab einer Auflösung von 300 dpi unter einen Wert von 5 %. Bei einer Auflösung von 1.200 dpi verbleibt nur noch ein Fehler von ca. 1-2 %. Ergebniswerte mit einem geringeren Fehler lassen sich nur durch eine überproportionale Erhöhung der Auflösung erreichen, da die Kurven asymptotisch gegen Null streben.

Die maximal erreichbare Auflösung wird durch die optische Auflösung des verwendeten Aufnahmesystems begrenzt. Mit einer Digitalkamera mit 5 Mio Pixel ergibt sich bei einer gewählten Objektgröße der Textilproben von 7x10cm eine maximale Auflösung von ≈ 600 dpi. Heute gebräuchliche Flachbettscanner bieten optische Auflösungen von durchschnittlich 1.200–2.400 dpi in beiden Richtungen, in Einzelfällen auch bis zu 4.800 dpi. Sie ermöglichen somit Ergebnisse, deren Fehler bei ca. 1 % oder darunter liegen. Scanner bieten somit einen qualitativen Vorteil gegenüber einer Digitalkamera. In Abhängigkeit von einem vorgegebenen zulässigen Fehler lässt sich aus den Ergebnissen der Simulation eine erforderliche Bildauflösung ermitteln, mit welcher die Analyse der Flächenanteile durchgeführt werden sollte.

Die Untersuchung zeigt, dass der exakte Wert bei einer Bildauflösung von 1.200 dpi mit hinreichender Genauigkeit, d. h. mit einem relativen Fehler von durchschnittlich 1 %, erreicht wird (Bild 5.6). Die Aufnahme mit einer solchen Auflösung lässt sich zudem mit geringem Aufwand realisieren. Aus diesem Grund wird für die Anwendung eines optischen Verfahrens zur Ermittlung der Flächenanteile die Empfehlung gegeben, eine Auflösung von wenigstens 1.200 dpi zu verwenden.

Die Simulation zeigt noch einen weiteren Effekt. Bei der Untersuchung unterschiedlicher textiler Strukturen wurde festgestellt, dass die erreichbare Genauigkeit einer Auswertung der Flächenanteile mittels digitaler Bildbearbeitung maßgeblich von der Beschaffenheit der Textilstruktur abhängt (Bild 5.6). Je feingliedriger die textile Struktur aufgebaut ist, d. h. je mehr Übergangskanten zwischen Faden (weiß) und Öffnung (schwarz) in dieser Struktur vorhanden sind, desto geringer wird die erreichbare Genauigkeit des gesuchten Wertes für den Flächenanteil. In Bild 5.7 ist dieser Zusammenhang für die drei künstlich erzeugten textilen Strukturen für zwei ausgewählte Auflösungsstufen dargestellt.

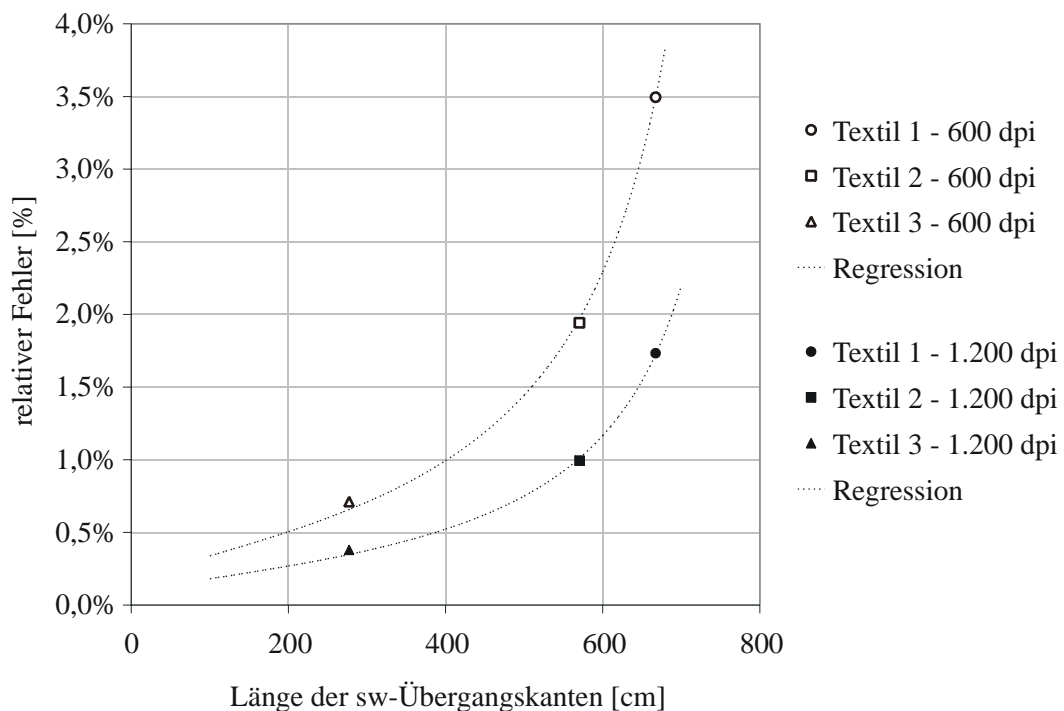


Bild 5.7 Zunahme des Fehlers mit erhöhter Facettierung der textilen Struktur

Die Länge der Schwarz-Weiß-Übergangskanten wurde mit Hilfe des CAD-Programmes AutoCAD[®] aus den 7x10 cm großen künstlich erzeugten textilen Strukturen mittels Umfangsfunktion gewonnen. Das Textil 3 besitzt aufgrund seiner Struktur vergleichsweise wenige Übergangskanten zwischen den Öffnungen (schwarz) und den sie umschließenden Fäden (weiß), wohingegen das Textil 1 sehr filigran aufgebaut ist und somit einen wesentlich größeren Anteil Übergangskanten besitzt. Bild 5.7 zeigt deutlich den Einfluss des Anteiles an Schwarz-Weiß-Übergängen auf die erreichbare Genauigkeit bei der Flächenermittlung. Der relative Fehler bei der Ermittlung der Matrixflächenanteile nimmt mit zunehmender Länge der Schwarz-Weiß-Übergänge exponentiell zu. D. h., je filigraner die textile Struktur ist, von welcher die Flächenanteile bestimmt werden sollen, desto fehlerbehafteter wird das Ergebnis der Flächenermittlung.

5.3.3 Einfluss der Projektionsart

Die verwendete Projektionsart bei der Aufnahme eines dreidimensionalen Objektes mit der Objektdicke t hat ebenfalls einen Einfluss auf das zu erwartende Ergebnis der Flächenanteile. Bild 5.8 zeigt schematisch die unterschiedlichen Ergebnisse bei einer Zentral- und einer Parallelprojektion.

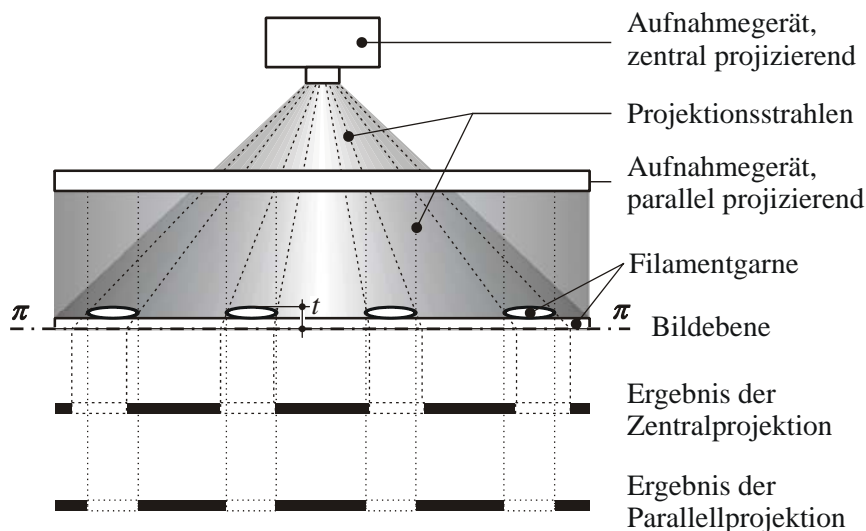


Bild 5.8 Einfluss der Projektionsart auf das Ergebnis der Flächenauswertung

Die Projektionsstrahlen treffen in Abhängigkeit von der gewählten Projektionsart in unterschiedlichem Winkel auf die Bildebene π . Bei einem Winkel von 90° aller Projektionsstrahlen zur Bildebene spricht man von einer Parallelprojektion. In diesem Fall werden alle zu π parallelen Ebenen eines dreidimensionalen Objektes – unabhängig von seiner Dicke t – flächengleich abgebildet. Somit liefert die Parallelprojektion für die Ermittlung der Flächenanteile auch bei Textilproben mit einer Objektdicke $t > 0$ exakt die Flächenanteile der Filamentgarne und der Öffnungen zwischen den Filamentgarnen ohne Verzerrung (Bild 5.8, unten).

Treffen die Projektionsstrahlen von einem zentralen Punkt aus auf das Objekt, so spricht man von einer Zentralprojektion. Die Projektionsstrahlen treffen dabei in unterschiedlich schiefem Winkel auf die Bildebene π . Die Projektion des dreidimensionalen Objektes, in diesem Fall der Textilprobe mit der Dicke t , auf die Bildebene π liefert je nach Einfallswinkel der Projektionsstrahlen ein verzerrtes Bild dieses Objektes (Bild 5.8, 2. v. u.). Je flacher der Winkel der Projektionsstrahlen zur Bildebene wird, um so größer wirkt sich diese Verzerrung auf das Ergebnis aus.

Außer der Neigung der Projektionsstrahlen spielt auch die Dicke des Objektes eine entscheidende Rolle. Mit zunehmender Objektdicke vergrößert sich der Einfluss der projektionsbedingten Verzerrung. Ein vor der Bildebene liegendes Objekt wird bei der Zentralprojektion auf der Bildebene vergrößert abgebildet. Je größer die Dicke t des Objektes ist, desto weiter entfernt ist auch die erste zu π parallele Objektebene. Entsprechend werden weiter entfernt von der Bildebene liegende Teile des Objektes stärker verkleinert abgebildet.

Die zu untersuchenden Textilien weisen tatsächliche Objektdicken von 1–2 mm auf, was i. d. R. dem zweifachen Filamentgarndurchmesser entspricht. Die Breiten der Filamentgarne dieser Textilien und deren lichte Abstände bewegen sich mit einigen Millimetern in einer ähnlichen Größenordnung. Es bleibt also festzustellen, dass der Projektionswinkel bei der Zentralprojektion ebenfalls einen Einfluss auf das zu erwartende Ergebnis der Flächenanalyse hat. Somit ist anzustreben, einen nahezu senkrechten Projektionswinkel zur Bildebene zu ermöglichen. Wie oben bereits festgestellt wurde, kann das z. B. durch eine Vergrößerung der Entfernung des Aufnahmeapparates von der Bildebene und vom betrachteten Objekt erreicht werden.

5.3.4 Einfluss der Objektausleuchtung und Schattenbildung

Bei der Auswertung der textilen Flächenstrukturen nach dem von CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] vorgeschlagenen Verfahren mittels Zuordnung der Fäden bzw. Fadenzwischenräume zu den Farbbereichen Weiß bzw. Schwarz aus einem gescannten Graustufenbild ist die Qualität der Ausleuchtung der zu analysierenden Textilstrukturen von essentieller Bedeutung. In Abhängigkeit von der vorhandenen Helligkeit der Textilstruktur im Graustufen-Pixelbild ergibt sich ein anderer Schwellwert für die Zuordnung der Farbbereiche. Dieser differiert nicht nur von Textil zu Textil, sondern ist auch vom verwendeten Aufnahmegerät (z. B. Scanner) und der dort eingestellten Belichtungszeit abhängig. Aus diesem Grund ist es zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der zu analysierenden Textilstrukturen empfehlenswert, immer dasselbe Aufnahmegerät mit derselben Einstellung zu verwenden, um diesen Einfluss zu eliminieren.

Die im Abschnitt 5.3.3 erwähnten unterschiedlichen Höhen der Fadenlagen im Textil führen zu einem weiteren Effekt: Ausleuchtungsdifferenzen mit Schattenbildung. Betrachtet man eine auf der Scannerglasfläche liegende Textilstruktur, so führen einerseits die unterschiedlichen Abstände der Fadenlagen von der Scannerlampe zu Ausleuchtungsdifferenzen, da weiter weg liegende Fäden dunkler abgebildet werden; andererseits entsteht durch quer verlaufende Fäden eine gewisse Verschattung der dahinterliegenden Fäden (Bild 5.9). Dies ist insbesondere an den Kreuzungspunkten der Filamentgarne sowie an Kreuzungspunkten des Nähfadens der Fall. Ebenfalls erscheinen die Ränder der Filamentgarne aufgrund ihrer dreidimensional runden Form und des somit über die Fadenbreite variierenden Abstandes von der Scannerlampe dunkler. Die Schattenstellen erscheinen im Pixelbild als dunkles Grau und laufen somit bei der Bildauswertung Gefahr, dem Schwarzbereich (= Fadenzwischenräume) zugeordnet zu werden, obwohl diese zum Weißbereich (= Fäden) gehören.

Die Größe dieses Einflusses der Verschattung richtet sich nach der Häufigkeit der in einer textilen Struktur vorhandenen Fadenkreuzungspunkte. D. h., je mehr Fadenkreuzungen in einem Textil vorhanden sind, umso deutlicher macht sich dieser Einfluss bemerkbar. Aus diesem Grund reagieren insbesondere Textilien mit einer Trikot-Bindung (siehe Abschnitt 3.1, Bild 3.2, links), bei welcher sehr viele Kreuzungspunkte zwischen Nähfäden und Filamentgarnen vorhanden sind, sowie Textilien mit sehr dicht verlaufenden Filamentgarnen, wo sich folglich die Kreuzungspunkte pro Flächeneinheit häufen, bei der Flächenauswertung besonders empfindlich gegenüber Ausleuchtungsdifferenzen.

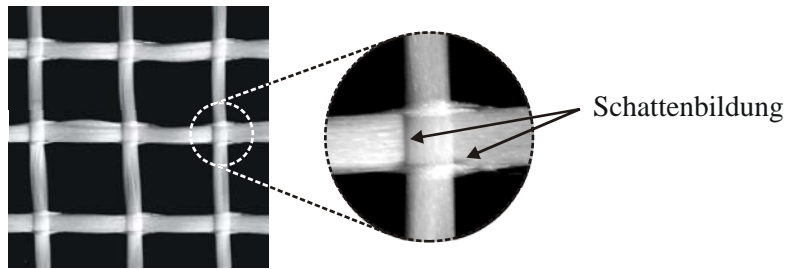


Bild 5.9 Schattenbildung an den Fadenkreuzungen

Der Einfluss der Schattenbildung an den Fadenkreuzungspunkten ist im Auflichtscanverfahren (siehe CURBACH, BAUMANN & BEYER [17]) grundsätzlich vorhanden und kann nicht allein durch eine verbesserte Qualität der Bildauswertung eliminiert werden. Die einzig mögliche Lösung für diesen Fall bietet die Anwendung eines anderen, geeigneteren Aufnahmeverfahrens wie z. B. das Durchlichtscanverfahren.

5.3.5 Einfluss der Transparenz

Bei der Aufnahme von Bilddaten eines zu betrachteten Objektes – in diesem Fall einer Textilstruktur – stellt die Transparenz bestimmter Fasermaterialien ein gesondertes Problem dar. In Abhängigkeit von den Eigenschaften der in der textilen Struktur verarbeiteten Filamentgarne erscheinen diese je nach Lichtdurchlässigkeit mehr oder weniger transparent. Bild 5.10 zeigt diesen Effekt am Beispiel von Glas- und Polypropylenfasern in einer textilen Struktur. Während sich die Glasfasern im gescannten Bild vor dem schwarzen Hintergrund deutlich weiß abzeichnen, erscheinen die stark transparenten Polypropylengarne im Pixelbild lediglich als Grauschleier oder sind teilweise gar nicht sichtbar. D. h., die durchscheinenden Polypropylengarne heben sich nur unzureichend vom dunklen Hintergrund ab, was bei der Bildauswertung eine Zuordnung dieser Fasern zum Weißbereich stark erschwert oder ganz unmöglich macht. Dieses Problem besteht bei allen bildgebenden Verfahren – sowohl beim Auflicht- und Durchlichtscanverfahren als auch bei der Aufnahme mit einer digitalen Kamera wie z. B. bei Anwendung der digitalen Photogrammetrie.

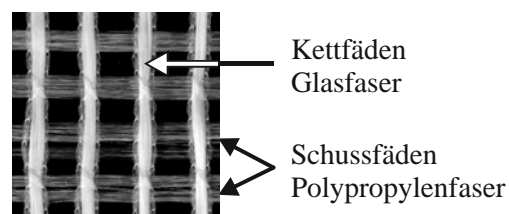


Bild 5.10 Beispiel Glasfasertextil mit Polypropylen Garnen in Querrichtung

Soll ein Aufnahmeverfahren wie z. B. das Durchlichtscanverfahren, bei welchem die textilen Strukturen von hinten (d. h. gegenüber der Bildebene) durchleuchtet werden, zur Anwendung kommen, so zeigt sich auch eine deutliche Transparenz der Glasfasern (Bild 5.11). Diese führt wiederum dazu, dass sich die Fasern im auszuwertenden Pixelbild nicht bzw. nicht

ausreichend vom Hintergrund abheben und somit eine korrekte Zuordnung zum Weißbereich verhindern.

Eine Lösung dieser Problematik ist folglich nicht durch eine Verbesserung des Auswerteverfahrens der Bilddaten zu erreichen, sondern nur in einer Veränderung der Aufnahme der Bilddaten zu suchen, bei welcher die Transparenzeigenschaften der in den Textilien verarbeiteten Fäden von vorn herein eliminiert werden. Dies kann zum Beispiel durch eine Vorbehandlung der textilen Strukturen vor der Aufnahme mit einem nichttransparenten, pigmentierten Material geschehen, welches sich jedoch nicht wieder vom Fasermaterial lösen darf.

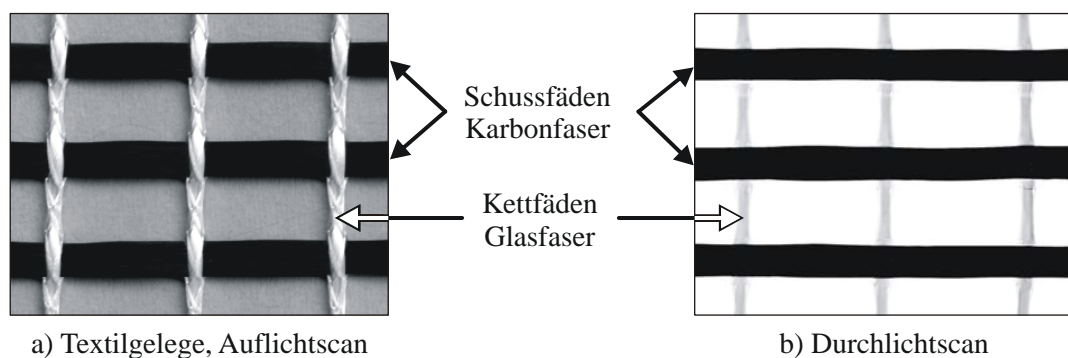


Bild 5.11 Beispiel Textil mit gemischter Glas- und Karbonfaserbewehrung im Durchlichtscan

5.3.6 Einfluss der Objektfarbe

Das von CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] vorgeschlagene einfache Scanverfahren wurde unter der Voraussetzung entwickelt, dass die zu analysierenden Textilstrukturen immer dieselbe Objektfarbe besitzen. Dies trifft zu für Textilien, welche aus nur einer Faserart bzw. Faserarten gleicher Farbe bestehen. Das ist z. B. bei reinen Glasfaser- bzw. gemischten Glas- und Polypropylenfasern in der Textilstruktur der Fall, wo alle Fasern im Bild mehr oder weniger einheitlich Weiß erscheinen. Hierbei kann zur Kontrastbildung eine entsprechende Hintergrundfarbe – in diesem Fall Schwarz – gewählt werden. In einer anschließenden Bildauswertung können diese beiden Farbbereiche dann für die Flächenermittlung zwei getrennten Farbwerten für Fäden und Fadenzwischenräume zugeordnet werden.

Dieses Verfahren stößt jedoch an Grenzen, sobald auch Textilien mit anderen Fasermaterialien analysiert werden sollen. So haben z. B. Aramidfasern im Unterschied zu Glas- und Polypropylenfasern eine gelbe Farbe – Karbonfasern hingegen sind tiefschwarz. Deutlicher wird diese Problematik, wenn man Textilien mit gemischter Bewehrung wie z. B. Glas- und Karbonfasern (vgl. Bild 5.11, a) betrachtet. Hier besitzen die in der textilen Struktur verarbeiteten Fasern unterschiedliche Farben – im vorgenannten Fall sogar mit genau entgegengesetzter Helligkeit. Somit kann dieses einfache Scanverfahren unter Verwendung eines kontrastreichen Hintergrundes wie Schwarz oder Weiß hier nicht mehr angewendet werden. Möglich ist lediglich ein Übergang vom Graustufenbild zu einem Farbbild durch Wahl eines farbigen Hintergrundes, was jedoch die Auswertung der Bilddaten, d. h. die Zuordnung von Fäden und Fadenzwischenräumen zu den entsprechenden Farbbereichen im Pixelbild, enorm verkompliziert. Denn unter Verwendung einer einzigen weiteren Farbe für den Hintergrund

bedeutet dies bereits einen Übergang vom eindimensionalen in den zweidimensionalen Farbraum (Bild 5.12).

Als einfachere Lösung für diese Problematik kann das Einfärben der textilen Strukturen in Betracht gezogen werden, um eine gleichmäßige Farbgebung zu gewährleisten, was die Auswertung der Bilddaten im eindimensionalen Farbraum ermöglicht.

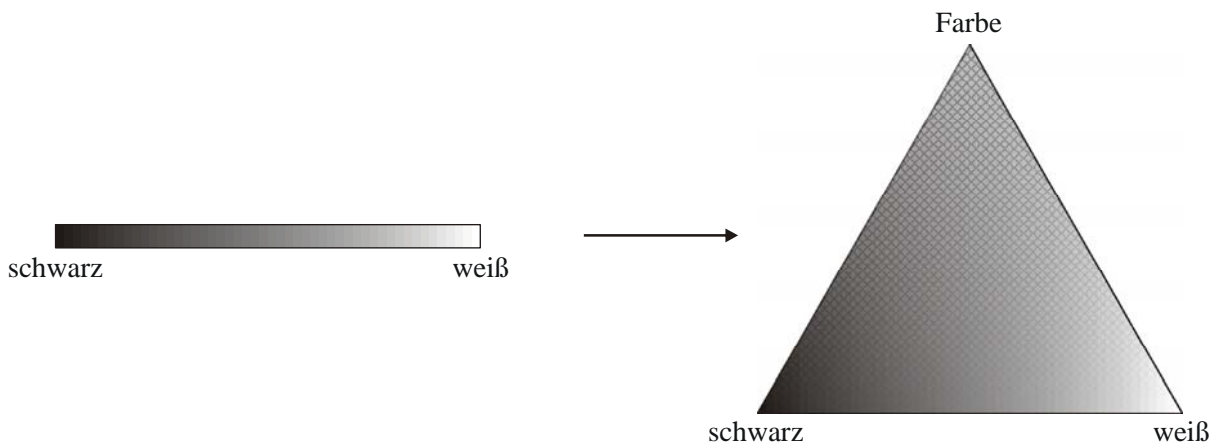


Bild 5.12 Eindimensionaler und zweidimensionaler Farbraum

5.3.7 Einfluss des Schwellwertes

Bei der Auswertung der Bilddaten textiler Flächenstrukturen vor einem kontrastreichen Hintergrund wird das Ergebnis für den gesuchten wirksamen Flächenanteil maßgeblich von dem zur Zuordnung der Pixelbereiche verwendeten Schwellwert beeinflusst. So fällt beispielsweise bei einem weißen Glasfasertextil, welches nach dem Verfahren von CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] vor einem schwarzen Hintergrund gescannt wird, das Ergebnis für den wirksamen Flächenanteil umso geringer aus, je weiter der gewählte Schwellwert in Richtung des Schwarzbereiches verschoben wird. In diesem Fall werden immer weniger Pixel dem Schwarzbereich, d. h. dem Hintergrund, welcher der Matrixfläche entspricht, zugeordnet. Auch ist der gesuchte Schwellwert von der vorhandenen Helligkeit des Graustufenbildes abhängig. Je heller z. B. das Pixelbild ist, desto mehr wird sich auch der gesuchte Schwellwert in Richtung des Weißbereiches verschieben.

Der optimale Schwellwert muss genau so gewählt werden, dass alle Bestandteile der Textilstruktur dem einen Farbbereich – in diesem Beispiel Weiß – und die Zwischenräume zwischen den Fäden dem anderen Farbbereich – in diesem Fall Schwarz – korrekt zugeordnet werden. Dies kann beispielsweise durch manuelle Wahl des Schwellwertes geschehen, wobei die Erfahrung der auswertenden Person, d. h. die subjektive Einschätzung des Bearbeiters, eine wesentliche Rolle spielt. Diese subjektive Wahl erscheint jedoch nicht befriedigend, da eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse so nicht gewährleistet werden kann. Das Finden eines objektiven Kriteriums für die Ermittlung des optimalen Schwellwertes stellt somit eines der wichtigsten Kriterien bei der Entwicklung eines geeigneten Auswerteverfahrens dar.

5.4 Entwicklung und Anwendung eines geeigneten Verfahrens

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zunächst drei verschiedene Methoden der Bildbearbeitung untersucht. Diese werden im Folgenden als Methode 1–3 bezeichnet. Bei der Methode 1 wurden die Graustufenbilder aller Textilien mit einem identischen Schwellwert in Schwarzweiß umgewandelt. Dabei sind zwar bezüglich des Schwellwertes identische Bedingungen für die Auswertung aller Textilflächen gegeben, doch ist diese Methode extrem von dem gewählten Schwellwert zur Konvertierung in den Schwarz-Weiß-Modus abhängig. Des Weiteren können die stark durchscheinenden Polypropylengarne (siehe auch Abschnitt 5.3.5, Bild 5.10) bei dieser Methode im Unterschied zu den Glasfasergarnen nur bedingt erfasst werden, wodurch diese Methode als ungeeignet zur Auswertung textiler Flächenstrukturen einzustufen ist.

Bei der Methode 2 wurde aus diesem Grund von einer gleichen Festsetzung des Schwellwertes für alle Textilien weggegangen und für jedes Textil getrennt die Gradationskurve manuell eingestellt, bis an den Rändern der Garne scharfe Konturen entstanden. Diese Methode ermöglicht eine bessere Erfassung der durchscheinenden Polypropylengarne und kann in dieser Hinsicht als genauer und besser geeignet als die Methode 1 angesehen werden. Jedoch ist das Finden einer optimalen Gradationskurve für jedes einzelne Textil nur bedingt möglich und von der subjektiven Einschätzung des Bearbeiters abhängig. Somit ist auch diese Methode als ungeeignet hinsichtlich einer Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu beurteilen.

Genauere Ergebnisse infolge der Bildbearbeitung lassen sich mit der Methode 3 erzielen. Dabei werden nach und nach einzelne Farbbereiche der textilen Struktur durch ein helles Weiß ersetzt. Gegenüber einer automatischen Konvertierung bietet diese Methode den Vorteil, dass eine gezieltere Zuordnung der Weißbereiche zur textilen Struktur erfolgen kann, d. h. auf diese Weise können gezielt nur die Bildbereiche der Garne und Nähfäden einem hellen Weißton zugeordnet werden, nicht aber evtl. hellere Stellen des Hintergrundes. Bei dieser Methode ist eine vollständige Erfassung der durchscheinenden Polypropylenfasern möglich. Allerdings ist insbesondere diese manuelle Zuordnung der Pixelbereiche von der subjektiven Einschätzung des Bearbeiters abhängig, womit auch diese Methode als ungeeignet hinsichtlich einer Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu beurteilen ist.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass diese drei Methoden der Bildtransformation sämtlich von der subjektiven Einschätzung des Bearbeiters abhängig sind und daher zu Abweichungen der Ergebnisse von bis zu 200 % führen können. Somit muss festgestellt werden, dass die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit der Messwerte bei diesen drei untersuchten Methoden noch nicht ausreichend sind.

Wichtig ist also, wie im Abschnitt 5.3.7 festgestellt wurde, das Finden eines objektiven Kriteriums für die Zuordnung sowie einer geeigneten Aufnahmemethode. Eine Möglichkeit bietet dabei die Messung der textilen Strukturen mittels der digitalen Nahfeldphotogrammetrie. Die Idee besteht darin, die textilen Strukturen in einer einheitlichen Höhe über einer ebenen Unterlage zu befestigen und in einer dreidimensionalen Objekterfassung das Höhenprofil des Textils aufzunehmen (Bild 5.13). Alle Koordinaten, welche die Höhe Null besitzen, entsprechen den Öffnungen zwischen den Garnen und geben somit im Endergebnis den Anteil der Matrixfläche wider. Eine solche Messung war jedoch aus Kapazitätsgründen am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung im Rahmen dieser Arbeit leider nicht möglich. Zudem

wären auch hier Probleme mit durchscheinenden Filamentgarnen wie z. B. Polypropylen (siehe Abschnitt 5.3.5) zu erwarten, da es sich bei der Photogrammetrie ebenfalls um ein optisches Messverfahren handelt.

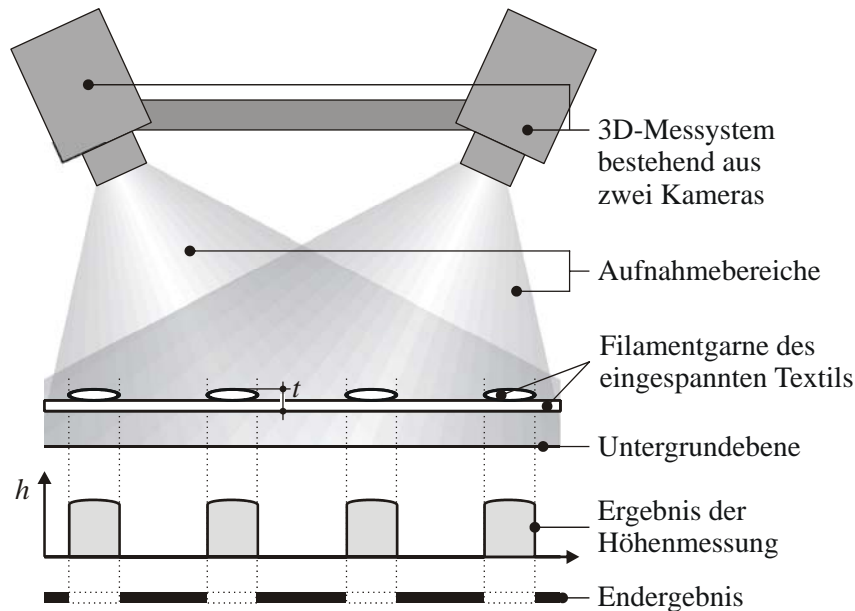


Bild 5.13 Möglichkeit für die photogrammetrische Höhenmessung und Auswertung

Aus diesem Grund wurde nach einer weiteren Möglichkeit zum Finden eines objektiven Kriteriums für die Zuordnung der Pixelbereiche gesucht. Die Hauptproblematik besteht dabei in der eindeutigen Detektion des Schwellwertes, welcher die Trennung zwischen den schwarzen (Matrix) und weißen (Textil) Pixelbereichen angibt, so dass zudem die Reproduzierbarkeit der gewonnenen Ergebnisse gegeben ist. Als Lösungsansatz hierfür wurde eine Auswertung der in Graustufen gescannten Bilddaten mittels Histogrammanalyse geprüft. Dazu wurden Textilproben der Abmessung 7 x 10 cm im Auflichtverfahren mit einer Auflösung von 1200 dpi vor einem schwarzen Hintergrund gescannt und anschließend ausgewertet.

In einem eigens dafür programmierten Algorithmus werden hierbei zunächst die Bilddaten der gescannten Graustufenbilder ausgelesen und als Häufigkeitsverteilung über die Grauwerte von 0 bis 256 aufgetragen (Bild 5.14). Dabei sind im Allgemeinen zwei lokale Maxima zu erwarten – eines im schwarzen Bereich (Matrix) und eines im hellen Bereich (Fäden). Als Kriterium für eine eindeutige Zuordnung zu den Farbwerten Schwarz und Weiß wurde das lokale Minimum zwischen diesen beiden Maxima als Schwellwert detektiert (Bild 5.14). Hierdurch ist die Zuordnung zu den Bereichen Schwarz und Weiß nicht mehr von der subjektiven Einschätzung des Bearbeiters abhängig. Der wirksame Flächenanteil in der Textilebene (= Matrixflächenanteil) ergibt sich aus dem Verhältnis der Anzahl dem Farbwert Schwarz zugeordneter Pixel zur Gesamtpixelzahl (Gl. (5.2)), wobei die Pixelanzahl der Fläche unter der Häufigkeitskurve im Histogramm entspricht.

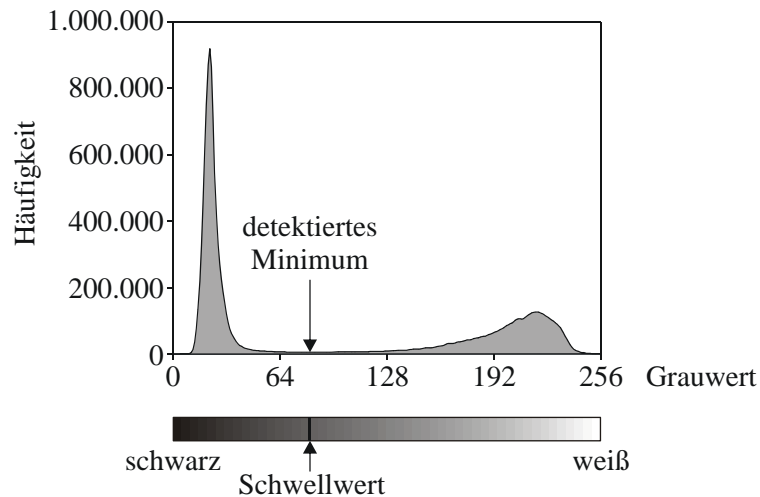


Bild 5.14 Beispiel Histogramm mit detektiertem Minimum (= Schwellwert)

$$k_{A,eff} = \frac{n_{Pxl,schwarz}}{n_{Pxl,ges}} = \frac{\sum_{\gamma=0}^S h(\gamma)}{\sum_{\gamma=0}^{256} h(\gamma)} \quad (5.2)$$

mit $n_{Pxl,schwarz}$... Anzahl schwarzer Pixel
 $n_{Pxl,ges}$ Gesamtpixelzahl
 γ Grauwert
 S Schwellwert
 h Häufigkeit

Im Folgenden soll die Anwendung dieser Methode anhand eines ausgewählten Textils, welches u. a. für die Querkraftverstärkung von Plattenbalken angewandt wurde, beispielhaft genauer erläutert werden. Die Auswertung der im Auflichtscanverfahren gewonnenen Graustufenbilddaten für das Textil NWM3-023-02 (s. Anhang A 1.2) liefert das in Bild 5.15, links dargestellte Histogramm. Hieraus lässt sich eindeutig ein lokales Minimum ermitteln, welches zur Bestimmung des Schwellwertes für die Transformation in ein Schwarzweißbild herangezogen werden kann. Dieser liegt im gezeigten Beispiel bei einem Farbwert von 6. Aus dem Verhältnis der schwarzen Pixel – im Histogramm der Bereich links des detektierten Schwellwertes – zur Gesamtpixelzahl ergibt sich nach Gl. (5.2) der wirksame Flächenanteil zu $k_{A,eff} = 0,11$ (Gl. (5.3)). In Abhängigkeit von dem Grauwert, der als Schwellwert verwendet wird, ergibt sich aus dieser Berechnung ein variabler Wert für den wirksamen Flächenanteil $k_{A,eff}$. Das Diagramm in Bild 5.15, rechts zeigt den Verlauf des wirksamen Flächenanteiles in Abhängigkeit vom gewählten Schwellwert und den errechneten Wert für das detektierte Minimum. Der gesuchte Wert für das Textil NWM3-023-02 kann diesem Diagramm an der Stelle des Grauwertes abgelesen werden, der dem lokalen Minimum zwischen dem Schwarz- und Weißbereich im Histogramm (Bild 5.15, links) entspricht.

$$k_{A,eff} = \frac{\sum_{\gamma=0}^6 h(\gamma)}{\sum_{\gamma=0}^{256} h(\gamma)} = \frac{n_{Pxl.,schwarz}}{n_{Pxl.,ges}} = \frac{1738109}{15622268} = 0,11 \quad (5.3)$$

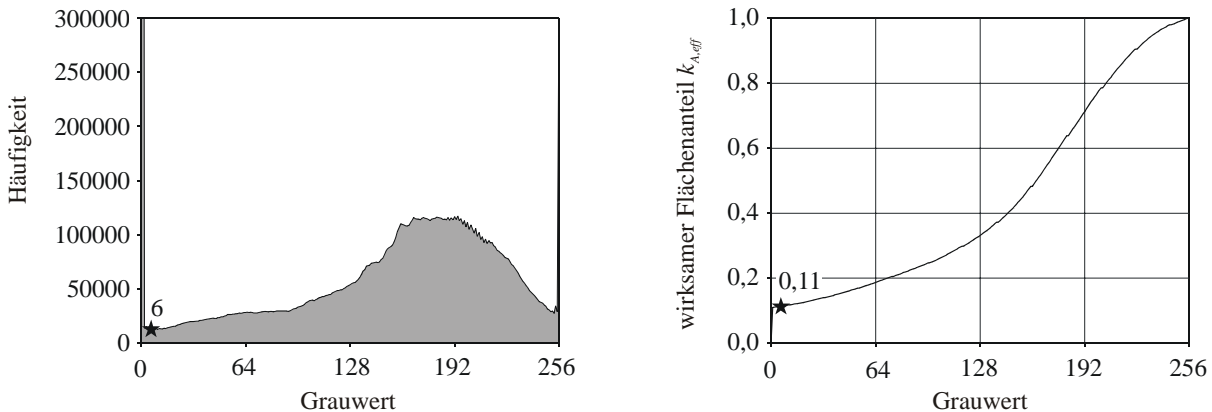


Bild 5.15 Histogramm und wirksamer Flächenanteil für NWM3-023-02, Textil unbehandelt (original), Auflichtscanverfahren

Die Zuordnung zu den Bereichen Schwarz und Weiß ist durch das Minimum-Kriterium nicht mehr von der subjektiven Einschätzung des Bearbeiters abhängig. Dennoch ist im Diagramm (Bild 5.15, rechts) aus dem Anstieg der Kurve um den errechneten Schwellwert herum zu erkennen, dass bereits eine geringe Schwankung des im Histogramm detektierten Minimums zu größeren Abweichungen des errechneten Wertes für den wirksamen Flächenanteil führt. Dies ist darin begründet, dass der Kontrast zwischen schwarzen und weißen Bereichen bei den Graustufenbilddaten der im Auflichtverfahren gescannten Textilproben noch nicht ausreichend stark ist. Während sich der Schwarzbereich (Matrix) im Histogramm (Bild 5.15, links) als eindeutige Spitze abzeichnet, nimmt der Weißbereich (Fäden) hier noch ein sehr breites Spektrum der Grauwerte von 6–256 ein. Dies führt zu einer vergleichsweise hohen Sensibilität des Verfahrens bezüglich einer geringen Schwankung des zu detektierenden Schwellwertes.

Das relativ breite Spektrum der Grauwerte im Weißbereich wird u. a. durch Schattenbildungen an den Kreuzungspunkten der Filamentgarne sowie im Bereich der Nähfäden hervorgerufen (siehe Abschnitt 5.3.4, Bild 5.9). Textilien mit vielen Fadenkreuzungen reagieren dabei besonders empfindlich gegenüber Ausleuchtungsdifferenzen.

Die Methode des Auflichtscans der originalen, unbehandelten Textilien vor einem schwarzen Hintergrund stößt zudem schnell an ihre Grenzen, sollen auch andere Fasermaterialien als Glasfasern untersucht werden. So erscheinen z. B. transparente Polypropylenfasern vor dem schwarzen Hintergrund in grau (siehe Abschnitt 5.3.5, Bild 5.10) und sind aus dem Histogramm nicht oder nur schwer als zu dem Faseranteil (weiß) zugehörig zu detektieren. Leichter verständlich erscheint diese Problematik, wenn man an Textilien mit Karbonfasern als Querbewehrung denkt (siehe Bild 5.16, links). In diesem Fall ist die oben beschriebene Zuordnung aus einem einfachen Graustufenscan der Textilien generell nicht mehr möglich,

da hier die Fasern zum Teil eine weiße und zum Teil eine schwarze Farbe besitzen (siehe auch Abschnitt 5.3.6). Somit ist hier weder ein schwarzer noch ein weißer Hintergrund als einziges Kontrastmaterial geeignet.

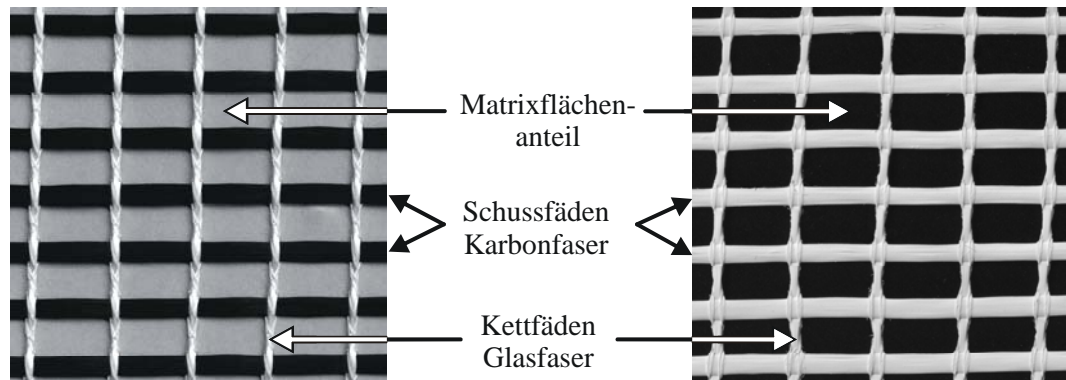


Bild 5.16 Textil mit gemischter Karbon- und Glasfaserbewehrung – original und geweißt

Als Lösungsansatz für diese Problematik wurde im Vorfeld des Scannens eine Vorbehandlung der textilen Strukturen mit einer matten, weißen Farbe vorgenommen (Bild 5.16, rechts). Auf diese Weise erscheinen zum einen alle Fasern – unabhängig von Material und Originalfarbe – in Weiß. Zum anderen werden Lichtreflektionen des originalen Fasermaterials durch die matte Farbe gedämpft (vgl. Bild 5.9 und Bild 5.18). Auch der Einfluss der Schattenbildung an den Fadenkreuzungen wird hierdurch etwas verringert. Die matt weiß vorbehandelten Fäden bilden somit einen besseren Kontrast zum schwarzen Hintergrund. Durch die Vorbehandlung der Textilien vor dem Scannen wird zusätzlich noch eine vom Fasermaterial unabhängige Bestimmung des wirksamen Flächenanteiles möglich. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass es durch Verwendung einer flüssigen Farbe zu einer teilweisen Verklebung der Filamente kommt, wobei kleinste Lücken zwischen den einzelnen Filamenten geschlossen werden. Diese werden dann bei der Auswertung nicht als Fadenzwischenraum sondern als zur textilen Struktur gehörig erkannt, was zu einer Unterschätzung des wirksamen Flächenanteiles führt. Gleichzeitig durchdringt jedoch die Zementmatrix des Feinbetons im eingebauten Zustand der textilen Bewehrung aufgrund ihres Größtkorndurchmessers von 1 mm ebenfalls nicht alle Lücken innerhalb der Filamentgarne. D. h. solche kleinsten Zwischenräume führen ebenfalls zu einer Störung der Matrixfläche in der Textilebene eines textil bewehrten Betonbauteils – also zu einer Verringerung des wirksamen Flächenanteils. Aus diesem Grund erscheint es sogar günstig, wenn solche Stellen bei der Flächenanalyse als zum Textil gehörig detektiert werden.

Bei Anwendung des oben beschriebenen Histogramm-Auswertalgorithmus lässt sich bei den weiß vorbehandelten Textilien aufgrund des besseren Kontrastes ein wesentlich breiteres Plateau zwischen den Maxima im Schwarz- und Weißbereich im Histogramm erkennen als bei den original eingescannten, unbehandelten Textilien (vgl. Bild 5.15 und Bild 5.17, links). Somit führt eine geringe Schwankung des aus dem Minimum ermittelten Schwellwertes nicht mehr zu solchen Differenzen des berechneten Wertes für den wirksamen Flächenanteil. D. h., die Anfälligkeit des berechneten Wertes für den wirksamen Flächenanteil auf eine geringfügige Änderung des detektierten Minimums bzw. Schwellwertes sinkt durch die Vorbehand-

lung der textilen Strukturen deutlich. Dies ist im Bild 5.17, rechts als flacheres Plateau der Kurve im Bereich des gesuchten Wertes gegenüber der Kurve im Bild 5.15, rechts erkennbar. Somit ist das Verfahren des Scannens der vorbehandelten Textilien dem Scannen der unvorbehandelten Originaltextilien vorzuziehen. Trotz Verbesserung des Kontrastes verbleibt dennoch der Effekt von Schattenbildungen im Bereich der Fadenkreuzungen (Bild 5.18), welche im Histogramm als Graustufen zwischen den Maxima von Weiß- und Schwarzbereich erscheinen und möglicherweise nicht korrekt dem Weißbereich (Fäden) zugeordnet werden.

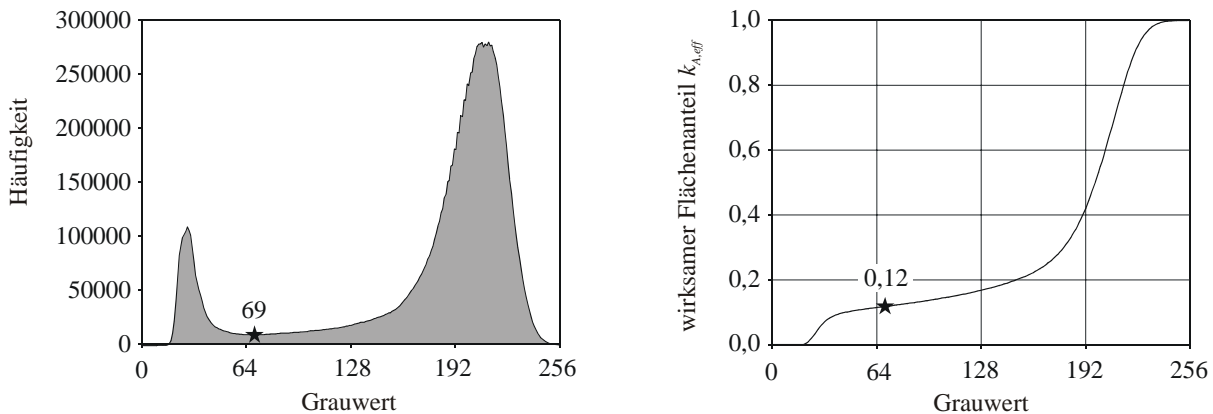


Bild 5.17 Histogramm und wirksamer Flächenanteil für NWM3-023-02, Textil weiß vorbehandelt, Auflichtscanverfahren

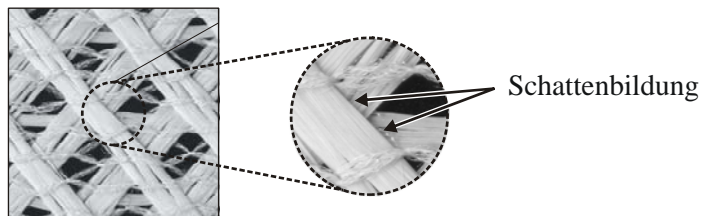


Bild 5.18 Schattenbildung an den Fadenkreuzungen des weiß vorbehandelten Textils

Aus diesem Grund ist eine weitere Erhöhung des Kontrastes zwischen Fäden und Hintergrund unabdingbar, um die Anfälligkeit des Auswerteverfahrens gegenüber geringen Schwellertschwankungen zu minimieren. Hierzu muss ein geeigneteres Scanverfahren gefunden werden, bei welchem zudem der Effekt der Schattenbildungen im Bereich der Fadenkreuzungen eliminiert wird. Als günstig für diesen Zweck erwies sich das Durchlichtscanverfahren. Hierbei werden alle Zwischenräume zwischen den Fäden vollständig durchleuchtet und erscheinen im Pixelbild weiß, während die Fäden selbst kaum Licht durchlassen und somit im Pixelbild im Schwarzbereich wiedergegeben werden. Der Kontrast zwischen Schwarz- und Weißbereich wird umso höher, je lichtundurchlässiger das in der textilen Struktur verwendete Fasermaterial ist. Da die in den meisten Textilstrukturen verwendeten Glasfasern aufgrund ihrer Materialeigenschaft jedoch lichtdurchlässig sind, ist auch bei Anwendung des Durchlichtscanverfahrens eine Vorbehandlung der Textilien mit einer Licht absorbierenden Farbe zwingend notwendig, da die Fasern sonst durchleuchtet werden (vgl. Bild 5.11, rechts). Zur Schaffung eines starken Kontrastes müssen sich die Fasern gegenüber den durchleuchteten Faserzwischenräumen deutlich schwarz abzeichnen. Hierfür hat sich

eine Vorbehandlung der textilen Strukturen mit einer matten, schwarze Farbe als optimal geeignet erwiesen (Bild 5.19, links). Zum einen wird dabei durch die Farbe Schwarz das vom Scanner ausgesendete Licht im Bereich der Fasern absorbiert. Zum anderen verhindert die Mattigkeit der verwendeten Farbe Lichtreflexionen an den Fasern, welche im Pixelbild statt einheitlichem Schwarz zu helleren Stellen führen und damit den Kontrast schwächen würden. Des weiteren entfällt hierbei das Problem der Schattenbildungen an den Fadenzweigungen, da nun die gesamte Textilstruktur im Pixelbild den Schatten gegenüber den durchleuchteten Fadenzwischenräumen darstellt (Bild 5.19, rechts). Auf diese Weise ist eine von Fasermaterial und -farbe unabhängige Bestimmung des wirksamen Flächenanteiles möglich.

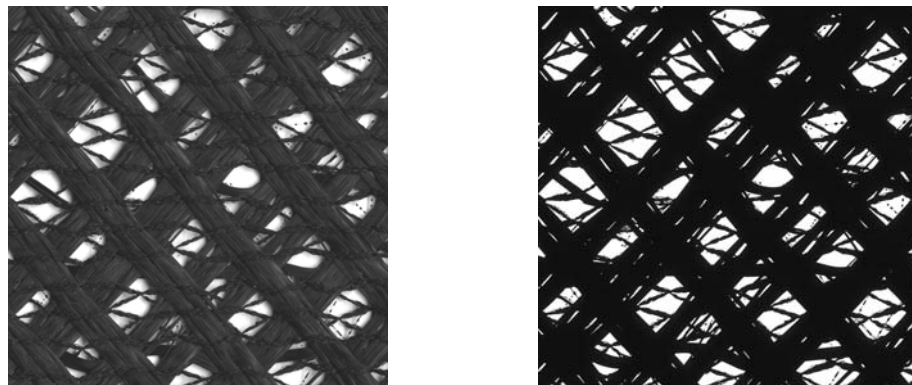


Bild 5.19 schwarz vorbehandeltes Textil und Ergebnis des Durchlichtscans

Das Ergebnis dieser optimierten Auswertevariante ist in Bild 5.20 für das ausgewählte Beispieltexil dargestellt. Der im Vergleich zu den weiß vorbehandelten und im Auflichtscanverfahren gescannten Textilien stärkere Kontrast zeigt sich im Histogramm als stark ausgeprägtes Plateau zwischen zwei extrem hohen Maxima im Schwarz- und Weißbereich (vgl. Bild 5.17 und Bild 5.20, links). Beim Vergleich der Bilder ist zu beachten, dass beim Durchlichtscanverfahren die Bereiche Schwarz und Weiß gegenüber dem Auflichtscanverfahren vertauscht sind, d. h. die Fäden nun schwarz und die Fadenzwischenräume weiß abgebildet werden. Dies führt zu einer Umkehrung der Skalierung der Grauwert-Achsen in den Diagrammen. Im auswertenden Diagramm (Bild 5.20, rechts) ist der Verlauf des Wertes für den wirksamen Flächenanteil in Abhängigkeit vom Grauwert des Schwellwertes dargestellt. Die Kurve zeigt ein weit ausgedehntes, nahezu horizontales Plateau im Bereich des aus dem Histogramm ermittelten Schwellwertes. Hieraus ist zu entnehmen, dass sich Schwankungen des detektierten Schwellwertes nun kaum noch auf den zu ermittelnden wirksamen Flächenanteil auswirken.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei diesem Verfahren zur Auswertung der Textilflächen, d. h. Durchlichtscanverfahren mit einer Auflösung von wenigstens 1.200 dpi und Vorbehandlung der Textilien mittels einer matt schwarzen Farbe, eine hohe Genauigkeit und gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gegeben ist. Somit kann das hier entwickelte Verfahren der Fachwelt zur weiteren Anwendung empfohlen werden. Mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Auswerteverfahren mittels Vorbehandlung der Textilien mit einer matt schwarzen Farbe und nachfolgendem Durchlichtscan steht nun eine einfach handhabbare Möglichkeit zur Verfügung, den wirksamen Flächenanteil für jede beliebige textile Bewehrungsstruktur

tur als Materialparameter zu ermitteln. Nach diesem Auswerteverfahren wurde im Folgenden für alle im Rahmen dieser Arbeit bei Haftzug- und Schubversuchen eingesetzten Textilien der wirksame Flächenanteil bestimmt. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind dem Anhang A 2.4 zu entnehmen.

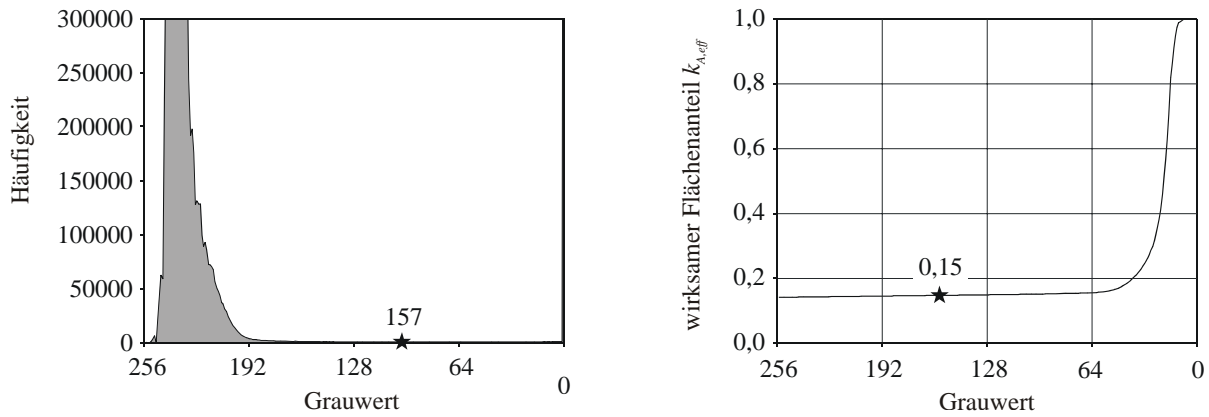


Bild 5.20 Histogramm und wirksamer Flächenanteil für NWM3-023-02, Textil schwarz vorbehandelt, Durchlichtscanverfahren

6 Untersuchungen zum Haftverbund

6.1 Allgemeines zur Oberflächenhaftzugfestigkeit

Ein wichtiger Teilaspekt für die Charakterisierung der Verbundeigenschaften zwischen einem Altbetonbauteil und einer nachträglich aufgetragenen Verstärkungsschicht ist die Beurteilung der Eigenschaften des Haftverbundes unter einer Oberflächenzugbeanspruchung. Diese senkrechte Zugbeanspruchung auf die einzelnen Schichten des Verbundsystems wird in der Literatur auch als *Schälbeanspruchung* bezeichnet (NEUBAUER [66]). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll die Untersuchung der Eigenschaften des Haftverbundes zum einen Aufschluss über die Festigkeitseigenschaften der einzelnen Schichten unter einer Schälbeanspruchung geben. Zum anderen liefert die aus Haftzugversuchen gewonnene Bruchfläche Aussagen über die Lage der maßgebenden Schicht innerhalb des Verstärkungssystems. Auf diese Weise gelingt eine Charakterisierung der erforderlichen Eigenschaften der neu aufgetragenen Schichten für eine optimale Ausnutzbarkeit der textiltbewehrten Feinbetonverstärkungsschicht. Die Eigenschaften des Haftverbundes stehen in engem Zusammenhang mit den zu untersuchenden Verbundeigenschaften unter Schubbeanspruchung bei der Einleitung der Zugkraft aus der Verstärkungsschicht in den Altbetonuntergrund (siehe Abschnitt 9.2) und bilden somit eine wichtige Grundlage zur modellhaften Beschreibung des Verbundverhaltens.

Die Prüfung der Oberflächenhaftzugfestigkeit bietet demnach eine einfache Möglichkeit zur Beurteilung der Tragfähigkeit eines aus mehreren Schichten bestehenden Verbundsystems. Bei der Instandsetzung von Hochbau- und Ingenieurbauwerken wird diese Prüfung als allgemein übliches Verfahren für die Güteprüfung der Tragfähigkeit des Untergrundes oder auch der neu aufgetragenen Schichten angewendet (SCHULZ [95]).

Zur Durchführung dieser Prüfung existieren eine Reihe verschiedener Regelwerke, von denen die wichtigsten nachfolgend beispielhaft aufgelistet sind:

- Oberflächenzugfestigkeit von Beton nach DIN 1048, Teil 2 [28]
- Abreißfestigkeit von Betonunterlagen und aufgetragenen Schichten nach ZTV-ING 03, Teil 1 [13]
- Haftzugfestigkeit von aufgetragenen Schichten nach DAfStb-Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen [25]

Das Prüfverfahren der Oberflächenhaftzugfestigkeit ist in diesen Regelwerken unter den unterschiedlichsten Bezeichnungen in ähnlicher Weise geregelt. Die Prüfung der Haftzugfestigkeit oder auch Oberflächenzugfestigkeit bzw. Abreißfestigkeit von Betonoberflächen bzw. Oberflächen von Beschichtungssystemen gibt Aufschluss über die Tragfähigkeit des Untergrundes und nachträglich aufgetragener Schichten. Die Prüfung ermöglicht ebenfalls eine Detektion evtl. vorhandener Schwachstellen im Beschichtungs- bzw. Verstärkungssystem.

Wesen des Verfahrens ist das Abreißen eines zuvor auf eine Betonoberfläche geklebten Prüfstempels mit einer Zugvorrichtung. Die Haftzugfestigkeit errechnet sich aus der auf die

Stempelfläche bezogenen gemessenen Höchstkraft und wird nach den gängigen Richtlinien in der Einheit N/mm² angegeben, siehe Gl. (6.1).

$$f_{at} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d_s^2} \quad (6.1)$$

mit f_{at} Haftzugfestigkeit
 F gemessene Bruchkraft
 d_s Durchmesser des Prüfstempels

Der so ermittelte Zahlenwert der Haftzugprüfung gibt die Tragfähigkeit des gesamten Verbundsystems gegenüber einer oberflächlichen Zugbeanspruchung an und liefert somit eine Aussage über die Beanspruchbarkeit des Verbundes.

Bei der Angabe der Versagensart wird in Kohäsions- und Adhäsionsversagen unterschieden. Bei einem Kohäsionsversagen kann der Bruch entweder im Altbeton, in der neu aufgetragenen Schicht oder in der Klebschicht des Prüfstempels liegen, wobei Proben der letzteren Versagensart nicht zur Auswertung herangezogen werden dürfen, sobald dieser Anteil an der Bruchfläche 20 % übersteigt. Bei einem Adhäsionsversagen tritt der Bruch in einer Grenzschicht, z. B. zwischen Altbeton und Verstärkungsschicht ein. Die entstandenen Bruchflächen nach einer Haftzugprüfung geben Aufschluss über die schwächste Komponente im Verbundsystem.

6.2 Einfluss des Betongefüges des Verstärkungssystems

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Verbundfestigkeit des Verstärkungssystems ist insbesondere das Gefüge und die Oberflächenfestigkeit des zu verstärkenden Altbetonuntergrundes von Bedeutung. Nur wenn dieser Untergrund eine ausreichende Tragfähigkeit besitzt, ist eine Verstärkungsmaßnahme sinnvoll durchführbar. Dabei ist u. a. die Qualität der Oberflächenvorbehandlung von entscheidender Bedeutung. Vor der Aufbringung einer Verstärkungsschicht muss die Oberfläche frei von Zementschlamm, Zementhaut, losen Teilen, Gefügefehlstellen sowie verbundstörend wirkenden Substanzen wie z. B. Trennmittel und Anstrichresten sein. Anderenfalls muss mit einem Versagen des Haftverbundes zwischen dem Altbeton und der aufgetragenen Verstärkungsschicht oder dem Versagen der beanspruchten oberflächennahen Betonzone des Altbetonuntergrundes gerechnet werden.

Zur Charakterisierung der Tragfähigkeit des Untergrundes wird üblicherweise der Haftzugversuch herangezogen. Die Ergebnisse solcher Versuche an Normalbeton sind jedoch von vielen verschiedenen Einflussfaktoren abhängig und unterliegen relativ starken Streuungen (SCHULZ [95]).

Zunächst ist an dieser Stelle der Einfluss der Kornverteilung in der oberflächlichen Betonrandzone zu nennen. Geschalte oder ungeschalte Betonrandzonen weisen i. d. R. andere Eigenschaften als der im Inneren eines Bauteils befindliche Kernbeton auf. Durch die Schalung oder das Glätten an der freien Oberfläche wird den Zuschlagkörnern eine ebene Begrenzungsfläche vorgegeben, welche sie höchstens berühren, nicht jedoch durchdringen können.

Dies führt zu einer Reduktion des Zuschlaggehaltes an der Betonoberfläche und einer Erhöhung des Feinmörtel- bzw. Zementsteingehaltes (Bild 6.1). STÖCKL [98] fand heraus, dass die Körner an einer Betonrandfläche i.M. um die halbe Korngröße nach innen verschoben sind, weshalb auf den oberflächlichen Mörtelbereich eine mit Zuschlagkörnern angereicherte Zone folgt, welche bei ca. $2/3$ des Größtkorndurchmessers maximal wird. Der gleichmäßig aufgebaute Kernbeton beginnt dann bei ca. 1,3- bis 1,6-fachem Größtkorndurchmesser.

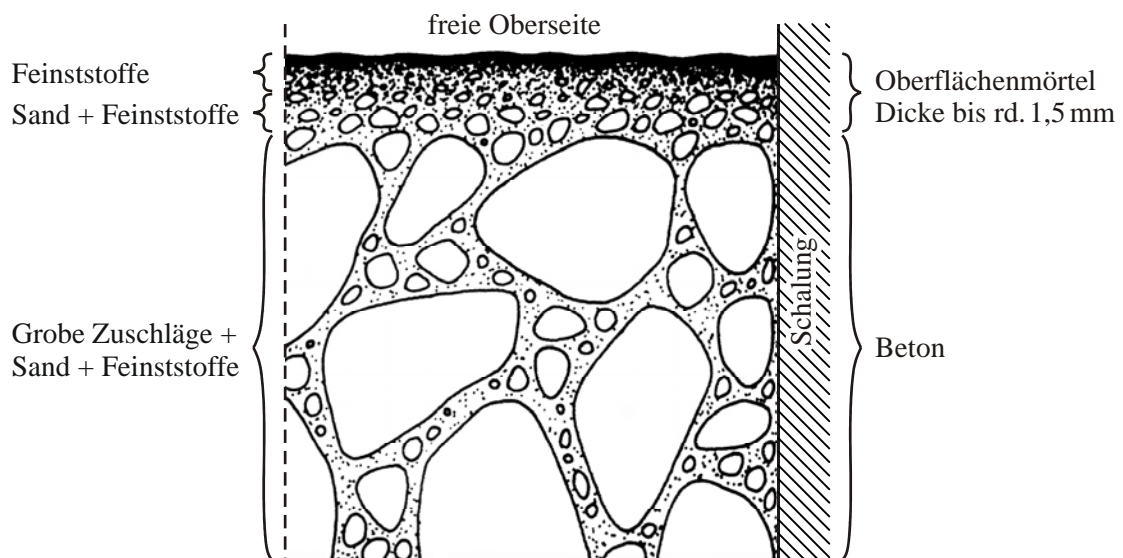


Bild 6.1 Betongefüge an der Oberfläche aus SCHULZ [95]

Ebenfalls Einfluss auf das Betongefüge haben Entmischungsvorgänge wie z. B. Feinmörtelausscheidungen oder die Verdrängung von Wasser infolge Rüttelwirkung. Feinmörtelangeereicherte Zonen schwinden stärker als der Kernbeton, was die Rissneigung in den Betonrandzonen erhöht. Mit Wasser angereicherte sogenannte Zementschlammeschichten entstehen bevorzugt an der freien Betonoberseite und vermindern infolge ihrer Porosität die Oberflächenfestigkeit des Betongefüges. Ebenso führen Austrocknungsvorgänge sowie Frosteinwirkung im jungen Betonalter zu einer Verminderung der Festigkeit, da die Hydratationsreaktion gestört wird (SCHULZ [95]).

Einen weiteren Einfluss besitzen Korrosion des erhärteten Betons infolge diverser chemischer Angriffe sowie Alterungsvorgänge wie z. B. die Karbonatisierung. Während die Betonkorrosion zu einer Schädigung der Betonrandzonen führt, kann die oberflächliche Festigkeit infolge der Karbonatisierung sogar über der des Kernbetons liegen (SCHULZ [95]). Geschädigter, korrodierter Beton muss vor der Aufbringung einer Verstärkungsschicht entfernt werden. Hierzu kommen verschiedene Oberflächenbehandlungsverfahren wie z. B. Sandstrahlen, Flammstrahlen, HDW-Strahlen oder Fräsen in Frage. Die Verfahren sind in ihrer Wirkungsweise sehr unterschiedlich – für eine genauere Betrachtung der Auswirkungen verschiedener Oberflächenbehandlungsverfahren wird an dieser Stelle auf RANDL [79], SCHULZ [95] und SCHULZ & WESCHE [96] verwiesen. Unter Beachtung der Tatsache, dass die karbonatisierte Schicht oftmals eine höhere Festigkeit als der darunterliegende Beton besitzt, sollte beim Vorbehandeln des Betonuntergrundes auf eine möglichst schonende Variante wie z. B. das Sandstrahlen zurückgegriffen werden, bei der möglichst wenig Beton, d. h. nur mindere

Zementschlämme, abgetragen und hauptsächlich die Oberfläche aufgraut wird, da sich andernfalls eine Minderung der Oberflächenzugfestigkeit einstellt.

6.3 Versagensmechanismen/-ebenen

Bei einem Verbundsystem aus einem Altbetonbauteil, das mit einer textilbewehrten Feinbetonschicht verstärkt wird, können bei der Prüfung der Oberflächenhaftzugfestigkeit prinzipiell die im Abschnitt 4.3 genannten drei Versagensebenen auftreten (Bild 6.2). Von der Oberfläche des Verstärkungssystems nach innen betrachtet sind das:

1. Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung,
2. Versagen in der Verbundfuge zwischen Altbeton und neuem Feinbeton sowie
3. Versagen des Altbetonuntergrundes.

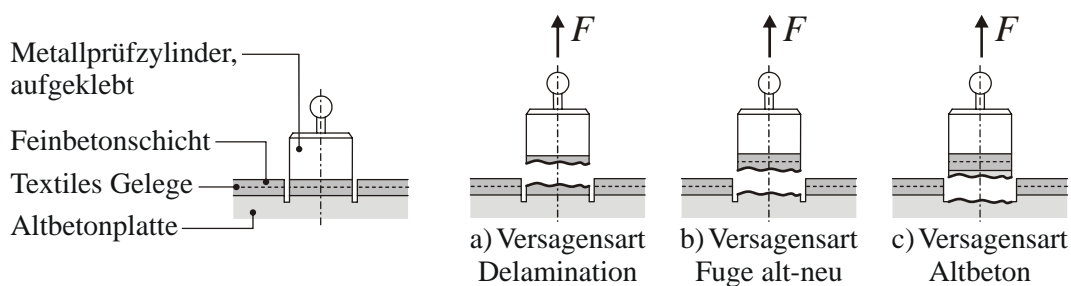
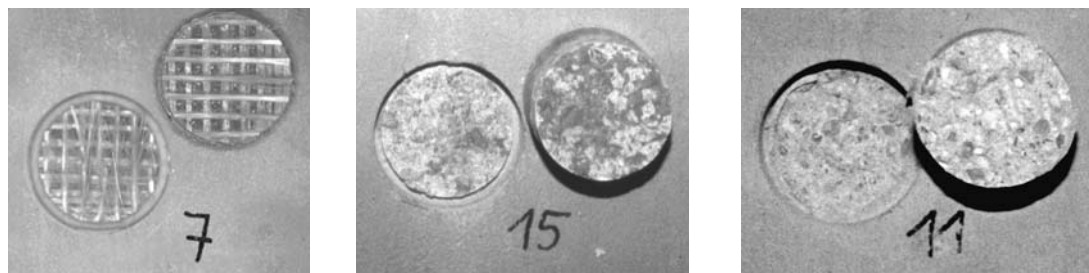


Bild 6.2 Prinzipdarstellung eines Haftzugversuches und der möglichen Versagensarten

Das erstgenante Versagen a) wird hauptsächlich von den Eigenschaften der textilen Bewehrungsstruktur sowie von der Haftzugfestigkeit der verwendeten Feinbetonmatrix der Verstärkungsschicht beeinflusst. Hierauf soll im nachfolgenden Abschnitt noch genauer eingegangen werden. Bei dem zweitgenannten Versagensfall b) spielt die Beschaffenheit der Verbundfuge, insbesondere deren Rautiefe, eine entscheidende Rolle. Das letztgenannte Versagen c) ist lediglich von der Haftzugfestigkeit des zu verstärkenden Altbetonuntergrundes abhängig und kann durch die Verstärkungsmaßnahme nicht beeinflusst werden. Bild 6.3 zeigt die Bruchbilder der oben genannten drei Versagensebenen nach dem Haftzugversuch.



a) Delamination

b) Fuge Alt-/Neubeton

c) Altbetonuntergrund

Bild 6.3 Bruchbilder der drei möglichen Versagensarten

6.4 Modellierung für den Widerstand gegen Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung

Die Ebene der textilen Bewehrungslage setzt sich zusammen aus einem Flächenanteil der textilen Bewehrungsstruktur und einem Flächenanteil der Feinbetonmatrix in den Zwischenräumen zwischen den Filamentgarnen und dem Nähfaden der textilen Struktur (Bild 6.4). Die Kett- und Schussfäden der textilen Bewehrungsstrukturen bestehen aus Filamentgarnen, welche quer zur Faserrichtung nahezu keine Zugfestigkeit besitzen. Auch durch den umgebenden Nähfaden kann keine nennenswerte Querkzugfestigkeit des textilen Geleges erreicht werden. Auf Grund dieser Beschaffenheit der textilen Gelegestruktur wird aufbauend auf den Ergebnissen von CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] angenommen, dass für den Abtrag der Zugkräfte senkrecht zur Ebene der textilen Bewehrung nur die zwischen den Filamentgarnen und dem Nähfaden vorhandene Matrixfläche herangezogen werden kann (Bild 6.5, a)). Der Anteil dieser Fläche, die sich effektiv am Lastabtrag beteiligt, wird durch den wirksamen Flächenanteil $k_{A,eff}$ beschrieben. Dieser ist abhängig von der jeweiligen verwendeten Textilstruktur und kann nach dem im Kapitel 5 entwickelten Verfahren für jedes Textil als Materialparameter ermittelt werden. Bezogen auf die Gesamtfläche ergibt sich damit eine entsprechend geringere mittlere aufnehmbare Haftzugspannung (Bild 6.5, b)).

Ein Versagen durch Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung tritt ein, sobald die Haftzugfestigkeit des Feinbetons in der wirksamen Fläche zwischen den Filamentgarnen der textilen Bewehrungsstruktur (Bild 6.5, c)) überschritten wird. D. h., bezogen auf die Gesamtfläche in der Ebene der textilen Bewehrungsstruktur ergibt sich ein gegenüber der Haftzugfestigkeit des reinen Feinbetons um den Faktor $k_{A,eff}$ abgeminderter Wert (Gl. (6.2)).

$$f_{tex,at} = k_{A,eff} \cdot f_{fc,at} \quad (6.2)$$

mit $f_{tex,at}$..Haftzugfestigkeit der Textilebene (\square Widerstand)

$k_{A,eff}$... wirksamer Flächenanteil in der Textilebene

$f_{fc,at}$... Haftzugfestigkeit des (ungestörten) Feinbetons

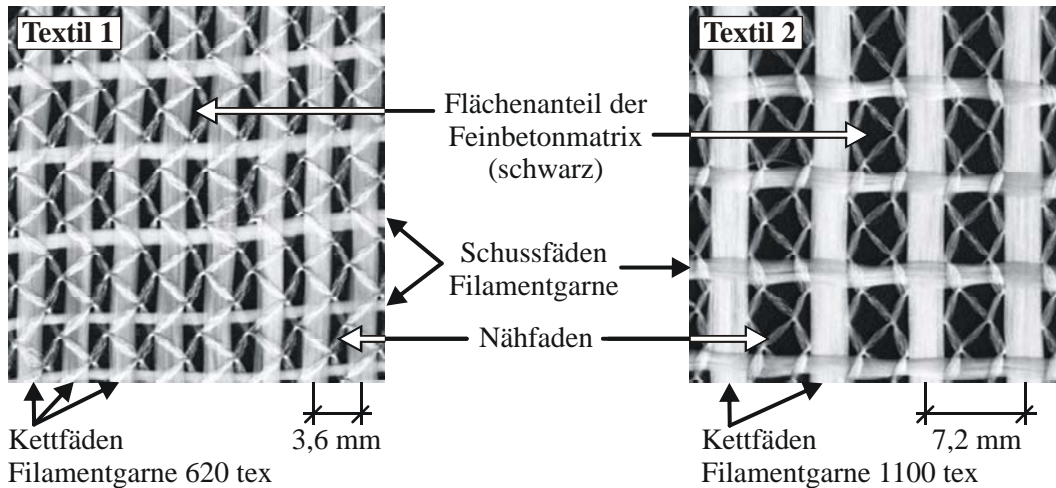


Bild 6.4 Textile Bewehrungsstrukturen und Flächenanteil der Feinbetonmatrix

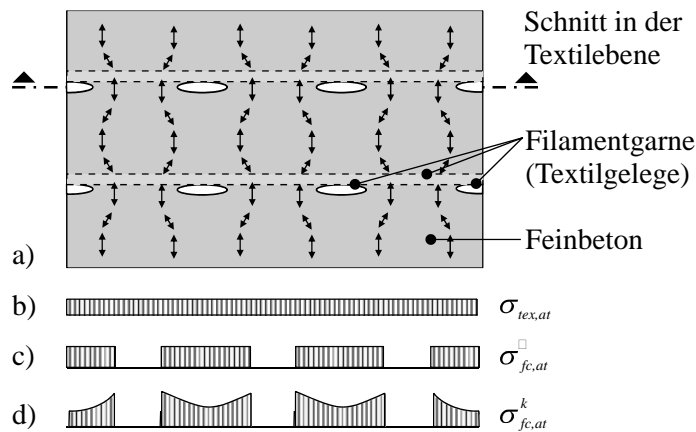


Bild 6.5 Spannungen in der Textilebene unter senkrechter Zugbeanspruchung
a) schematische Darstellung der Zugspannungstrajektorien
b) mittlere Spannung in der Textilebene
c) mittlere Spannung im Feinbeton zwischen den Filamentgarnen
d) Spannungsverteilung im Schnitt in der Textilebene

Die Haftzugfestigkeit in der Ebene der textilen Bewehrung kann noch durch weitere Faktoren beeinflusst werden. So kommt es bei einer Zugbelastung senkrecht zur Ebene der textilen Bewehrung zu Spannungskonzentrationen infolge der Einschnürung der Zugspannungsfelder in den Feinbetonmatrixbereichen durch die Öffnungen zwischen den Filamentgarnen hindurch (Bild 6.5, a)). Die Fäden der textilen Bewehrung vermindern somit nicht nur die Fläche, welche der Matrix zur Übertragung der Haftzugspannungen zur Verfügung steht, sondern führen zusätzlich zu Spannungskonzentrationen entlang der Filamentgarnränder (Bild 6.5, d)).

Diesem Gedanken folgend erfordert der in Gleichung (6.2) beschriebene Ansatz für den Widerstand gegen Delamination eine Erweiterung um einen Faktor $k_K \leq 1$, der diese widerstandsmindernde Kerbwirkung beschreibt (Gl. (6.3)).

$$f_{tex,at} = k_K \cdot k_{A,eff} \cdot f_{fc,at} \quad (6.3)$$

mit k_K Kerbfaktor

Wird abweichend von den ersten Ergebnissen der von CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] durchgeführten experimentellen Untersuchungen zusätzlich eine teilweise Mitwirkung der textilen Bewehrungsstruktur in Betracht gezogen, so muss der in Gl. (6.3) beschriebene Ansatz um diesen Anteil erweitert werden (Gl. (6.4)). Diese Möglichkeit kann bei einer Erhöhung der Quersteifigkeit der textilen Strukturen beispielsweise infolge einer nachträglichen Beschichtung in Betracht gezogen werden.

$$f_{tex,at} = (k_K \cdot k_{A,m} + \alpha_{tex} \cdot k_{A,tex}) \cdot f_{fc,at} \quad (6.4)$$

mit k_K Kerbfaktor

$k_{A,m}$ Flächenanteil der Matrix

α_{tex} Beiwert für die Mitwirkung des Textils

$k_{A,tex}$... Flächenanteil des Textils

Eigene vergleichende Haftzuguntersuchungen an unbehandelten und beschichteten Textilien haben jedoch gezeigt, dass sich die gemessenen Festigkeiten an Proben mit diesen Textilien nicht voneinander unterscheiden. Daraus ist zu schlussfolgern, dass es trotz einer Erhöhung der Steifigkeit infolge der nachträglichen Beschichtung der textilen Strukturen zu keiner messbaren Mitwirkung des Textils kommt (vgl. Bild 6.5, c)). Der in Gl. (6.4) eingeführte Beiwert α_{tex} nimmt somit auch bei beschichteten Textilien den Wert Null an, so dass eine Erweiterung der Gl. (6.2) für den Widerstand gegen Delamination um einen Mitwirkungsanteil der textilen Bewehrungsstrukturen nicht erforderlich ist.

Eigene experimentelle Untersuchungen haben weiterhin gezeigt, dass der wirksame Flächenanteil in der Textilebene den Haupteinflussparameter für die Haftzugfestigkeit in dieser Ebene darstellt. Weitere Einflüsse, wie der einer Kerbwirkung der Filamentgarne im Feinbeton, sind klein gegenüber der Versuchsstreuung und somit nicht quantifizierbar. Aus diesem Grund kann der in Gleichung (6.3) eingeführte Faktor für den Kerbeinfluss genügend genau zu $k_K \approx 1$ angenommen werden. Der Widerstand, den die Textilebene einer Schälbeanspruchung entgegensetzt, kann somit nach Gl. (6.2) aus dem wirksamen Flächenanteil der textilen Bewehrung und der Haftzugfestigkeit der sie umgebenden Feinbetonmatrix näherungsweise bestimmt werden.

6.5 Modellanwendung zur Vorhersage der Versagensebene und Textilauswahl

Im Folgenden soll das im Abschnitt 6.4 entwickelte Modell des Widerstandes gegen Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung zur Vorhersage der maßgebenden Versagensebene des Verstärkungssystems bzw. für die Auswahl geeigneter Textilien als Bewehrungsstruktur für die Feinbetonverstärkungsschicht Anwendung finden.

Das Verstärkungssystem mit textilbewehrtem Beton setzt sich aus den Verbundpartnern Altbetonuntergrund und textilbewehrte Feinbetonverstärkungsschicht zusammen (Bild 6.6). Dieses Verstärkungssystem kann unter einer Schälbeanspruchung innerhalb der verschiedenen Ebenen der Verstärkungsschicht – Altbeton, Verbundfuge alt-neu sowie Textilebene – versagen (Bild 6.2). Um eine Vorhersage der maßgebenden Versagensebene treffen zu können, müssen die Widerstände der möglichen Versagensebenen bezüglich einer auftretenden Schälbeanspruchung ermittelt und verglichen werden.

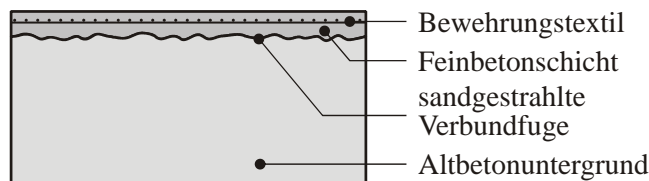


Bild 6.6 Aufbau eines Verstärkungssystems mit textilbewehrtem Beton

Die maßgebende Versagensebene ist diejenige Ebene mit dem geringsten Widerstand gegen eine Haftzugbeanspruchung. Der Widerstand dieser Ebene bestimmt den Gesamtwiderstand des Verbundsystems gegen eine solche Beanspruchung (Gl. (6.5)).

$$R_{at} = \min(R_{c,at}, R_{bj,at}, R_{tex,at}) \quad (6.5)$$

mit R_{at} Widerstand gegenüber Haftzugbeanspruchung

$R_{c,at}$... Widerstand gegenüber Haftzugbeanspruchung im Altbeton

$R_{bj,at}$.. Widerstand gegenüber Haftzugbeanspruchung in der Verbundfuge

$R_{tex,at}$. Widerstand gegenüber Haftzugbeanspruchung in der Textilebene

Der Widerstand des Altbetons gegenüber einer Haftzugbeanspruchung ist abhängig von den Materialeigenschaften des zu verstärkenden Bauteils und kann durch gesonderte Untersuchungen am Bauteil ermittelt werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass dieser Wert relativ großen Streuungen unterliegt, wie dies bei Zugprüfungen für gewöhnlich der Fall ist. Da durch das Bauteil vorgegeben, kann der Widerstand des Altbetons gegenüber einer Haftzugbeanspruchung für die Ermittlung der erforderlichen Parameter eines geeigneten Textils als feste Größe angesehen werden. Unter der Voraussetzung, dass der Widerstand der Verbundfuge diesen nicht unterschreitet (vgl. Abschnitt 4.4.2), können die erforderlichen Parameter der textilbewehrten Feinbetonverstärkungsschicht in der Weise ermittelt werden, dass ein Versagen durch Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung ausgeschlossen wird. D. h., bei einer bestimmten Untergrundtragfähigkeit des zu verstärkenden Bauteils ist es unter Kenntnis der Haftzugfestigkeit der zu verwendenden Matrix möglich, die erforderlichen Textilparameter so zu bestimmen, dass die maximale Tragfähigkeit des Altbetonuntergrundes ausgenutzt werden kann (s. a. Gl. (6.17)).

Für den effektiven Einsatz von textilbewehrtem Beton zur Bauwerksverstärkung sollte sowohl die Tragfähigkeit des Altbetonuntergrundes als auch die Tragfähigkeit der Verstärkungsschicht möglichst voll ausgenutzt werden können. Das bedeutet für die Tragfähigkeit

bezüglich des Haftverbundes, dass der Widerstand der Ebene der textilen Bewehrung gegen eine Schälbeanspruchung nicht maßgebend für den Gesamtwiderstand des Verbundsystems gegenüber einer solchen Beanspruchung werden darf (Gl. (6.6)).

$$R_{tex,at} \geq R_{at} \quad (6.6)$$

Ebenso wenig darf der Widerstand der Verbundfuge zwischen Altbeton und Feinbetonschicht maßgebend für ein Versagen der Verstärkungsschicht werden (Gl. (6.7)), um diesem Anspruch gerecht zu werden.

$$R_{bj,at} \geq R_{at} \quad (6.7)$$

Das heißt, aus ökonomischen Gesichtspunkten heraus wird gefordert, dass der Widerstand gegenüber einer Schälbeanspruchung sowohl in der Ebene des Verbundes zwischen Altbeton und Feinbeton als auch in der Ebene der textilen Bewehrung größer als der Widerstand des Altbetonuntergrundes sein soll (Gl. (6.8), (6.9)).

$$R_{bj,at} \geq R_{c,at} \quad (6.8)$$

$$R_{tex,at} \geq R_{c,at} \quad (6.9)$$

Unter der Annahme, dass der Widerstand einer Schicht gegenüber einer Schälbeanspruchung der Haftzugfestigkeit dieser Schicht entspricht, kann diese Forderung wie folgt ausgedrückt werden:

$$f_{bj,at} \geq f_{c,at} \quad (6.10)$$

mit $f_{bj,at}$...Haftzugfestigkeit in der Verbundfuge
 $f_{c,at}$ Haftzugfestigkeit im Altbeton

$$f_{tex,at} \geq f_{c,at} \quad (6.11)$$

mit $f_{tex,at}$..Haftzugfestigkeit in der Textilebene
 $f_{c,at}$ Haftzugfestigkeit im Altbeton

Die Haftzugfestigkeit in der Verbundfuge ist insbesondere abhängig von der vorhandenen Rautiefe des Altbetonuntergrundes bei der Verstärkungsmaßnahme (siehe Abschnitt 2.3.4). Durch eine ausreichende Oberflächenvorbehandlung kann der Forderung nach Gl. (6.10) entsprochen werden (vgl. hierzu Abschnitt 6.6.5).

Die Erfüllung der Forderung nach Gl. (6.11) steht in unmittelbarem Zusammenhang mit den Eigenschaften der zu verwendenden textilen Bewehrung. Diese muss von Ihrer Beschaffenheit so gestaltet sein, dass der verbundstörende Einfluss der Textillage den Betrag der erhöhten Haftzugfestigkeit des Feinbetons gegenüber der des Altbetonuntergrundes nicht überschreitet. Das bedeutet genauer ausgedrückt: infolge der höheren Festigkeit des Feinbetons der Verstärkungsschicht gegenüber der Haftzugfestigkeit des Altbetonuntergrundes ergibt sich die in Gl. (6.12) dargestellte Differenz. Gleichzeitig wird die hohe Haftzugfestigkeit des Feinbetons durch die textile Bewehrungsstruktur vermindert (Gl. (6.13), (6.14)).

$$\Delta f_{(fc-c),at} = f_{fc,at} - f_{c,at} \quad (6.12)$$

$$f_{tex,at} = k_{A,eff} \cdot f_{fc,at} \quad (6.13)$$

$$\Rightarrow \Delta f_{(fc-tex),at} = f_{fc,at} - f_{tex,at} = (1 - k_{A,eff}) \cdot f_{fc,at} \quad (6.14)$$

Aus der Forderung nach Gl. (6.11) darf diese Differenz der Haftzugfestigkeit des bewehrten Feinbetons gegenüber dem unbewehrten Feinbeton die Differenz der Haftzugfestigkeit zwischen unbewehrtem Feinbeton und Altbeton nicht überschreiten. Anderenfalls wird die Ebene der textilen Bewehrung maßgebend für ein Versagen des Verbundsystems unter Haftzugbeanspruchung. D. h., aus der Forderung

$$\Delta f_{(fc-tex),at} \leq \Delta f_{(fc-c),at} \quad (6.15)$$

folgt durch Einsetzen der o. a. Gleichungen:

$$(1 - k_{A,eff}) \cdot f_{fc,at} \leq f_{fc,at} - f_{c,at} \quad (6.16)$$

Durch Umstellen erhält man einen Mindestwert für den wirksamen Flächenanteil in der Ebene der textilen Bewehrung. Der wirksame Flächenanteil ist abhängig von den Haftzugfestigkeiten des vorhandenen Altbetons am zu verstärkenden Bauwerk und der Haftzugfestigkeit der verwendeten Feinbetonmatrix (Gl. (6.17)).

$$k_{A,eff} \geq \frac{f_{c,at}}{f_{fc,at}} \quad (6.17)$$

Mit Hilfe dieses Mindestwertes des wirksamen Flächenanteiles der Feinbetonmatrix in der Ebene der textilen Bewehrung gelingt eine einfach handhabbare Klassifizierung der vorhandenen textilen Bewehrungen hinsichtlich ihrer Eignung bezüglich ihres Widerstandes gegenüber einer Schälbeanspruchung.

In Abhängigkeit von der Verstärkungsaufgabe und den tatsächlich vorhandenen Festigkeitseigenschaften am speziellen Objekt wird sich die Forderung nach Gl. (6.11) möglicherweise nicht immer ganz erfüllen lassen. D. h., es besteht u. U. die Möglichkeit, dass sich infolge bestimmter Festigkeitsverhältnisse eine Delamination als maßgebende Versagensart nicht ausschließen lässt, aber gleichwohl bis zu dieser Grenze eine Verstärkungswirkung erzielt werden kann. In solchen Fällen ist es angebracht, dennoch eine textile Struktur zu wählen, deren Eigenschaften dem ermittelten Mindestwert des wirksamen Flächenanteiles möglichst nahe kommen, um eine möglichst hohe, wenn auch nicht vollständige, Ausnutzung der Tragfähigkeit der Verstärkungsschicht zu erreichen.

6.6 Eigene experimentelle Untersuchungen

6.6.1 Probekörper und Versuchsdurchführung

Die experimentellen Untersuchungen zur Haftzugfestigkeit nach DIN 1048, Teil 2 [28] dienen zum einen der Bestimmung des Versagensortes des Verbundsystems aus Altbeton und textilbewehrter Feinbetonverstärkungsschicht und zum anderen der Bestimmung der Haft-

zugfestigkeit an der schwächsten Stelle des Verbundsystems. Ergänzend zur DIN wurden die Empfehlungen zu Bohrtiefe, Zeitpunkt und Art der Bohrung, Probengeometrie sowie Prüfungsgeschwindigkeit von SCHULZ [95] und WINKLER & GRUNER [106] aufbauend auf CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] für die Durchführung der Haftzugversuche herangezogen. Zur Simulation eines typischen Altbetonuntergrundes wurden dazu plattenförmige Grundkörper 600 x 600 x 100 mm aus Normalbeton hergestellt. Diese wurden nach 28 Tagen mit einer 8 mm starken textilbewehrten Feinbetonverstärkungsschicht beschichtet. Bei der Aufbringung der Verstärkungsschicht wird zwischen zwei Verfahren unterschieden:

- Unter dem Begriff *Auflaminieren* wird das lagenweise Aufbringen von Feinbetonmatrix und textilem Gelege verstanden. Der Feinbeton wird dabei mit einer Glättkelle von oben auf den Untergrund aufgebracht. Nach dem Abziehen einer Feinbetonschicht wird das textile Gelege aufgelegt und in den Feinbeton eingearbeitet.
- Beim *Sprühen* wird die Feinbetonschicht mit einem Sprühgerät aufgebracht. Die textile Bewehrung wird wie beim Laminierten in die Feinbetonmatrix eingearbeitet. Das Verfahren eignet sich besonders für die vertikale oder über-Kopf-Aufbringung der Verstärkung.

Während das Auflaminieren infolge geringerem Technikeinsatz und somit einfacherer Handhabung im Labor leichter durchführbar ist, bietet das Sprühverfahren Vorteile bei vertikaler oder über-Kopf-Aufbringung. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden etwaige Auswirkungen dieser beiden Aufbringverfahren auf die erreichbaren Haftzugfestigkeiten untersucht.

Zur Herstellung der unbewehrten Altbetongrundkörper sollte ein Beton zur Anwendung kommen, welcher der Betonfestigkeit eines typischen zu verstärkendem Bauteiles entspricht. Hierzu wurde ein Normalbeton mit einem Größtkorn von 8 mm und einer Würfeldruckfestigkeit am 15er Würfel von i. M. 32 N/mm² verwendet. Als Feinbeton für die Verstärkungsschicht wurde die im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 528 in Dresden entwickelte Rezeptur mit 1 mm Größtkorndurchmesser verwendet (CURBACH [16]). Die genauen Rezepturen der verwendeten Betone sind Anhang A 1.1 zu entnehmen. Als Bewehrungstextilien der Feinbetonverstärkungsschicht wurden hauptsächlich biaxiale, aber auch mehraxiale nähgewirkte Gelege aus AR-Glas- und Kohlefaserfilamentgarnen unterschiedlicher Feinheiten eingesetzt. Die zugehörigen Eigenschaften der Filamentgarne sind im Anhang A 1.2, Tab. A 1.2.1 tabellarisch aufgelistet. Zur Fixierung der Multifilamentgarne kamen drei unterschiedliche Bindungsarten der Nähfäden zum Einsatz (vgl. Abschnitt 3.1, Bild 3.2). Tab. A 1.2.2 im Anhang A 1.2 gibt einen Überblick über die bei den experimentellen Untersuchungen eingesetzten textilen Gelege. Dieser sind auch die zugehörigen Parameter der verwendeten textilen Gelege zu entnehmen.

Vor dem Aufbringen der textilbewehrten Betonschicht wurden die Oberflächen der Altbetonplatten mit Sand gestrahlt und die Rautiefe nach KAUFMANN [47] bestimmt. Die verstärkten Platten wurden 7 Tage lang durch Abdecken mit feuchten Tüchern nachbehandelt und bis zum 28. Tag innerhalb der Versuchshalle gelagert. Je Serie wurden 16 Einzelprüfungen durchgeführt. Dazu wurden je Platte 16 Probekörper mit einem Durchmesser von 50 mm mit Hilfe eines Ringbohrers freigebohrt (Bild 6.7). Bezüglich der Bohrtiefe wurde auf die Ergebnisse von SCHULZ [95] zurückgegriffen. Die dort untersuchte Abhängigkeit der gemessenen Haftzugfestigkeit von der gewählten Bohrtiefe bei Normalbeton ergab bei geringen Bohrtie-

fen erhöhte Messwerte für die Haftzugfestigkeit (Bild 6.8). Ab einer Bohrtiefe von 10 mm und mehr trat keine Verringerung der Messwerte mehr ein. Aus diesem Grund wurde für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Haftzugversuche eine Bohrtiefe von 10 mm in den Altbetonuntergrund gewählt. D. h., die Tiefe der Ringnut beträgt 10 mm plus Dicke der Verstärkungsschicht. Bei einer 8 mm starken Verstärkungsschicht ergeben sich beispielsweise 18 mm Gesamtbodrtiefe.

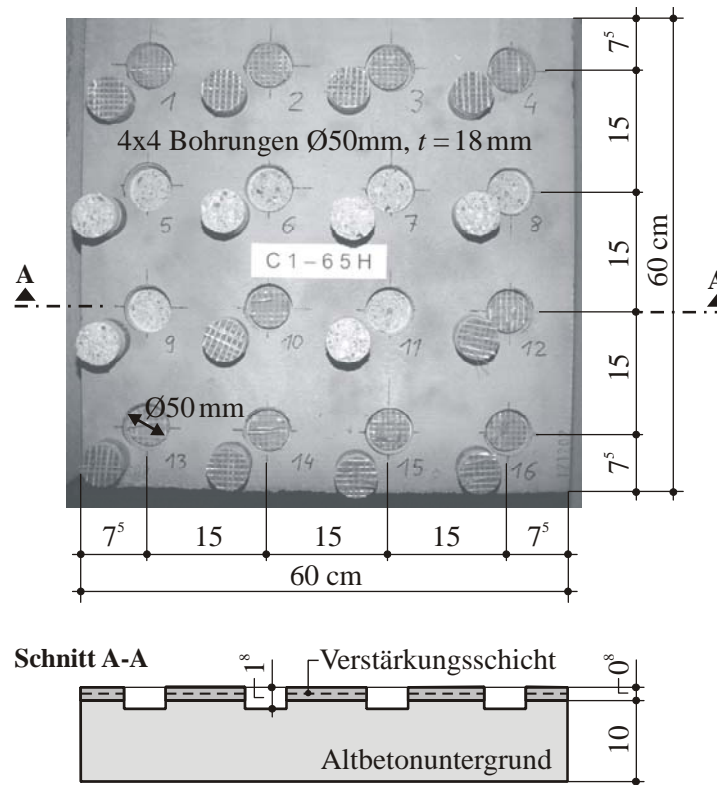


Bild 6.7 Darstellung der verwendeten Versuchsplatten

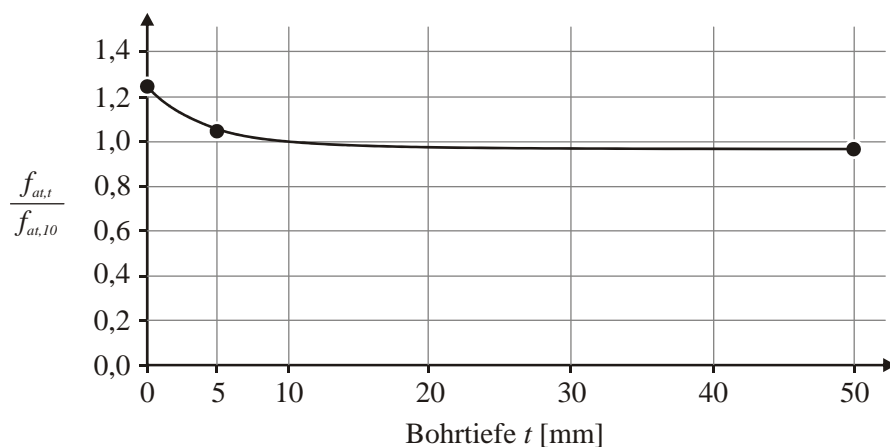


Bild 6.8 Haftzugfestigkeit für verschiedene Bohrtiefen t bezogen auf die Haftzugfestigkeit bei $t = 10$ mm aus SCHULZ [95]

Das Prinzip der Haftzugversuche ist im Bild 6.9 dargestellt. Durch Aufbringen einer oberflächlichen Zugbelastung F senkrecht zur Ebene der textilbewehrten Verstärkungsschicht wird der maximale Widerstand des Verbundsystems gegenüber einer Schälbeanspruchung ermittelt. Dieser entspricht der gemessenen Haftzugfestigkeit der schwächsten und somit zuerst versagenden Schicht.

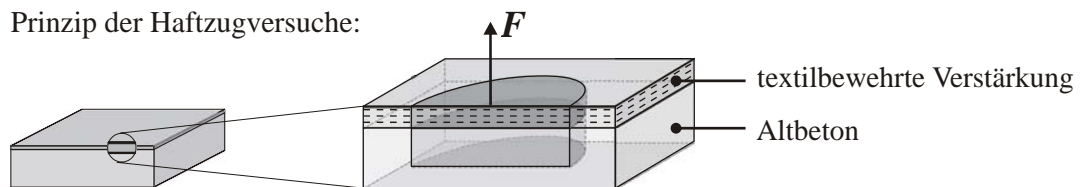


Bild 6.9 Prinzipdarstellung einer Haftzugprüfung

Zwei bis drei Tage vor der Prüfung werden Stahlstempel für den Anschluss der Zugvorrichtung des Prüfgerätes auf die freigebohrten Zylinder aufgeklebt. Hierzu wird ein Zweikomponenten-Epoxydharzkleber verwendet. Mit Hilfe einer Dosenlibelle werden die Stahlstempel exakt waagrecht auf den Probekörpern einjustiert.

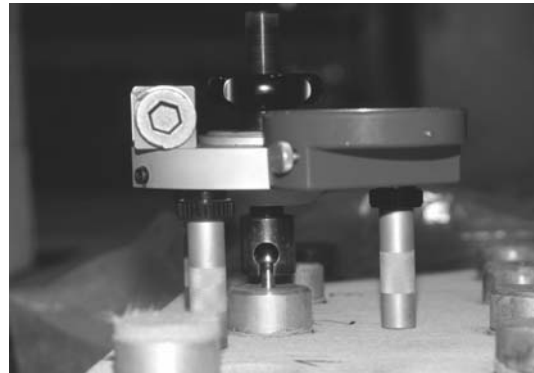
Die Messung der Haftzugfestigkeiten wurde mit dem transportablen Prüfgerät DYNA Z 15 durchgeführt (Bild 6.10). Die Kraft wird dabei manuell aufgebracht. Der Richtwert für die Belastungsgeschwindigkeit beträgt 100 N/s. Die gemessene Bruchkraft liefert unter Kenntnis des Prüfstempeldurchmessers die gesuchte Haftzugfestigkeit (siehe auch Gl. (6.1)). Die Prüfung erfolgte einheitlich 28 Tage nach dem Aufbringen der Verstärkungsschicht. Entsprechend den Ergebnissen von WINKLER & GRUNER [106], dass geringe Änderungen der Prüfbedingungen wie z. B. des verwendeten Prüfgerätes, des Zeitpunktes der Bohrung, der Probekörpergeometrie sowie der Lagerungsbedingungen erhebliche Auswirkungen auf die gemessenen Festigkeitswerte haben, wurden die Prüfbedingungen im weiteren Verlauf der Untersuchungen zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht mehr verändert. Als Regelprüfungen wurden zusätzlich die Druckfestigkeit des Altbetons sowie die Biegezug- und Druckfestigkeit des Feinbetons nach EN 196-1 [30] im Alter von 28 Tagen geprüft. Die Lagerung der Feinbetonregelprüfkörper erfolgte nach EN 1015-11 [31]. Weitere Einzelheiten zur Versuchsdurchführung inklusive der Vor- und Nachbereitung der Probekörper sind dem Anhang A 3.1 zu entnehmen.

Bei Textilien mit großen Öffnungsweiten, welche die Anforderungen eines Mindestwertes des wirksamen Flächenanteiles der Feinbetonmatrix nach Gl. (6.17) erfüllen, führt die oben beschriebene Probekörpergeometrie grundsätzlich zu einem Versagen im Altbetonuntergrund. Um auch für ggf. höher tragfähige Altbetonuntergründe als dem hier verwendeten Altbeton Aussagen über die Grenztragfähigkeit bezüglich einer Haftzugbeanspruchung treffen zu können, ist es jedoch notwendig, die erreichbare Haftzugspannung für den Versagensfall Delamination auch für solche Textilien zu kennen. Da die Haftzugfestigkeit in der Ebene der textilen Gelegestrukturen bei einem Probekörperversagen im Altbetonuntergrund nicht ermittelbar ist, wurde die Probekörpergeometrie für diese Fälle so abgewandelt, dass eine von der Tragfähigkeit des Altbetonuntergrundes unabhängige Prüfung möglich wird. Dazu wurden Haftzugproben hergestellt, die nur aus Feinbeton und Textil bestehen (Bild 6.11). D. h. es

wird die textilbewehrte Feinbetonverstärkungsschicht ohne Altbetonuntergrund geprüft, um ein vorzeitiges Versagen im Altbeton mit Sicherheit ausschließen zu können. Die Dicke der hierfür herzustellenden textilbewehrten Feinbetonplatten entspricht dabei der Schichtdicke einer äquivalenten Feinbetonverstärkungsschicht auf einem Altbetonuntergrund. Genau wie bei den oben beschriebenen Haftzugversuchen wurden auch hier Zylinder mit einem Durchmesser von 50 mm freigebohrt. Diese wurden anschließend mit einem Zweikomponenten-Epoxydharzkleber auf einen höher tragfähigen Untergrund aufgeklebt. Gewählt wurden hierfür Stahlplatten, so dass ein vorzeitiges Versagen außerhalb der textilen Bewehrungslage verhindert wird (Bild 6.12).



a) Durchführung der Prüfung mit DYNA Z 15



b) Detailaufnahme der Lasteinleitung

Bild 6.10 Durchführung einer Haftzugprüfung**Bild 6.11** Haftzugprobekörper zur Prüfung ohne Altbetonuntergrund

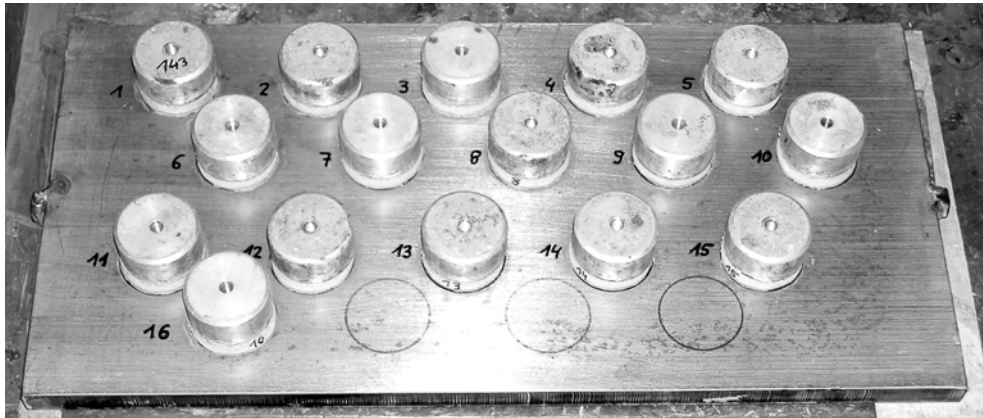


Bild 6.12 Auf Stahlplatten aufgeklebte Haftzugprobekörper mit Prüfstempeln

6.6.2 Versuchsprogramm und Parametervariation

Im Vordergrund der durchgeführten experimentellen Untersuchungen stand der Einfluss der textilen Bewehrung auf die erreichbaren Haftzugfestigkeiten. Material und Verarbeitung der als Bewehrung in Frage kommenden textilen Strukturen sind äußerst vielgestaltig. Somit variieren auch die Materialeigenschaften der textilen Strukturen in Abhängigkeit von den unterschiedlichsten Parametern. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die folgenden Einflussparameter der textilen Strukturen untersucht:

- die Feinheit der Multifilamentgarne,
- der Abstand der Multifilamentgarne untereinander,
- die Form der Multifilamentgarne infolge des Herstellverfahrens,
- die Art der Nähfadenbindung,
- das verwendete Fasermaterial,
- eine nachträgliche Beschichtung der textilen Strukturen und dazu
- der wirksame Flächenanteil der textilen Bewehrungsstrukturen.

Aus der Kombination der verschiedenen oben genannten Einflussparameter auf die textilen Bewehrungsstrukturen ergibt sich für jede textile Struktur ein anderer wirksamer Flächenanteil (siehe Kapitel 5). Dieser kann auch als eine Art Kennwert einer textilen Struktur betrachtet werden. Aufgrund der Ergebnisse von CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] wurden die Auswirkungen dieses Wertes auf die erreichbaren Haftzugfestigkeiten in der Ebene der textilen Bewehrungsstrukturen im Rahmen dieser Arbeit genauer untersucht.

Neben den Parametern, welche die Eigenschaften der textilen Bewehrungsstrukturen beeinflussen, wurden weitere für die spätere Berechnung wesentliche Parameter untersucht. Diese betreffen u. a. die Vorbereitung des Untergrundes oder aber die Art und Weise der Aufbringung der Verstärkungsschicht. Insbesondere handelt es sich dabei um Einflussparameter, die bei der praktischen Umsetzung auf einer Baustelle von Bedeutung sind, um Aussagen über die Eignung der Aufbringverfahren hinsichtlich der Ausführung treffen zu können. Ganz speziell wurden folgende Parameter untersucht:

- Die Rautiefe der Fuge, d. h. die Intensität der Vorbereitung des zu verstärkenden Altbetonuntergrundes,
- Verwendung einer zusätzlichen mineralischen Haftbrücke (bzw. Haftvermittler),
- unterschiedliche Aufbringverfahren der textilbewehrten Verstärkungsschicht, insbesondere Laminieren und Aufsprühen der Feinbetonmatrix,
- die Aufbringrichtung der textilbewehrten Verstärkungsschicht, insbesondere der Vergleich zwischen waagerechter, senkrechter und über-Kopf-Aufbringung sowie
- der Bewehrungsgehalt der Verstärkungsschicht, d. h. die Anzahl der Textillagen.

6.6.3 Versuchsergebnisse – Haftzugfestigkeiten

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden über 160 Serien mit je 16 Einzelversuchen zur Haftzugfestigkeit unterschiedlich textilbewehrter Verstärkungsschichten durchgeführt. Die Notwendigkeit der großen Versuchsanzahl ist dabei u. a. in der bei Beton unter Zugbelastung bekanntermaßen starken Streuung sowie in der umfangreichen Anzahl untersuchter Parameter (siehe Abschnitt 6.6.2) begründet. Die Durchführbarkeit der Haftzugversuche ist im Gegensatz zu den in Kapitel 7 beschriebenen Schubversuchen vergleichsweise einfach und mit einem wesentlich geringeren Aufwand durchzuführen. Die experimentellen Untersuchungen der Haftzugfestigkeit sind somit geeignet, eine umfangreiche Parameterstudie mit einer großen Bandbreite durchzuführen. Insbesondere ließen sich aus diesen Untersuchungen grundlegende Erkenntnisse zur maßgebenden Versagensebene von textilbewehrten Betonverstärkungssystemen unter einer Schälbeanspruchung ableiten. Bezüglich der Auswertung der Ergebnisse aus den Parameterstudien ist zwischen den verschiedenen Versagensmechanismen (siehe Abschnitt 6.3) zu differenzieren. Diese lassen sich anhand der Lage der Versagensebene im Versuch unterscheiden und entsprechend getrennt auswerten. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Parameterstudie dargestellt.

Bei den im Abschnitt 6.6.2 erstgenannten Parametern handelt es sich ausschließlich um *Parameter*, welche mit einer *Änderung der textilen Bewehrungsstruktur* zusammenhängen. Diese lassen sich, wenn überhaupt, nur schwer getrennt untersuchen, da die Änderung eines solchen Parameters im Regelfall die Änderung weiterer Parameter nach sich zieht. Beispielhaft sei dies an den Parametern Feinheit und Abstand sowie Form der Multifilamentgarne und Art der Nähfadenbindung erläutert: soll z. B. der Bewehrungsgrad nicht geändert werden, so führt eine Verdoppelung der Feinheit der Multifilamentgarne in der Hauptbewehrungsrichtung unwiderruflich zu einer Verdoppelung der Abstände zwischen diesen Multifilamentgarne. Ebenso bewirkt eine Änderung der Bindungsart des Nähfadens infolge anderer Umschnüpfung der Multifilamentgarne zu einer Änderung deren Querschnittsform. Diese Beispiele sollen zeigen, dass verschiedene Parameter der textilen Gelegestrukturen wechselseitig miteinander zusammenhängen und somit eine getrennte Analyse erschweren oder sogar unmöglich machen. Jedoch haben alle Variationen der textilen Gelegestrukturen gleichsam einen Einfluss auf dessen *wirksamen Flächenanteil*. Hieraus ergibt sich die Bedeutung dieses Parameters zur globalen Beschreibung der Materialeigenschaften einer textilen Bewehrungsstruktur bezüglich deren Eignung im Verbundsystem. Der wirksame Flächenanteil eines

Bewehrungstextils hat einen maßgeblichen Einfluss auf den Versagensfall Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung. Auf diesen wird im Abschnitt 6.6.6 ausführlich eingegangen.

Die Untersuchung des Parameters *Rautiefe* des Altbetonuntergrundes lieferte das Ergebnis, dass bei einer ausreichenden Untergrundvorbehandlung des Altbetonbauteiles (Freilegen des Korngerüstes) schon ab einer sehr geringen Rautiefe von 1 mm kein Versagen der Kontaktzone Alt-Neubeton mehr eintritt (vgl. Abschnitt 6.6.5). Eine größere Rautiefe hat demzufolge keine Auswirkungen mehr auf die Verbundtragfähigkeit, da die Verbundfuge alt/neu in diesen Fällen nicht mehr maßgebend für das Versagen wird.

Separate Untersuchungen zur Haftzugfestigkeit textilbewehrter Verstärkungsschichten mit und ohne *mineralische Haftbrücke* haben gezeigt, dass das Aufbringen einer zusätzlichen mineralischen Haftbrücke auf den Altbetonuntergrund vor dem Verstärken zu keiner Erhöhung der gemessenen Haftzugwerte führt. Im Gegensatz dazu kann eine unsachgemäße Verarbeitung eines solchen Haftvermittlers sogar zu einer Verminderung der Tragfähigkeit beitragen, wenn die mineralische Haftbrücke beispielsweise nicht ordnungsgemäß aushärtet und dadurch eine versagensmaßgebende Trennschicht zwischen Alt- und Feinbeton entsteht. Die Tatsache, dass die Applikation einer Haftbrücke selbst unter Laborbedingungen mit Schwierigkeiten verbunden ist, wurde auch von MENN ET AL. [58] festgestellt. Aus diesem Grund sollte bei ausreichend aufgerautem Untergrund grundsätzlich auf die Anwendung einer mineralischen Haftbrücke verzichtet werden.

Weiterhin wurden zwei *unterschiedliche Aufbringverfahren* – Handlaminieren und Sprühen – für die textilbewehrte Verstärkungsschicht untersucht. Die Auswertung von 436 Einzelversuchen, die im Laminierverfahren beschichtet wurden und 140 Einzelversuchen welche im Sprühverfahren beschichtet wurden, liefert das in Bild 6.13 dargestellte Diagramm. Hierfür wurden ausschließlich Versuchskörper mit horizontaler Aufbringrichtung ausgewertet. Die Haftzugwerte wurden zur besseren Vergleichbarkeit auf den Mittelwert der im Laminierverfahren gemessenen Werte bezogen. Der Vergleich der bezogenen Haftzugwerte im Diagramm zeigt, dass die gemessenen Haftzugfestigkeiten der handlamierten Probekörper geringfügig über denen der im Sprühverfahren beschichteten Probekörper liegen.

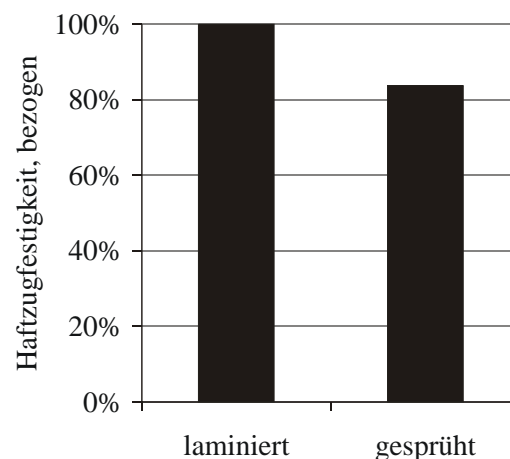


Bild 6.13 Abhängigkeit vom verwendeten Aufbringverfahren

Dies ist vermutlich auf einen besseren Verbund durch das Einarbeiten des textilen Geleges in die Feinbetonmatrix zurückzuführen, während im Sprühverfahren das textile Gelege nur vorsichtig an die Matrix angedrückt wurde. Durch ein stärkeres Einarbeiten des Geleges in die Feinbetonmatrix sollten jedoch auch im Sprühverfahren höhere Haftzugfestigkeiten erreicht werden können. Des Weiteren ist ein gewisser Einfluss von Witterungsunterschieden zu beachten, da die im Sprühverfahren hergestellten Probekörper aus Platzgründen außerhalb der Versuchshalle beschichtet wurden.

Zusätzlich zum Aufbringverfahren wurde auch der Parameter *Aufbringrichtung* untersucht. Beispielhaft seien hier z. B. die Biegeverstärkung von Kelleraußenwänden oder die Querkraftverstärkung von Balken als Anwendungsgebiete für eine vertikale Aufbringrichtung genannt. Die über-Kopf-Aufbringung findet z. B. bei der Biegeverstärkung von Deckenplatten Anwendung. Verstärkungsschichten, welche an senkrechte Flächen oder über Kopf appliziert werden sollen, sind zweckmäßig im Sprühverfahren zu beschichten, da eine Applikation im Handlaminierverfahren aus verfahrenstechnischen Gründen wenig sinnvoll erscheint. Unterschiede im Verbundverhalten infolge nichtwaagerechter Aufbringrichtung wurden aus diesem Grund ausschließlich für das Sprühverfahren untersucht, um verfahrensbedingte Unterschiede bei der Parameteranalyse zu eliminieren. Die Beschichtung der Probekörper im Sprühverfahren erfolgte für alle drei Aufbringrichtungen außerhalb der Versuchshalle. In Bild 6.14 sind die gemessenen Haftzugwerte, bezogen auf den Mittelwert der Messdaten bei horizontaler Aufbringrichtung, für die drei untersuchten Aufbringrichtungen aufgetragen. Den im Diagramm dargestellten Werten liegen dabei 140 Einzelversuche mit horizontaler Aufbringrichtung, 96 Einzelversuche mit vertikaler Aufbringrichtung und 67 Einzelversuche mit Aufbringung über Kopf zugrunde. Der Vergleich der Messwerte zeigt, dass bei einer Applikation der Verstärkungsschicht über Kopf die gleichen Haftzugfestigkeiten erreicht werden wie bei der horizontalen Aufbringung (Bild 6.14). Bei der vertikalen Aufbringung wurde jedoch eine nicht vernachlässigbare Reduktion der Haftzugfestigkeit der applizierten Verstärkungsschicht gegenüber der horizontalen Aufbringung festgestellt. Diese wird möglicherweise durch die geringe Scherfestigkeit des aufgesprühten Frischfeinbetons verursacht, was zu einem „Herunterfließen“ an der vertikalen Altbetonoberfläche und damit zu Verbundstörungen führt. Jedoch ist eine genauere Untersuchung des Parameters vertikale Aufbringung zur Überprüfung der hier gewonnenen Ergebnisse im Rahmen weiterführender Forschungsarbeiten erstrebenswert.

Zur Untersuchung des Parameters *Bewehrungsgehalt* wurden für zwei ausgewählte Textilien die Lagenanzahl variiert. Dabei wurden zusätzlich zu den standardmäßig mit je einer Textillage durchgeführten Haftzugversuchen die Anzahl Textillagen geprüft, welche bei den Verstärkungslaschen für die Schubversuche (siehe Kapitel 7) eingebaut wurde. Bild 6.15 zeigt die gemessenen Haftzugfestigkeitswerte von Versuchsplatten mit einer und vier Lagen Bewehrungstextil NWM3-004-01 sowie einer und sechs Lagen Bewehrungstextil NWM3-013-01. Es ist eine deutliche fallende Tendenz der gemessenen Haftzugfestigkeiten mit zunehmender Anzahl eingebauter Bewehrungstextillagen zu verzeichnen.

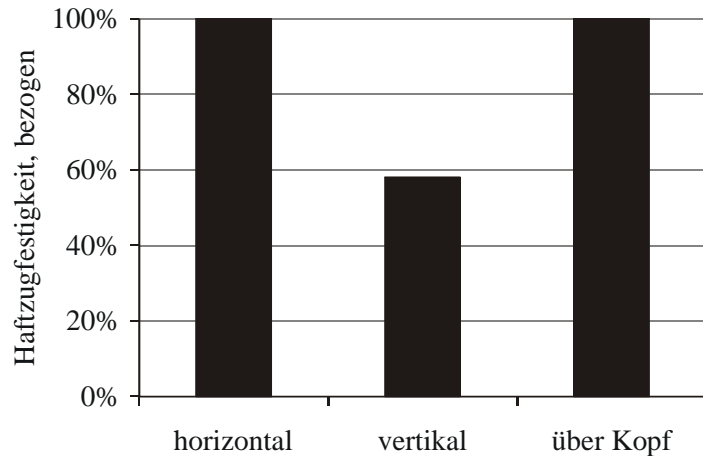


Bild 6.14 Abhängigkeit von der Aufbringrichtung

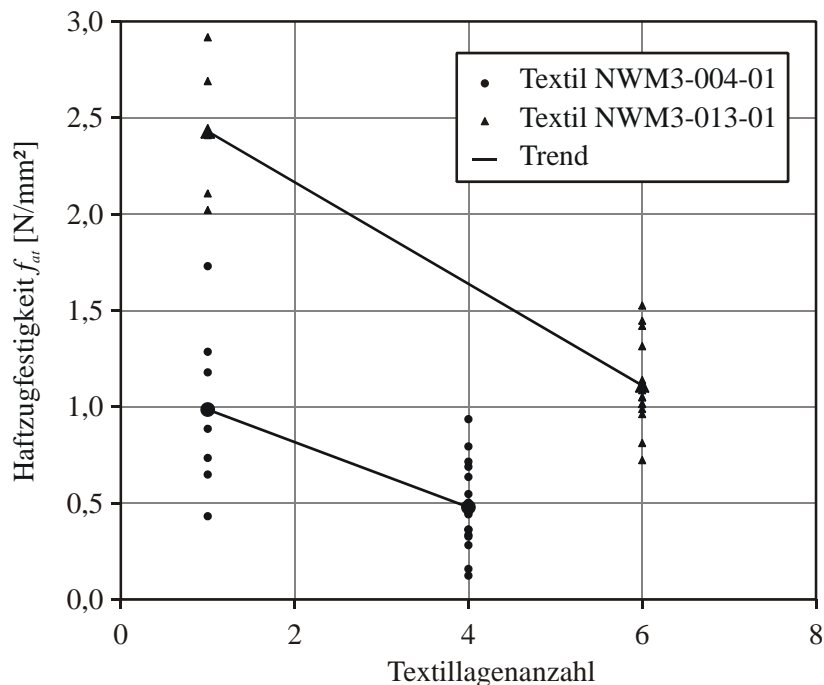


Bild 6.15 Abhängigkeit von der Textillagenanzahl

Das Verhalten ist zum einen auf die erhöhte Versagenswahrscheinlichkeit infolge der Steigerung der Anzahl von möglichen Fehlstellen zurückzuführen. Da das gesamte Verbundsystem immer an seiner schwächsten Stelle bzw. in der schwächsten Ebene versagt, wird bei mehreren Textillagen immer diejenige Lage mit der geringsten Haftzugfestigkeit maßgebend für das Verbundversagen. Die Anzahl der möglichen Versagensebenen nimmt proportional mit der Anzahl der eingebauten Textillagen zu. Somit steigt die Wahrscheinlichkeit eines früheren Versagens gegenüber Probekörpern mit nur einer Textillage mit zunehmender Anzahl von weiteren Bewehrungstextillagen.

Zum anderen liegen die Bewehrungstextilien beim Einbau von mehreren Lagen i. d. R. nicht geometrisch exakt übereinander. D. h., die Kett- und Schussfäden der übereinanderliegenden Textillagen haben einen einbautechnologisch bedingten Versatz gegeneinander (Bild 6.16),

so dass sich nie genau Faden über Faden und Öffnung über Öffnung befinden. Dies führt dazu, dass die Kraft übertragenden Matrixstege nicht vollständig von Lage zu Lage durchgehen. Der Kraftfluss wird dementsprechend abgelenkt (Bild 6.16, oben) bzw. die verfügbare Querschnittsfläche der Matrixstege reduziert sich (Bild 6.16, unten). Es bleibt festzuhalten, dass der tatsächlich vorhandene wirksame Flächenanteil der Matrix bei mehreren textilen Bewehrungslagen gegenüber dem an einer Textillage ermittelten wirksamen Flächenanteil geringer ausfällt. Da die erreichbare Haftzugfestigkeit beim Versagensfall Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung unmittelbar von diesem abhängig ist (siehe Abschnitt 6.6.6), sind bei mehreren Textillagen geringere Haftzugwerte als bei nur einer Lage die Folge.

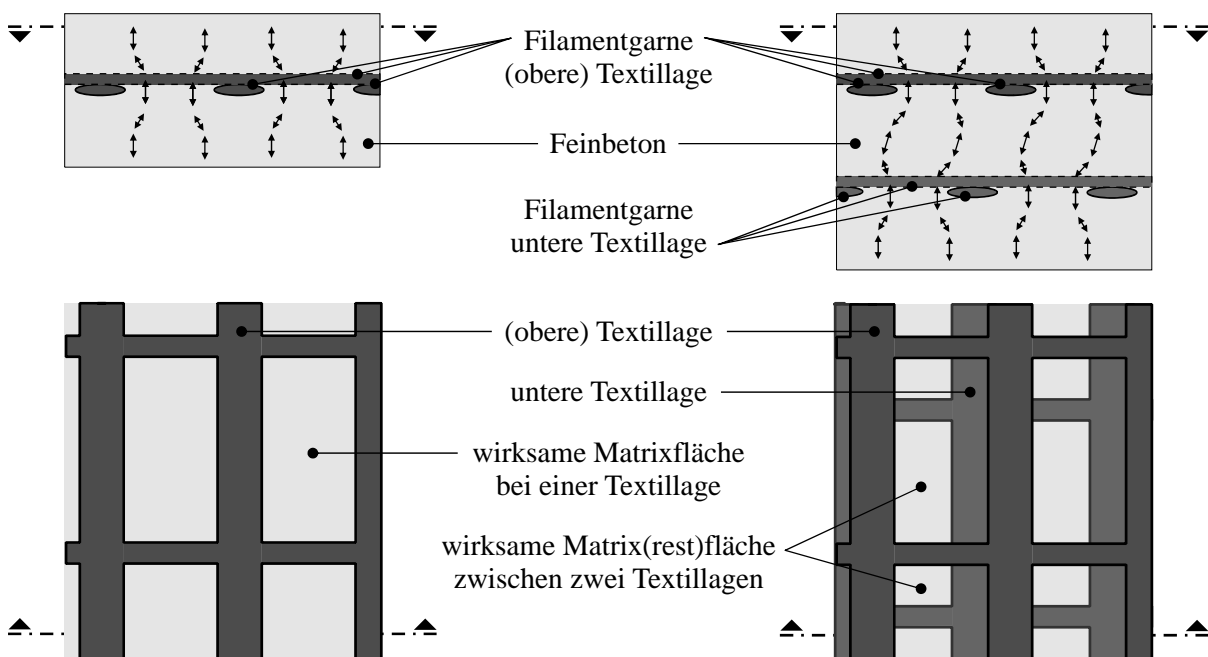


Bild 6.16 Reduktion der wirksamen Matrixfläche beim Einbau von mehreren Textillagen und Ablenkung des Kraftflusses und infolge des Versatzes

Die aus den Versuchswerten in Bild 6.15 ermittelte Abminderung der Haftzugfestigkeit infolge der Erhöhung der eingebauten Textillagen gegenüber der Haftzugfestigkeit bei einer Textillage zeigt Bild 6.17. Beispielhaft ergibt sich für sechs Textillagen NWM3-013-01 ($\Delta n = 6 - 1 = 5$) eine um den Faktor $k_{at,n} = 0,54$ verminderte Haftzugfestigkeit gegenüber dem für eine Textillage ermittelten Wert.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der experimentellen Haftzuguntersuchungen nach den drei Versagensfällen im Altbeton, in der Verbundfuge und in der Ebene der textilen Bewehrung getrennt dargestellt und im Anschluss eine Abgrenzung dieser Fälle gegeneinander vorgenommen.

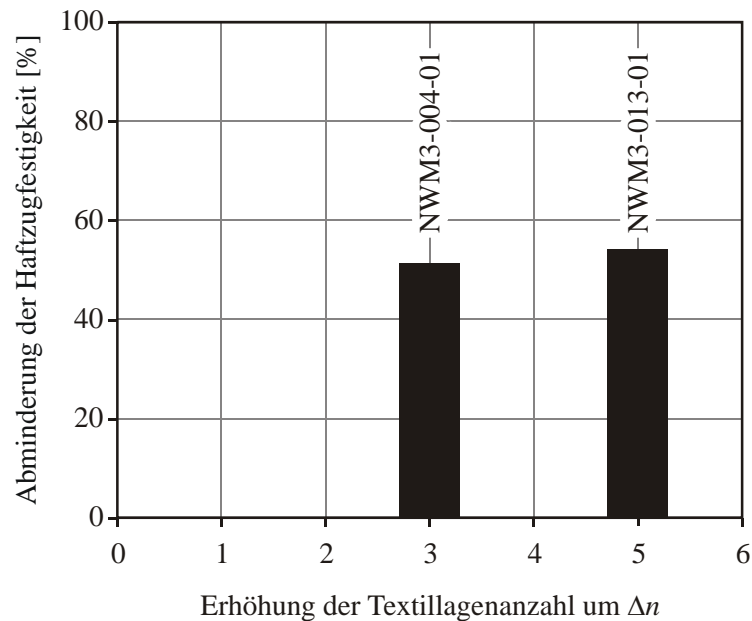


Bild 6.17 Reduktion der Haftzugfestigkeit infolge Erhöhung der Textillagenanzahl

6.6.4 Versagensfall Altbetonbruch

Der Versagensfall Bruch im Altbetonuntergrund ist in erster Linie abhängig von der Festigkeit des zu verstärkenden Altbetons. Dieser muss eine gewisse Mindesthaftzugfestigkeit aufweisen, damit eine nachträgliche Verstärkung überhaupt wirkungsvoll zum Einsatz kommen kann. Angaben hierzu finden sich in den einschlägigen Regelwerken wie z. B. der Instandsetzungsrichtlinie [25] und der ZTV-ING [13]. Hier wird für die „Abreißfestigkeit“ des Betonuntergrundes ein Mindestwert von $1,5 \text{ N/mm}^2$ im Mittel gefordert, wobei kein Einzelwert unter $1,0 \text{ N/mm}^2$ liegen darf.

Der im Rahmen des Versuchsprogramms eingesetzte Altbeton wies im Mittel eine Haftzugfestigkeit von $2,4 \text{ N/mm}^2$ auf und lag damit weit über dem geforderten Mindestwert (Bild 6.18). Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, weisen die gemessenen Haftzugfestigkeiten des Altbetons über alle durchgeführten Versuche eine gewisse Streuung auf. Dies ist bei Zugversuchen an Betonproben nicht ungewöhnlich. Bild 6.18 zeigt, dass selbst der 5%-Fraktilewert aller geprüften Probekörper, welche durch einen Bruch im Altbetonuntergrund versagt haben, weit über dem in einschlägigen Vorschriften geforderten Mindestwert für die mittlere Haftzugfestigkeit liegt. Der kleinste zulässige Einzelwert für die Betonhaftzugfestigkeit wurde in keinem der durchgeführten Versuche unterschritten. Die Darstellung belegt, dass der im Rahmen dieser Arbeit gewählte Beton als Beschichtungsuntergrund für die hier durchgeführten Versuche grundsätzlich geeignet ist.

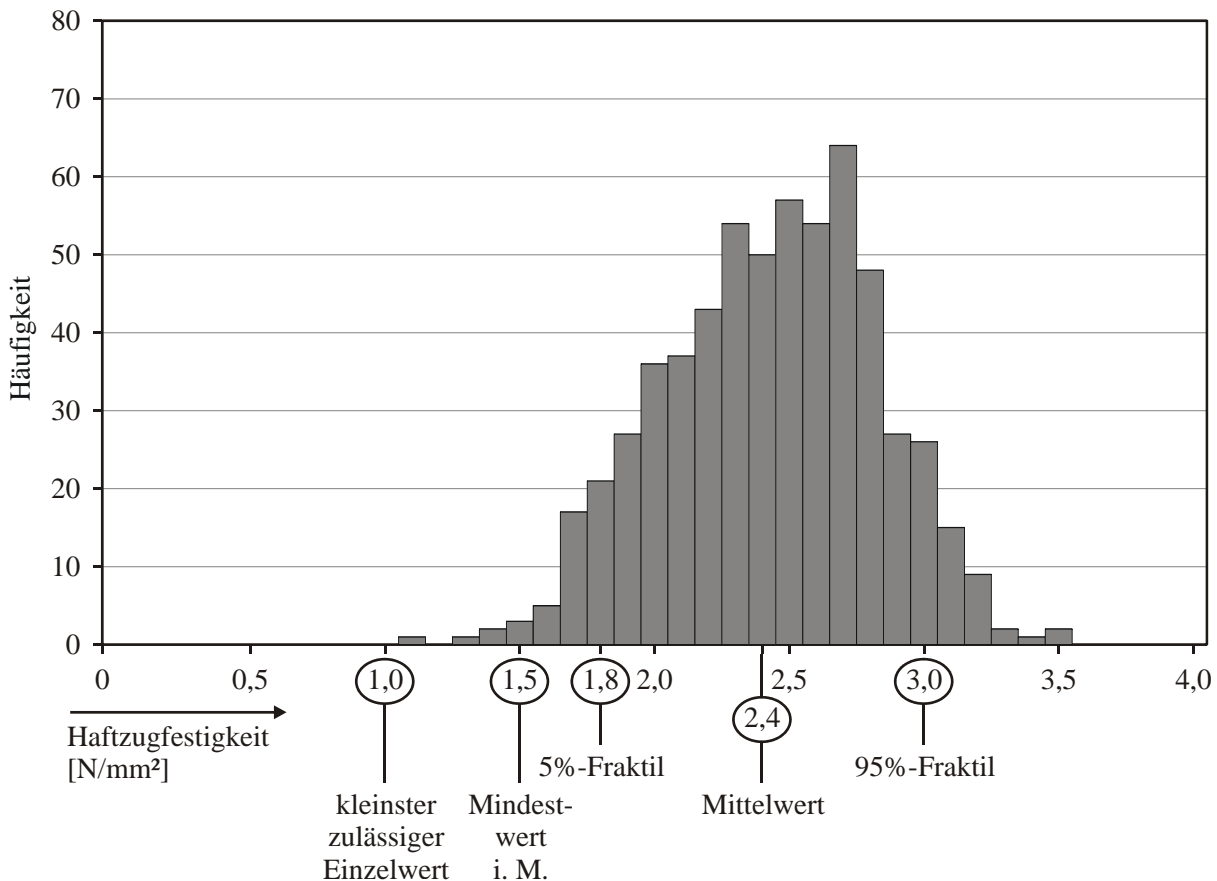


Bild 6.18 Messwerte der Haftzugfestigkeiten im Versagensfall Altbetonuntergrund

Die im Abschnitt 6.6.2 genannten Parameter, welche im Laufe der experimentellen Untersuchungen variiert wurden, besitzen keinen Einfluss auf die Messwerte im Versagensfall Altbetonbruch, da in allen Versuchsserien dieselbe Rezeptur für den Altbeton verwendet wurde. Das Eintreten der Versagensart ist nur insofern von oben genannten Parametern abhängig, als dass die Festigkeiten der Verbundfuge bzw. Verstärkungsschicht beeinflusst werden und somit ggf. die anderen beiden Versagensarten bei bestimmten Parametervariationen nicht mehr maßgebend werden.

Eine höhere Altbetonfestigkeit wurde nur punktuell und im Rahmen anderer Forschungsvorhaben untersucht. Für einen Beton mit der mittleren Würfeldruckfestigkeit von 64 N/mm^2 wurde eine mittlere Haftzugfestigkeit von $3,1 \text{ N/mm}^2$ gemessen. Es ist festzuhalten, dass die im Vergleich zu dem im Regelfall verwendeten Altbeton (i. M. 32 N/mm^2) doppelte Würfeldruckfestigkeit zwar zu einer Erhöhung, jedoch nicht gleichzeitig zu einer Verdoppelung der Haftzugfestigkeit führt (Bild 6.19). Das Verhalten ähnelt der in der DIN 1045-1 [27] geregelten Abhängigkeit der Zylinderzugfestigkeit von der Druckfestigkeit, jedoch können die dort angegebenen Formeln nicht ohne Weiteres auf die Oberflächenhaftzugfestigkeit übertragen werden. Eine tiefergehende Untersuchung dieses Zusammenhangs war im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht vorgesehen.

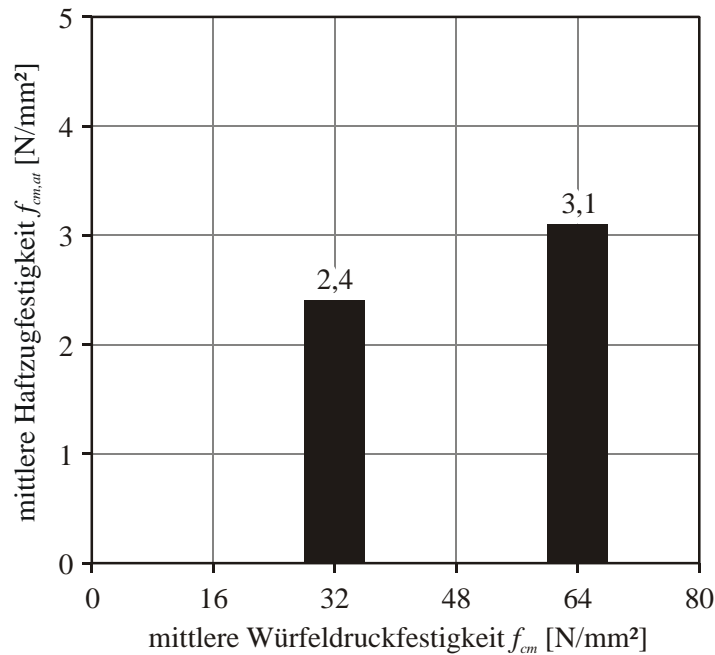


Bild 6.19 Haftzugfestigkeiten in Abhängigkeit von der Würfeldruckfestigkeit

Genauere Untersuchungen bezüglich dieses Zusammenhangs wurden u. a. von SCHULZ [95] durchgeführt. Auch dort wurde festgestellt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Haftzugfestigkeit und der Druckfestigkeit des Betons wenig sinnvoll erscheint. Statt dessen wird ein nichtlinearer Zusammenhang ähnlich der Verknüpfung von zentrischer Zugfestigkeit und Druckfestigkeit nach HEILMANN [41] vermutet. Für die Auswertung seiner Versuchsergebnisse gibt SCHULZ drei mögliche Gleichungen an. Neben der von HEILMANN abgeleiteten Funktion (Gl. (6.18)) wurde auch die verallgemeinerte Form der Potenzfunktion verwendet (Gl. (6.19)). Des Weiteren wird Gl. (6.20) als ebenfalls geeignet angegeben.

$$f_{cm,at} = a \cdot f_{cm}^{2/3} \quad (6.18)$$

$$f_{cm,at} = a \cdot f_{cm}^b \quad (6.19)$$

$$f_{cm,at} = \frac{a \cdot f_{cm}}{b + f_{cm}} \quad (6.20)$$

mit $f_{cm,at}$.. mittlere Haftzugfestigkeit des Altbetons
 a Parameter
 b Parameter
 f_{cm} Würfeldruckfestigkeit des Altbetons

Aus den in eigenen Untersuchungen punktuell ermittelten Werten in Bild 6.19 ist ersichtlich, dass dieselbe Parameterkombination der textilbewehrten Verstärkungsschicht – beispielsweise mit einer Haftzugfestigkeit in der Textilebene von 2,8 N/mm² – bei dem Altbeton mit der Würfeldruckfestigkeit von 32 N/mm² zu einem Versagen des Altbetonuntergrundes führt. Bei dem höherfesten Untergrund tritt diese Versagensart jedoch nicht ein, da die Tragfähig-

keit der textilbewehrten Feinbetonschicht in diesem Beispiel vor einem Versagen des Untergrundes erreicht wird. Aus diesem Grund sind für die Abgrenzung der Versagensfälle die Festigkeiten sowohl des Altbetonuntergrundes als auch des Feinbetons in Relation zu diesem von Bedeutung. Auch die Bedeutung des wirksamen Flächenanteiles ist in Abhängigkeit von diesem Festigkeitsverhältnis zu betrachten. Hierauf wird im Abschnitt 6.6.6 noch genauer eingegangen.

6.6.5 Versagensfall Verbundfuge

Der Versagensfall Bruch in der Verbundfuge wird hauptsächlich von den beiden untersuchten Parametern *Rautiefe* des Altbetonuntergrundes und Anwendung einer mineralischen *Haftbrücke* (diese wird oft auch als Haftvermittler bezeichnet) beeinflusst. Wie schon im Abschnitt 6.6.3 erwähnt, konnte durch Aufbringen einer zusätzlichen mineralischen *Haftbrücke* auf den vorbereiteten Altbetonuntergrund keine Erhöhung der Haftzugfestigkeit erzielt werden.

Untersuchungen von SCHÄFER ET AL. [89] an Betonproben mit einer Spritzbetonverstärkungsschicht haben gezeigt, dass die erreichbaren Haftzugfestigkeiten mit zunehmender *Rautiefe* der Fuge zwischen Alt- und Neubeton ansteigen. Bei den eigenen Untersuchungen an mit textilbewehrtem Beton beschichteten Altbetonproben wurde festgestellt, dass das Versagen in der Verbundfuge bereits durch eine leichte Vorbehandlung des Altbetonuntergrundes praktisch ausgeschlossen werden kann, da ab einer bestimmten Rautiefe andere Versagensebenen maßgebend werden. Interessant ist die Fragestellung, welche Rautiefe hierfür erforderlich ist. In einschlägigen Regelwerken wie der Instandsetzungsrichtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [25] oder der ZTV-ING [13] sind bezüglich eines Mindestwertes für die Rautiefe des zu beschichtenden Altbetonuntergrundes keine Vorgaben zu finden. In den durchgeführten Versuchsserien ist ein Versagen in der Verbundfuge nur ausnahmsweise in Einzelfällen aufgetreten (Bild 6.20).

Die Auswertung der durchgeführten Versuche hat gezeigt, dass bereits eine geringe Rautiefe von 1 mm genügt, um ein Versagen der Kontaktzone Alt-Neubeton zu verhindern. Dies entspricht einem Aufrauen des Untergrundes bis das Korngerüst im wesentlichen freiliegt. Dies kann z. B. mittels Sandstrahlen geschehen. Eine solche Untergrundvorbehandlung ist in der Praxis problemlos umsetzbar, so dass davon ausgegangen werden kann, dass ein Versagen der direkten Verbundfugen zwischen Alt- und Neubeton nicht maßgebend werden wird.

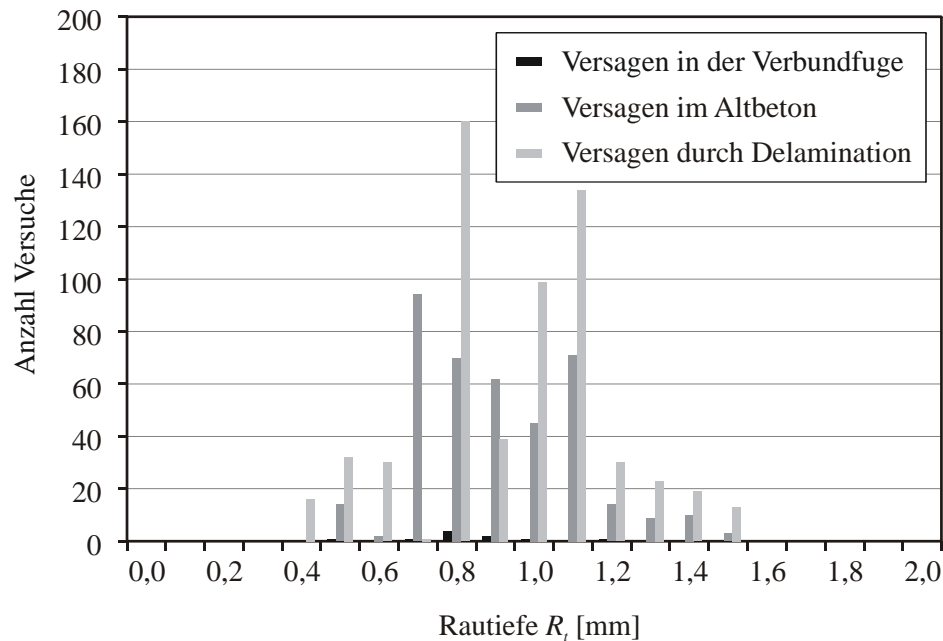


Bild 6.20 Auftretenshäufigkeit eines Versagens in der Verbundfuge

6.6.6 Versagensfall Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung

Der Versagensfall Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung wird insbesondere durch den Parameter *Textil* beeinflusst. Um den Versagensmechanismus charakterisieren zu können, wurden unterschiedliche textile Strukturen bezüglich ihres Einflusses auf die erreichbaren Haftzugfestigkeiten an textilbewehrten Verstärkungsschichten untersucht. Ganz speziell wurden dabei Variationen der Fadenfeinheiten, der Fadenabstände, der Fadenform infolge des Herstellverfahrens, der Bindungsart des Nähfadens und des Fasermaterials vorgenommen. Auch wurde der Einfluss einer nachträglichen Beschichtung der textilen Strukturen geprüft. Da die oben genannten Parameter der textilen Bewehrungsstrukturen weitestgehend miteinander zusammenhängen, ist eine getrennte Analyse dieser einzelnen Parameter auf experimentellem Wege nicht möglich (vgl. Abschnitt 6.6.3). Mit allen diesen Variationen der Textilparameter geht eine Änderung des *wirksamen Flächenanteiles* in der Ebene der textilen Bewehrung einher. Dessen Einfluss auf die erreichbaren Haftzugfestigkeiten wurde hinsichtlich des Versagensfalles Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung intensiv untersucht. Genau genommen handelt es sich bei diesem Versagensfall um ein Zugversagen des Feinbetons in der durch das Textil geschwächten Ebene.

Zur Vergleichbarkeit der verschiedenen Versuchsserien untereinander ist es demnach notwendig, bei diesem Versagensfall den Einfluss der Streuung der Feinbetonzugfestigkeit aus den gemessenen Werten der Haftzugfestigkeit zu eliminieren. Als Regelprüfungen für Feinbetonproben sind die Messung der Druck- und Biegezugfestigkeit nach DIN EN 196-1 [30] übliche Prüfverfahren. Es gibt jedoch keine genormte Prüfung für die zentrische Zugfestigkeit. Für Prüfkörper aus Normalbeton geben EIBL & IVANYI [32] einen Zusammenhang zwischen der Probekörperhöhe im Biegezugversuch und dem Verhältnis zwischen Biegezug- und zentrischer Zugfestigkeit an (Bild 6.21).

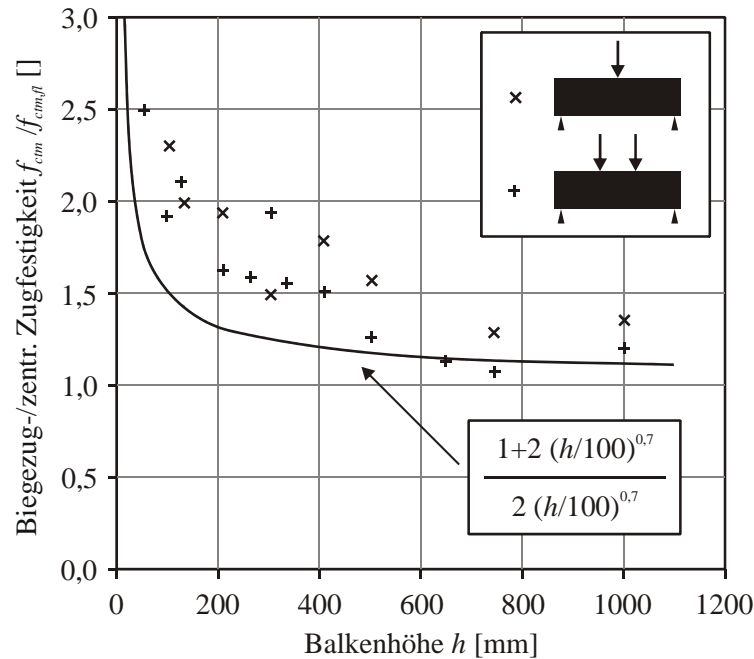


Bild 6.21 Verhältnis zwischen zentrischer Zug- und Biegezugfestigkeit nach EIBL & IVANYI [32]

Mit Hilfe dieses Zusammenhangs ist es theoretisch möglich, aus der gemessenen Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit von der Probekörperdicke einen Wert für die zentrische Zugfestigkeit zu errechnen. Inwieweit die angegebene Formel jedoch auf den Werkstoff Feinbeton und die hierbei zu verwendenden Probekörpergeometrien angewendet werden kann, ist zunächst in Frage zu stellen. Aus der Grafik ist zweifelsfrei zu erkennen, dass die nach der angegebenen Formel berechneten Werte gerade für kleine Probekörperhöhen weit unterhalb der experimentell ermittelten Werte liegen. Des Weiteren sind die Rechenwerte für die hier verwendeten Mörtelprismen nach DIN EN 196-1 [30] mit $h = 40$ mm experimentell nicht abgesichert. Aus diesem Grund wird die so ermittelbare rechnerische zentrische Zugfestigkeit nicht zur Auswertung der Versuche herangezogen. Stattdessen wird die direkt an den Regelprüfkörpern zur jeweiligen Versuchsserie gemessene Feinbetonbiegezugfestigkeit als Bezugswert zur Eliminierung des Einflusses der Feinbetonzugfestigkeitsstreuung aus den Messdaten verwendet (Gl. (6.21)).

$$f_{at} = f_{at}^o \div f_{fct,fl} \cdot f_{fctm,fl} \quad (6.21)$$

mit f_{at} Einzelwert Haftzugfestigkeit, Versuchsstreuung eliminiert

f_{at}^o Einzelwert Haftzugfestigkeit, gemessen

$f_{fct,fl}$. Feinbetonbiegezugfestigkeit der geprüften Serie

$f_{fct,fl}$. Mittelwert der Feinbetonbiegezugfestigkeit aus allen geprüften Serien

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen mit unterschiedlichen textilen Strukturen haben im Versagensfall Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung eine starke Abhängigkeit von den erreichbaren Haftzugfestigkeiten vom wirksamen Flächenanteil in dieser Ebene gezeigt (CURBACH & ORTLEPP [22], MÖLLER ET AL. [60], ORTLEPP [73],

ORTLEPP & CURBACH [74], ORTLEPP, ORTLEPP & CURBACH [77]). Die Auswertung der Versuche lässt einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen dem wirksamen Flächenanteil und den gemessenen Haftzugfestigkeiten im Versagensfall Delamination in der Textilebene erkennen (Bild 6.22). Dem Diagramm liegen 1324 Einzelversuche mit einem Versagen in der Ebene der textilen Bewehrung zugrunde. Die ersten 746 Einzelversuche wurden von mit textilbewehrtem Feinbeton beschichteten Altbetonprobekörpern gewonnen (vgl. Abschnitt 6.6.1, Bild 6.7). Ab einer Haftzugspannung von ca. 2,4 N/mm² versagt der Altbetonuntergrund. Für Bewehrungstextilien mit größeren Öffnungsweiten, die entsprechend höhere Haftzugfestigkeiten erreichen würden, können mit diesen Probekörpern keine Messwerte für den Versagensfall Delamination gewonnen werden können.

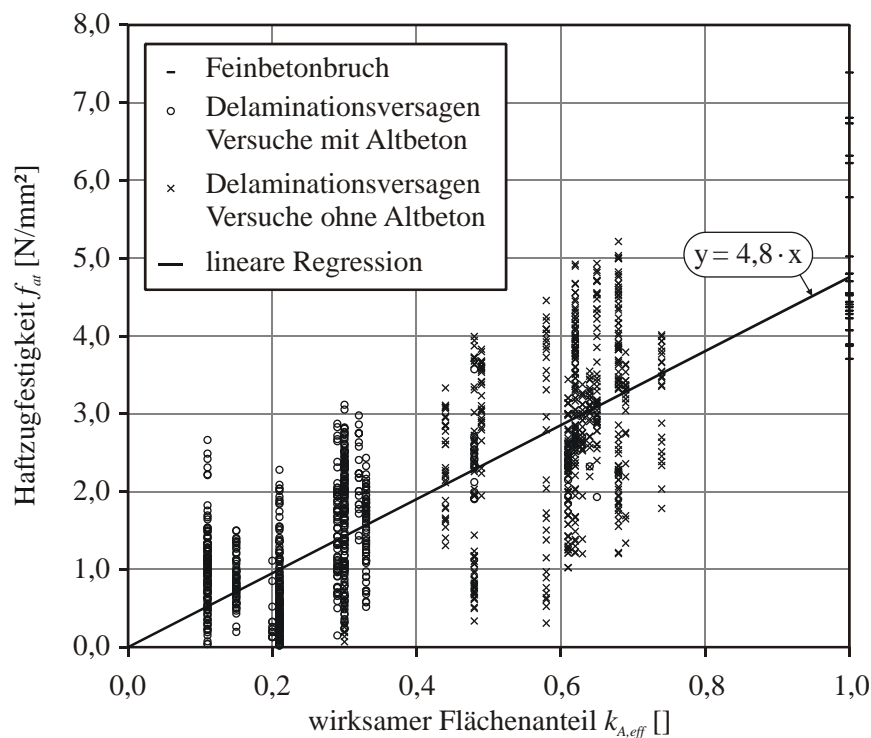


Bild 6.22 Versuchsergebnisse – Einfluss des wirksamen Flächenanteils

Zur Überprüfung des oben genannten linearen Zusammenhangs waren jedoch auch Messwerte für Textilien mit einer größeren Öffnungsweite erforderlich. Dies ist auch darin begründet, dass die Ermittlung des wirksamen Flächenanteiles für solche Textilstrukturen verfahrensbedingt wesentlich genauer und weniger fehlerbehaftet ist als für Strukturen mit einer sehr kleinen Öffnungsweite (vgl. Abschnitt 5.3.2). Aus diesem Grund wurde für alle folgenden experimentellen Untersuchungen die Versuchsanordnung so verändert, dass die Prüfung an der reinen textilbewehrten Feinbetonschicht ohne den Schwachpunkt Altbeton erfolgen konnte (siehe Abschnitt 6.6.1, Bild 6.11 und Bild 6.12). Die so ermittelten Haftzugfestigkeiten für Textilien mit einem wirksamen Flächenanteil $>0,4$ sind im Diagramm (Bild 6.22) durch Kreuz-Symbole gekennzeichnet.

Zur Absicherung des ermittelten linearen Zusammenhangs wurden zusätzlich 24 Einzelversuche an reinen, ungestörten Feinbetonproben durchgeführt. Der wirksame Flächenanteil des

ungestörten Feinbetons beträgt 1,0. Die Versuche am reinen Feinbeton sind im Diagramm (Bild 6.22) als Querstrich-Symbole dargestellt. Als Mittelwert dieser Versuche wurde eine Haftzugfestigkeit für den ungestörten Feinbeton von 4,9 N/mm² ermittelt. Dieser separat ermittelte Wert für die Haftzugfestigkeit des ungestörten Feinbetons kann als Vergleichswert für die Richtigkeit der aus den Haftzugversuchen mit textiler Bewehrung gewonnenen Regressionsgeraden herangezogen werden. Die Extrapolation der an den textilbewehrten Proben gewonnenen Daten mittels des linearen Zusammenhangs muss für den vollen wirksamen Flächenanteil ($k_{A,eff} = 1$) die Haftzugfestigkeit des ungestörten Feinbetons ergeben. Die aus den Versuchen per Regression ermittelte Gerade schneidet die Achse $k_{A,eff} = 1$ bei 4,8 N/mm². Die Übereinstimmung mit der separat ermittelten Feinbetonhaftzugfestigkeit ist als sehr gut zu bezeichnen. Um auf der sicheren Seite zu liegen, wird empfohlen, den niedrigeren Wert von 4,8 N/mm² zu verwenden. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen bestätigen somit den im Abschnitt 6.4 hergeleiteten Zusammenhang zwischen der Haftzugfestigkeit in der Textilebene und dem wirksamen Flächenanteil der textilen Bewehrung (Gl. (6.22)). Mit Hilfe dieses Zusammenhangs ist es möglich, die Haftzugfestigkeit in der Ebene der textilen Bewehrung unter Kenntnis des wirksamen Flächenanteils der einzusetzenden textilen Bewehrungsstruktur aus der Haftzugfestigkeit des Feinbetons ohne Durchführung von Versuchen abzuschätzen. Der wirksame Flächenanteil des Bewehrungstextils sollte hierfür nach dem im Kapitel 5 entwickelten Verfahren ermittelt werden.

$$f_{tex,at} = k_{A,eff} \cdot f_{fc,at} \quad (6.22)$$

mit $f_{tex,at}$.. Haftzugfestigkeit in der Textilebene
 $k_{A,eff}$.. wirksamer Flächenanteil
 $f_{fc,at}$.. Haftzugfestigkeit des ungestörten Feinbetons

Für die praktische Anwendung ist jedoch die Haftzugfestigkeit des ungestörten Feinbetons als Bezugswert weniger geeignet, da sich diese experimentell schwer ermitteln lässt, weil sie einerseits großen Streuungen unterliegt und es andererseits auch kein genormtes Prüfverfahren gibt. Als genormte Prüfverfahren zur Ermittlung von Festigkeitswerten an Feinbeton kommen üblicherweise die Druck- und Biegezugfestigkeitsprüfung an Mörtelprismen nach DIN EN 196-1 [30] zur Anwendung. Aus diesem Grund erweist es sich als sinnvoll, den Rechenwert für die Haftzugfestigkeit in der Textilebene auf die genormte Biegezugfestigkeit zu beziehen.

Der in den eigenen experimentellen Untersuchungen verwendete Feinbeton wies eine mittlere Biegezugfestigkeit von 6,85 N/mm² auf. Die mittlere Haftzugfestigkeit ergab sich zu 4,8 N/mm². Somit ergibt sich für diesen Feinbeton ein Abminderungsfaktor für die Haftzugfestigkeit gegenüber der Biegezugfestigkeit von 0,7 (Gl. (6.23)).

$$\frac{f_{fc,at}}{f_{fct,fl}} = \frac{4,8 \text{ N/mm}^2}{6,85 \text{ N/mm}^2} = 0,7 \quad (6.23)$$

mit $f_{fc,at}$.. Haftzugfestigkeit des ungestörten Feinbetons
 $f_{fct,fl}$.. Biegezugfestigkeit des Feinbetons nach DIN EN 196-1 [30]

Unter Anwendung dieses Faktors auf Gleichung (6.22) kann nun als Näherungsformel für die Haftzugfestigkeit in der Ebene der textilen Bewehrung geschrieben werden:

$$f_{\text{tex,at}} = 0,7 \cdot k_{A,\text{eff}} \cdot f_{\text{fct,fl}} \quad (6.24)$$

mit $f_{\text{tex,at}}$..Haftzugfestigkeit in der Textilebene

$k_{A,\text{eff}}$... wirksamer Flächenanteil

$f_{\text{fct,fl}}$..Biegezugfestigkeit des Feinbetons nach DIN EN 196-1 [30]

Es wird darauf hingewiesen, dass der in Gl. (6.23) ermittelte Faktor für die angegebene Gleichung speziell für die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Feinbetonrezeptur ermittelt wurde. Die Übertragbarkeit dieses einfachen Faktors auf Feinbetonrezepturen mit anderen Festigkeitseigenschaften unterstellt einen linearen Zusammenhang zwischen der Haftzug- und Biegezugfestigkeit. Zur Absicherung dieser Annahme liegen jedoch keine Versuchsdaten mit anderen Feinbetonrezepturen vor. Als allgemeingültige Formel zur Ermittlung der Haftzugfestigkeit in der Textilebene sollte in solchen Fällen Gleichung (6.22) verwendet werden. Um zusätzlich die im Abschnitt 6.6.3 gezeigte Reduktion der Haftzugfestigkeit infolge einer Erhöhung der Anzahl der eingebauten textilen Bewehrungslagen zu berücksichtigen, ist diese Gleichung noch um den Faktor $k_{at,n}$ zu erweitern (Gl. (6.25)).

$$f_{\text{tex,at}} = k_{at,n} \cdot k_{A,\text{eff}} \cdot f_{\text{fct,at}} \quad (6.25)$$

mit $k_{at,n}$ Abminderungsfaktor infolge Erhöhung der Textillagenanzahl

Hiermit steht eine einfache Formel zur rechnerischen Abschätzung der Haftzugfestigkeit eines textilbewehrten Verstärkungssystems in der Ebene der textilen Bewehrung bereit. Es ist zu beachten, dass sich die hergeleiteten Formeln auf die aus den durchgeführten Versuchen gewonnene Mittelwerte beziehen. Bezüglich der Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes wird auf die Forschungsarbeiten im Rahmen des Teilprojektes E3 des Sonderforschungsbereiches 528 verwiesen (SFB 528 [97]).

6.6.7 Geometrische Unsicherheiten im Versagensfall Delamination

Wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde, sind die Messwerte der erreichbaren Haftzugfestigkeiten im Versagensfall Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung abhängig vom wirksamen Flächenanteil in dieser Ebene. Wie in Bild 6.22 zu sehen ist, unterliegen die Messwerte der Haftzugfestigkeiten einer starken Streuung. Entsprechend Gleichung (6.22) kann diese auf zwei Faktoren zurückgeführt werden:

1. die Streuung der Feinbetonzugfestigkeit und
2. geometrische Unsicherheiten des Faktors $k_{A,\text{eff}}$ für den wirksamen Flächenanteil.

Dass die Betonzugfestigkeit üblicherweise großen Streuungen unterliegt, wird als allgemein bekannt angenommen. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle der Einfluss des zweiten Faktors näher betrachtet werden.

Der wirksame Flächenanteil wurde für die Auswertung der Versuchsergebnisse für jedes Bewehrungstextil nach dem im Kapitel 5 beschriebenen Verfahren an 7 x 10 cm großen Textilproben ermittelt. Diese Größe wurde gewählt, um einen möglichst von der Beschaffenheit der Textilstruktur unabhängigen Mittelwert für den wirksamen Flächenanteil zu erhalten. Insbesondere bei großen Öffnungsweiten der zu analysierenden textilen Bewehrungsstruktur gewinnt die Wahl eines genügend großen Ausschnittes für die Bildanalyse zunehmend an Bedeutung. Genauer gesagt bedeutet dies, dass sich bei ungünstiger Wahl des Bildausschnittes durchaus ein Bewehrungsfaden mehr oder weniger je Richtung im Bildausschnitt befinden kann. Als Konsequenz ergäben sich Auswirkungen auf den aus der Bildanalyse ermittelten wirksamen Flächenanteil. Da der wirksame Flächenanteil für die weitere Auswertung der experimentellen Untersuchungen als eine Art Materialparameter benötigt wird, ist das Ziel der Analyse ein durchschnittlicher Zahlenwert, welcher für die gesamte Textilstruktur gilt. Für die bei den hier durchgeführten experimentellen Untersuchungen eingesetzten textilen Strukturen hat sich die oben genannte Geometrie für diesen Zweck als ausreichend erwiesen.

Die im Haftzugversuch entstehende Bruchebene im Versagensfall Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung ist jedoch wesentlich kleiner. Die freigebohrten Zylinder haben einen Durchmesser von 5 cm (siehe Bild 6.7). Beim Freiboahren der Zylinder wird die textile Bewehrungsstruktur an einer zufälligen Stelle ausgeschnitten. Je nachdem, an welcher Stelle die Bohrkronen das Textil trifft, befinden sich mehr oder weniger Bewehrungsfäden innerhalb der zukünftigen Bruchebene des Prüfstempels (Bild 6.23).

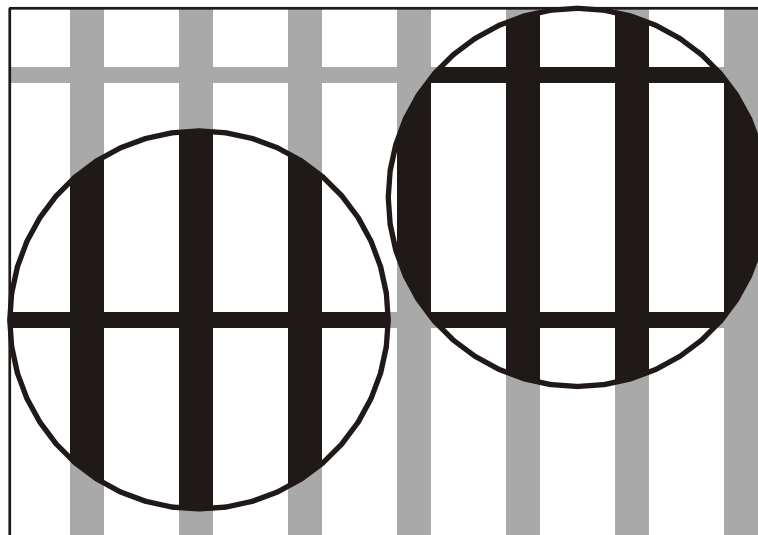


Bild 6.23 unterschiedliche Flächenverhältnisse im Kreisquerschnitt

Aus der zufälligen Verteilung der Textilausschnitte beim Freiboahren der zu prüfenden Zylinder resultiert eine geometrische Streuung des tatsächlich vorhandenen wirksamen Flächenanteiles in der Bruchebene gegenüber dem an der 7 x 10 cm großen Textilprobe ermittelten Durchschnittswert. Sinnvoll wäre an dieser Stelle eine Ermittlung des wirksamen Flächenanteiles direkt am Bruchquerschnitt der jeweiligen Probe, was jedoch wegen der im Abschnitt 5.2 genannten Gründe nicht ohne weiteres durchführbar ist.

Um die Auswirkungen der geometrischen Unsicherheit auf den wirksamen Flächenanteil und damit verbunden auf die erreichbaren Haftzugfestigkeiten beurteilen zu können, wurde dieser Einfluss anhand der drei künstlich erzeugten textilen Strukturen (siehe Abschnitt 5.3.2, Bild 5.4) theoretisch untersucht. Hierzu wurde ein Kreisabschnitt mit dem Durchmesser des Haftzugstempels von 5 cm in Schritten von $\Delta x = 1$ mm zeilenweise mit $\Delta y = 1$ mm über die künstlich erzeugte Textilprobe von 7 x 10 cm bewegt (Bild 6.24). An jeder Position des Kreises wurde der wirksame Flächenanteil des Textils im Kreissausschnitt bestimmt. Die Berechnung liefert eine Matrix mit 51 x 21 Werten für den wirksamen Flächenanteil (Bild 6.25).

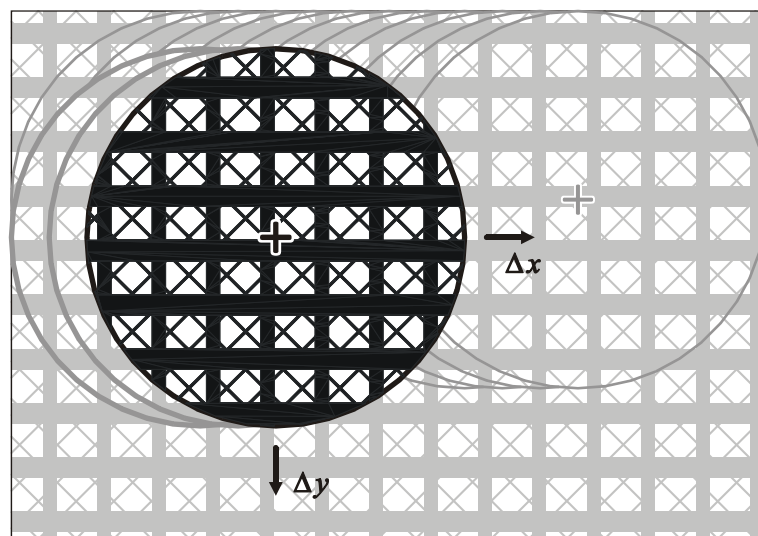


Bild 6.24 Verschiebung des Kreisabschnittes

Im Bild 6.25 ist das Ergebnis dieser Analyse beispielhaft für das im Bild 6.24 dargestellte Textil 2 abgebildet. Die 3D-Darstellung zeigt eine deutliche Rasterung in den ermittelten Werten für den wirksamen Flächenanteil. Diese ergibt sich aus der Lage der Längs- und Querfäden der textilen Struktur, welche sich hier deutlich abzeichnen. Je niedriger der Anteil der Bewehrungsfäden im Kreissausschnitt ist, desto größer ist die verbleibende Matrixfläche, so dass der wirksame Flächenanteil entsprechend höher ist (vgl. Bild 6.23). D. h., die ermittelten Werte für den wirksamen Flächenanteil unterliegen somit einer gewissen Schwankung in Abhängigkeit von der Stelle, an welcher die textile Struktur beim Freibohren der Zylinder getroffen wird. Bild 6.26 zeigt ein Histogramm und die sich daraus ergebende Verteilungsfunktion für das künstlich erzeugte Textil 1. Das entsprechende Ergebnis für das Textil 2 ist im Bild 6.27 und für das Textil 3 im Bild 6.28 dargestellt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die geometrische Streuung infolge der zufälligen Lage des Kreisabschnittes bei allen drei untersuchten künstlichen textilen Strukturen maximal auf die zweite Kommastelle des ermittelten Wertes für den wirksamen Flächenanteil auswirkt. Die möglichen Abweichungen infolge dieser geometrischen Unsicherheit des wirksamen Flächenanteiles haben nach dem in Gl. (6.22) angegebenen linearen Zusammenhang entsprechend geringe Auswirkungen auf die Haftzugfestigkeit in der Ebene der textilen Bewehrung.

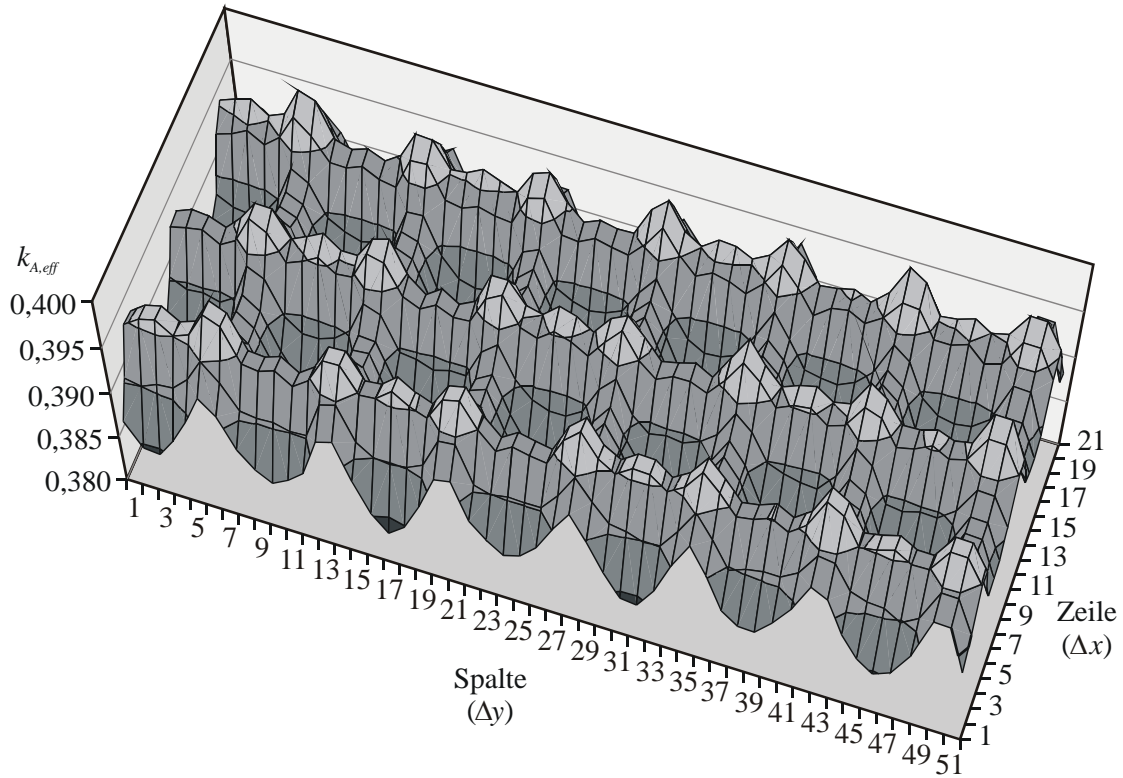


Bild 6.25 wirksamer Flächenanteil in Abhängigkeit von der Position des Kreisabschnittes

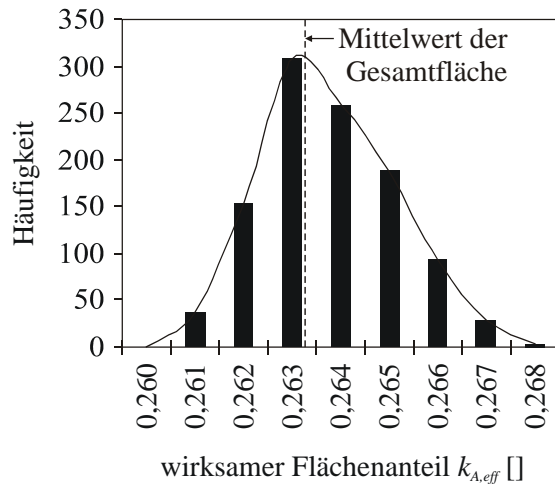


Bild 6.26 Histogramm und Verteilungsfunktion aus analytischer Ermittlung (Textil 1)

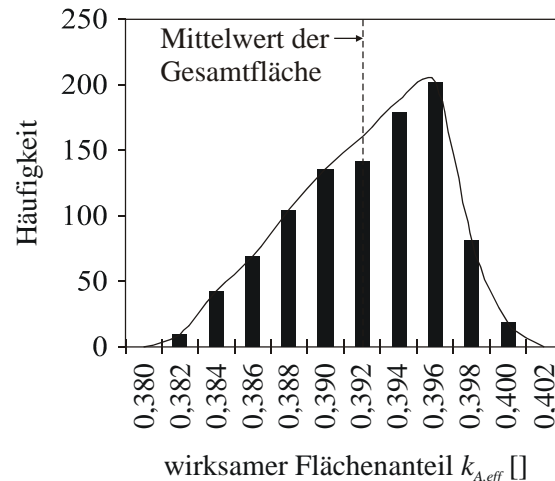


Bild 6.27 Histogramm und Verteilungsfunktion aus analytischer Ermittlung (Textil 2)

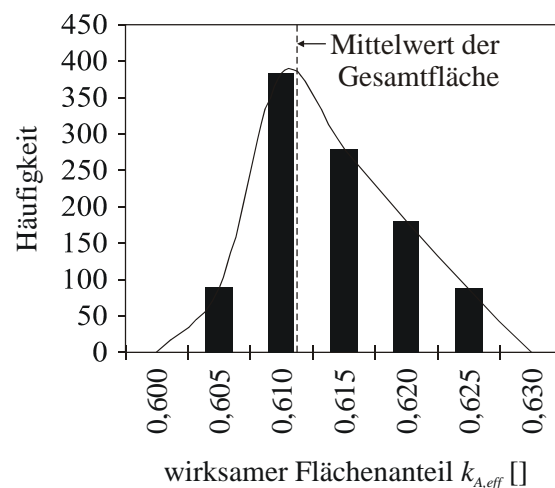


Bild 6.28 Histogramm und Verteilungsfunktion aus analytischer Ermittlung (Textil 3)

Der Kern dieser Untersuchungen ist die Frage, in welchem Maße sich diese geometrische Unsicherheit im Vergleich zu der ebenfalls vorhandenen Versuchsstreuung bei der experimentellen Ermittlung der Haftzugfestigkeit auswirkt. Hierzu wurden die entsprechenden Versuche der für die künstlich erzeugten Textilstrukturen Pate stehenden Textilien (NWM3-004-01 \Rightarrow Textil 1, NWM3-013-01 \Rightarrow Textil 2 und NWM4-003-03 \Rightarrow Textil 3) auf ihre Streubreite hin ausgewertet. Um die Streubreite infolge der zufälligen Anordnung der Bohrungen mit der Streubreite der Messdaten miteinander vergleichen zu können, wurden die in Versuchen gemessenen Haftzugfestigkeiten mit Hilfe des linearen Zusammenhangs aus Gl. (6.22) auf den wirksamen Flächenanteil zurückgerechnet. Dazu wurde der unter Abschnitt 6.6.6 ermittelte Wert der mittleren Feinbetonhaftzugfestigkeit aller durchgeführten Versuche von $f_{fc,at} = 4,8\text{N/mm}^2$ als fester Parameter zugrundegelegt (Gl. (6.26)).

$$k_{A,eff} = \frac{f_{tex,at}}{f_{fc,at}} = \frac{f_{tex,at}}{4,8\text{N/mm}^2} \quad (6.26)$$

mit $k_{A,eff}$.. wirksamer Flächenanteil

$f_{tex,at}$.. gemessene Haftzugfestigkeit in der Textilebene

$f_{fc,at}$.. Haftzugfestigkeit des ungestörten Feinbetons

Hieraus ergibt sich für jeden Versuch ein virtueller wirksamer Flächenanteil, welcher die Streuung der Messdaten enthält. Die so ermittelten Werte für den wirksamen Flächenanteil aus den Messdaten der experimentellen Haftzugversuche sind im Bild 6.29 für das Textil NWM3-004-01, im Bild 6.30 für das Textil NWM3-013-01 und Bild 6.31 für das Textil NWM4-003-03 als Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Es zeigt sich bei allen drei textilen Bewehrungsstrukturen eine deutlich größere Streubreite der Ergebnisse aus den experimentell gewonnenen Messdaten als bei den theoretischen Untersuchungen. Auf die Form der Verteilungsfunktionen wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, da sie für den hier anzustellenden Vergleich der Streubreite nicht relevant ist.

Deutlicher sichtbar wird dieser Unterschied der Streuung aus experimenteller Messung und Streuung infolge zufälliger Anordnung der Bohrung im direkten Vergleich der Verteilungsfunktionen. Die folgenden Diagramme zeigen jeweils die Verteilungsfunktionen aus experimenteller Messung und analytischer Ermittlung der geometrischen Unsicherheit für Textil 1 (Bild 6.32), Textil 2 (Bild 6.33) und Textil 3 (Bild 6.34). Allen drei untersuchten Textilien Strukturen ist gemein, dass die Streubreite infolge der zufälligen Anordnung der Bohrungen verschwindend gering gegenüber der Streubreite der experimentell gewonnen Daten ist. Somit wird die bereits getroffene Vermutung bestätigt, dass die geometrische Streuung in der allgemeinen Versuchsstreuung untergeht. Daraus ist zu schlussfolgern, dass die Streuung der gemessenen Haftzugfestigkeiten bezogen auf den mit Gl. (6.24) beschriebenen Zusammenhang im wesentlichen auf die Streuung der Feinbetonzugfestigkeit zurückzuführen ist.

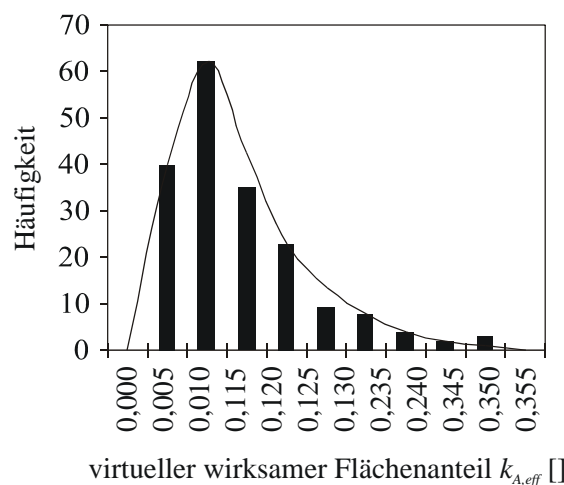


Bild 6.29 Histogramm und Verteilungsfunktion aus experimentellen Daten (Textil 1)

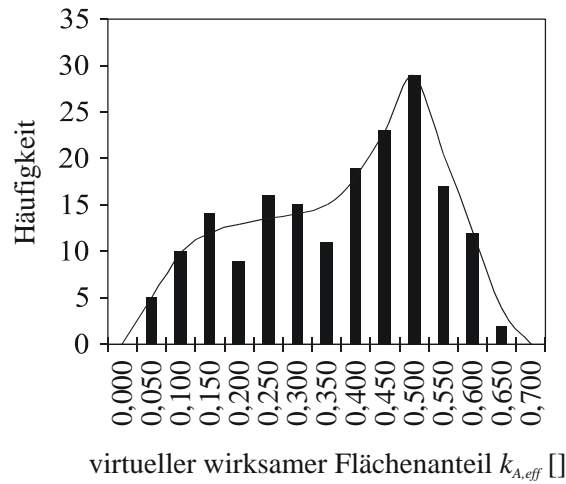


Bild 6.30 Histogramm und Verteilungsfunktion aus experimentellen Daten (Textil 2)

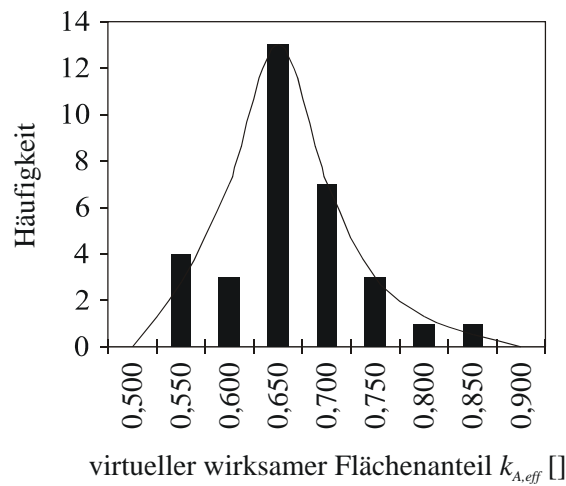


Bild 6.31 Histogramm und Verteilungsfunktion aus experimentellen Daten (Textil 3)

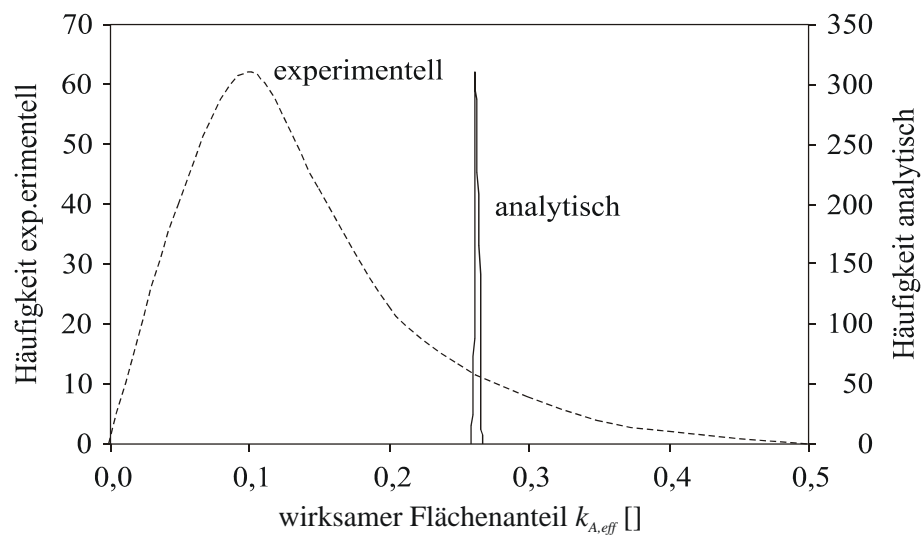


Bild 6.32 Verteilungsfunktionen aus analytischer Ermittlung und experimentellen Daten (Textil 1)

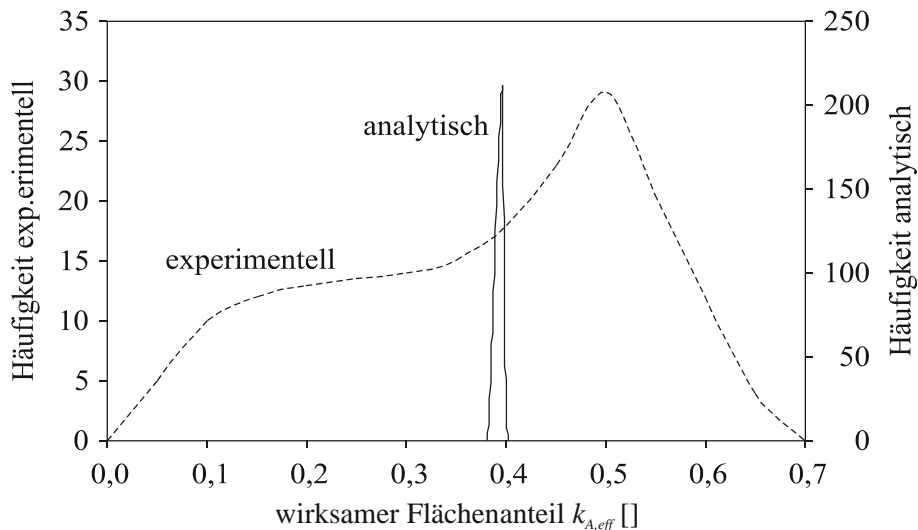


Bild 6.33 Verteilungsfunktionen aus analytischer Ermittlung und experimentellen Daten (Textil 2)

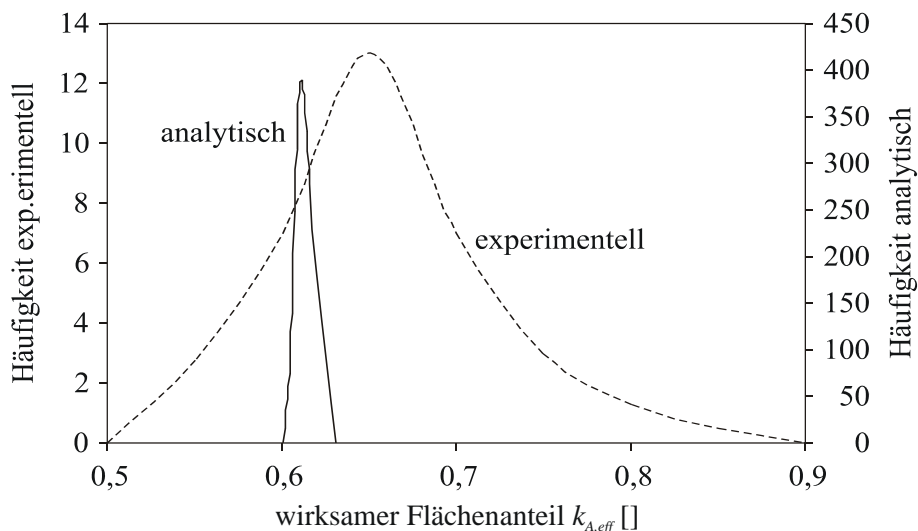


Bild 6.34 Verteilungsfunktionen aus analytischer Ermittlung und experimentellen Daten (Textil 3)

6.6.8 Abgrenzung der Versagensfälle

Wenn ein Versagen der Verbundfuge zwischen Altbeton und Feinbetonverstärkungsschicht durch eine ausreichende Untergrundvorbehandlung, wie z. B. Sandstrahlen, ausgeschlossen werden kann, verbleiben als mögliche Versagensebenen des Verbundsystems nur der Altbetonuntergrund und die Ebene der textilen Bewehrung in der Feinbetonverstärkungsschicht (CURBACH & ORTLEPP [22]). Welche dieser beiden Versagensfälle unter einer Abschälbeanspruchung im Einzelfall maßgebend wird, hängt zum einen von der Haftzugfestigkeit des Altbetonuntergrundes und zum anderen von der Haftzugfestigkeit des Feinbetons in unmittelbarem Zusammenhang mit dem wirksamen Flächenanteil der textilen Bewehrung ab. Maßgebend für das Versagen wird diejenige Ebene mit dem geringeren Widerstand gegen eine Abschäl- bzw. Haftzugbeanspruchung (siehe Abschnitt 6.5).

Bild 6.35 zeigt die Abgrenzung der beiden Versagensfälle Versagen im Altbeton und Versagen durch Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung in Abhängigkeit vom wirksamen Flächenanteil. Die erreichbaren Haftzugfestigkeiten bis zum Versagen in der Ebene der textilen Bewehrung sind linear abhängig vom wirksamen Flächenanteil und werden durch die diagonal verlaufende Grenzlinie beschrieben. Diese maximal erreichbaren Haftzugfestigkeiten werden nach oben zusätzlich durch die Haftzugfestigkeit des Altbetonuntergrundes begrenzt (horizontale Niveaulinie). Die Fläche oberhalb der Grenzlinien entspricht dem Versagensbereich des Verbundsystems unter Haftzugbeanspruchung. Unterhalb der durchgezogenen Grenzlinie bleibt der Haftverbund intakt (Bild 6.36).

Der Schnittpunkt zwischen der diagonalen und der horizontalen Linie gibt die Grenze zwischen den beiden Versagensfällen Delamination und Altbetonbruch an. Als Ziel einer Optimierung der Eigenschaften der textilen Bewehrung sollte die maßgebende Versagensebene jedoch nicht innerhalb der neu aufzubringenden Verstärkungsschicht liegen, um deren Tragfähigkeit optimal ausnutzen zu können. Dies bedeutet genauer gesagt, dass das Versagen durch Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung nicht bemessungsmaßgebend werden sollte, um einen wirtschaftlichen Einsatz eines Verstärkungssystems aus textilbewehrtem Beton zu gewährleisten. Die maßgebende Versagensebene sollte im Altbetonuntergrund liegen, um diesem Anspruch zu genügen. Der hierfür in Frage kommende Bereich ist im Bild 6.35 durch die gestrichelte senkrechte Grenzlinie dargestellt. Diese gibt einen Mindestwert für den wirksamen Flächenanteil der textilen Bewehrungsstrukturen an. Für einen wirtschaftlichen Einsatz kommen somit nur textile Bewehrungsstrukturen in Frage, welche diesen Mindestwert aufweisen.

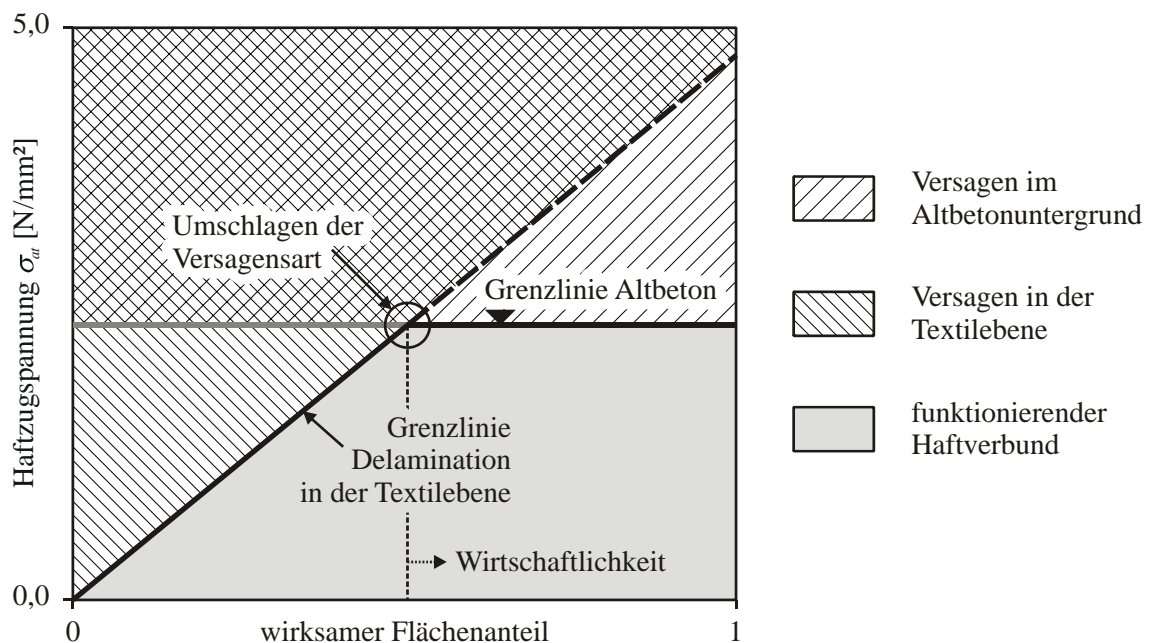


Bild 6.35 Versagensbereiche und Grenzlinien

Im Bild 6.36 sind die aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen ermittelten Grenzlinien für die beiden Versagensfälle Altbeton und Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung dargestellt. Die diagonal verlaufende Grenzlinie für das Versagen der Textil-

ebene wurde aus den Versuchsergebnissen (siehe Bild 6.22) zu $y = 4,8 \cdot x$ ermittelt. Die horizontal verlaufende Grenzlinie für die Haftzugtragfähigkeit des Altbetonuntergrundes ist abhängig von der Betonfestigkeit. Das Diagramm zeigt, dass sich mit einer Erhöhung der Tragfähigkeit des Altbetonuntergrundes der Umschlagpunkt zwischen den beiden Versagensarten entlang der Grenzlinie für Delamination nach oben verschiebt. Bei einem höher tragfähigen Altbetonuntergrund kann also auch die Tragfähigkeit in der Ebene der textilen Bewehrung höher ausgenutzt werden. Der im Bild 6.36 dunkelgrau dargestellte Überlebensbereich vergrößert sich somit um den hellgrau dargestellten Bereich.

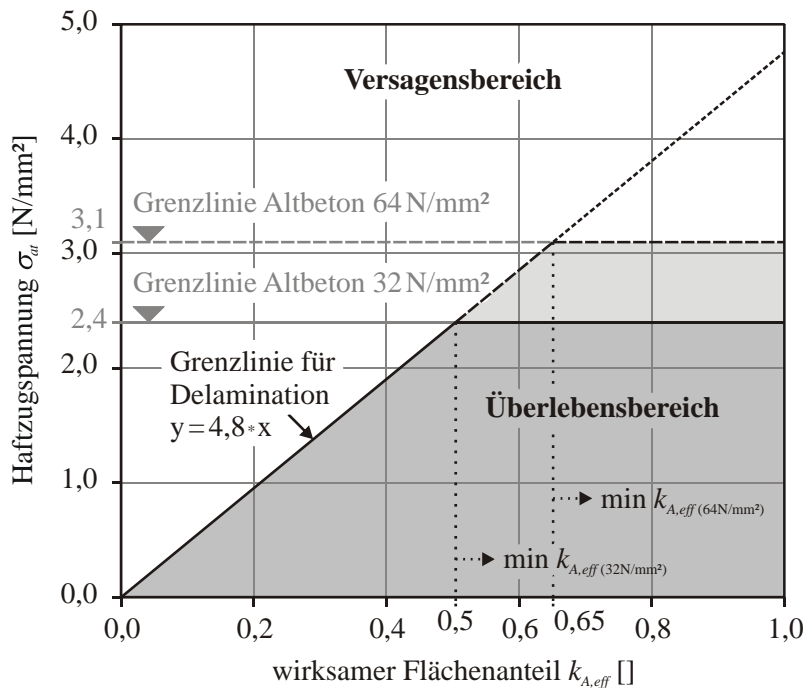


Bild 6.36 Grenzlinien der Versagensfälle

Gleichzeitig mit der Verschiebung des Umschlagpunktes zwischen den Versagensarten verschiebt sich jedoch auch die im Bild 6.35 dargestellte Grenzlinie für den wirtschaftlichen Einsatz der textilen Bewehrungsstruktur weiter nach rechts. Dies bedeutet, dass sich der Mindestwert für den wirksamen Flächenanteil der textilen Bewehrungsstrukturen ebenfalls erhöht, wenn ein Versagen in der Textilebene nicht bemessungsmaßgebend werden soll. Bei den im Bild 6.36 dargestellten Grenzlinien für einen Altbetonuntergrund mit der mittleren Würfeldruckfestigkeit von 32 N/mm^2 und einem höherfesten Altbetonuntergrund mit der mittleren Würfeldruckfestigkeit von 64 N/mm^2 ergeben sich für einen wirtschaftlichen Einsatz der textilen Bewehrungsstrukturen Mindestwerte für den wirksamen Flächenanteil der zu verwendenden textilen Bewehrungsstrukturen von $k_{A,eff} = 0,5$ bzw. $k_{A,eff} = 0,65$. Dies bedeutet genauer, dass textile Bewehrungsstrukturen mit einem wirksamen Flächenanteil zwischen diesen beiden Werten zur Verstärkung eines Altbetons mit einer Würfeldruckfestigkeit von 32 N/mm^2 bereits geeignet sind. Bei der Verstärkung eines höher tragfähigen Untergrundes, wie dem geprüften Beton mit der Würfeldruckfestigkeit von 64 N/mm^2 , führen diese jedoch zu einem Delaminationsversagen in der Ebene der textilen Bewehrung, so dass die Tragfähigkeit des Altbetonuntergrundes in diesem Fall nicht voll ausgenutzt werden kann.

Das hier beschriebene Beispiel zeigt, dass eine pauschale Angabe für den wirksamen Flächenanteil zur Entscheidung über die Eignung einer textilen Bewehrungsstruktur für die Verstärkung nicht ausreichend ist. Der Mindestwert für den wirksamen Flächenanteil ist also grundsätzlich in Abhängigkeit vom zu verstärkenden Untergrund zu ermitteln (siehe Gl. (6.17)).

6.6.9 Anforderungen an die textile Bewehrung

Unter dem wirtschaftlichen Gesichtspunkt, dass die neu aufgebrachte textilbewehrte Verstärkungsschicht im Lastfall Haftzugbeanspruchung nicht bemessungsmaßgebend werden soll, sind bestimmte Mindestanforderungen an die textile Bewehrung zu stellen. In Abhängigkeit von der Qualität des zu verstärkenden Untergrundes erfüllen nur Textilien mit einem entsprechenden Mindestwert des wirksamen Flächenanteiles diese Bedingung (vgl. Bild 6.36). Dieser kann aus dem Schnittpunkt der Grenzlinie für Delamination ($y = 4,8 \cdot x$) mit der Grenzlinie des entsprechenden Altbetons ermittelt werden. Im Folgenden seien die entsprechenden Werte für drei wichtige Festigkeiten des Untergrundbetons einmal zusammenfassend dargestellt:

1. Untergrund aus üblichem, normalfestem Beton ($f_c \approx 32 \text{ N/mm}^2$) : $\text{erf } k_{A,eff} = 0,50$
2. Untergrund aus höherfestem Beton ($f_c \approx 64 \text{ N/mm}^2$) : $\text{erf } k_{A,eff} = 0,65$
3. Untergrund mit der vorgeschriebenen Mindesthaftzugfestigkeit nach den einschlägigen Richtlinien ($\min f_{c,at} = 1,5 \text{ N/mm}^2$) $\text{erf } k_{A,eff} = 0,31$

7 Untersuchungen zum Verbundtragverhalten unter Schubbeanspruchung

7.1 Versuchsaufbau

7.1.1 Mögliche Versuchsanordnungen für Verbunduntersuchungen

Zur Untersuchung des Verbundverhaltens von auf alte Betonbauteile aufgeklebten Stahllaschen oder CFK-/GFK-Lamellen haben bisher verschiedene Formen von Versuchsanordnungen Anwendung gefunden. Üblicherweise wird die Verbundfestigkeit zwischen CFK-/GFK-Lamellen bzw. Stahllaschen und dem Altbetonuntergrund mit Hilfe von Schubversuchen oder abgewandelten Balkenversuchen untersucht. CHEN ET AL. [15] geben einen Überblick über verschiedene mögliche Versuchsaufbauten zur Untersuchung des Verbundverhaltens in der Klebefuge zwischen Altbeton und Verstärkungslasche. Diese verschiedenen Arten von Versuchsaufbauten können entsprechend ihres mechanischen Verhaltens wie folgt klassifiziert werden (siehe Bild 7.1):

- Doppellaschen-Druck-Zug-Schubversuch
- Doppellaschen-Zug-Zug-Schubversuch
- Einlaschen-Druck-Zug-Schubversuch
- Einlaschen-Zug-Zug-Schubversuch

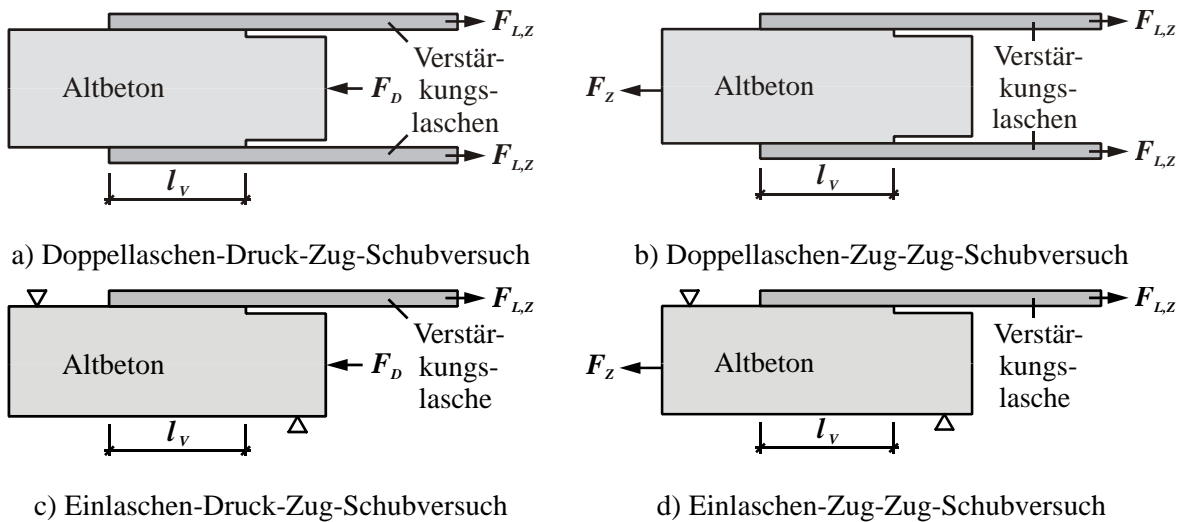


Bild 7.1 Verschiedene Arten von Schubversuchen nach CHEN ET AL. [15]

Der Doppellaschen-Druck-Zug-Schubversuch ist einer der momentan gebräuchlichsten Versuchsarten. Dieser wurde u. a. bei Versuchen von HOLZENKÄMPFER [44], HANKERS [39] und NEUBAUER [66] angewendet. Bei diesem Schubkörper fällt die Verbundspannungsspitze am belasteten Laschenanfang mit der maximalen Betondruckspannung im Altbetongrundkörper zusammen, während in einem zu verstärkenden Bauteil eher Zugspannungen vorherrschen.

Der Vorteil dieser Versuchsart liegt jedoch in der Einfachheit der Versuchsdurchführung, da in diesem Fall keine Bewehrung des Altbetonbauteils erforderlich ist. Zudem führt die beidseitige, symmetrische Anordnung zweier Verstärkungslaschen zu einer Minimierung der Momente in der Verbundfuge.

Beim Doppellaschen-Zug-Zug-Schubversuch wird die Zugkraft durch die im Altbeton eingebaute Bewehrung eingeleitet. Auch bei diesem Versuchskörper sind die Verstärkungslaschen beidseitig symmetrisch angeordnet. Dieser Versuchskörper, wie er u. a. für die Untersuchungen von RANISCH [82] verwendet wurde, ist für die Nachbildung des Verankerungsbereiches besonders gut geeignet, da die Verbundspannungsspitze am Laschenanfang mit der kleinen Betonzugspannung zusammenfällt, bringt allerdings den Nachteil mit sich, dass der Altbetongrundkörper mit einer Stahlbewehrung ausgeführt werden muss. WU ET AL. [109] fanden in vergleichenden Untersuchungen heraus, dass die Tragfähigkeit der Klebefuge eines Zug-Zug-Körpers etwas höher als die eines Zug-Druck-Körpers ist. Diese beiden Werte gleichen sich jedoch mit steigendem Steifigkeitsverhältnis zwischen Altbetonuntergrund und Verstärkungslasche einander an. Auch HOLZENKÄMPFER [44] stellte fest, dass es rechnerisch keinen signifikanten Unterschied zwischen diesen beiden Versuchskörperarten gibt.

Der Einlaschen-Druck-Zug-Schubversuch ist der im Labor am einfachsten auszuführende Versuch und wurde aus diesem Grund bisher auch häufig angewendet, z. B. BIZINDAVYI & NEALE [6] oder CHAJES ET AL. [14]. Zudem werden hier sowohl Material als auch Laborzeit gespart, da nur eine Verstärkungslasche appliziert werden muss. Allerdings führt die Applikation von nur einer Lasche zu einem Verlust der Symmetrie des Probekörpers im Vergleich zum Doppellaschen-Druck-Druck-Schubversuch, woraus zusätzliche Momente in der Verbundfuge resultieren.

Der Einlaschen-Zug-Zug-Schubversuch komplettiert die Serie der Schubversuchsarten. Dieser Versuch hat eher nur theoretischen Wert, da in der Literatur Untersuchungen anhand eines solchen Versuchsaufbaues schwer zu finden sind.

Biege- bzw. Balkenversuche sind geeignet, um die Wirkung von Schubkräften unter gleichzeitigem Einfluss eines variierenden Momentes im Altbetonuntergrund zu simulieren. Von van GEMERT [35] und ZIRBA ET AL. [115] wurden einander ähnliche Versuchsaufbauten verwendet, um das Verhalten der Verankerung von Stahllaschen auf biegebeanspruchten Betonbauteilen zu untersuchen. Während ZIRBA ET AL. [115] aus Untersuchungen an verschiedenen Probekörperformen schlussfolgerten, dass das Verbundverhalten von geklebten Laschen eher ein Oberflächenphänomen ist, zeigen andere experimentelle Untersuchungen durchaus einen Einfluss der Spannungen im Altbeton auf die Verbundfestigkeit. Im Allgemeinen lässt sich jedoch feststellen, dass Balkenversuche zur Untersuchung des Verbundverhaltens eher unüblich und nur selten in der Literatur zu finden sind.

7.1.2 Versuchsaufbau für besondere Anforderungen aus dem Materialverhalten der textilbewehrten Verstärkungsschicht

Übliche Verstärkungsmaterialien wie Stahl, Kohlenstoff- und Glasfaserverbundkunststoffe zeigen im Anwendungsbereich ein lineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten. Der textilbewehrte Beton zeigt im Gegenteil dazu ein nichtlineares Materialverhalten (siehe Ab-

schnitt 3.3). Hieraus ergeben sich spezielle Anforderungen an den Versuchsaufbau, die es nicht ermöglichen, einen schon angewendeten Versuchsaufbau komplett zu übernehmen.

Im Rahmen des Teilprojektes C1 des SFB 528 wurde von CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] ein Versuchsaufbau entwickelt, der die besonderen Eigenschaften des Textilbetons berücksichtigt. Der Versuchsaufbau sollte möglichst einfach sein, einen unkomplizierten Ablauf sowie die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse gewährleisten. Das bedeutete konkret:

- keine bewehrten Altbetongrundkörper,
- Minimierung der Momente in der Verbundfuge sowie
- Minimierung der Spannungen senkrecht zur Verbundfuge aus der Lasteinleitung.

Unter diesen Gesichtspunkten wurde von CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] ein doppella-schiger Druck-Zug-Schubkörper (Bild 7.1a), ähnlich dem von HOLZENKÄMPFER [44], HANKERS [39] und NEUBAUER [66] gewählt (Bild 7.2). Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde dieser Versuchsaufbau beibehalten und weiterentwickelt (Bild 7.3). Bei den vorgenannten Quellen handelt es sich um Arbeiten zum Verbundverhalten von Stahl- und Kohlefaserkunststofflamellen. In diesen Fällen besitzen beide Laschen den gleichen Querschnitt und bestehen aus dem gleichen Material. Außerdem weisen beide Laschen ein lineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten auf. Die Dehnungen werden nur auf einer Lasche gemessen. Um das Versagen dieser Lasche zu erzwingen, wird die gegenüberliegende Lasche an den Grundkörper zusätzlich angepresst.



Bild 7.2 Probekörper für die Verbundversuche

Im Unterschied zu diesen Verstärkungsmaterialien ist das Verhalten der textildbewehrten Feinbetonlaschen nach dem Erstriss nichtlinear. Würden zwei Laschen aus Textilbeton verwendet, ergäben sich Effekte, die die Messung ungünstig beeinflussen. So findet die Rissbildung in zwei textildbewehrten Feinbetonlaschen nicht synchron statt. Mit der Entstehung eines Risses in einer Lasche ist eine sprunghafte Längenänderung sowie eine Entlastung dieser

Lasche im weggesteuerten Versuch verbunden. Dadurch würde die gegenüberliegende Lasche kurzzeitig stoßartig belastet; auch bestünde die Gefahr, dass sich der Probekörper einschwingt, was eine Verfälschung der Messergebnisse zur Folge hätte. Aus diesem Grund wurden bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen zwei Laschen unterschiedlichen Materials und Querschnittes eingesetzt. Außer der auflaminierten und zu untersuchenden Feinbetonlasche wird eine Stahllasche mit einem Querschnitt von $5 \times 50 \text{ mm}^2$ mit einem Zweikomponenten-Epoxydharzkleber aufgeklebt. Der Querschnitt der Stahllasche wurde so gering wie möglich gewählt, um den Steifigkeitsunterschied zur Textilbetonlasche zu minimieren.

Aufgrund des höheren Elastizitätsmoduls des Materials ist die Stahllasche gegenüber dem textilbewehrten Feinbeton sehr steif. Der daraus resultierende große Unterschied im Verformungsverhalten der beiden Laschen kann durch den geringeren Querschnitt der Stahllasche allein nicht kompensiert werden. Deshalb wird diese Verformungsdifferenz durch eine gelenkig gelagerte Waagebalkenkonstruktion an der oberen Lasteinleitung ausgeglichen (Bild 7.3, oben). Der Stahlrahmen am oberen Ende des Grundkörpers bildet das Widerlager für den Grundkörper aus Altbeton.

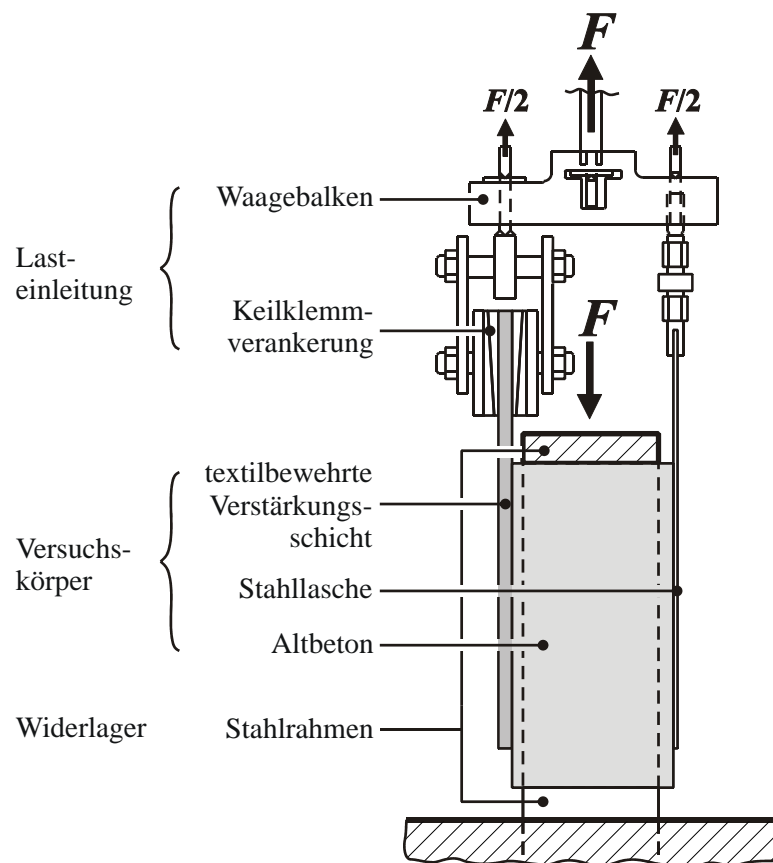


Bild 7.3 verwendeter Versuchsaufbau für die Verbundversuche

Die Probekörpergeometrie wurde gegenüber CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] verändert, um die Handhabbarkeit im Labor zu verbessern. Die Altbetongrundkörper wurden von ursprünglich $15 \times 15 \times 60 \text{ cm}^3$ auf eine Abmessung von $15 \times 15 \times 40 \text{ cm}^3$ verkürzt, was eine

Gewichtsreduktion des gesamten Probekörpers von ca. 36 kg auf ca. 25 kg ausmacht. Die unbewehrten Altbetongrundkörper bestehen aus einem Normalbeton, der einem typischen zu verstärkenden Untergrund entspricht. Für die textilbewehrte Feinbetonlasche wird in Anlehnung an CURBACH & JESSE [19] eine Breite von 10 cm und eine Dicke in Abhängigkeit von der Textillagenzahl zwischen 8 und 11 mm verwendet. Die Lasteinleitung in die Feinbetonlasche erfolgt über eine Keilklemmverankerung (Bild 7.3, oben). Details hierzu sind CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] zu entnehmen. Die Verformungen werden nur auf der Feinbetonlasche gemessen. Um das Versagen dieser Lasche zu erzwingen, wird die gegenüberliegende Stahllasche mit einer größeren Verbundlänge auf den Altbetongrundkörper aufgeklebt.

Der Messbereich der Kraftmessdose in der verwendeten Prüfmaschine ist für die Gesamtkraft aus beiden Laschen auf $F = 50 \text{ kN}$ limitiert. Die im Bild 7.3 dargestellte Versuchseinrichtung ist von CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] deshalb nur für Laschenkräfte $F/2 \leq 20 \text{ kN}$ ausgelegt worden. Im Laufe der durchgeführten Versuche hat sich gezeigt, dass zur Ermittlung der maximalen Verbundbruchkraft höhere Laschenzugkräfte aufgebracht werden müssen. Somit musste die Versuchsanordnung für einige Versuche abgeändert werden. Es wurde ein Einlaschen-Druck-Zug-Körper entsprechend Bild 7.1c gewählt und auf die rückseitig aufgeklebte Stahllasche verzichtet, so dass der gesamte Messbereich der Maschinenkraft von bis zu 50 kN für die Lasteinleitung in die Textilbetonverstärkungslasche zur Verfügung steht. Vergleichsrechnungen von CHEN ET AL. [15] für FVK-Lamellen mittels FEM ergaben, dass zwischen dem Ein- und dem Doppellaschen-Druck-Zug-Körper nur geringe Unterschiede bezüglich der gemessenen Verbundspannungen zu verzeichnen sind, wenngleich die Unterschiede gegenüber anderen Probekörperformen größer ausfallen. Zur Einleitung der größeren Laschenkräfte wurde statt der im Bild 7.3 dargestellten Keilklemmverankerung eine neue Lasteinleitungsstruktur mit vierfacher Verschraubung konstruiert, um dem Auftreten von Schlupf zwischen den Klemmbacken entgegenzuwirken (Bild 7.4).

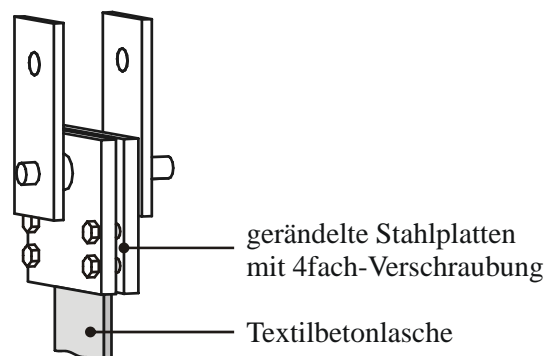


Bild 7.4 veränderte Lasteinleitungsstruktur für Laschenkräfte über 20 kN

7.1.3 Versuchsdurchführung

Zur Simulation des Altbetonuntergrundes wurde ein Normalbeton mit einem Größtkorn von 8 mm und einer Würfeldruckfestigkeit am 15er Würfel von 28 bis 36 N/mm² eingesetzt. Die Rezeptur ist Anhang A 1.1 zu entnehmen. Die Altbetongrundkörper wurden nach 28 Tagen gesandstrahlt und mit dem Feinbeton beschichtet. Die Feinbetonlasche wird liegend auf der

Seitenfläche des Altbetongrundkörpers mit einer Schalung auf die vorher gesäuberte, gesandstrahlte Oberfläche appliziert und anschließend 7 Tage mit feuchten Tüchern abgedeckt und für 28 Tage in einer Kammer mit nahezu konstanter Temperatur und Luftfeuchte gelagert. Ein bis zwei Tage vor der Prüfung wird dann die Stahllasche aufgeklebt. Eine Serie der Verbundversuche besteht aus sechs Versuchskörpern. Zusätzlich werden nach 28 Tagen die Druckfestigkeit des Altbetons an je drei Würfeln ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$) und die Spaltzugfestigkeit des Altbetons an je drei Zylindern sowie am Prüftag der Verbundversuchskörper wiederum die Druckfestigkeit des Altbetons an drei Würfeln und die Druck- und Biegezugfestigkeit des Feinbetons an je sechs Mörtelprismen bestimmt. Bei einigen Serien wurden zusätzlich nach 28 Tagen Werte für die Zylinderzugfestigkeit sowie den E-Modul ermittelt. Der Feinbeton entspricht einem hochfesten Mörtel mit einem Größtkorn von 1 mm und einer Druckfestigkeit von $\approx 70\text{--}80 \text{ N/mm}^2$. Die Rezeptur des Feinbetons ist ebenfalls im Anhang A 1.1 dargestellt.

Als Bewehrungstextilien wurden biaxiale nähgewirkte Gelege aus AR-Glas- und Karbonfasern verwendet. Die Eigenschaften sowie die Bezeichnung der verwendeten Filamentgarne und der Gelege sind im Anhang A 1.1 beschrieben.

Die Verbundversuche wurden weggesteuert, mit einer Geschwindigkeit von $0,015 \text{ mm/s}$, durchgeführt. Die Steuerung erfolgt über den Maschinenweg. Weitere Einzelheiten zur Versuchsdurchführung inklusive der Vor- und Nachbereitung der Probekörper sind dem Anhang A 3.2 zu entnehmen.

7.1.4 Messtechnik

In den ersten Versuchen von CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die Verformungen im Verbundbereich mit Hilfe von DD1-Dehnungsaufnehmern in festen Messintervallen von zunächst 5 cm und später 2,5 cm gemessen. Die geringere Messlänge war erforderlich, um eine Mindestanzahl von Punkten zur Erfassung des Verformungsverlaufs über die bei Textilbeton recht kurze Verbundlänge zu erhalten. Der Messbereich der Dehnungsaufnehmer und die Materialeigenschaften des textilbewehrten Betons bedingen dabei die untere Grenze der Messlänge, welche nicht unterschritten werden sollte. Diese Messung gestaltete sich jedoch aus vielerlei Gründen als schwierig, so dass sich die Notwendigkeit eines alternativen Messverfahrens ergeben hat. Als berührungsloses Messverfahren wurde die photogrammetrische Punktmessung gewählt. Im Verlauf der Versuchsauswertung hat sich herausgestellt, dass der Einsatz einer einfachen 2D-Messung nicht ausreichend ist. Die großen Verdrehungen des gesamten Probekörpers konnten auch durch die Anwendung eines 2½D-Verfahrens nicht ausgeglichen werden, so dass sich das Erfordernis des Einsatzes von 3D-Messverfahren ergab. Eine umfangreiche Abhandlung zur anfänglichen Entwicklung der Messungen ist CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] zu entnehmen.

Mit der oben genannten Methode der photogrammetrischen Punktmessung wurden auch die ersten Versuche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt. Dazu wurden photogrammetrische Messmarken im Abstand von 2 cm auf der Mittelachse des Probekörpers im Verbundbereich aufgeklebt. Während des Versuches wurde die 3D-Verschiebung der Messmarken mit zwei

Kameras beobachtet (Bild 7.5). Die Anwendung von photogrammetrischen 3D-Messverfahren führt zu einem hohen Datenvolumen und somit zu einem hohen zeitlichen Aufwand bei der Auswertung. So muss beispielsweise vor bzw. nach jedem Versuch eine Kalibrierung der beiden Kameras durchgeführt werden, da die geometrische Abstimmung der beider Kameras untereinander Voraussetzung für eine 3D-Auswertung ist. Auch das Objektkoordinatensystem des Probekörpers verändert sich von Lastschritt zu Lastschritt mit der Gesamtverdrehung des Probekörpers in der Prüfmaschine, was bei der Auswertung der gewonnenen Bilder nicht vernachlässigt werden kann (MAAS, HAMPEL & SCHULZE [55]). Daraus ergibt sich eine relativ lange Wartezeit zwischen Versuchsdurchführung und Verfügbarkeit der photogrammetrischen Messdaten.

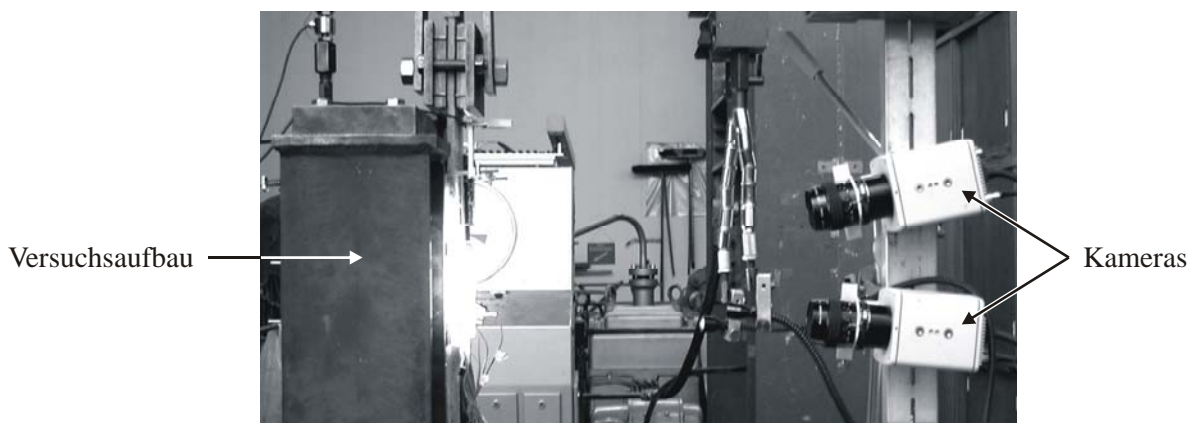


Bild 7.5 Versuchsstand mit 3D-Photogrammetriesystem

Aus der maximalen Auflösung der verwendeten Digitalkameras ergibt sich zunächst ein unterer Grenzwert für die erfassbaren Verformungen. Aus diesem Grund wurden im Verbundbereich zusätzlich zu den photogrammetrischen Messmarken Dehnmessstreifen mit einer Messlänge von ebenfalls 2 cm in versetzter Anordnung neben den Messmarken aufgeklebt (Bild 7.6). Durch die DMS kann die Erfassung von Dehnungen kleiner 0,15 ‰ sichergestellt werden. Die DMS liefern jedoch nur bei ungerissenem Beton verwertbare Ergebnisse und sind aus diesem Grund nicht zur alleinigen Messung geeignet. Mit Hilfe der DMS-Werte konnte der Einsatz spezieller Approximationsverfahren bei der photogrammetrischen Dehnungsmessung $< 0,15$ ‰ verifiziert werden, so dass bei den späteren Versuchen auf die DMS verzichtet werden konnte.

Die Auswertung der ersten Versuchsserien mit Hilfe der photogrammetrischen Punktmessung hat jedoch gezeigt, dass eine intervallweise Verformungsmessung in vor dem Versuch festgelegten (Punkt-)Abständen nicht zum Ziel führt. Ein Grund liegt in der Auswertung von Probekörpern mit sehr kurzen Verbundlängen. So bleiben bei der Punktmessung in 2 cm-Intervallen bei Probekörpern mit 4 cm beispielsweise nur noch zwei Intervalle übrig (Bild 7.7). Folglich können mit dieser Messmethode auch nur zwei Dehnungswerte im Verbundbereich ermittelt werden. Aus einer solch geringen Anzahl Messwerte kann jedoch kein Verformungsverlauf über die Verbundlänge ermittelt werden.

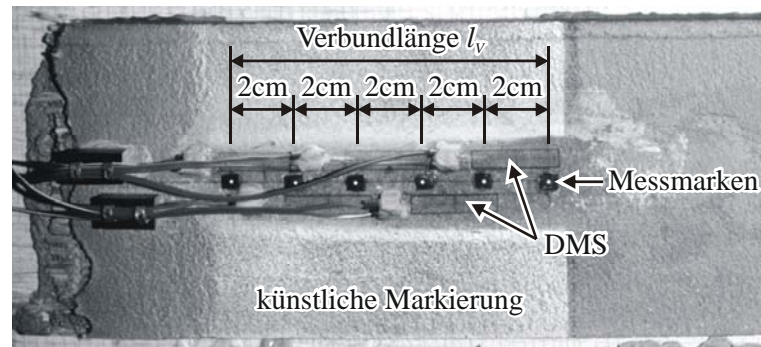


Bild 7.6 Anordnung der Messmarken und DMS im Verbundbereich

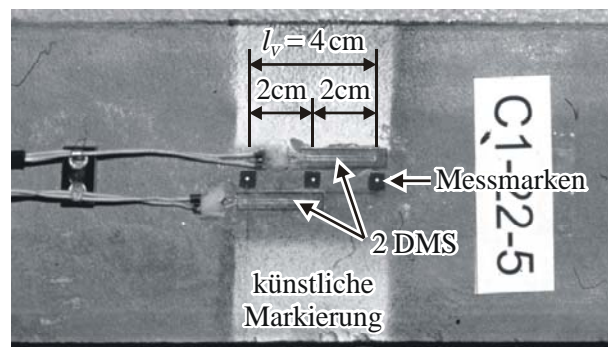


Bild 7.7 Messmarken und DMS bei kurzer Verbundlänge

Der Hauptgrund ist jedoch die Entwicklung des Rissbildes innerhalb des Verbundbereiches. Bei textilbewehrtem Beton unter Zugbeanspruchung ist die Rissöffnung bestimmend für die Gesamtverformung der Lasche. Außerdem entstehen die Risse in zufälliger Lage – unabhängig von den festgelegten Intervallgrenzen. Da sich die so entstehenden Rissöffnungen wesentlich auf die mittlere Dehnung über die Intervalllänge auswirken, führt eine ungünstige Konstellation der Rissverteilung dazu, dass aus den gemittelten Dehnungen über die Intervalllänge fehlerhafte Werte für die Verbundspannungen abgeleitet werden. Diese Problematik wird im Abschnitt 7.3.4 ausführlich erläutert.

Diese Erkenntnis führte zur Entwicklung eines kontinuierlichen photogrammetrischen Messverfahrens zur Risserkennung und der anschließenden Auswertung mittels adaptiver Intervallwahl, welche sich an der Lage der vorhandenen Risse orientiert (ORTLEPP & CURBACH [75]). Hierbei werden die Intervalle nicht wie bisher im Vorfeld der Messung festgelegt, sondern nach dem Versuch anhand des entstandenen Rissbildes ermittelt. Dieses Auswerteverfahren wird in den Abschnitten 7.3.6 und 7.3.7 ausführlich vorgestellt. Die Erfassung der Verformungen erfolgt dabei flächig über den gesamten Verbundbereich. Zur Kontrastverbesserung wird auf dem Probekörper im Messbereich eine künstliche Markierung mit einem speziellen Kontrastspray aufgebracht (vgl. Bild 7.6 und Bild 7.7). Die Bereitstellung der Verformungsdaten seitens der Photogrammetrie erfolgt entlang festgelegter Profile im Verbundbereich in Längsrichtung (vgl. Abschnitt 7.3.6, Bild 7.34).

Voraussetzung für diese Auswertemethode ist eine zuverlässige Detektion der Risslage zur Bestimmung der Intervallgrenzen. Mit Hilfe der digitalen Photogrammetrie ist eine flächige Erfassung des Rissbildes unter Zuhilfenahme spezieller Analysemethoden prinzipiell mög-

lich, jedoch mit vielerlei Problemen und Schwierigkeiten verbunden (MAAS & HAMPEL [54]). So steigt der Aufwand einer flächenhaften Erfassung mit einer Vergrößerung des Messbereiches quadratisch an. Weitere Ursachen der erschwerten Rissdetektion liegen u. a. in der Rissentstehung selbst begründet, da sich einige Risse im Verlauf des Versuches öffnen und durch Lastumlagerungen zum Teil wieder schließen.

Zur Berechnung des Rissbildes wird ein Lastbild nahe des Bruchzustandes verwendet, da sich bis dahin alle Risse gebildet haben sollten. Aus dem berechneten flächigen Rissbild werden die zu berechnenden Profile manuell festgelegt. Dieses interaktive Vorgehen ist erforderlich, um spezielle Problemstellen wie Rissverzweigungen oder andere gestörte Bereiche in den Profilen zu umgehen, die zu einem Abbruch der Berechnungsroutinen bei der Verformungsberechnung führen (vgl. Abschnitt 7.3.6, Bild 7.36). Für die nachträglich festgelegten Profile werden seitens der Photogrammetrie auf Basis einer Verformungsmessung für jedes Lastbild die einzelnen Risse detektiert. Diese zeigen sich als Sprünge in den Relativverschiebungen (siehe Abschnitt 7.3.7, Bild 7.38).

Die Entwicklung und programmiertechnische Umsetzung dieses neuen photogrammetrischen Verfahrens auf Basis der Rissanalyse nahm am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung einen Zeitraum von über zwei Jahren in Anspruch, bis erste Verformungsdaten einzelner Versuche für die Auswertung bereitgestellt werden konnten. Die Berechnung der Rissbilder und Verformungsdaten war nun zwar prinzipiell möglich, erforderte aber infolge des hohen Datenaufkommens einen sehr hohen zeitlichen Aufwand seitens der Photogrammetrie. So läuft eine Standardauswertung der Verschiebungsanalyse beispielsweise ca. 84–252 Stunden (MAAS & HAMPEL [54]). Dieser hohe Zeitbedarf machte die Anwendung des neu entwickelten Verfahrens zunächst nur für einzelne Versuche möglich und ergab relativ lange Wartezeiten bis zur Bereitstellung der nächsten Versuchsergebnisse. Aufgrund des hohen Datenaufkommens und im Zusammenhang mit diesen komplexen Berechnungen wie der flächenhaften Rissdetektion wurden optimierte Rechenalgorithmen erforderlich, die exakt den speziellen Anforderungen angepasst sind. Die Implementierung dieser Optimierungen zur Rechenzeitverkürzung und zur Automatisierung sowie die Umsetzung in eine neue Programmierumgebung am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung dauerte weitere 1½ Jahre. Aufgrund dieser langen Entwicklungszeit und des hohen Rechenaufwandes wurde die Anzahl der mit dem entwickelten Verfahren der adaptiven Intervallanpassung auszuwertenden Versuche auf wenige spezielle Versuche begrenzt. Bezüglich der Ergebnisse dieser Untersuchungen wird auf Abschnitt 7.3.7 verwiesen. Aufgrund der begrenzten Auswertekapazität am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung wurde bei den letzten Versuchen anstelle der photogrammetrischen Erfassung nur die Relativverschiebung am Beginn des Verbundbereiches in Laschenmitte mit einem DD1-Dehnungsaufnehmer gemessen.

Zusätzlich zur Verformungsmessung auf der Laschenoberseite wurde bei einigen Versuchen die Entwicklung der Rissneigungswinkel auf den Seitenflächen der Verstärkungslasche beobachtet. Hierzu wurden Spiegel im Winkel von 45° angebracht, so dass die Verformung der Seitenflächen durch die vorhandenen Kameras mit erfasst werden kann. Bild 7.8 zeigt die Konfiguration des verwendeten digitalen Photogrammetriesystems mit zwei digitalen Kameras und den seitlich angeordneten Spiegeln. Die Spiegel ermöglichen eine qualitative Beobachtung der Rissbildung. Eine photogrammetrische Verformungsmessung auf den Seitenflächen ist aufgrund zu großer geometrischer Ungenauigkeiten über die Spiegel allerdings

nicht möglich. Um dennoch Aussagen zum Verformungsverhalten über die Laschendicke zu erhalten, wurden bei einzelnen ausgewählten Versuchsserien einige Probekörper mit zwei Kameras direkt von der Seite erfasst.

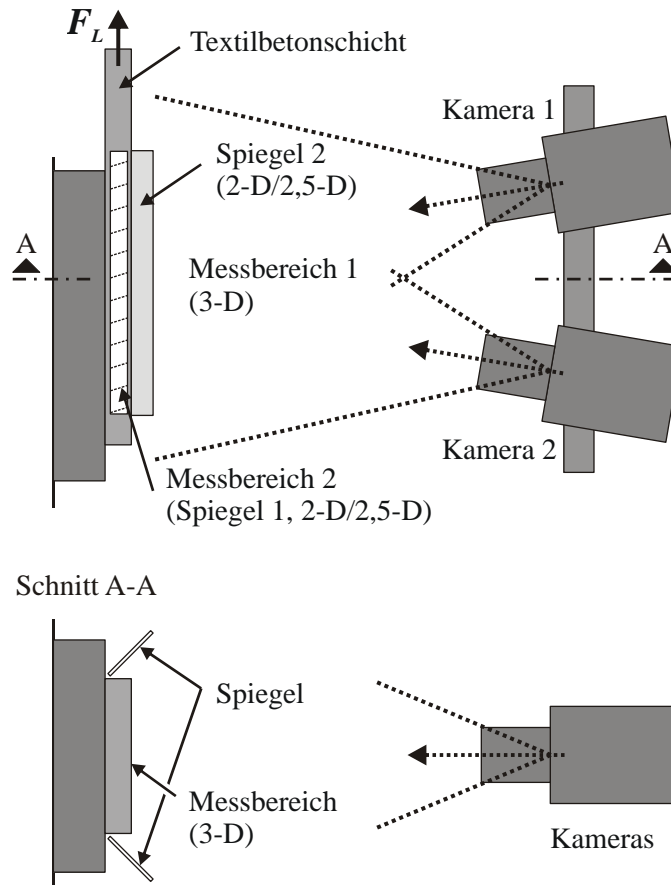


Bild 7.8 Konfiguration des digitalen Photogrammetriesystems

Der Kamerateyp Kodak Megaplus des verwendeten Photogrammetriesystems erlaubt hochgenaue Messungen (ORTLEPP, HAMPEL & CURBACH [76]). Die Methoden des entwickelten digitalen photogrammetrischen Verfahrens erreichen eine Genauigkeit von bis zu 1/50 Pixel auf der reinen Feinbetonoberfläche und bis zu 1/100 Pixel bei Verwendung einer künstlichen Markierung (vgl. Bild 7.6 und Bild 7.7). Diese Genauigkeit ist zur Detektion von Verformungen bis zu $1\ \mu\text{m}$ und Rissbreiten bis zu $3\ \mu\text{m}$ in einem Messbereich von ca. $10 \times 10\ \text{cm}$ erforderlich (ORTLEPP, HAMPEL & CURBACH [76]).

Aufgrund der Geschwindigkeit der Rissbildung und des sehr plötzlich eintretenden Versagens ist die Entstehung des endgültigen Verbundrisses mit bloßem Auge nicht wahrnehmbar. Zur Beobachtung des Versagensmechanismus wurde deshalb eine Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt. Die maximale Aufzeichnungsgeschwindigkeit liegt bei 40.000 Bildern pro Sekunde. Die Auflösung der Hochgeschwindigkeitskamera ist wesentlich geringer als die der für die photogrammetrische Messung eingesetzten (Normalgeschwindigkeits-)Digitalkameras. Der Einsatz der Hochgeschwindigkeitskamera sollte lediglich der

qualitativen Beobachtung des Versagenszustandes und nicht der Messung dienen. Bezüglich der Auswertung der aufgezeichneten Sequenzen wird auf Abschnitt 7.2.4 verwiesen.

Zusätzlich zu den Messungen im Verbundbereich wurde die Verformung im Bereich der freien Laschenlänge mittels DD1-Dehnungsaufnehmern gemessen. Aufgetragen über die Laschenkraft und bezogen auf den Laschenquerschnitt wurde daraus für jeden einzelnen Schubversuch die zugehörige Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Verstärkungsschicht unter einaxialer Zugbelastung ermittelt.

7.1.5 Versuchsprogramm

Die Schubversuche zur Untersuchung der Verbundtragfähigkeit dienen in erster Linie der Suche nach einer maximal übertragbaren Verbundkraft und der dazugehörigen Verankerungslänge für verschiedene textile Bewehrungsstrukturen. Dazu wurden für jedes zu untersuchende Textil die geprüften Verbundlängen variiert, bis ein Umschlagen der Versagensart vom Verbundbruch zum Laschenzugbruch eintrat bzw. trotz Vergrößerung der Verbundlänge keine Laststeigerung mehr erreicht werden konnte. Diese nicht mehr steigerbare Last entspricht der maximal übertragbaren Verbundkraft. Die kleinste hierfür notwendige Verbundlänge entspricht der Verankerungslänge. Bei einem Umschlagen der Versagensart in einem Laschenzugbruch ist die Tragfähigkeit der Verstärkungsschicht geringer als die Tragfähigkeit der Verankerung. Zur Untersuchung der Tragfähigkeit der Verankerung ist demnach eine Erhöhung der Laschentragfähigkeit erforderlich, so dass kein Umschlagen der Versagensart mehr eintritt. Dazu wurde zusätzlich eine Variation der Textillagenanzahl vorgenommen (Bild 7.9).

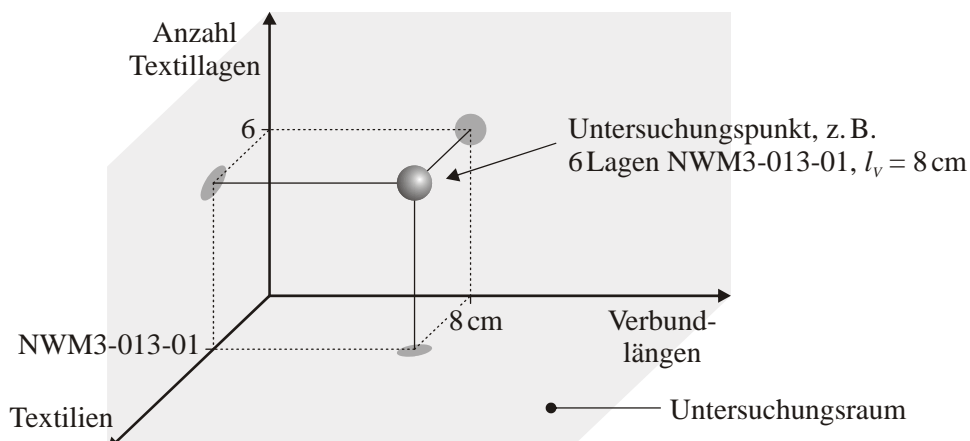


Bild 7.9 räumliche Darstellung der Hauptuntersuchungsparameter

Hinter der Variation der textilen Struktur verbergen sich zahlreiche weitere Unterparameter wie die Garnfeinheit, der Garnabstand, der Quersfadeneinfluss, die Nähfadenbindungsart und -stichlänge, der Einfluss einer nachträglichen Beschichtung und nicht zuletzt das Garnmaterial. Die Summe dieser einzelnen, die textile Bewehrungsstruktur betreffenden Einflüsse wird in der vereinfachten Grafik im Bild 7.9 unter dem Begriff „Textilien“ zusammengefasst.

Neben den bereits genannten drei Hauptuntersuchungsparametern wurden weitere Parameter wie die Rautiefe des Altbetonuntergrundes, der Einfluss einer mineralischen Haftbrücke sowie der Einfluss des Aufbringverfahrens und der Aufbringrichtung der Feinbetonverstärkungsschicht untersucht. Diese Untersuchungen wurden an ausgewählten textilen Strukturen durchgeführt, um den Versuchsumfang in Grenzen zu halten. Auf die Auswirkungen dieser Einflussparameter wird im Abschnitt 7.4.2 eingegangen.

Für die Untersuchungen der Hauptparameter wurden die eben genannten zusätzlichen Parameter konstant gehalten. Als Randbedingungen wurden eine Rautiefe des Altbetonuntergrundes von 1 mm und die Beschichtung im Laminierverfahren in horizontaler Richtung ohne Verwendung einer Haftbrücke vorgegeben.

7.2 Verbundbruchverhalten und Versagensmechanismen

7.2.1 Beobachtete Versagensebenen

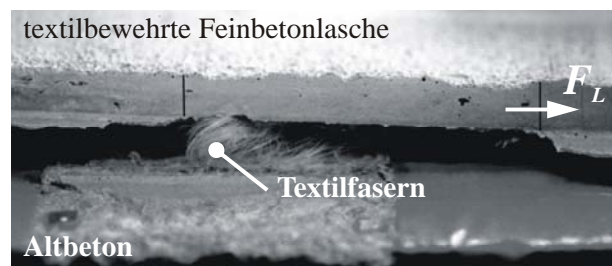
Bei den durchgeführten Verbundversuchen konnten nur zwei der theoretisch möglichen Versagensebenen (siehe Abschnitt 4.3) beobachtet werden:

1. eine Delamination in der Ebene des textilen Geleges der Verstärkungslasche sowie
2. ein Versagen im Altbeton (Bild 7.10).

Das Versagen genau in der Verbundfuge zwischen Alt- und Neubeton ist in den experimentellen Schubuntersuchungen nicht aufgetreten. Diese Tatsache wird auf eine ausreichende Untergrundvorbehandlung zurückgeführt.



a) Verbundversagen im Altbeton



b) Verbundversagen in der Textilebene

Bild 7.10 In Verbundversuchen beobachtete Versagensebenen aus CURBACH & ORTLEPP [22]

Als vierte mögliche Versagensform einer Verankerung wurde im Abschnitt 4.3 das Versagen des *inneren* Verbundes erwähnt. Diese Versagensart, in Form eines Faserauszuges aus der Feinbetonschicht, trat bei textilen Bewehrungen auf, die aus relativ dicken Filamentgarnen der Firma Vetrotex bestehen (ab einer Feinheit von 1.200 tex). D. h., das Faserende der Textilien im Verankerungsbereich wurde bei Laststeigerung aus der Feinbetonmatrix herausgezogen (Bild 7.11). Bei Filamentgarnen der Firma NEG ist dieses Phänomen bei den Schubversuchen nicht aufgetreten.

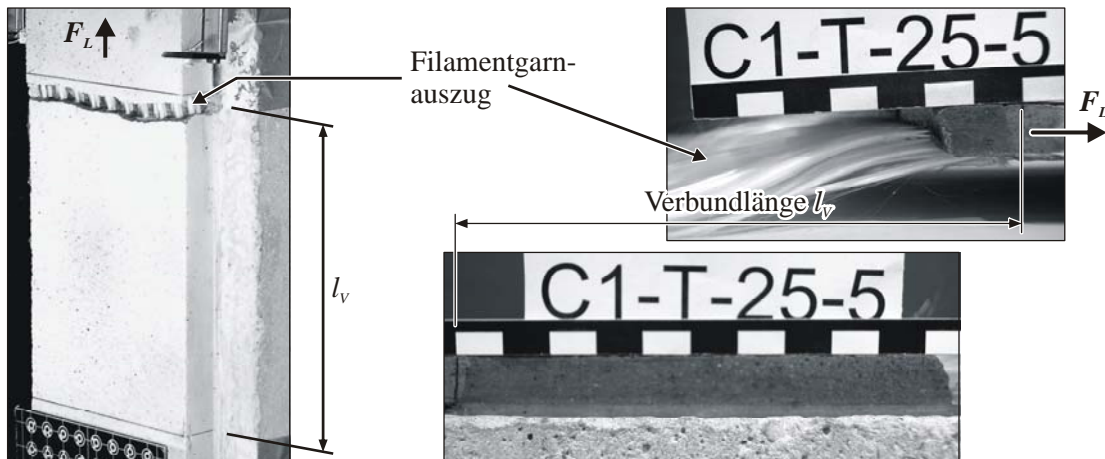
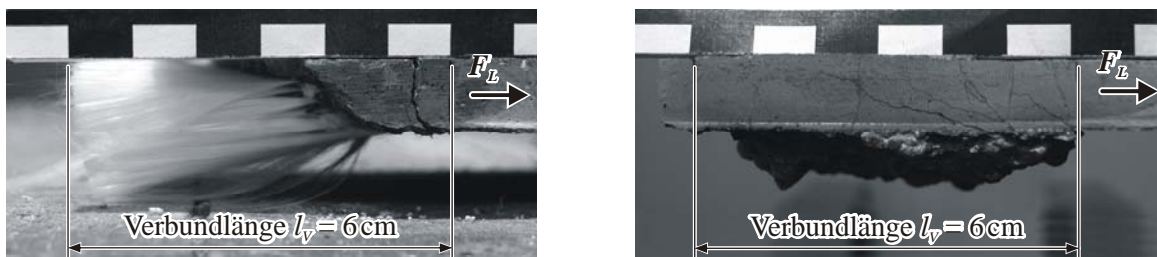


Bild 7.11 Versagen des inneren Verbundes zwischen Filamentgarnen und Feinbetonmatrix

Eine ähnliche Problematik wurde auch von KRÜGER [51] in Bezug auf die Verankerung vorgespannter textiler Strukturen in der Feinbetonmatrix erwähnt. Er kommt zu dem Ergebnis, dass eine Imprägnierung (Beschichtung) der textilen Strukturen den Verbund maßgeblich verbessert. Eigene Untersuchungen zum Filamentgarnauszug an ausgewählten textilen Strukturen (vgl. Abschnitt 8.3.1) bestätigen diese Erkenntnis. Bei Textilien mit einer zusätzlichen Beschichtung trat auch bei den durchgeführten Schubversuchen kein Versagen durch Faserauszug mehr auf (Bild 7.12). Somit wird davon ausgegangen, dass das Versagen des inneren Verbundes beim Einsatz geeigneter textiler Strukturen nicht mehr maßgebend wird.



a) Faserauszug bei unbehandelten Textilien

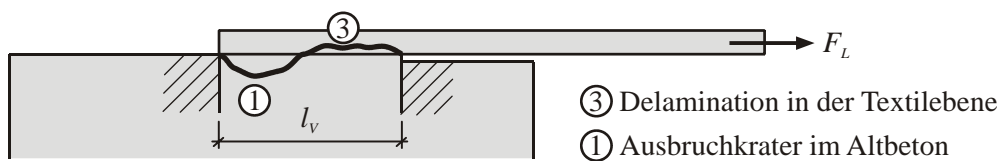
b) Altbetonbruch bei beschichteten Textilien

Bild 7.12 Einfluss einer nachträglichen Beschichtung der Textilien auf die Versagensart

Für eine modellmäßige Betrachtung des Verbundversagens verbleiben somit, wie auch beim Verbundverhalten unter Haftzugbeanspruchung, die im Abschnitt 4.3, Bild 4.1 dargestellten Versagensfälle Versagen im Altbeton (1) und Versagen durch Delamination in der Textilebene (3) zu unterscheiden. Eine ähnliche Versagensform wurde von NEUBAUER [66] bei Verbundversuchen an mit CFK-Lamellen verstärktem Beton beobachtet. Dort verläuft die Versagensebene, beginnend am belasteten Laschenende, durch die im Epoxydharz eingebetteten Fasern. Diese Versagensart wird von ihm als „Faserzwischenbruch“ bezeichnet. Zur Modellbildung wird jedoch nur das Versagen im Altbeton herangezogen, während zur

Versagensform des „Faserzwischenbruchs“ lediglich bruchmechanische Überlegungen angestellt werden.

Die beiden reinen Versagensformen Altbetonbruch und Delamination werden ergänzt durch einen Mischbruch, welcher zunächst durch Delamination in der Textilebene eingeleitet wird. Der endgültige Bruch entsteht durch Ausbruch eines „Reststückes“ im Altbeton, welcher sich zumeist als tiefer Ausbruchkrater zeigt (Bild 7.13). Während die reinen Versagensformen Altbetonbruch und Delamination die Hauptverbundversagensformen ausmachen, handelt es sich beim Mischbruch um ein selteneres Phänomen, welches erst bei größeren Verbundlängen ab 8–10 cm und nur bei Textilien mit einem relativ hohen wirksamen Flächenanteil auftritt.



5. Mischverbundbruch

Bild 7.13 kombiniertes Verbundversagen durch Delamination und Altbetonbruch

Das Auftreten eines Verbundversagens durch Delamination in der Textilebene ist in erster Linie von den Eigenschaften der textilen Bewehrung abhängig. Je höher der wirksame Flächenanteil ist, desto höher fallen auch die über diese größere Fläche übertragbaren Verbundkräfte aus. D. h., die Wahrscheinlichkeit eines Verbundversagens durch Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung sinkt mit der Erhöhung des wirksamen Flächenanteiles (vgl. auch Abschnitt 6.4).

Bild 7.14 zeigt beispielhaft die Bruchbilder von Schubversuchen an drei verschiedenen Textilstrukturen mit einer einheitlichen Verbundlänge von 6 cm. Der wirksame Flächenanteil der dargestellten Textilien steigt im Bild 7.14 von links nach rechts an. Bei dem Textil NWM3-004-01 (Bild 7.14, links) handelt es sich um ein sehr dichtes Textil mit geringen Abständen zwischen den Filamentgarnen und zusätzlich einer ungünstigen Nähfadenbindung, die einen großen Teil der Öffnungsfläche zwischen den Filamentgarnen abdeckt. Bei diesem Textil trat das Verbundversagen grundsätzlich durch Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung ein.

Mit der Vergrößerung des wirksamen Flächenanteiles erhöht sich die Verbundtragfähigkeit in der Ebene der textilen Bewehrung und übersteigt ab einem bestimmten Punkt die Verbundtragfähigkeit des Altbetonuntergrundes. In diesem Fall ergibt sich ein Umschlagen der Versagensebene von der Delamination in der Textilebene zum Altbetonbruch. Im Bild 7.14, mitte ist das Textil NWM3-013-01 gezeigt, bei welchem sich das Verbundversagen sowohl durch Delamination in der Textilebene als auch durch Altbetonbruch eingetreten ist. Bei einer weiteren Erhöhung des wirksamen Flächenanteiles dominiert das Verbundversagen im Altbeton (Bild 7.14, rechts).

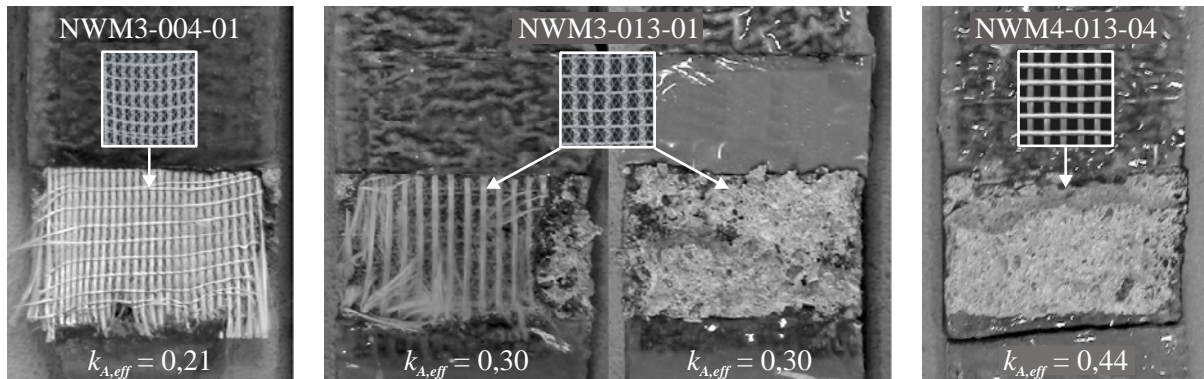


Bild 7.14 Umschlagen der Versagensart von der Delamination zum Altbetonbruch mit Erhöhung des wirksamen Flächenanteiles der Textilstruktur

Bezugnehmend auf einen praxisorientierten Einsatz der textilen Bewehrung wie z. B. einer Biegeverstärkung von Platten und Balken wurden für die späteren Schubversuche zwei Textilstrukturen entwickelt, welche vom Bewehrungsverhältnis her einer Q- bzw. R-Matte im Stahlbetonbau entsprechen (Bild 7.15). Diese werden im Folgenden als *Q-Textil* bzw. *R-Textil* bezeichnet. Das Textil NWM4-013-04 besitzt Längs- und Querräden gleicher Feinheit und im gleichen Abstand. Es eignet sich z. B. zur Verstärkung von Platten mit zweiachsender Tragwirkung (Q-Textil). Das Textil NWM4-022-04 besitzt in der Haupttragrichtung dieselben Fäden wie das Textil NWM4-013-04, jedoch nur 20 % Querbewehrungsanteil (R-Textil). Dieses Textil wurde zur Verstärkung für einaxiale Beanspruchung konzipiert. Die Querräden des R-Textiles besitzen die Hälfte der Feinheit der Querräden des Q-Textiles und haben den 2,5fachen Abstand. Das R-Textil besitzt damit einen höheren wirksamen Flächenanteil als das Q-Textil. Die Delaminationsneigung ist beim R-Textil entsprechend geringer als beim Q-Textil (Bild 7.15).

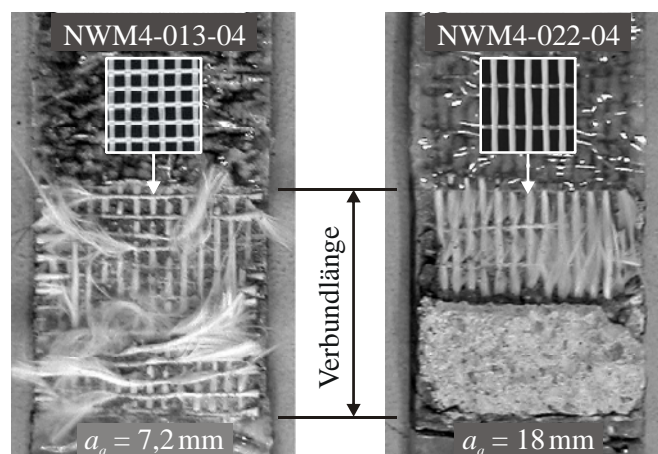


Bild 7.15 Abnahme der Delaminationsneigung durch Verringerung des Querbewehrungsanteiles

Dargestellt sind im Bild 7.15 zwei Bruchbilder von Schubversuchen mit einer Bewehrung aus einem Q- und einem R-Textil mit der Verbundlänge 10 cm. Während der Probekörper mit dem Q-Textil durch eine vollständige Delamination versagt hat, zeigte sich bei dem Probekörper mit dem R-Textil ein Mischbruch aus beginnender Delamination und endgültigem

Versagen im Altbeton. Typisch ist der Wechsel der Versagensebene in den Altbeton in Höhe einer Querrfadenebene.

Ein ähnlicher Effekt zeigt sich bei der Verwendung von nachträglich beschichteten Textilien. In Bild 7.14 und Bild 7.15 wurden die typischen Bruchbilder beim Verbundversagen zunächst am Beispiel unbehandelter Textilien dargestellt. Bild 7.16 zeigt den Einfluss einer nachträglichen Beschichtung der textilen Bewehrungsstruktur am Beispiel des zuvor genannten Q-Textils, hier dargestellt für eine Verbundlänge von 12 cm. Das Textil NWM3-026-05-p2 (Bild 7.16, rechts) ist bezüglich der Fadeneigenschaften Feinheit, Abstand und Bindungsart vergleichbar mit dem Textil NWM4-013-04 (Bild 7.16, links), wurde jedoch mit einer zusätzlichen Schlichte beschichtet. Die Filamentgarne des beschichteten Textils sind kompakter als die Filamentgarne bei einem vergleichbaren unbehandelten Textil. Entsprechend verringert sich die Wirkung des Textils als verbundstörende Trennschicht, so dass die Delaminationsneigung durch die nachträgliche Beschichtung abnimmt und sich das Versagen zunehmend in den Altbeton verlagert (Bild 7.16).

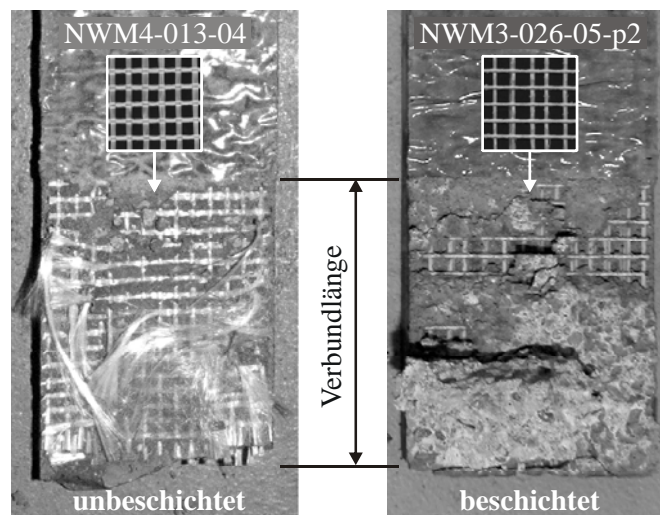


Bild 7.16 Abnahme der Delaminationsneigung durch Beschichtung der textilen Strukturen

7.2.2 Rissbildung in der Verstärkungsschicht

Im Vergleich zu herkömmlichen oberflächlich geklebten Bewehrungen aus Stahl oder faserverstärkten Kunststoffen ist das Materialverhalten des textilbewehrten Betons von einer typischen Rissbildung gekennzeichnet. Bild 7.17, oben zeigt schematisch einen Ausschnitt des für die Schubversuche verwendeten Probekörpers aus Bild 7.2 während des Versuches. Dargestellt ist die Hälfte des Probekörpers mit der textilbewehrten Feinbetonverstärkungslasche.

Im Verlauf des Verbundversuches zeigen sich bei steigender Zugbelastung zunächst Risse auf der freien Länge der textilbewehrten Feinbetonlasche, wenn dort die Zugfestigkeit des Feinbetons überschritten wird. Anschließend wird an den Seitenflächen der Verstärkungslasche die Bildung von Schrägrissen sichtbar. Diese beginnen am belasteten Ende des Verbundbereiches und verlagern sich mit steigender Last in Richtung des unbelasteten Endes des Verbundbereiches. Mit Fortschreiten des Verbundrisses verändert sich auch die Neigung der

Schrägrisse. Während der erste Schrägriss zu Beginn der Rissbildung noch nahezu senkrecht entsteht, werden die folgenden Schrägrisse mit fortschreitender Verbundrissbildung zunehmend flacher.

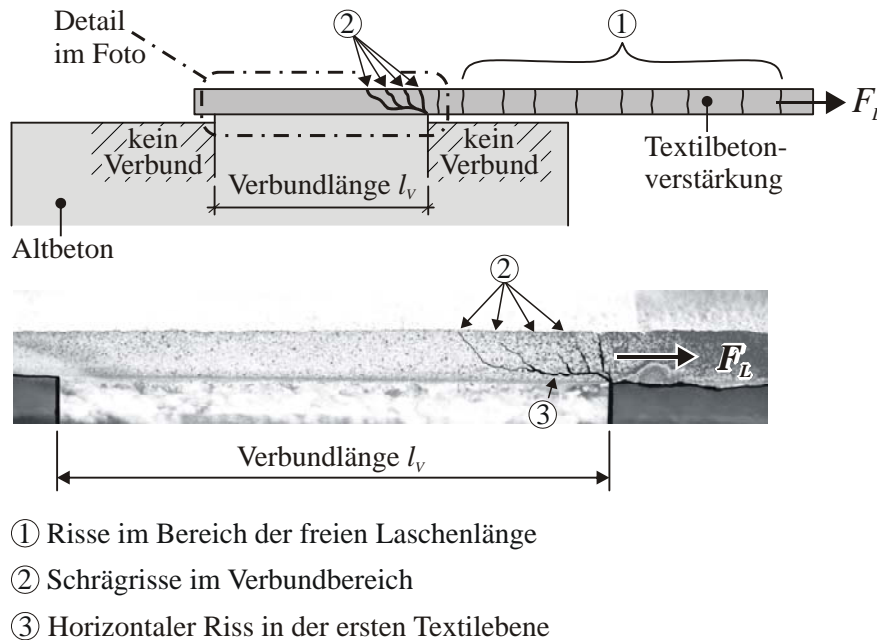


Bild 7.17 Schematische Darstellung der Rissbildung während des Schubversuches

Eine starke Zunahme der Rissbildung kurz vor Erreichen der Bruchlast kann als typisch angesehen werden. Im Detailfoto (Bild 7.17, unten) ist deutlich ein horizontaler Verbundriss zu erkennen. Dieser verläuft entlang der ersten, dem Altbeton zugewandten Textilebene und verlängert sich mit der Entstehung neuer Schrägrisse in Richtung des unbelasteten Endes des Verbundbereiches. Er bildet den Bruchquerschnitt im Versagensfall Delamination.

Bild 7.18 zeigt die Entstehung der Schrägrisse und die Entwicklung des Verbundrisses auf der Seitenfläche der Verstärkungsschicht im Verbundbereich für sieben ausgewählte Laststufen. Beim letzten Lastbild ist bereits der Verbundbruch infolge Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung eingetreten. Während in den ersten beiden dargestellten Laststufen kaum eine Rissbildung zu erkennen ist, nimmt diese deutlich zu, wenn sich die Belastung dem Bruchlastniveau nähert (Bild 7.18, unten). Der horizontale Verbundriss verlängert sich mit zunehmender Last und der Entstehung neuer Schrägrisse in Richtung des unbelasteten Endes des Verbundbereiches. Im Bereich des Verbundrisses ist ein Abheben der Verstärkungsschicht vom Altbetonuntergrund zu erkennen (siehe hierzu auch Abschnitt 9.4.6).

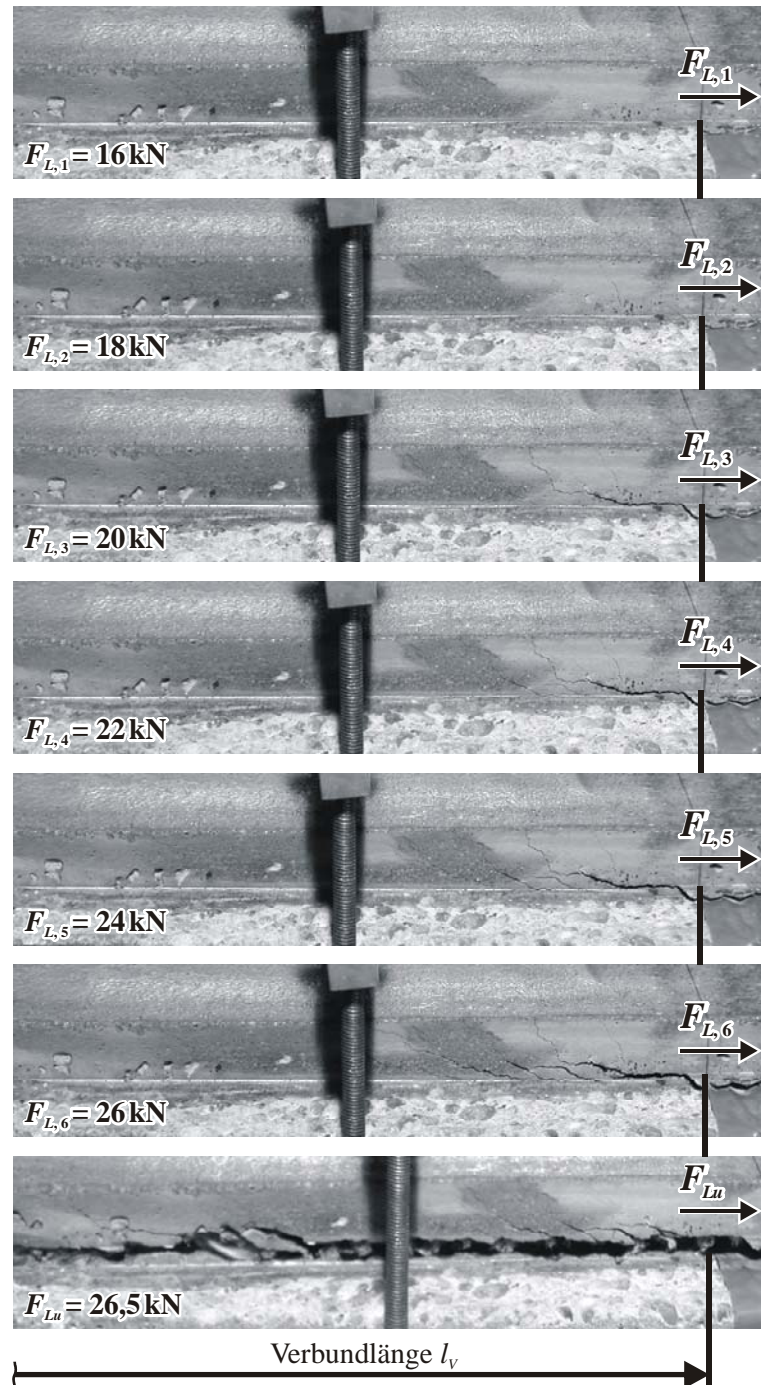


Bild 7.18 Schräg- und Verbundrissbildung für sieben ausgewählte Laststufen bis zum Bruch durch Delaminationsversagen

Im Bild 7.19 ist ein Ausschnitt aus dem mittels Photogrammetrie beobachteten Bereich eines Probekörpers anhand von vier ausgewählten Laststufen dargestellt. Der untere Bildbereich der Fotos zeigt dabei die Draufsicht auf die Oberseite der textilbewehrten Feinbetonlaschen. Im oberen Bildbereich befindet sich der Spiegel, in welchem sich die Seitenfläche der Verstärkungsschicht leicht verzerrt abbildet. Die Bildserie zeigt deutlich den Unterschied zwischen dem Rissbild auf der Laschenoberseite und der Entwicklung des Verbundrisses in der untersten Ebene der textilen Bewehrung.

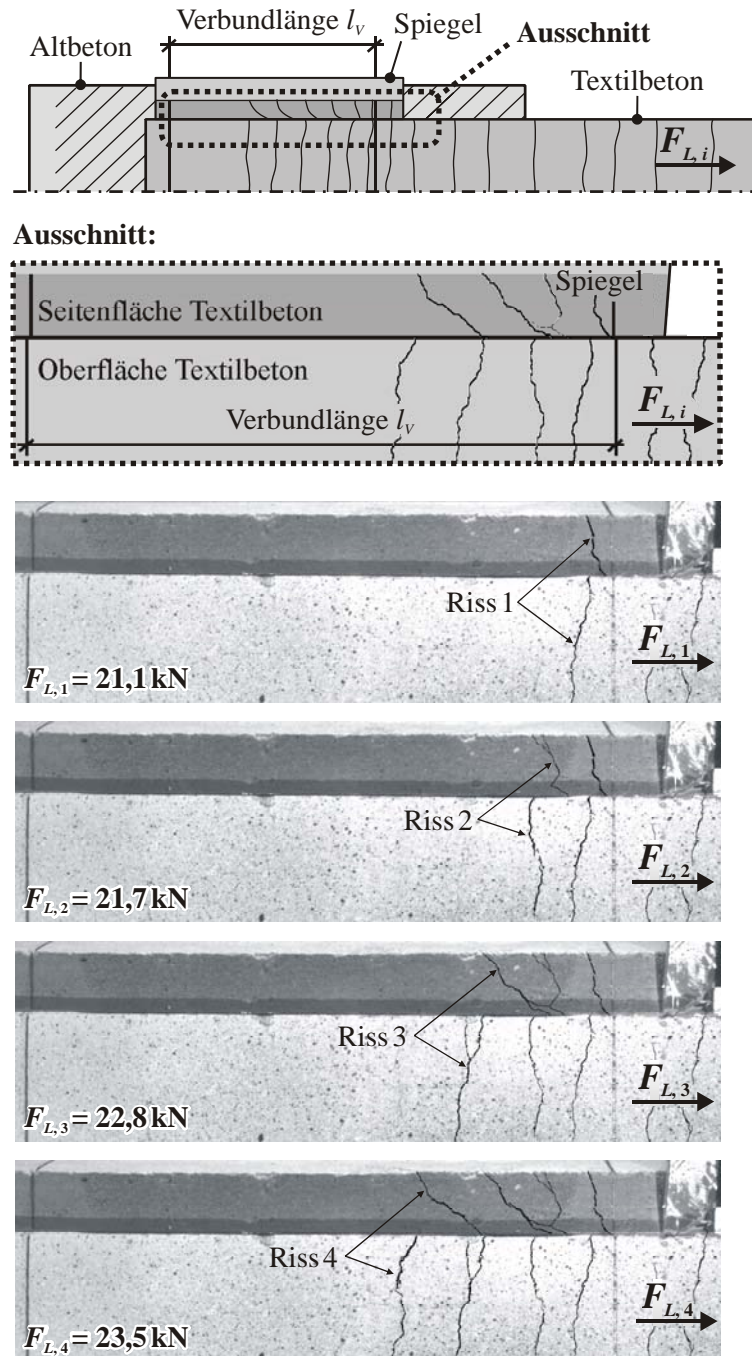


Bild 7.19 Ausschnitte von Photogrammetrie-Aufnahmen der Rissbildung auf der Laschenoberseite mit Spiegelbild der Schrägrissbildung auf der Seitenfläche für vier ausgewählte Laststufen bis kurz vor dem Bruch

In der zweiten dargestellten Laststufe ist der erste deutliche Schrägriss auf der Laschenstirnseite zu erkennen, welcher auf der Unterseite der Lasche in den horizontalen Verbundriss mündet. Auf der Oberseite der Lasche ist dieser Riss mit bloßem Auge in dieser Laststufe noch nicht zu erkennen, jedoch können durch die Verschiebungsanalyse der digitalen Photogrammetrie auf der Laschenoberseite bereits sehr kleine Risse detektiert werden.

In der dritten dargestellten Laststufe zeigt sich dieser Schrägriss auch auf der Laschenoberseite. Es ist deutlich zu erkennen, dass zwischen der Lage des Risses auf der Laschenobersei-

te, wie er mit der photogrammetrischen Messung erfasst wird, und der Lage des Schnittpunktes dieses Schrägrisses mit dem horizontalen Verbundriss ein großer Unterschied besteht. Ein Riss zeigt sich auf der Laschenoberseite wesentlich weiter hinten im Verbundbereich als er sich auf der Laschenunterseite, d. h. im Bereich der „Verbundfuge“ zum Altbetonuntergrund, tatsächlich befindet. Das bedeutet, dass die Lage des letzten Risses, welcher mit der photogrammetrischen Messung auf der Laschenoberseite detektiert wird, nicht der Lage des Verbundrisses auf der Laschenunterseite entspricht. Die Differenz zwischen Laschenober- und -unterseite vergrößert sich mit der Neigungsänderung der Schrägrisse zunehmend in Richtung des unbelasteten Endes des Verbundbereiches. Aus diesem Grund ist die Erfassung der Neigungswinkel der Schrägrisse in Abhängigkeit von ihrer Lage im Verbundbereich zusätzlich zur photogrammetrischen Messung auf der Laschenoberseite erforderlich.

7.2.3 Versagensmechanismen

Während bei sehr kurzen Verbundlängen von ca. 4–6 cm i. Allg. ein plötzliches Versagen eintritt, welches sich in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Bewehrungstextils als reiner Altbetonbruch oder vollständige Delamination zeigt, ist bei größeren Verbundlängen ab 8–10 cm zunächst die Bildung eines Verbundrisses zu beobachten, bevor das endgültige Verbundversagen eintritt (vgl. Bild 7.17 und Bild 7.18). Der Verbundriss entwickelt sich i. d. R. entlang der ersten, dem Altbetonuntergrund zugewandten Textilebene. Diese erhält im Verankerungsbereich aufgrund der Spannungsverteilung über die Laschendicke die höchste Verbundbeanspruchung (Bild 7.20).

Der Verbundbruch schreitet bei Laststeigerung zunächst durch Überschreiten der Scherfestigkeit des Feinbetons in der unteren textilen Bewehrungsebene fort. Aufgrund der Störwirkung des Textils wird die effektive Scherfestigkeit des Feinbetons in der Textilebene um den Faktor des wirksamen Flächenanteils des verwendeten Textils herabgesetzt (vgl. hierzu Abschnitt 7.4.4, Bild 7.64). Ist diese reduzierte Scherfestigkeit der Textilebene geringer als die Scherfestigkeit des wesentlich grobkörnigeren Altbetons, so bildet sich der Verbundriss entlang der Textilebene. Dieses Phänomen zeigte sich in den durchgeführten experimentellen Untersuchungen bei allen Bewehrungstextilen, welche einen wirksamen Flächenanteil unter 0,6 aufwiesen. Bei Textilien mit einem größeren wirksamen Flächenanteil hat sich eine teilweise Verlagerung der Versagensebene des sich bildenden Verbundrisses in den Altbeton gezeigt (Bild 7.21).

Infolge des Versatzes zwischen der Wirkungslinie der zu verankernden Zugkraft aus der Verstärkungsschicht gegenüber der Wirkungslinie im Altbeton kommt es zusätzlich zur reinen Scherbeanspruchung zu einer Haftzugbeanspruchung infolge dieser Umlenkkräfte (siehe auch Abschnitt 9.4). Zur Übertragung dieser Haftzugbeanspruchung steht zunächst die volle Verbundlänge zur Verfügung, so dass die aufzunehmende Haftzugspannung relativ gering ausfällt.

Bei größeren Verbundlängen überwiegt am lastseitigen Beginn des Verbundbereiches die Scherbeanspruchung, welche ab einer bestimmten Zugkraft zur Bildung des Verbundrisses führt. Über diesen Verbundriss können nur noch relativ geringe Scherkräfte infolge Reibung bzw. Kornverzahnung übertragen werden. Die Übertragung von Haftzugkräften infolge der

Kraftumlenkung ist im Bereich des Verbundrisses nicht mehr möglich. Wenn sich der Verbundriss zu bilden beginnt, verkürzt sich somit die zur Übertragung der Haftzugbeanspruchung zur Verfügung stehende ungerissene Verbundfläche hinter dem Verbundriss im gleichen Maße wie die gerissene Fläche im Bereich des Verbundrisses zunimmt.

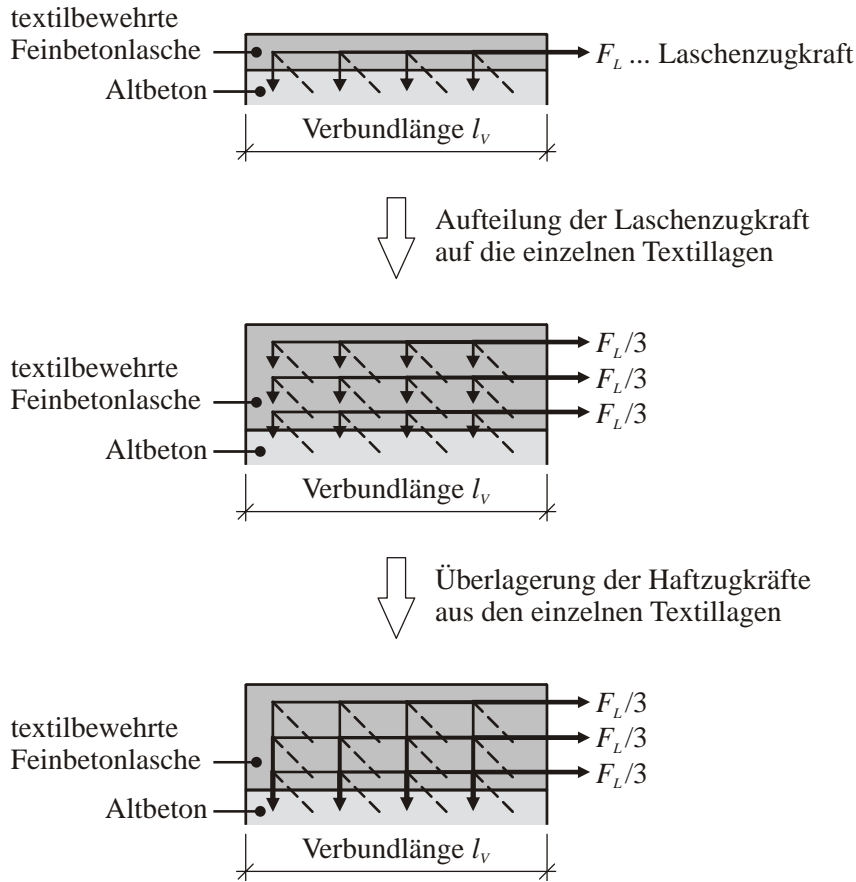


Bild 7.20 Verbundbeanspruchung in den Textilebenen

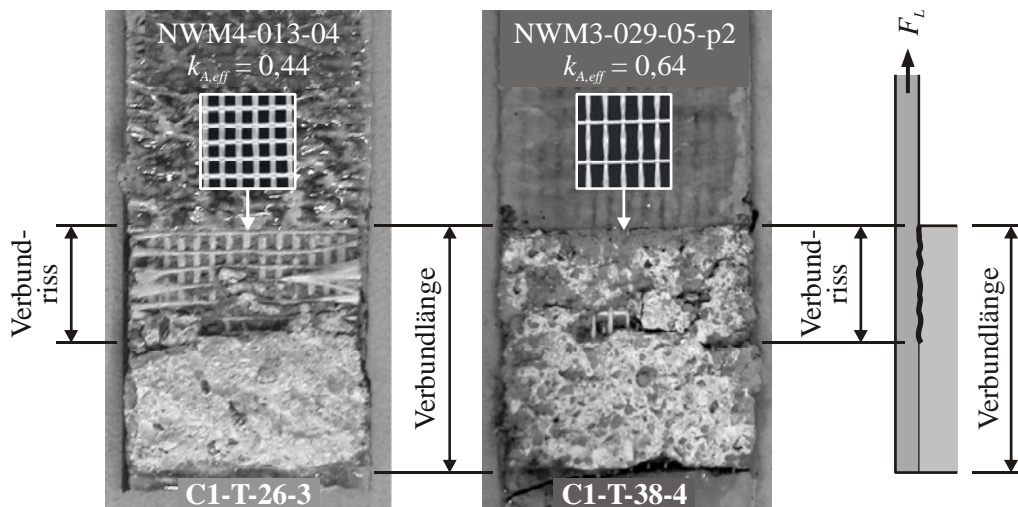


Bild 7.21 Verlagerung der Ebene des fortschreitenden Verbundrisses in den Altbeton

Mit zunehmender Länge des unter Laststeigerung wachsenden Verbundrisses ändern sich die Kräfteverhältnisse in der verbleibenden „Restverbundfläche“. Infolge der kleiner werdenden Fläche hinter dem Verbundriss bei gleichzeitiger Laststeigerung erhöht sich die zu übertragende Haftzugspannung. D. h., der Anteil der Haftzugbeanspruchung nimmt gegenüber dem Anteil der Scherbeanspruchung deutlich zu (vgl. dazu Abschnitt 9.4.4). Ab einem bestimmten Punkt wird infolgedessen die Haftzugfestigkeit des Altbetons bzw. der Textilebene überschritten, was zu einem schlagartigen Versagen der Restfläche hinter dem Verbundriss führt.

Das plötzliche Versagen der „Restverbundfläche“ findet in Abhängigkeit von den Eigenschaften der textilen Bewehrung entweder im Altbeton oder in der Ebene der textilen Bewehrung statt, wobei der Grenzwert des wirksamen Flächenanteiles für den Wechsel der Bruchebene unter vorwiegender Haftzugbeanspruchung (vgl. Abschnitte 6.6.8 und 6.6.9) niedriger als unter vorwiegender Scherbeanspruchung (siehe oben) ist. Diese beiden unterschiedlichen Grenzwerte führen letztendlich zu drei verschiedenen Versagensbildern (Bild 7.22).

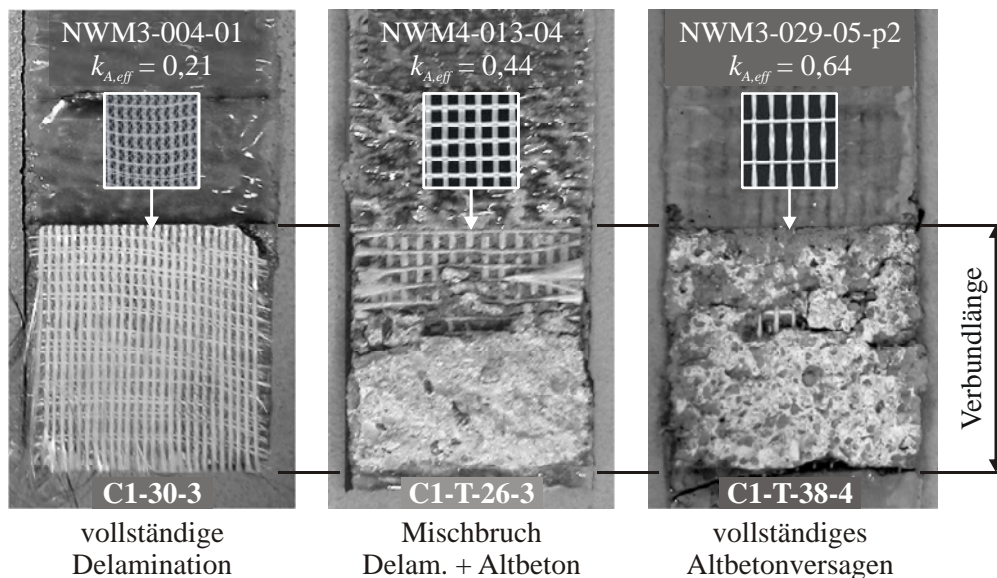


Bild 7.22 drei verschiedene Versagensbilder als Kombination der Versagensmechanismen

Wenn der wirksame Flächenanteil so gering ist, dass sich der Verbundriss unter Laststeigerung in der Ebene der textilen Bewehrung bildet und sich das schlagartige Versagen durch Überschreiten der Haftzugfestigkeit ebenfalls in der Ebene der textilen Bewehrung ereignet, handelt es sich um eine vollständige Delamination in der Textilebene (Bild 7.22, links). Bei Textilien, deren wirksamer Flächenanteil den Grenzwert der Haftzugfestigkeit überschreitet, den Grenzwert der Scherfestigkeit jedoch noch nicht erreicht, bildet sich der Verbundriss unter Laststeigerung wiederum in der Ebene der textilen Bewehrung. Jedoch ist in diesem Fall die Haftzugfestigkeit des Altbetonuntergrundes für das endgültige Versagen maßgebend, was zu einem Mischbruch führt (Bild 7.22, mitte). Bei Textilien mit einem sehr hohen wirksamen Flächenanteil, welcher den Grenzwert der Scherfestigkeit übersteigt, bildet sich der Verbundriss unter Laststeigerung im Altbeton aus. Das schlagartige Versagen der Restfläche hinter dem Verbundriss findet in diesem Fall ebenfalls im Altbeton statt. Hierbei handelt es sich um ein vollständiges Altbetonversagen (Bild 7.22, rechts).

7.2.4 Analyse der Versagensmechanismen mit der High-Speed-Kamera

Während die Bildung des Verbundrisses unter Laststeigerung bei größeren Verbundlängen noch deutlich zu erkennen ist, kommt es bei kurzen (Rest-)Verbundlängen zu einem schlagartigen Versagen. Die Entstehung des endgültigen Verbundbruchquerschnittes ist aufgrund der Geschwindigkeit der Rissbildung mit bloßem Auge nicht mehr wahrnehmbar. Zur Beobachtung des Versagensmechanismus konnte bei einzelnen Versuchen eine Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt werden, die mit 40.000 Bildern pro Sekunde aufzeichnet.

Aufgrund der sehr kurzen Verschlusszeiten der Hochgeschwindigkeitskamera erscheinen die Aufnahmen ohne zusätzliche Beleuchtung zu dunkel. Um die Risse auf der Laschenseitenfläche in den aufgenommenen Bildern erkennen zu können ist, eine sehr hohe Lichtstärke bei der Beleuchtung des Probekörpers erforderlich. Diese führt jedoch zur Beeinträchtigung der photogrammetrischen 3D-Messung auf der Laschenoberseite, wenn Bildbereiche durch Lösen des Blendschutzes während des Bruchvorganges überstrahlt werden (Bild 7.23). Aus diesem Grund ist eine gleichzeitige photogrammetrische Messung und Aufzeichnung des Bruchvorganges mit der Hochgeschwindigkeitskamera nur begrenzt möglich.

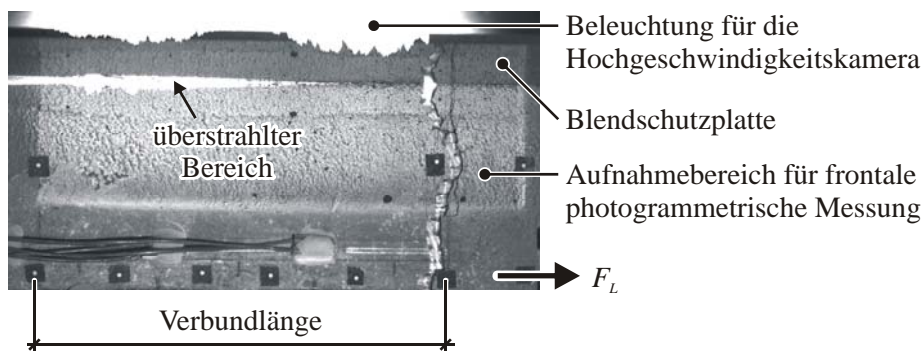


Bild 7.23 Überstrahlungseffekt

Die Auflösung der mit der Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommenen Bilder ist gegenüber der Auflösung bei der frontalen Photogrammetriemessung relativ gering, da das maximal speicherbare Datenvolumen durch die hohe Aufzeichnungsgeschwindigkeit beschränkt wird. Die Aufnahmen eignen sich zur visuellen Beurteilung des Bruchvorganges, jedoch nicht zu einer hochgenauen Messung wie auf der Laschenoberseite.

Bild 7.24 zeigt die Entstehung der Verbundbruchebene für den Versagensfall Altbetonbruch bei einer Verbundlänge von 4 cm. Nach dem Bruch entsteht eine ungleichmäßige Öffnung des Verbundrisses. Diese ergibt sich aus dem Nachbruchverhalten. Die Feinbetonlasche wird nach dem Bruch vom Altbetonuntergrund abgehelt (vgl. Bild 7.25).

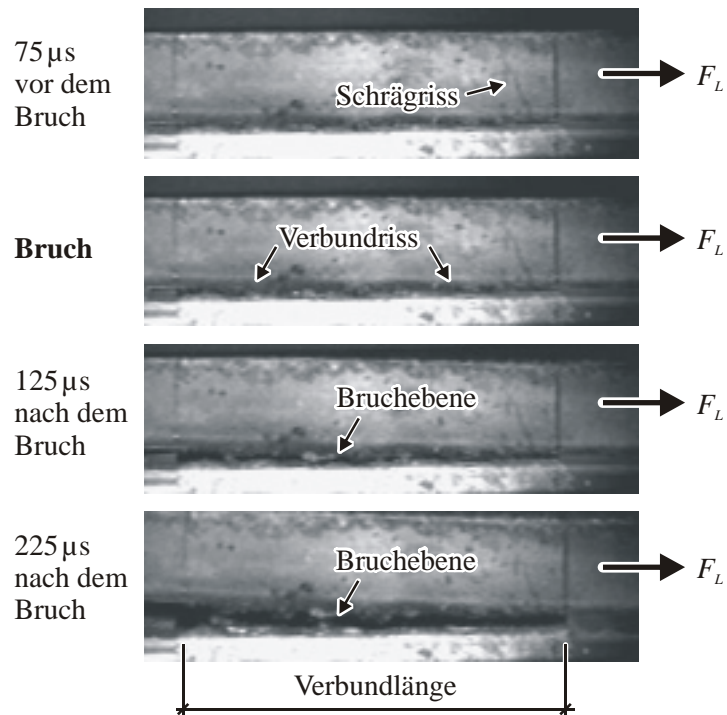


Bild 7.24 Entstehung der Bruchebene beim Versagensfall Altbetonbruch (aufgenommen mit der Hochgeschwindigkeitskamera)

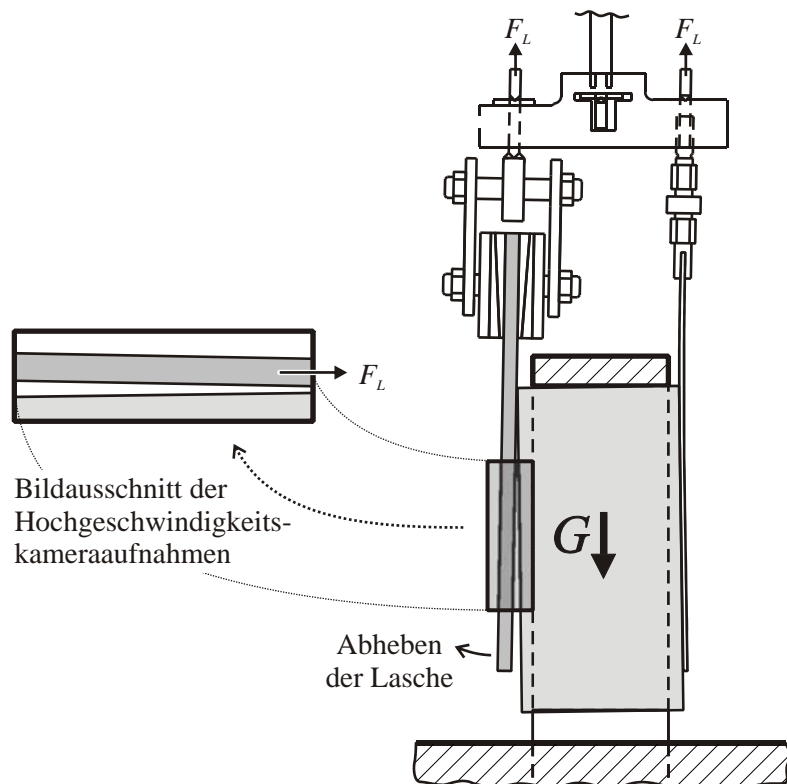


Bild 7.25 Bewegung der Lasche nach dem Bruch

Bild 7.26 zeigt die Entstehung des Verbundbruchquerschnittes durch Delamination in der untersten Ebene der textilen Bewehrung während des Bruchvorganges. Während sich die Bildung des Verbundrisses über einen längeren Zeitraum ($> 20.000 \mu\text{s}$) erstreckt, ist der end-

gültige Bruch durch Delamination hinter dem bereits vorhandenen Verbundriss auf ca. 100 μs beschränkt, so dass hier von einem schlagartigen Versagen des Restbereiches gesprochen werden kann.

Deutlicher zu sehen ist die Teilung des Verbundbereiches in den unter Laststeigerung allmählich wachsenden Verbundriss und einen schlagartig versagenden Restbereich im Bild 7.27. Die Beobachtungen des Bruchvorganges mit der Hochgeschwindigkeitskamera bestätigen somit die im vorigen Abschnitt beschriebenen Versagensmechanismen.

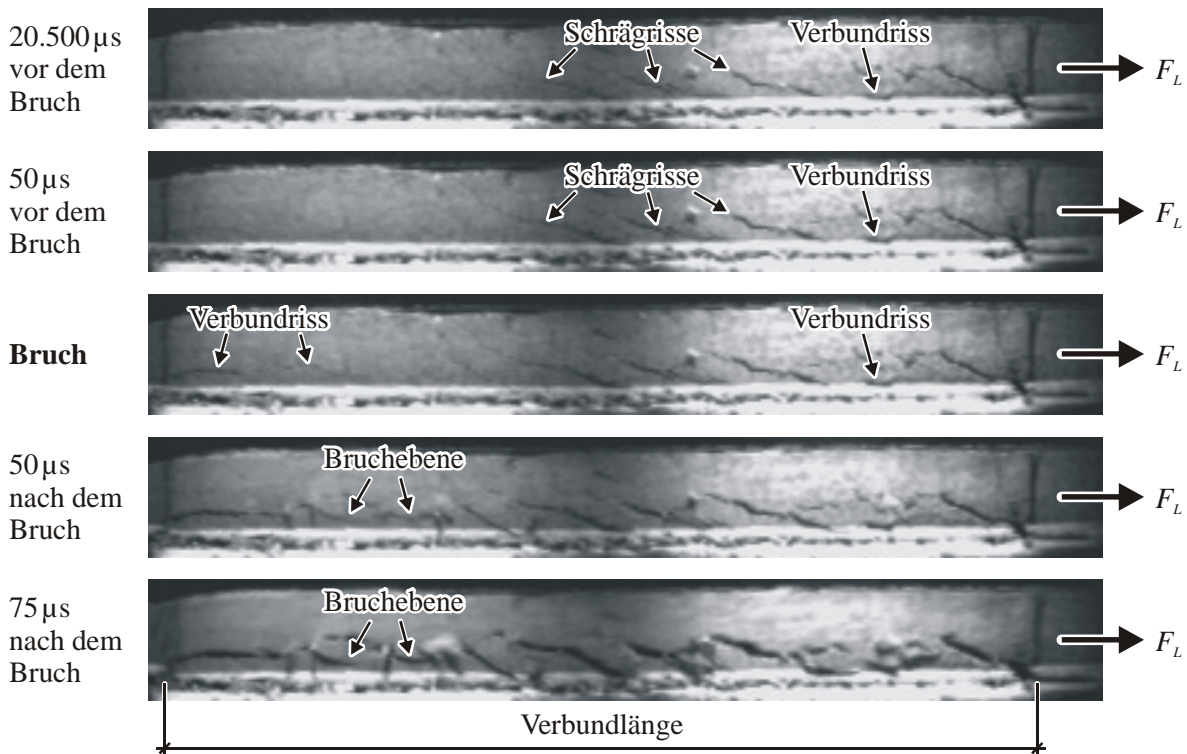


Bild 7.26 Entstehung der Bruchebene beim Versagensfall Delamination (aufgenommen mit der Hochgeschwindigkeitskamera)

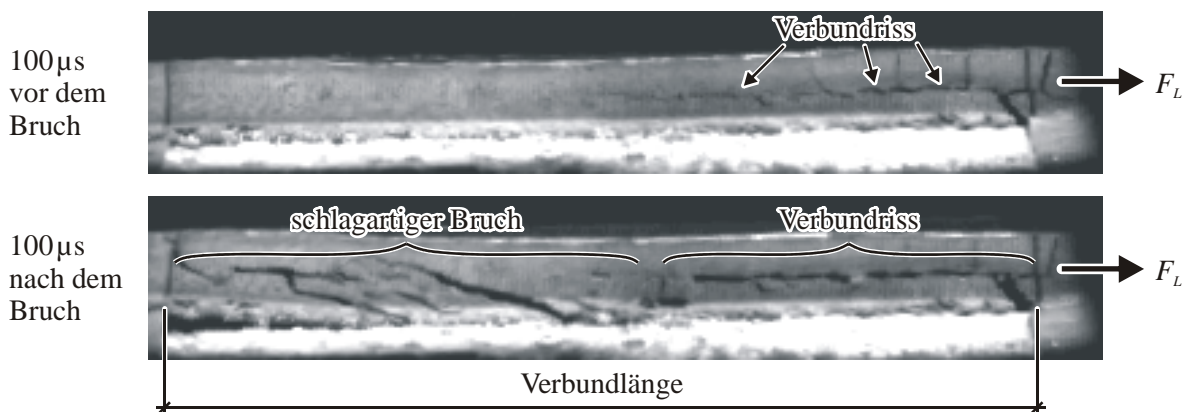


Bild 7.27 Entstehung des Verbundrisses und schlagartiges Versagen des Restbereiches beim Versagensfall Delamination (aufgenommen mit der Hochgeschwindigkeitskamera)

7.3 Verformungsmessung und Versuchsauswertung

7.3.1 Übliche Vorgehensweise bei Klebelamellen – Differenzenverfahren

Im Stahlbetonbau findet üblicherweise das Differenzenverfahren zur Berechnung von Verbundspannungen zwischen Bewehrungsstahl und umgebendem Beton Anwendung (WINTSCHER [107]). Dabei werden entlang des in Verbund stehenden Bewehrungsstabes eine Reihe von Dehnungsmessstellen in einem bestimmten Abstand angeordnet. Aus der in diesen Punkten gemessenen Dehnung wird mit Hilfe des Elastizitätsmoduls die Spannung im Stahl berechnet. Dies geschieht unter der Annahme einer konstanten Dehnungsverteilung über den Stabdurchmesser. Aus der Differenz der Stahlspannungen zweier Messstellen wird auf die Verbundspannung im dazwischenliegenden Bereich geschlossen (Bild 7.28).

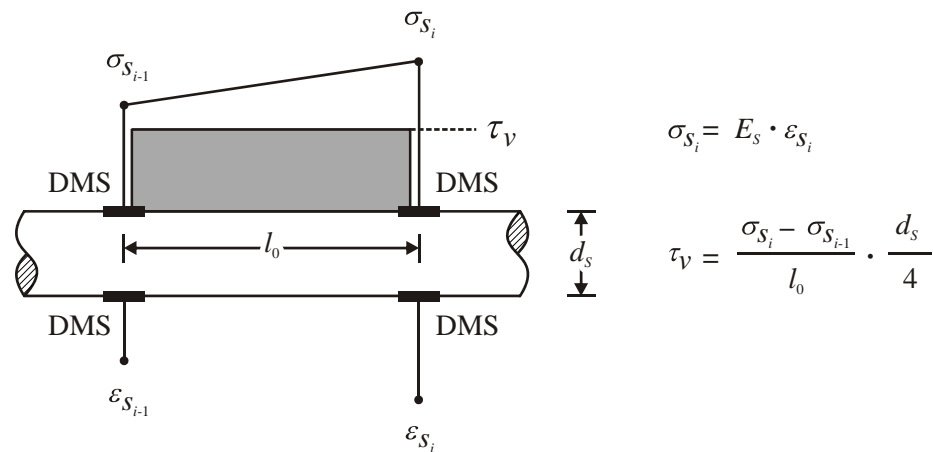


Bild 7.28 Schubspannungsermittlung nach dem Differenzenverfahren nach WINTSCHER [107]

Der Verbundspannungsverlauf über die Länge des Bewehrungsstabes wird dabei als bereichsweise konstant angenommen. Innerhalb des Abschnittes zwischen zwei Messstellen bestehe ein linearer Zusammenhang der durch den Verbund beeinflussten Spannungen in der Bewehrung. Die zugehörige lokale Verschiebung (Schlupf) des entsprechenden Bereiches wird von WINTSCHER [107] in der Mitte zwischen zwei Dehnungsmessstellen mit separaten Messaufnehmern gemessen. Werden diese Größen in einem Diagramm aufgetragen, so erhält man eine Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung.

HANKERS [39] wendet das Differenzenverfahren zur Ermittlung von Verbundspannungen zwischen geklebten Stahllaschen und Beton an. Der Verbundbereich wird in eine bestimmte Anzahl von Messintervallen unterteilt. Die Dehnungen der geklebten Stahllasche werden mittels DMS an den Intervallgrenzen auf der Oberseite der Lasche gemessen (Bild 7.29, oben).

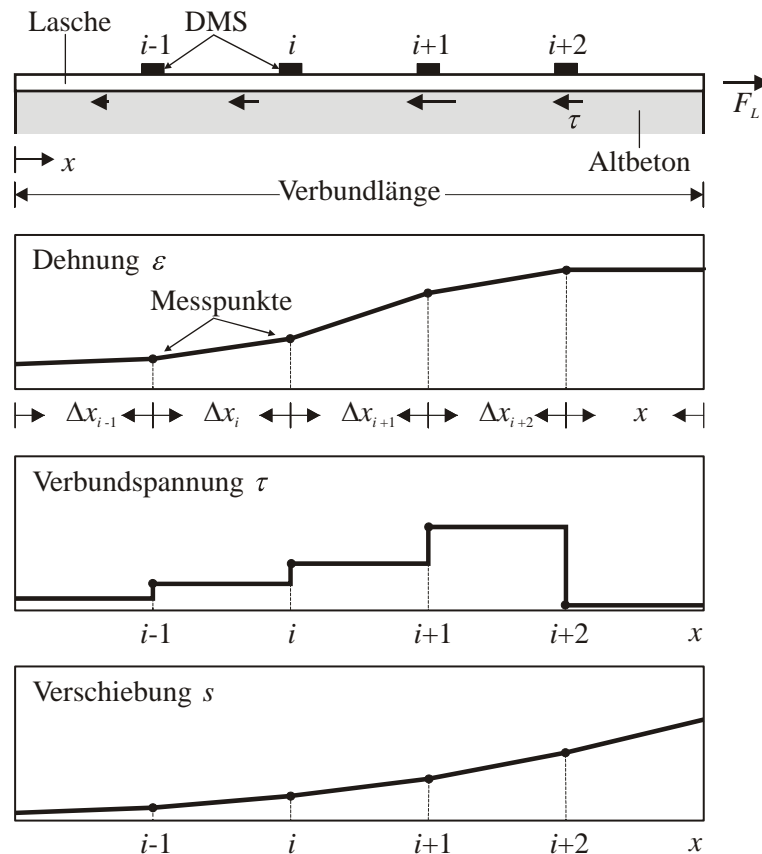


Bild 7.29 Ermittlung von Verbundspannung und Verschiebung aus gemessener Laschendehnung nach HANKERS [39]

Unter der Annahme einer konstanten Dehnungsverteilung über den Laschenquerschnitt $A = b \cdot t$ kann aus den gemessenen Dehnungen unter Voraussetzung eines liner-elastischen Materialverhaltens der Stahllasche die Normalspannung in den einzelnen Messpunkten zu $\sigma = E_s \cdot \varepsilon$ berechnet werden. Die von der Lasche auf den Beton übertragene Laschenkraft ΔF_L ergibt sich nach Gl. (7.1) aus der Differenz der so ermittelten Spannungen zweier Messstellen.

$$\Delta F_L = [\varepsilon(x_{i+1}) \cdot E_s - \varepsilon(x_i) \cdot E_s] \cdot b \cdot t \quad (7.1)$$

Die Differenz der Normalkraft ΔF_L zweier Messstellen bezogen auf deren Abstand Δx_i und die Laschenbreite b liefert nach Gl. (7.2) für jedes Intervall einen konstanten Wert für die Verbundspannung (Bild 7.29, mitte).

$$\tau(x_i) = \frac{\Delta F_L}{b \cdot \Delta x_i} = \frac{(\varepsilon(x_{i+1}) - \varepsilon(x_i)) \cdot E_s}{\Delta x_i} \cdot t \quad (7.2)$$

Zur Bestimmung der zugehörigen Relativverschiebungen der einzelnen Intervalle gibt HANKERS [39] als Alternative zur direkten Messung mittels induktiver Wegaufnehmer die Möglichkeit der Berechnung aus den gemessenen Laschendehnungen nach Gl. (7.3) an. Dabei wird die Verschiebung, beginnend am unbelasteten Laschenende, aus den Mittelwerten der Laschendehnungen zweier benachbarter Messpunkte $\varepsilon(x_i)$ und $\varepsilon(x_{i+1})$ multipliziert mit ihrem Abstand Δx_i unter Vernachlässigung der Betonverformungen ermittelt.

$$s(x_i) = s(x_{i-1}) + 0,5 \cdot (\varepsilon(x_i) + \varepsilon(x_{i-1})) \cdot \Delta x_i \quad (7.3)$$

Die Verschiebung am belasteten Laschenanfang wurde von HANKERS [39] mit IWA's direkt gemessen und den mit obigem Schema berechneten Verschiebungen gegenübergestellt. Die Übereinstimmung der Werte bis kurz vor Erreichen der Tragfähigkeit wird als gut bezeichnet.

Bezüglich der Verwendung der auf der Laschenoberseite gewonnenen Dehnungsmesswerte für die anschließende Berechnung gibt HANKERS [39] zu bedenken, dass sich infolge der Verbunddrissbildung eine ungleichmäßige Dehnungsverteilung über die Laschendicke einstellt, was sich allerdings nur durch eine zusätzliche Dehnungsmessung auf der Laschenunterseite erfassen ließe. Diese sei jedoch aufgrund der verbundstörenden Wirkung der DMS nicht sinnvoll durchführbar. Aus diesem Grund wird der Einfluss der ungleichmäßigen Laschendehnung nicht weiter berücksichtigt.

7.3.2 Erweiterung des Algorithmus für nichtlineares Materialverhalten

Der von HANKERS [39] vorgeschlagene Algorithmus gilt für linear-elastisches Werkstoffverhalten der Verstärkungslaschen, da in die Berechnung der Normalspannungen aus der gemessenen Dehnung ein konstanter E-Modul E_s einfließt. Bei Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton führt jedoch das nichtlineare Materialverhalten zu einer Abhängigkeit der Spannung von der jeweils vorhandenen Dehnung, so dass der von HANKERS [39] vorgeschlagene Berechnungsalgorithmus für den vorliegenden Fall um diese Abhängigkeit erweitert werden muss (Gl. (7.4) und (7.5)). Die Nichtlinearität kann durch eine Dehnungsabhängigkeit des E-Moduls ausgedrückt werden (vgl. Abschnitt 3.3.3, Bild 3.5), wobei der Begriff Elastizitätsmodul an dieser Stelle nicht mehr zutreffend ist. Vielmehr handelt es sich hierbei um den Sekantenmodul der Spannungs-Dehnungs-Linie (siehe auch Abschnitt 3.3.2).

$$\Delta F_L = [\varepsilon(x_{i+1}) \cdot E_{TRC}(\varepsilon(x_{i+1})) - \varepsilon(x_i) \cdot E_{TRC}(\varepsilon(x_i))] \cdot b \cdot t \quad (7.4)$$

$$\tau(x_i) = \frac{\Delta F_L}{b \cdot \Delta x_i} = \frac{\varepsilon(x_{i+1}) \cdot E_{TRC}(\varepsilon(x_{i+1})) - \varepsilon(x_i) \cdot E_{TRC}(\varepsilon(x_i))}{\Delta x_i} \cdot t \quad (7.5)$$

Die Berechnung der Relativverschiebungen aus der Dehnung der Verstärkungsschicht wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht erforderlich, da die Verformungsmessung mit Hilfe der Photogrammetrie bereits die Relativverschiebungen liefert. Aus diesen Relativverschiebungen können wiederum unter Ansatz der Intervalllänge mittlere Dehnungen zwischen zwei Punkten berechnet werden.

7.3.3 Ermittlung der Spannungs-Dehnungs-Linie auf der freien Laschenlänge

Für die Anwendung des erweiterten Berechnungsalgorithmus wird die Spannungs-Dehnungs-Linie der jeweiligen im Schubversuch geprüften textilbewehrten Verstärkungsschicht benötigt. Zu diesem Zweck wurde im Sonderforschungsbereich 528 ein eigenes Teilprojekt eingerichtet, in welchem die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen des textilbewehrten Betons an

separaten Dehnkörpern untersucht werden. Zu Anfang der hier durchgeführten Untersuchungen wurde auf diese Möglichkeit zurückgegriffen. Die Methode von JESSE [45] ermöglicht eine vergleichsweise genaue Bestimmung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens eines bestimmten Bewehrungstextils mit der entsprechenden Lagenanzahl.

Die separate Messung hat jedoch einige Nachteile. So stimmen beispielsweise die Herstell- und Lagerungs- bzw. Erhärtungsbedingungen der Dehnkörper nicht mit denen der Schubprobekörper überein. Insbesondere wird die Erhärtung des Feinbetons der Schubprobekörper von dem darunterliegenden Altbeton beeinflusst. Auch ist die Betonage der textilbewehrten Verstärkungsschicht bei der Herstellung der Schubprobekörper ungleich komplizierter als bei der Herstellung der Dehnkörper, welche auf einer flächigen Schalung hergestellt und im Nachhinein auf die entsprechende Probekörperbreite zurechtgesägt werden können. Somit ist es auch kaum möglich, in den verschiedenen Probekörperarten exakt dieselbe Laschendicke und denselben Bewehrungsgrad herzustellen.

Aus diesem Grund wurde dazu übergegangen, die Spannungs-Dehnungs-Linie der Verstärkungsschicht direkt am Schubprobekörper zu ermitteln. Diese wird für jeden Versuch extra im Bereich der freien Laschenlänge mit DD1-Dehnungsaufnehmern auf einer Messlänge von 150 mm gemessen. Die Messung der Dehnungen auf der freien Laschenlänge beim Verbundversuch entspricht im Prinzip der eines einaxialen Zugversuches. Allerdings kann die Spannungs-Dehnungs-Linie nicht bis zur einaxialen Zugbruchlast ermittelt werden, wenn vorher ein Verbundbruch eintritt. Die hier durchgeführten Messungen ersetzen somit nicht Untersuchungen am einaxialen Dehnkörper. Die Unvollständigkeit der am Schubprobekörper gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linie ist jedoch für die Auswertung des entsprechenden Schubversuches von untergeordneter Bedeutung, da die Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeit nur bis zur maximal eingeleiteten Laschenzugkraft benötigt wird. Der Vorteil gegenüber gesondert durchgeführten einaxialen Zugversuchen liegt darin, dass hierbei keine zusätzlichen Materialstreuungen wie bei separat betonierten Probekörpern auftreten können.

Problematisch ist hierbei allerdings die auch von JESSE [45] diskutierte herstellungsbedingte Vorkrümmung der Verstärkungslasche, welche zu unterschiedlichen Messergebnissen der Verformungen auf Vorder- und Rückseite des Dehnkörpers führt. JESSE [45] kompensiert diesen Effekt durch Mittelwertbildung aus der Messung auf der Vorderseite und der Messung auf der Rückseite des Probekörpers (Bild 7.30, a)). Diese Kompensationsmöglichkeit besteht jedoch nicht bei den Schubprobekörpern, da die Rückseite der Verstärkungslasche teilweise vom Altbetonuntergrund verdeckt und somit für Messtechnik unzugänglich ist. Um den Einfluss der Vorkrümmung dennoch zu eliminieren, wurden Messböckchen auf die Mittelachse der Laschenstirnseiten aufgeklebt (Bild 7.30, b)). Von dieser Messbasis aus wurden die Verformungen mit Hilfe von zwei gekoppelten DD1-Dehnungsaufnehmern auf der rechten und linken Laschenstirnseite gemessen und die Messwerte gemittelt. Die gemessenen Spannungs-Dehnungs-Linien werden für die weitere Berechnung in Anlehnung an die Untersuchungen von JESSE [45] durch eine trilineare Funktionsbeziehung approximiert.

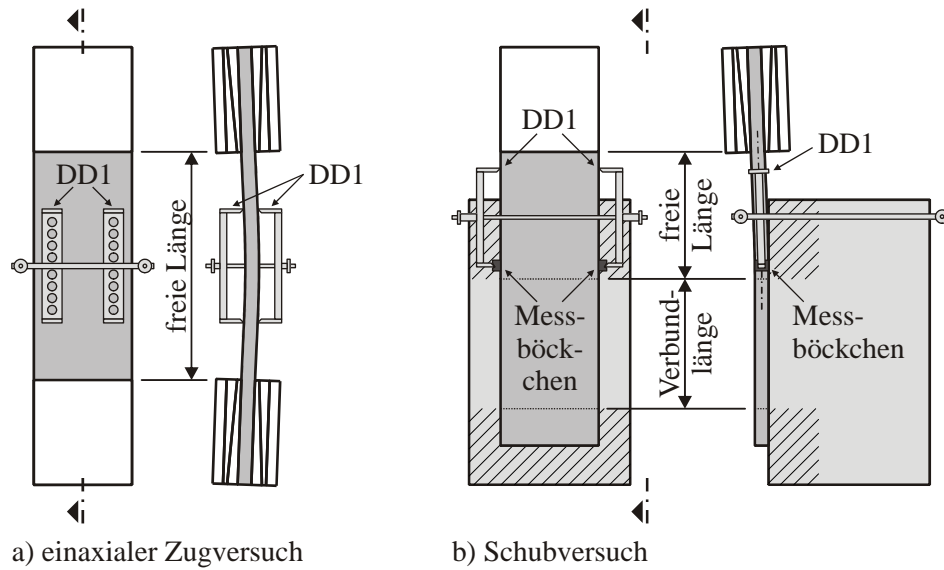
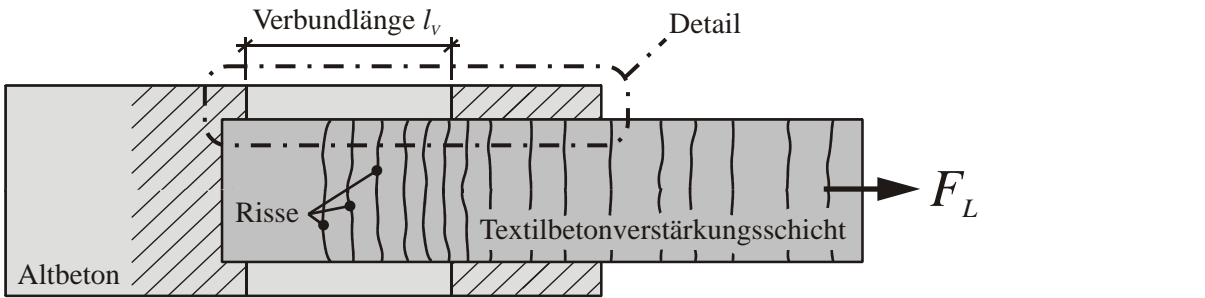


Bild 7.30 Anordnung der Messtechnik zur Kompensation der Vorkrümmung des Textilbetons bei der Messung der Spannungs-Dehnungs-Linie im Bereich der freien Länge

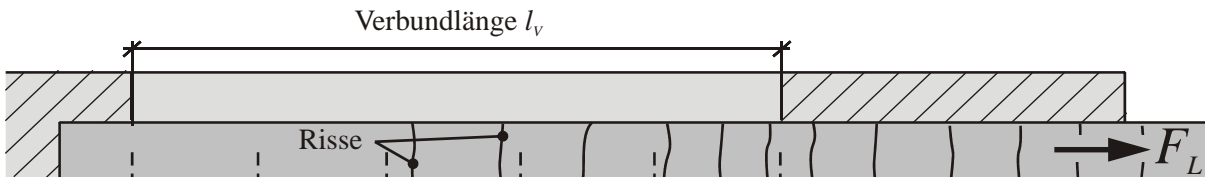
7.3.4 Problematik bei konstanten Messintervallen

Infolge der Rissbildung in der Verstärkungsschicht unter Zugbelastung, welche sich auch im Verbundverankerungsbereich einstellt (vgl. Abschnitt 7.2.2, Bild 7.17), ergibt sich gegenüber geklebten Bewehrungen ein großer Unterschied im Verformungsverhalten. Während der Verlauf der Dehnungen im Verbundbereich bei den bisher bekannten Verstärkungsmaterialien Stahl und CFK einer monoton steigenden Funktion entspricht, stellen die Risse im textilbewehrten Beton Unstetigkeiten im Dehnungsverlauf dar (ORTLEPP & CURBACH [75]). An der Stelle eines sich öffnenden Risses stellt sich aufgrund der Lastabtragung durch die textile Bewehrung lokal eine relativ große Dehnung ein, während die verbleibenden Betondehnungen im Bereich zwischen den Rissen wesentlich geringer ausfallen. D. h. an der Stelle eines Risses ergibt sich infolge der Rissbreite je nach gewählter Bezugslänge eine fiktive Dehnung ε , die ein Vielfaches der Betondehnung erreicht (Bild 7.31, c)) und sich somit wesentlich auf die mittlere Dehnung ε_i über die Intervalllänge auswirkt (Bild 7.31, d)).

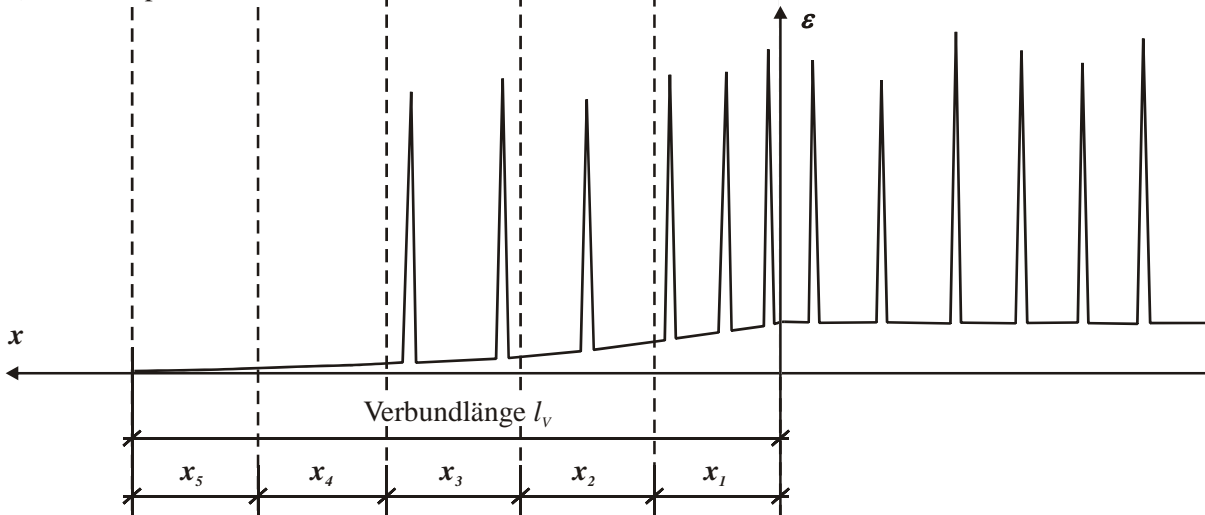
Bei einer Dehnungsmessung mit konstanten Intervalllängen kann der Fall eintreten, dass infolge der zufälligen Verteilung der Risse bei ungünstiger Konstellation in einem Intervall mehr Risse als im vorangehenden Intervall auftreten (Bild 7.31, b)). In dem Intervall, in welchem mehr Risse liegen, werden die mittleren Dehnungen infolge der hohen lokalen Dehnungen bei der Rissöffnung scheinbar größer als in einem Intervall mit weniger Rissen. Somit liefern die Messergebnisse der gemittelten Dehnungen über die Intervalllängen nicht in jedem Fall eine monoton steigende Dehnungsfunktion (Bild 7.31, d)). Die Folge davon ist, dass sich bei der Ermittlung der Differenzkräfte zwischen den Intervallen nach Gl. (7.4) mittels der zuvor ermittelten Spannungs-Dehnungs-Beziehung trotz Einbeziehung der Nichtlinearität des E-Moduls negative Werte ergeben. Daraus lassen sich dann keine sinnvollen Werte für die Verbundspannungen (Gl. (7.5)) ableiten.



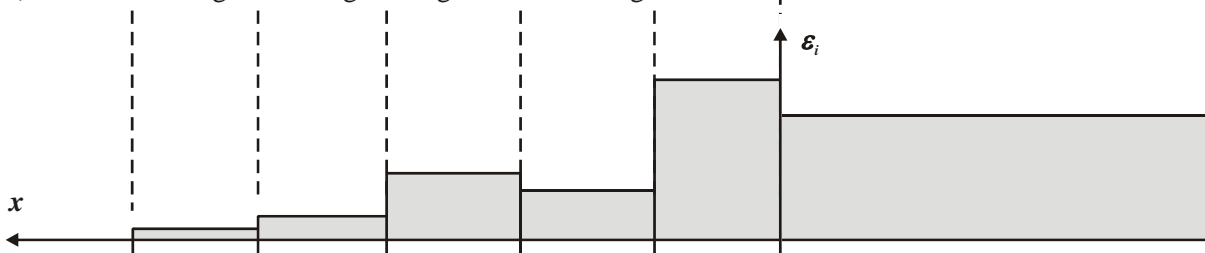
a) Probekörper für die Schubversuche



b) Probekörperdetail



c) fiktive Dehnungsverteilung entlang der Verstärkungsschicht



d) berechnete Dehnungsmittelwerte für konstante Intervalle

Bild 7.31 Risse, Dehnungsverlauf und mittlere Dehnung in konstanten Messintervallen

7.3.5 Lösungsvorschlag der adaptiven Intervallfestlegung

Die Bildung einzelner Risse wirkt sich entscheidend auf das Verformungsbild im Verbundbereich der textilbewehrten Feinbetonverstärkungsschicht aus. Deshalb ist eine Verformungsmessung im herkömmlichen Stil, z. B. mit DMS, DD1 oder photogrammetrischer Punktmessung in vorher festgelegten Messintervallen, bei textilbewehrtem Beton nicht möglich

(ORTLEPP, HAMPEL & CURBACH [76]). Aus diesem Grund ist die Einbeziehung der Rissbildung und deren Lokalisierung bei der Messdatenerfassung und Auswertung der Schubversuche von zentraler Bedeutung. Eine sinnvolle Messdatenerfassung ist somit nur mit Hilfe eines Verfahrens möglich, welches das entstehende Rissbild berücksichtigt.

Als Lösung dieser Problematik entstand die Idee der adaptiven Intervallfestlegung, welche sich an der Lage der vorhandenen Risse orientiert (ORTLEPP & CURBACH [75]). Hierbei werden die Intervalle nicht wie bisher im Vorfeld der Messung festgelegt, sondern nach dem Versuch anhand des entstandenen Rissbildes ermittelt. Dabei sollten als Intervallgrenzen beispielsweise die Punkte in der Mitte zwischen je zwei Rissen gewählt werden, so dass in jedem Intervall maximal ein Riss liegt (x_1 bis x_6 in Bild 7.32). In Bereichen ohne Rissbildung können die Intervalle weiterhin mit einer willkürlich gewählten Länge festgelegt werden (x_7 bis x_8 in Bild 7.32).

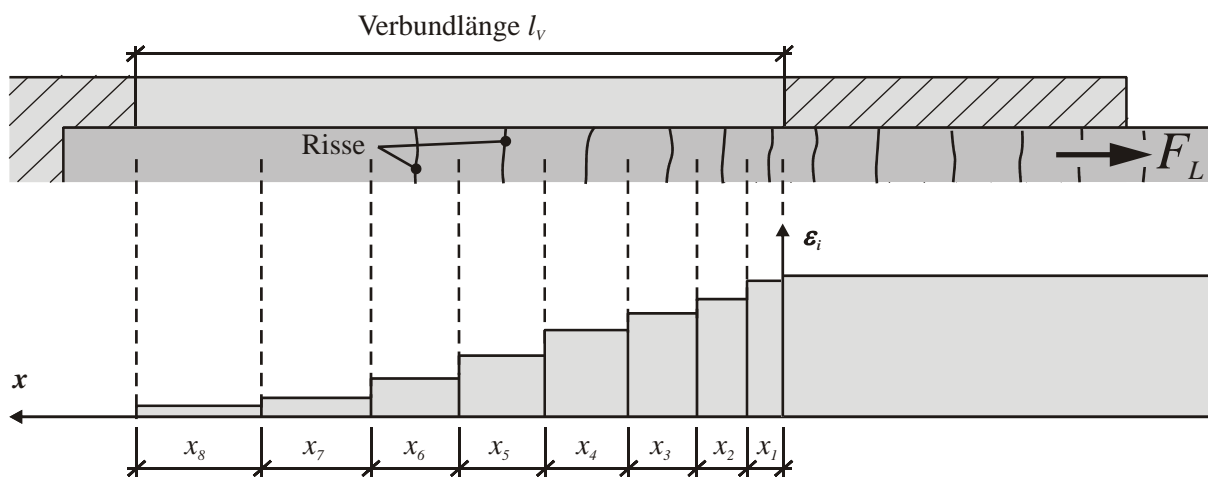


Bild 7.32 Risse und mittlere Dehnung in adaptiven Messintervallen

Voraussetzung für ein solches Vorgehen ist die zuverlässige Detektion der Lage der entstehenden Risse im Verbundbereich zur Bestimmung der Intervallgrenzen. Mit der digitalen Nahfeldphotogrammetrie steht für diesen Zweck ein leistungsfähiges Hilfsmittel zur Verfügung. Durch eine kontinuierliche Abtastung des Verbundbereiches mittels Photogrammetrie besteht die Möglichkeit einer rissbildorientierten Verformungsmessung. Dieses Verfahren liefert ein Verschiebungsbild über den Verbundbereich, welches die Rissöffnungsweiten und Positionen der einzelnen Risse enthält.

7.3.6 Rissbildorientierte photogrammetrische Verformungsmessung

Mit der digitalen Photogrammetrie steht ein geeignetes Werkzeug zur automatisierten Messung von Verformungen und Oberflächendefekten wie Rissen an Versuchskörpern bereit. Bei den Schubversuchen besteht die spezielle Messaufgabe der Photogrammetrie in der Detektion der Risspositionen und Rissbreiten in der Verstärkungsschicht in Zugrichtung während des Versuchs. Die Verformungen werden im Verbundbereich auf der Oberseite der Verstärkungsschicht mit Hilfe von 3D-Messverfahren ermittelt (vgl. Abschnitt 7.1.4, Bild 7.5). Zu

diesem Zweck wird im Laufe des Versuches mit zwei aufeinander abgestimmten Kameras synchron jede Sekunde ein Bild aufgezeichnet. Durch vorherige Kalibrierung sind aus den zugeordneten Bildern der beiden Kameras die 3D-Koordinaten der Probekörperoberfläche bestimmbar. Aus der Veränderung der aufgezeichneten Bilder von einem zum nächsten Lastschritt können die Verformungen der Oberfläche mit Hilfe einer speziellen Verschiebungsanalyse ermittelt werden. Im Folgenden wird das prinzipielle Vorgehen anhand des Versuches C1-31-3 erläutert. Bezüglich weiterer Ergebnisse wird an dieser Stelle auf Anhang 5 verwiesen.

In dem mittels Photogrammetrie beobachteten Bereich (Bild 7.33) wird zunächst für die gesamte Fläche das Rissbild berechnet (Bild 7.34). Hierzu dient ein Lastbild kurz vor dem Bruch, da davon auszugehen ist, dass bis dahin alle Risse entstanden sind. Zudem sind die Risse in diesem Zustand relativ groß und damit leichter detektierbar. Bei Kenntnis der Risslagen ist es möglich, in einer nachgeschalteten Verschiebungsanalyse auch kleinste mit bloßem Auge nicht sichtbare Risse zu detektieren. Mit Hilfe der bekannten Koordinaten aller endgültigen Risse kann somit in jeder Laststufe gezielt nach neu entstandenen Rissen gesucht werden. Die vorgeschaltete flächige Berechnung des Rissbildes bildet also die Voraussetzung für die nachfolgende Verschiebungsanalyse über alle Laststufen des Versuches.

Aufgrund des hohen Datenaufkommens ist eine flächige Verschiebungsanalyse des gesamten Verbundbereiches nicht möglich. Aus diesem Grund wird die Analyse auf einzelne Profile in Längsrichtung beschränkt (Bild 7.35). Für diese Profile wird am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung eine hochgenaue Verschiebungsanalyse im Subpixelbereich durchgeführt (MAAS & HAMPEL [54]).

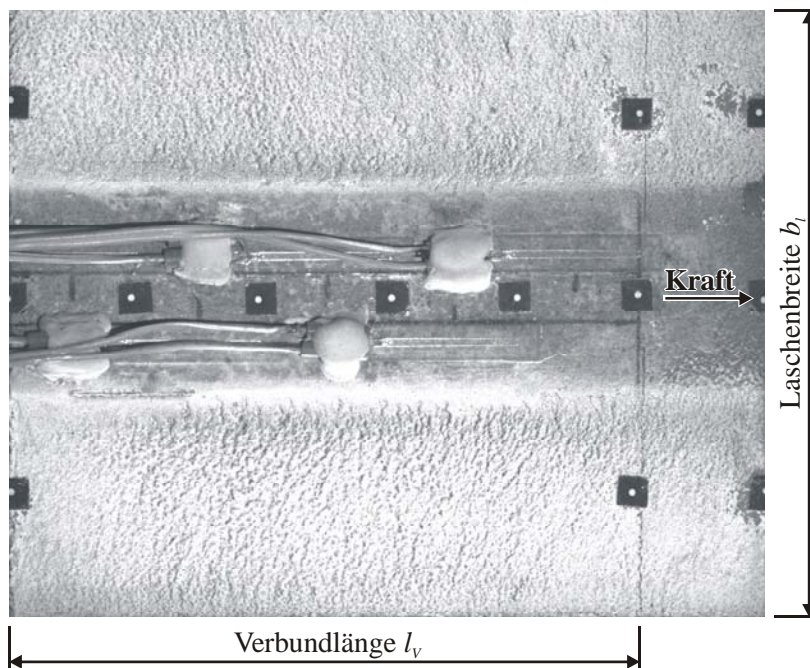


Bild 7.33 Referenzbild für die photogrammetrische Messung

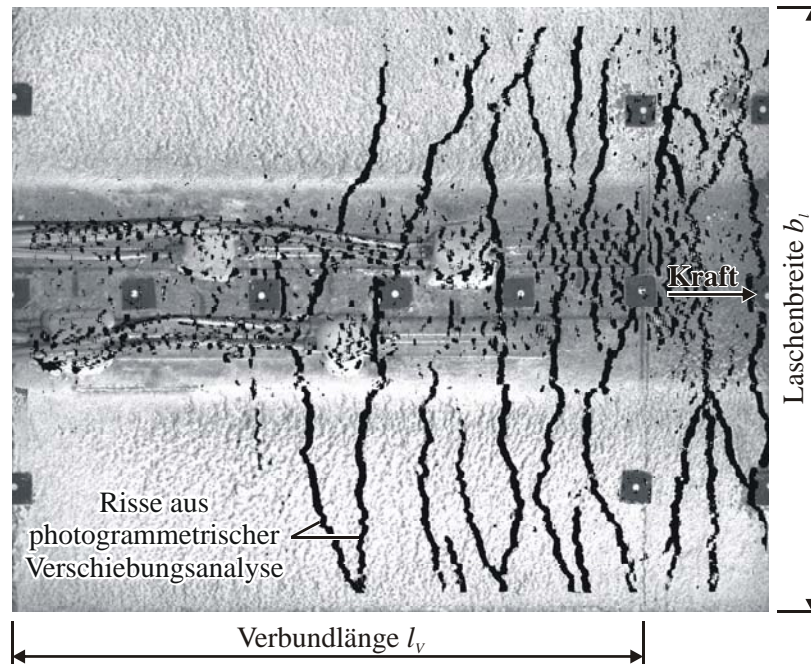


Bild 7.34 Ergebnis der Rissanalyse für ein Lastbild kurz vor dem Bruch

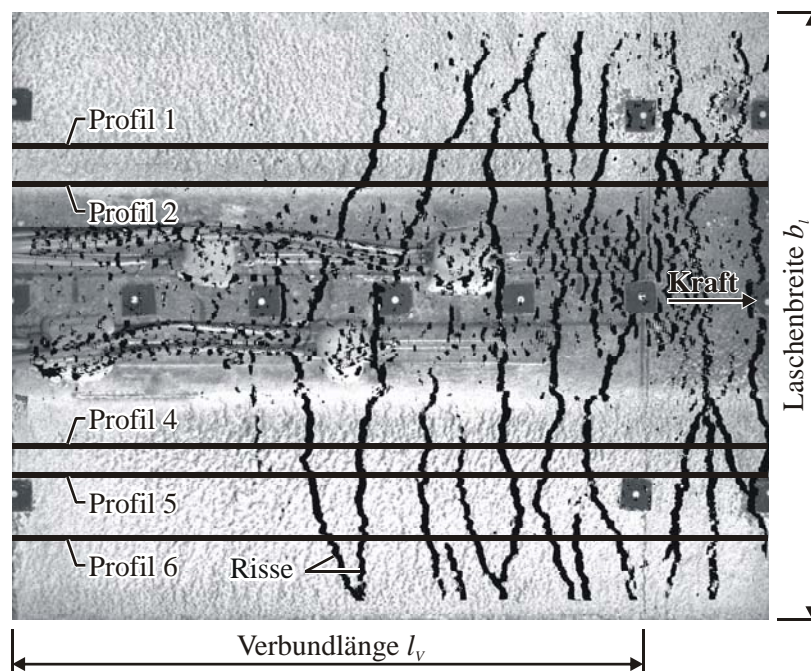


Bild 7.35 Profilfestlegung im berechneten Rissbild unter Auslassung der Problempunkte

Zunächst war angedacht, die im Bild 7.35 dargestellten Profile mit einer automatisierten Prozedur äquidistant über die Breite der Verstärkungsschicht für alle Versuche gleich festzulegen. Diese Automatisierung warf jedoch diverse Probleme bei der Durchführung der Verschiebungsanalyse am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung auf. Beispielsweise ergeben sich Problempunkte bei Rissverzweigungen, auslaufenden Rissen oder auch bei sehr dicht beieinanderliegenden Rissen (Bild 7.36a-c)). Da sich solche Probleme nach Auskunft des Photogrammeters programmieretechnisch nicht sinnvoll lösen lassen, musste eine Mög-

lichkeit gefunden werden, diesen auszuweichen. Dies führte zu der Erkenntnis, dass die Profile im Nachgang für jeden Versuch einzeln unter Beachtung aller möglichen Randbedingungen von Hand festgelegt werden müssen. Die besondere Schwierigkeit dabei besteht darin, dass bei keinem das festzulegende Profil kreuzenden Riss ein solcher Problempunkt auftreten darf. Anderenfalls besteht die Gefahr, dass eine Verschiebungsanalyse für das entsprechende Profil fehlerhafte Ergebnisse liefert.

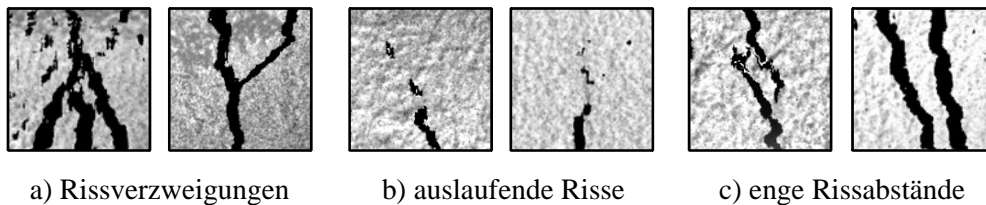


Bild 7.36 Beispiele für Problempunkte, durch die kein Profil verlaufen darf

7.3.7 Ergebnisse aus der rissbildorientierten photogrammetrischen Verformungsmessung

Das von der Photogrammetrie entwickelte programmierte Rissanalysemodul errechnet die Risspositionen und Rissbreiten in den einzelnen Profilen für alle Lastbilder (ORTLEPP, HAMPEL & CURBACH [76]). Im Bild 7.37 ist das Ergebnis der Rissanalyse beispielhaft für das Profil 4 dargestellt. Jeder der schwarzen Balken symbolisiert einen Riss. Die Position der schwarzen Balken entspricht der Stelle, an welcher sich der detektierte Riss befindet. Die Höhe der schwarzen Balken gibt die Laststufe an, bei welcher der Riss entsteht. Wie Bild 7.37 zu entnehmen ist, entstehen die Risse mit zunehmender Laststufe tendenziell vom belasteten Beginn des Verbundbereiches beginnend und setzen sich in Richtung des unbelasteten Endes (mit steigender Koordinate x_o) fort. Dies zeigt sich darin, dass die schwarzen Balken im Diagramm von rechts nach links tendenziell kleiner werden.

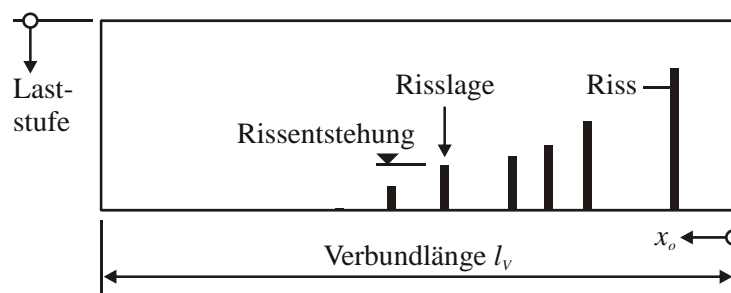


Bild 7.37 Ergebnis der Rissanalyse für das Profil 4

Aus der photogrammetrischen Verschiebungsanalyse werden für jedes festgelegte Messprofil (Bild 7.34) die Relativverschiebungen im Verbundbereich über die einzelnen Laststufen bereitgestellt (Bild 7.38). Diese gründen sich auf die ermittelten Rissbreiten, wohingegen die Betonverformungen vernachlässigbar gering ausfallen und somit nicht weiter berücksichtigt werden. Die einzelnen Risse zeigen sich als vertikale Sprünge in der dargestellten Kurve ab.

Die Höhe des Sprunges gibt dabei die Rissbreite an, während die Lage des Sprunges der Lage des Risses entspricht. Die im Bild 7.38 dargestellten photogrammetrisch gemessenen Verschiebungen zeigen eine signifikante Rissbildung.

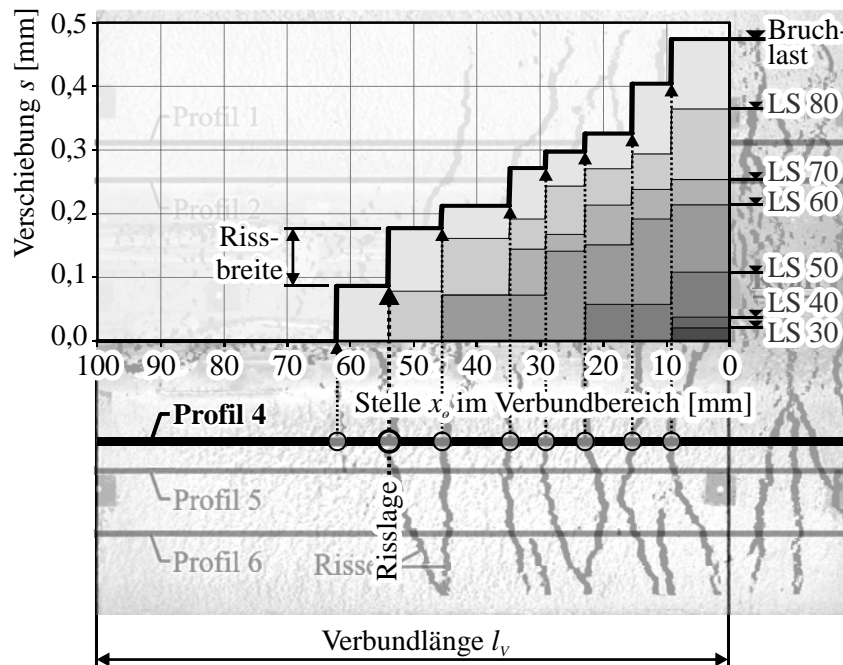


Bild 7.38 Relativverschiebungen für das Profil 4 zu jeder zehnten Laststufe (LS)

Bild 7.39 verdeutlicht die Entwicklung der Rissbildung im Verbundbereich über alle Laststufen. Die markierten Isolinien entsprechen den im Bild 7.38 dargestellten Kurven jeder zehnten Laststufe. Das treppenartige Aussehen der dreidimensionalen Oberfläche zeigt den starken Einfluss der Rissbildung auf die gemessenen Verformungen im Verbundbereich.

Um aus den an der Oberfläche gemessenen Verformungen auf eine Aussage über die in der Verbundfuge zu übertragenden Verbundspannungen zu kommen, muss auf eine für die Verstärkungsschicht ermittelte Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeit zurückgegriffen werden (vgl. Abschnitt 7.3.2). Dazu ist es erforderlich, aus den vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung gelieferten Verschiebungen bzw. Rissbreiten zunächst Dehnungen im Verbundbereich zu berechnen. Nach der Methode der adaptiven Intervallwahl (vgl. Abschnitt 7.3.5) werden die Intervalle angepasst an das entstandene Rissbild so festgelegt, dass in jedem Intervall genau ein Riss liegt. Aufgrund der Rissverzweigung ergibt sich für jedes einzelne Profil eine andere Intervallteilung. Daher muss die Berechnung der Dehnungen für jedes Messprofil getrennt erfolgen. Für die einzelnen Intervalle ergibt sich die mittlere Dehnung aus der vorhandenen Rissbreite in Abhängigkeit von der Intervalllänge nach Gl. (7.6).

$$\varepsilon_i = \frac{w_i}{\Delta x_i} \quad (7.6)$$

mit ε_i mittlere Dehnung im Intervall i

w_i Rissbreite des i -ten Risses (entspricht Relativverschiebung der Rissufer aus der photogrammetrischen Messung)

Δx_i Länge des Intervalls i

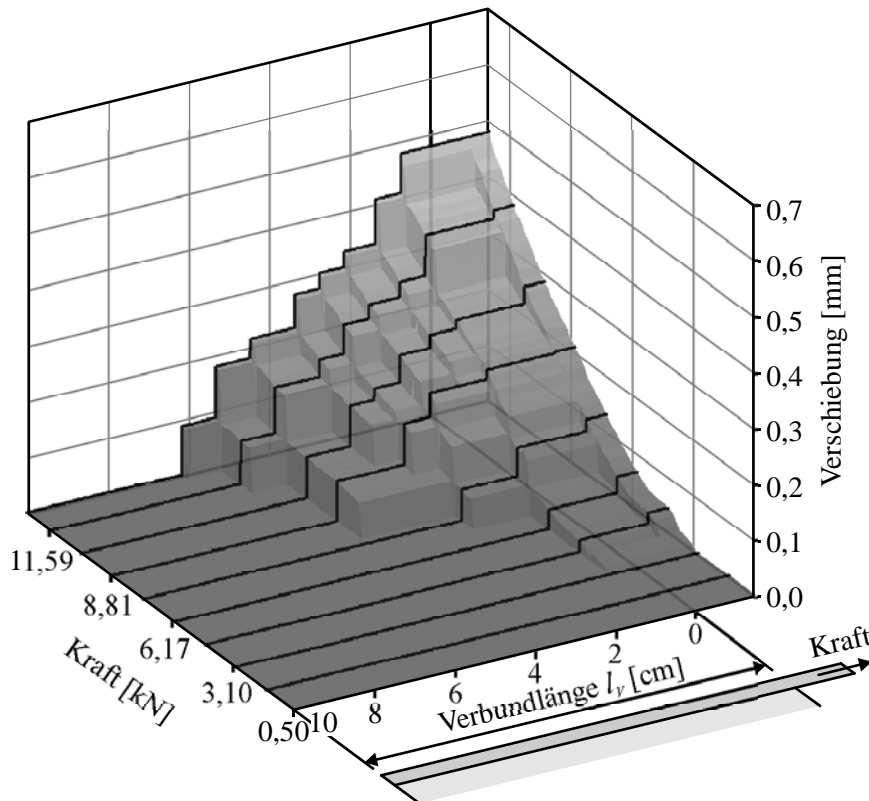


Bild 7.39 Relativverschiebungen für das Profil 4 über alle Laststufen

Die berechnete Dehnung ist damit sowohl abhängig von der Rissbreite als auch von der für die Berechnung angenommenen Bezugslänge (= Intervalllänge), welche sich aus dem Rissabstand ergibt. Je kürzer ein Intervall ist, desto höher wird also der berechnete Wert für die Dehnung bei gleicher Rissbreite ausfallen (Bild 7.40). D. h., die Lage der benachbarten Risse beeinflusst maßgeblich das Ergebnis der berechneten mittleren Dehnung für das jeweilige Intervall.

Bei der Ermittlung der Dehnungen unter einaxialer Zugbelastung am einfachen Dehnkörper wird dieser Einfluss durch Wahl einer genügend großen Messlänge abgemindert. Die mittlere Dehnung ergibt sich dort aus der Summe aller Rissbreiten im Messintervall bezogen auf die Summe aller Rissabstände (= Messlänge). Damit wird die Streuung der Abhängigkeit der Rissbreite vom Rissabstand der einzelnen Risse innerhalb dieser Messlänge egalisiert. Dies funktioniert jedoch nur am Dehnkörper, da die Dehnung unter einer reinen einaxialen Zugbelastung über die gesamte Länge des Probekörpers gleich ist. Im Verankerungsbereich werden

die Verformungen in der Verstärkungsschicht zusätzlich durch die Verbundkraftübertragung beeinflusst. Sie sind also über die Verbundlänge veränderlich. Um Aussagen über den Verlauf entlang der Verbundlänge zu erhalten, ist hier eine abschnittsweise Messung notwendig. Die von JESSE [45] gewählte lange Messlänge von 20 cm kann im Verankerungsbereich also keine Anwendung finden, da die für textildbewehrten Beton zu untersuchenden Verbundlängen im Schnitt wesentlich kürzer ausfallen. Hier sind Messintervalle im Zentimeterbereich erforderlich. Der Einfluss der Bezugslänge lässt sich hier also nicht durch Wahl einer großen Messlänge umgehen.

Bestünde unter einaxialer Zugbelastung zwischen Rissbreite und Rissabstand ein linearer Zusammenhang, so würde sich dieser Effekt aufheben. Unter dieser Voraussetzung kann die Berechnung von Dehnungen im Verankerungsbereich mit Hilfe der adaptiv festgelegten kurzen Intervalle durchgeführt werden. Die Gültigkeit dieser Annahme wurde mit Hilfe der digitalen Photogrammetrie am Dehnkörper überprüft (Bild 7.41). Die am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung gemessenen Werte zeigen eine sehr starke Streuung. Diese Streuung findet sich auch in den mittels adaptiver Intervallfestlegung berechneten Dehnungen für den Verankerungsbereich wieder (Bild 7.42). Deutlich zeichnen sich Spitzenwerte einer geringen Intervalllänge ab. Das Dehnungsbild, hier beispielhaft für das Profil 4 gezeigt, ist alles andere als homogen und entspricht somit nicht dem ursprünglich erwarteten Ergebnis (vgl. Abschnitt 7.3.5). Würden die so berechneten Dehnungswerte als Grundlage für die Ermittlung von Verbundspannungen nach dem in Abschnitt 7.3.2 beschriebenen erweiterten Differenzenverfahren herangezogen, so würde dies keine verwertbaren Ergebnisse liefern. Deshalb wird dieser Weg nicht weiter beschritten.

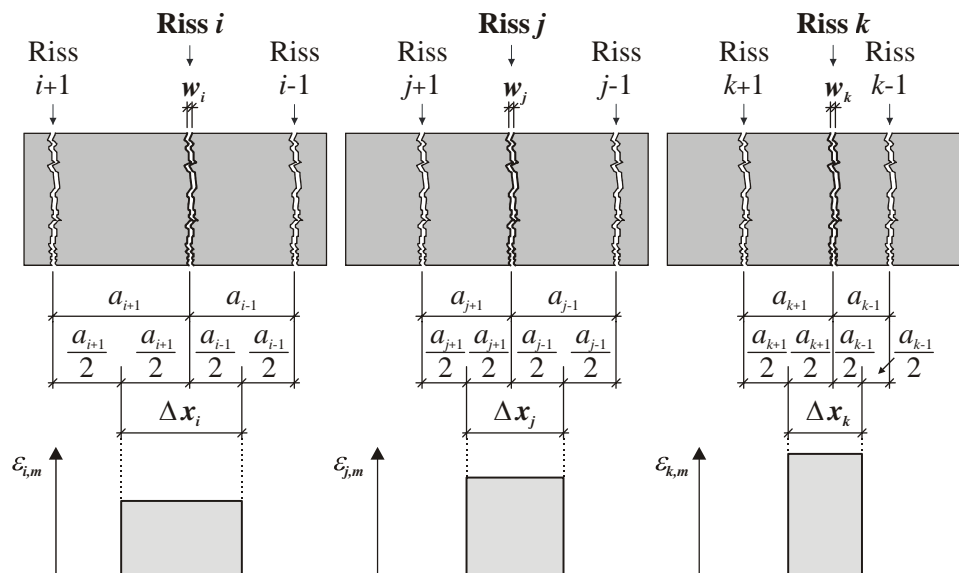


Bild 7.40 Abhängigkeit der mittleren Dehnung im Intervall von der Bezugslänge

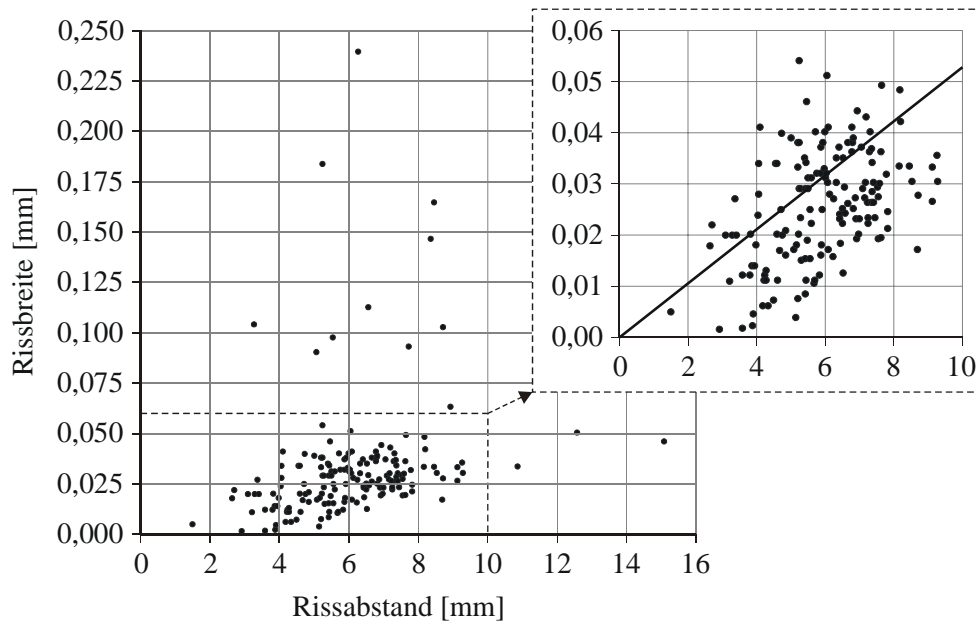


Bild 7.41 Beziehung zwischen Rissabstand und Rissbreite aus einem Dehnkörperversuch

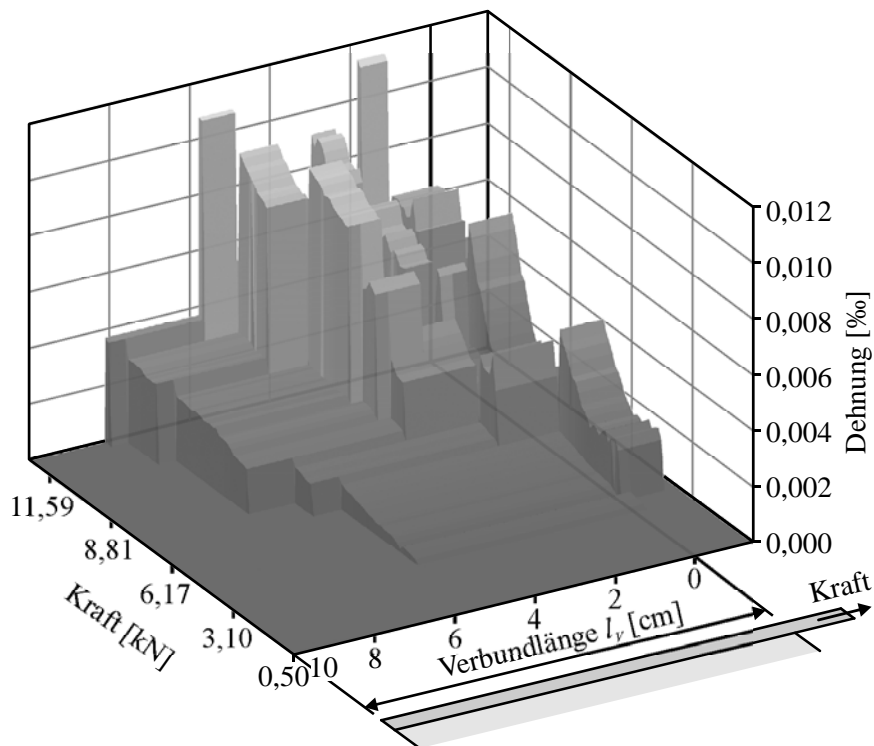


Bild 7.42 Berechnete Dehnung mittels adaptiver Intervallwahl für das Profil 4

Als sinnvolle Alternative zur adaptiven Intervallfestlegung der Einzelprofile wird eine Überlagerung der Verschiebungswerte der einzelnen Profile zu einem gemittelten Verschiebungsbild gesehen. Die Risse entstehen im Verbundbereich nicht gleichmäßig über die Breite der Verstärkungsschicht (vgl. Bild 7.34). Dies führt dazu, dass in jedem festgelegten Profil andere Risspositionen detektiert werden und entsprechend auch für jedes einzelne Profil ein anderer Verschiebungsverlauf gemessen wird. Die Verschiebungsverläufe der einzelnen Profile

sind für den hier beispielhaft gezeigten Versuch im Anhang A 5.1 detailliert dargestellt. Sie zeigen infolge des inhomogenen Rissbildes erhebliche Unterschiede. Um eine einheitliche Aussage über die gesamte Lasche zu erhalten, werden die Verschiebungsdaten aller Profile überlagert. Auf diese Weise wird ein näherungsweise verschmiertes Rissbild über die gesamte Laschenbreite gewonnen (Bild 7.43 und Bild A 5.1.14). Die 3D-Oberfläche der Verschiebungen erscheint durch die Überlagerung wesentlich gleichmäßiger als für ein einzelnes Profil, was Voraussetzung für die weiterführende Handhabung der Daten ist.

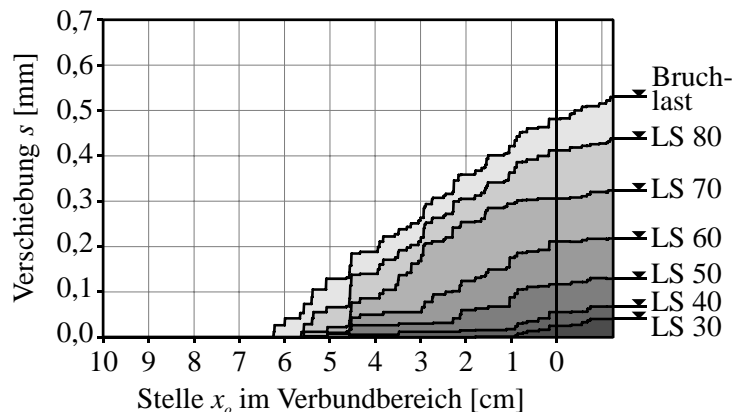


Bild 7.43 Relativverschiebungen aller Profile überlagert für jede zehnte Laststufe

Die Berechnung von Dehnungen aus den gemessenen Verschiebungen erfolgt mittels Differentiation über die Länge des Verbundbereiches. Die Voraussetzung für die Durchführbarkeit dieser mathematischen Operation ist die Differenzierbarkeit der Verformungskurven, d. h. ein stetiger Verlauf. Dieser ist infolge der Sprünge an den Risspositionen der Einzelprofile trotz der Überlagerung im Bild 7.43 noch nicht gegeben. Mit Hilfe einer gleitenden Mittelwertbildung werden die Unstetigkeiten der überlagerten Verschiebungskurven geglättet, so dass sich eine differenzierbare Funktion ergibt (Bild 7.44 und Bild A 5.1.15).

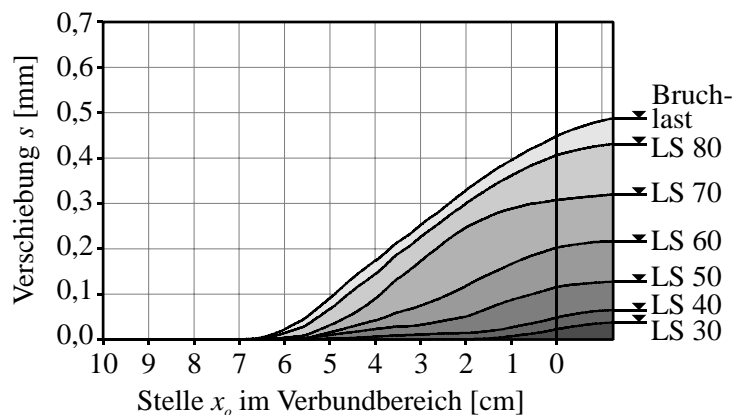


Bild 7.44 Relativverschiebungen aller Profile überlagert und geglättet für jede zehnte Laststufe

Bild 7.45 zeigt die mittels Ableitung der geglätteten Verschiebungsdaten über die Verbundlänge berechneten Dehnungen im Verbundbereich für jede zehnte Laststufe bis zum Verbundbruch infolge Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung. Die Dehnungen verlaufen anfänglich vom belasteten Beginn des Verbundbereiches tendenziell fallend zum unbelasteten Ende des Verbundbereiches. Im gezeigten Beispiel betrifft dies geringe Belastungen bis etwa zur 20. Laststufe. Der hintere Teil des Verbundbereiches erhält nahezu gar keine Verformungen. Im Bereich der freien Länge sind die Dehnungen konstant. Das Verformungsverhalten entspricht hier einem einaxialen Zugversuch.

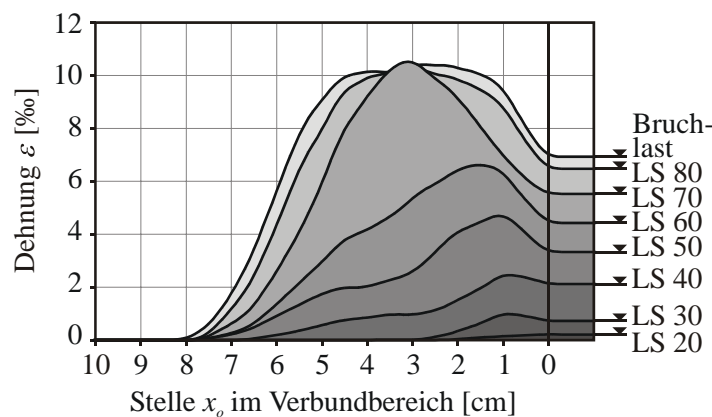


Bild 7.45 Dehnungen im Verbundbereich für jede zehnte Laststufe

Mit zunehmender Last zeigt sich eine Besonderheit des textilbewehrten Betons. Es beginnt sich ein Dehnungsmaximum am Beginn des Verbundbereiches herauszubilden, welches im Laufe der weiteren Laststeigerung in Richtung des unbelasteten Endes in den Verbundbereich hineinwandert (Bild 7.47). Im Vergleich dazu sind die Dehnungskurven bekannter Verstärkungsmaterialien wie Stahl oder CFK durch eine kontinuierliche Dehnungsabnahme über den Verbundbereich zum lastabgewandten Ende hin gekennzeichnet (Bild 7.46). Hinter dem Dehnungsmaximum fallen die Dehnungswerte mit zunehmender Laststufe immer steiler ab. Der hinterste Teil des Verbundbereiches bekommt nach wie vor keine nennenswerten Dehnungen. Im Gegensatz dazu verteilen sich die Dehnungen bei aufgeklebten Stahllamellen über den gesamten Verbundbereich (Bild 7.46), weisen jedoch um eine Größenordnung geringere Werte als bei der textilbewehrten Feinbetonverstärkungsschicht auf.

Die Entwicklung der Dehnungen, insbesondere die Lage des in den Verbundbereich hineinwandernden Dehnungsmaximums in Abhängigkeit von der zu verankernden Zugkraft, zeigt Bild 7.47. Dargestellt sind die aus den überlagerten Relativverschiebungen aller Messprofile ermittelten Dehnungen im Verbundbereich über die Zugkraft als Graustufenskala in der Draufsicht auf die 3D-Darstellung zum Bild 7.45 (siehe Anhang A 5.1, Bild A 5.1.16) und die Stelle des Maximalwertes der Dehnung jedes einzelnen Messprofils für alle Laststufen. Die Wanderung des Dehnungsmaximums, symbolisiert durch den Pfeil im Diagramm, zeigt einen deutlichen, nahezu linearen Trend der Verschiebung des Dehnungsmaximums in den Verbundbereich hinein mit zunehmender Laschenzugkraft. Dies geht konform mit der Entwicklung eines horizontalen Verbundrisses mit zunehmender Laschenkraft (vgl. hierzu Abschnitt 7.3.11, Bild 7.57).

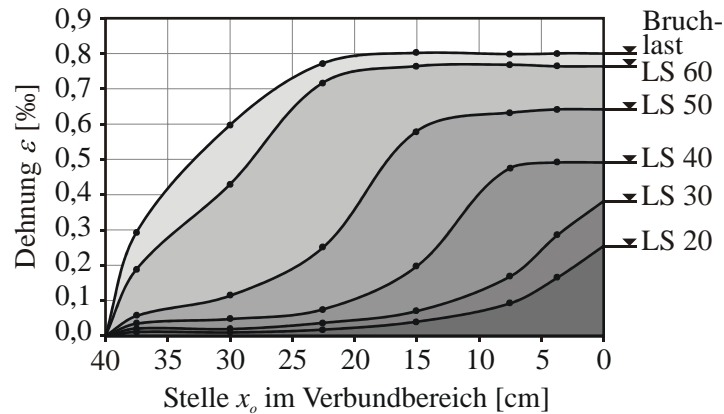


Bild 7.46 Dehnungen bei Stahllaschen (Daten entnommen aus HOLZENKÄMPFER [44])

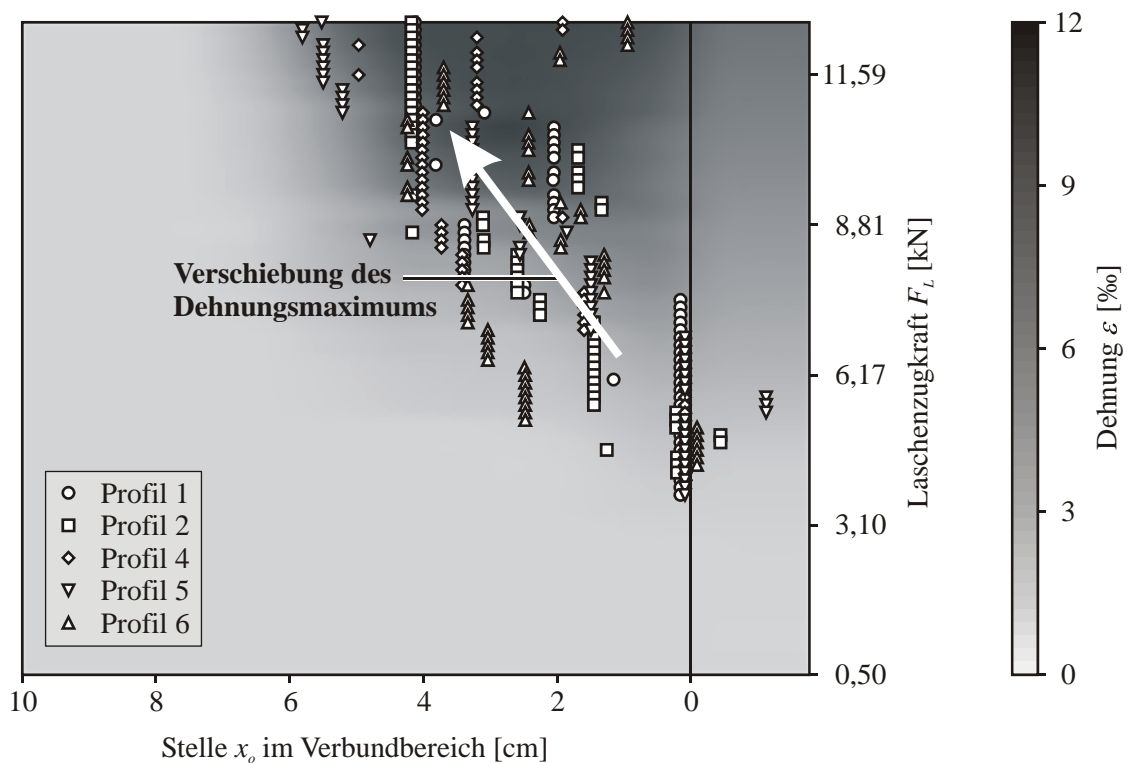


Bild 7.47 Dehnungen im Verbundbereich über alle Laststufen mit Markierung der Maxima aus allen Messprofilen

Aus der Tatsache der Entstehung eines Dehnungsmaximums, welches sich mit zunehmender Belastung in den Verbundbereich hineinverschiebt, ergeben sich bei der Anwendung des Differenzenverfahrens diverse Probleme trotz der Erweiterung des Algorithmus für nichtlineares Werkstoffverhalten der Verstärkungsschicht, wie im Folgenden gezeigt wird (siehe Abschnitte 7.3.1 und 7.3.2). Zur Berücksichtigung des nichtlinearen Werkstoffverhaltens des textilbewehrten Betons wird eine trilineare Approximation nach JESSE [45] herangezogen. Dazu wird die Spannungs-Dehnungs-Linie aller sechs Probekörper einer Serie im Bereich der freien Laschenlänge messtechnisch erfasst und für die gesamte Versuchsserie, gemittelt über alle Einzelversuche, eine trilineare Funktion errechnet (Bild 7.48, Gl. (7.7)). Hieraus ergibt

sich eine nichtkonstante Funktion für den „E-Modul“ als Sekantenmodul, welche von der Dehnung abhängig ist (Gl. (7.8), Bild 7.49).

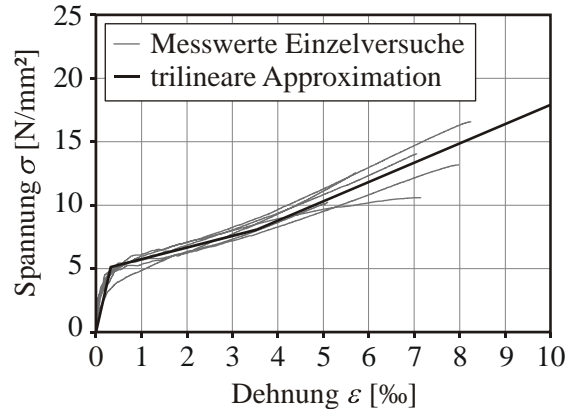


Bild 7.48 Spannungs-Dehnungs-Linie – Messwerte und Approximation

$$\sigma = \begin{pmatrix} m_I \\ m_{IIa} \\ m_{IIb} \end{pmatrix} \cdot \varepsilon + \begin{pmatrix} n_I \\ n_{IIa} \\ n_{IIb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15.573 \\ 915 \\ 1.523 \end{pmatrix} \cdot \varepsilon + \begin{pmatrix} 0 \\ 4,818 \\ 2,675 \end{pmatrix} \text{ für } \begin{cases} 0 \leq \varepsilon \leq 0,329 \cdot 10^{-3} \\ 0,329 \cdot 10^{-3} < \varepsilon \leq 3,522 \cdot 10^{-3} \\ \varepsilon > 3,522 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad (7.7)$$

mit σ Spannung [N/mm²]

ε Dehnung []

m_i Anstieg der Geraden im Zustand $i = I, IIa, IIb$

n_i Schnittpunkt der Geraden mit der σ -Achse im Zustand $i = I, IIa, IIb$

$$E(\varepsilon) = \begin{pmatrix} n_I \\ n_{IIa} \\ n_{IIb} \end{pmatrix} \cdot \varepsilon^{-1} + \begin{pmatrix} m_I \\ m_{IIa} \\ m_{IIb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 15.573 \\ 4,818 \cdot \varepsilon^{-1} + 915 \\ 2,675 \cdot \varepsilon^{-1} + 1.523 \end{pmatrix} \text{ für } \begin{cases} 0 \leq \varepsilon \leq 0,329 \cdot 10^{-3} \\ 0,329 \cdot 10^{-3} < \varepsilon \leq 3,522 \cdot 10^{-3} \\ \varepsilon > 3,522 \cdot 10^{-3} \end{cases} \quad (7.8)$$

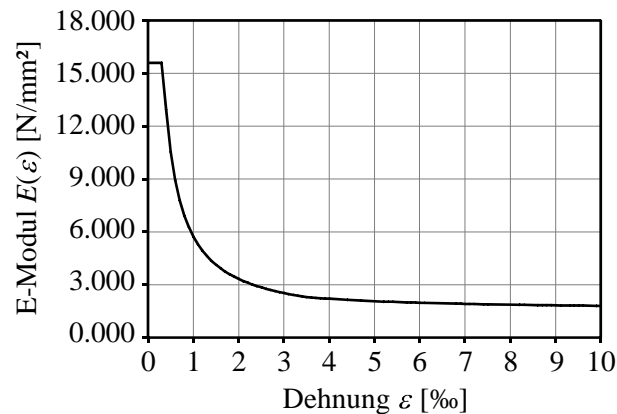


Bild 7.49 Abhängigkeit des Sekantenmoduls von der Dehnung

Mit Hilfe dieses Zusammenhanges kann unter Voraussetzung der Gültigkeit der am einaxialen Zugstab ermittelten Abhängigkeit im Endverankerungsbereich aus der gemessenen Dehnung die Längsspannung in der Verstärkungsschicht berechnet werden. Für den hier beispielhaft gezeigten Versuch ist die Längsspannungsverteilung im Verbundbereich im Bild 7.50 dargestellt. Am unbelasteten Verbundbereichsende, wo nahezu keine Verformungen gemessen wurden, ergeben sich auch keine nennenswerten Spannungen. Im weiteren Kurvenverlauf zeichnet sich nach steilem Anstieg ein Knick ab, welcher aus der trilinearen Approximation der Spannungs-Dehnungs-Linie herrührt und den Übergang vom Zustand I in den Zustand II darstellt. Dieser vollzieht sich im vorliegenden Beispiel bei der Erstrissspannung von $\sigma_A \approx 5,1 \text{ N/mm}^2$. Hieran schließt sich ein flacheres Rissbildungsplateau an, welches sich mit zunehmender Belastung verkürzt und bis zum Erreichen der abgeschlossenen Rissbildung bei einer Spannung von $\sigma_B \approx 8,0 \text{ N/mm}^2$ entsprechend steiler verläuft. Im Bereich der abgeschlossenen Rissbildung entsprechend der Spannungs-Dehnungs-Linie nehmen die Spannungskurven die Form der Dehnungen an (vgl. Bild 7.45). Sehr deutlich zeigt sich auch hier im Spannungsverlauf das aus dem Dehnungsverlauf stammende Maximum, welches sich mit zunehmender Laststufe nach links in den Verbundbereich hineinverschiebt. Rechnerisch ergibt sich also mitten im Verbundbereich eine höhere Spannung als am lastseitigen Beginn des Verbundbereiches aus der freien Laschenlänge (im Diagramm rechts) eingeleitet wird. Ein solches Ansteigen der Spannung ist für eine Endverankerung nicht plausibel, da die in der Verstärkungsschicht vorhandenen Kräfte (= Kräfte in der freien Länge) über den Verbund in den Altbeton abgeleitet werden und die Spannungen demnach über den Verbundbereich abnehmen müssten.

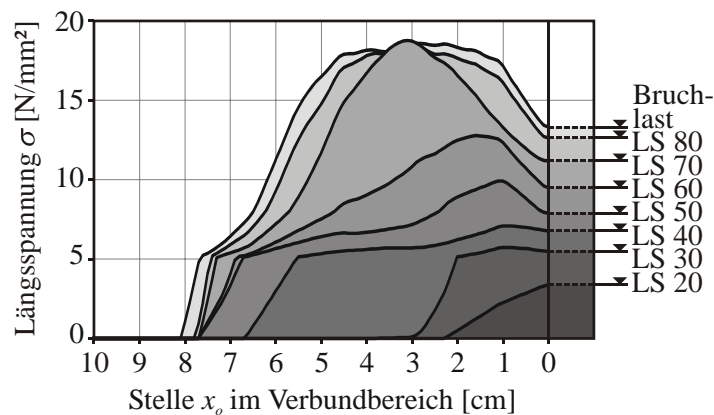


Bild 7.50 Längsspannungen im Verbundbereich für jede zehnte Laststufe

Die Bestimmung von Verbundschubspannungen geschieht bei der Analyse von Verbundproblemen üblicherweise unter Anwendung des Differenzenverfahrens (vgl. Abschnitte 7.3.1 und 7.3.2). Die über den Verbund in den Altbeton eingeleitete Kraft ergibt sich dabei aus der Differenz der über die Verbundlänge abnehmenden Längsspannung in einem Intervall bezogen auf die Intervalllänge (vgl. Gl. (7.5)). Für eine kontinuierliche Berechnung der Verbundspannung wird statt der intervallweisen Differenzbildung die Ableitung der Längsspannung σ_L nach der Stelle x_o im Verbundbereich gebildet (Gl. (7.9)). Bei einer kontinuierlich über die Verbundlänge abnehmenden Längsspannung in der Verstärkungsschicht ergibt sich hieraus der Verlauf der Verbundspannungen über die Verankerungslänge. Der rechnerisch aus

dem Dehnungsverlauf ermittelte Längsspannungsverlauf zeigt jedoch ein Ansteigen der Spannungen im Verbundbereich hinter der Lasteinleitung. Dies führt nach dem Differenzenverfahren zu negativen Spannungsdifferenzen und in Folge dessen zu rechnerisch negativen Werten der Verbundschubspannung am belasteten Beginn des Verbundbereiches (Bild 7.51).

$$\tau(x_o) = \frac{\partial F_L}{\partial A_o} = \frac{b_L \cdot t_L \cdot \partial \sigma_L}{b_L \cdot \partial x_o} = t_L \cdot \frac{\partial \sigma_L}{\partial x_o} \quad (7.9)$$

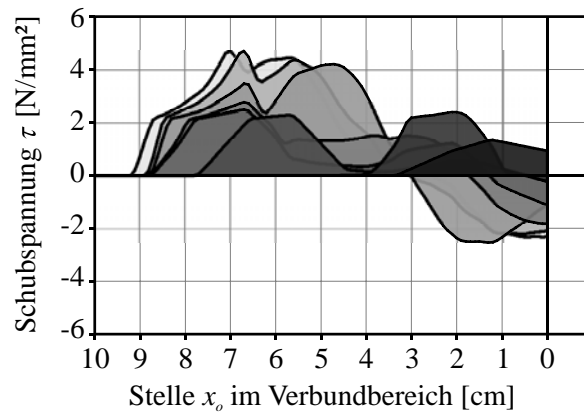


Bild 7.51 Verbundschubspannungen für jede zehnte Laststufe

Somit ist offensichtlich, dass für Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton keine Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung angegeben werden kann, wie sie von linear-elastischen Klebelamellen her bekannt ist. Aufgrund des Materialverhaltens sind die erforderlichen Voraussetzungen für die Gültigkeit der für die Anwendbarkeit des Algorithmus notwendigen Annahmen trotz der Erweiterung für nichtlineares Materialverhalten der Verstärkungsschicht (vgl. Abschnitt 7.3.2) nicht erfüllt. Für Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton müssen demnach alternative Ansätze zur Beschreibung des Verbundverhaltens gefunden werden. Bezüglich der theoretischen Betrachtung wird an dieser Stelle auf Kapitel 9 verwiesen.

7.3.8 Verformungsverhalten über die Laschendicke

Die Bestimmung von Spannungen im Verbundbereich aus den auf der Laschenoberseite gemessenen Verformungen liefert beim Verstärkungsmaterial Textilbeton trotz Verwendung des erweiterten Differenzenverfahrens (vgl. Abschnitt 7.3.2) keine sinnvollen Ergebnisse. Ein Grund hierfür ist, dass die Annahme einer konstanten Dehnung über die Laschendicke bei Verstärkungsschichten aus Textilbeton offensichtlich nicht gültig ist. Um diese Vermutung zu beweisen, wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung ein Schubversuch durchgeführt, bei welchem eine Stirnseite der Verstärkungsschicht im Verbundbereich mit zwei Kameras direkt beobachtet wurde.

Mit einer Laschendicke von ca. 8 mm ist der beobachtete Bereich extrem klein, was für die photogrammetrische Messung einen Grenzbereich darstellt, welcher kaum noch auflösbar ist. Da die Algorithmen zur Risserkennung hier nicht mehr einsetzbar sind, wurde als Kompromiss eine punktweise Erfassung der Verformungen in zwei Ebenen durchgeführt. Auch hier

wird um jeden gewählten Messpunkt herum ein Bereich von mehreren Pixeln (= „Patch“) zur sicheren Bilderkennung benötigt, so dass eine Messung direkt an der Oberfläche nicht möglich ist. Eine Ebene befindet sich somit in der Nähe der Laschenunterseite, während die zweite Messebene möglichst oberflächennah gewählt wurde.

Die photogrammetrische Messung liefert zu jeder Laststufe Relativverschiebungen für die einzelnen Punkte. Aufgrund von Näherungsansätzen bei der Bildanalyse sind hier noch systematische Fehler enthalten, welche jedoch bei der Dehnungsberechnung nach Aussage des Photogrammeters von untergeordneter Bedeutung sind. Bild 7.52 zeigt die Dehnungsdifferenz zwischen der Messebene an der Laschenoberseite und der Messebene im Bereich der Laschenunterseite. Wenngleich die Darstellung noch verfahrensbedingte Streuungen enthält, so eignet sie sich doch zur qualitativen Betrachtung der an dieser Stelle relevanten Details.

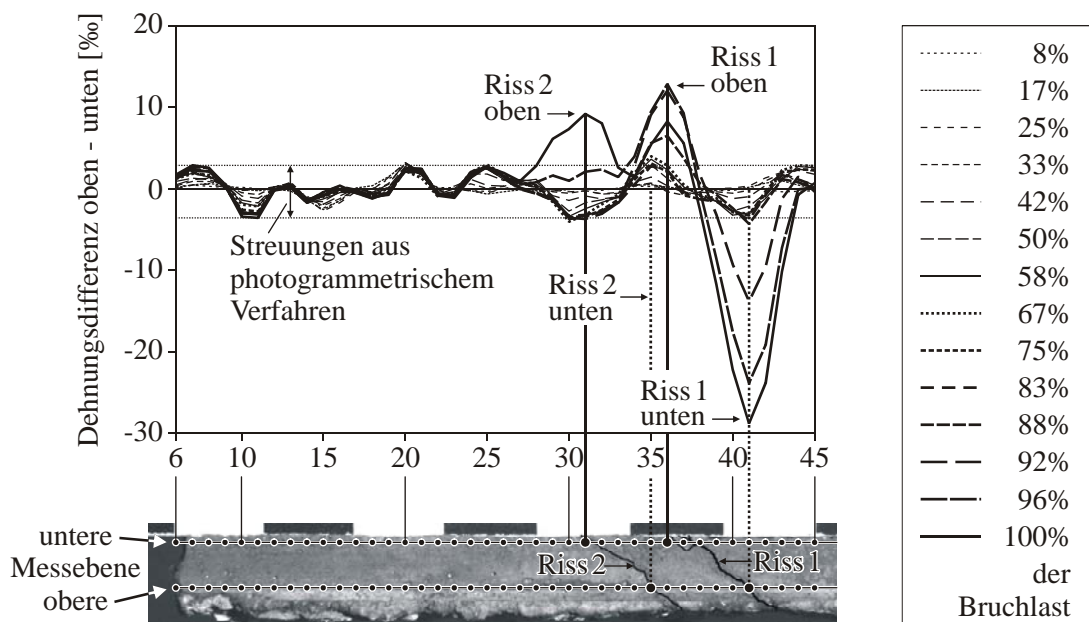


Bild 7.52 Dehnungsunterschiede zwischen der Laschenober- und -unterseite im Bereich der Schrägrisse aus photogrammetrischer Messung

Bei ca. 80–90% der Bruchlast öffnet sich der erste Schrägriss. Die Rissöffnung führt im Bereich der markierten Punkte 41 bzw. 36 zu einer großen Dehnung auf der Unter- bzw. Oberseite der Verstärkungsschicht. Da der Riss im Punkt 41 nur die untere Messebene kreuzt, zeigt sich die Dehnungsdifferenz zwischen der oberen und unteren Messebene als negativer Ausschlag im Diagramm. Der Schnittpunkt mit der oberen Messebene führt entsprechend zu positiven Werten (Punkt 36). Der zweite Schrägriss entsteht erst einige Laststufen vor der Bruchlast. Dieser kreuzt die untere Messebene beim Punkt 35, also an fast derselben Stelle wie der erste Riss die obere Messebene kreuzt. Der negative Ausschlag ist somit im Diagramm nicht als solcher sichtbar, da er sich mit dem positiven Ausschlag des ersten Risses überlagert. Diese Überlagerung führt zu einer Verminderung des positiven Ausschlages des ersten Schrägrisses gegenüber dem negativen Ausschlag im Punkt 41. Der Kreuzungspunkt des zweiten Schrägrisses mit der oberen Messebene zeigt wiederum einen positiven Ausschlag, d. h. größere Dehnungen auf der Laschenoberseite. Das Diagramm beweist somit

eindeutig, dass die Dehnungen auf der Laschenober- und -unterseite nicht gleich sind. Diese Tatsache ist hauptsächlich auf die Öffnung der geneigten Risse im Verbundbereich zurückzuführen.

7.3.9 Ermittlung der Rissneigungswinkel

Im Zuge der experimentellen Verbunduntersuchungen wurde festgestellt, dass sich im Verankerungsbereich innerhalb der textilbewehrten Verstärkungsschicht mit zunehmender zu verankernder Zugkraft Schrägrisse bilden (vgl. Abschnitt 7.2.2, Bild 7.17, CURBACH, BAUMANN & BEYER [17]). Da sich ein Riss durch Überschreiten der Hauptzugspannung senkrecht zu dieser ausbildet, geben die Neigungswinkel der Schrägrisse Auskunft über die Orientierung der Hauptzugspannung im Verbundbereich zum Zeitpunkt der Rissentstehung. Die Richtung der Hauptzugspannung in der Verstärkungsschicht innerhalb des Verbundbereiches übt einen erheblichen Einfluss auf die Kraftübertragung aus der Verstärkungsschicht in den Altbeton aus. Aus diesem Grund wurde der Verlauf der Rissneigungswinkel über die Verbundlänge genauer untersucht.

Dazu wurden zunächst die Risse auf den Stirnseiten der Laschen sichtbar gemacht. Dies geschieht mit dem von JESSE [45] beschriebenen Farbeindringverfahren. Es ermöglicht eine Detektierung der Risse nach der Entlastung der Probe. Der entscheidende Punkt ist dabei die wasserdichte Versiegelung der Oberfläche vor Beginn des Versuches. Nach der Rissbildung wird ein flüssiges Färbemittel aufgetragen, das in die Risse eindringt und auf der Oberfläche durch einfaches Abwischen wieder entfernt werden kann. So werden auch feinste Risse an der entlasteten Probe deutlich sichtbar.

Anschließend wurde das Rissbild digital für jeden Probekörper auf jeweils beiden Laschenstirnseiten frontal, d. h. verzerrungsfrei, aufgenommen. In den so gewonnenen Bilddaten wurden die Risse ausgemessen (Bild 7.53). Die auf diese Weise erhaltenen Daten für die Risswinkel in Abhängigkeit von ihrer Position im Verbundbereich wurden numerisch ausgewertet (Bild 7.54). Durch eine statistische Auswertung der einzelnen Versuchskörper wird hieraus für jede Versuchsserie eine Risswinkelbeziehung für den Verbundbereich gewonnen, welche für die weitere Auswertung der jeweiligen Versuchsserie herangezogen werden kann.

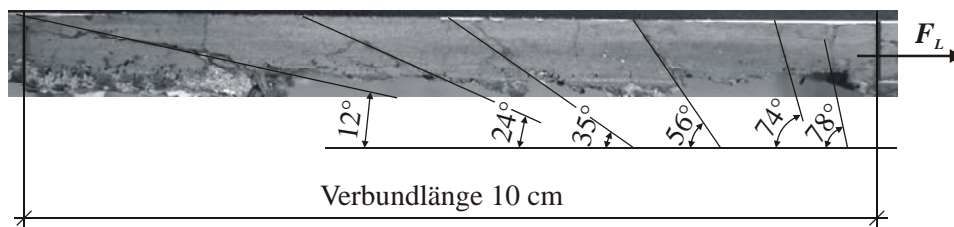


Bild 7.53 vermaßtes Rissbild einer Verstärkungslasche

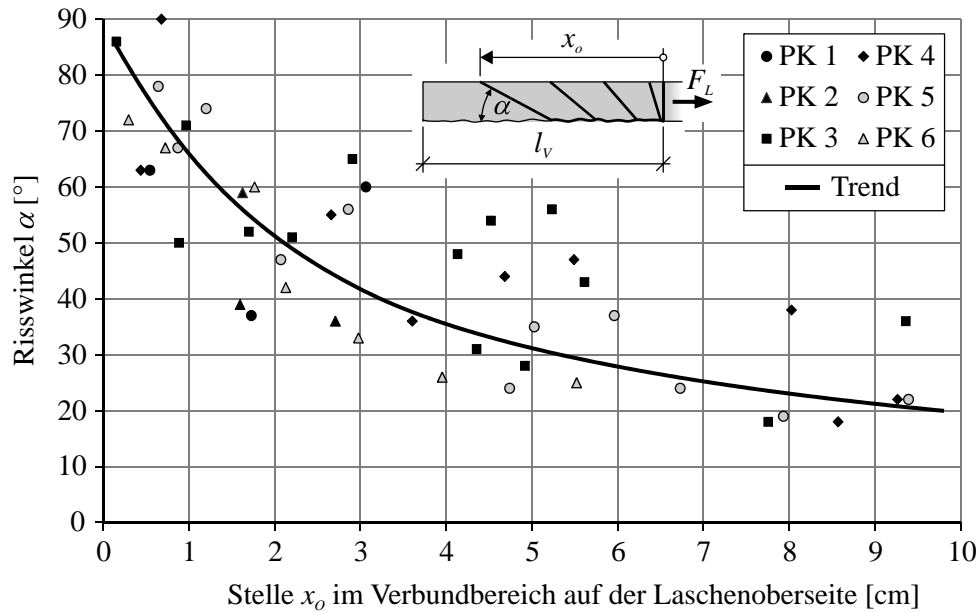


Bild 7.54 Ergebnis der Rissbildauswertung für eine Versuchsserie

Das Ergebnis dieser Analyse zeigt übereinstimmend für alle untersuchten Textilien, dass die Rissneigungswinkel beginnend bei 90° am belasteten Ende des Verbundbereiches in Richtung des unbelasteten Endes zunehmend flacher werden ORTLEPP & CURBACH [75], ORTLEPP, HAMPEL & CURBACH [76]. Diese Änderung des Neigungswinkels resultiert aus einer Änderung der Hauptzugspannungsrichtung in Richtung des unbelasteten Endes des Verbundbereiches.

Die einfache Auftragung des Risswinkels über die Stelle x_o im Verbundbereich liefert einen nichtlinearen Zusammenhang (siehe Trend in Bild 7.54). Unter Berücksichtigung der Verhältnisse am Mohrschen Spannungskreis erweist sich die cot-Funktion zur Darstellung des Risswinkels über die Verbundlänge als günstiger. Als Näherung ergibt sich ein linearer Zusammenhang nach Gl. (7.10). Der freie Parameter m dieser Risswinkelbeziehung kann für jede Versuchsserie mittels linearer Regression bestimmt werden (Bild 7.55).

$$\cot \alpha = m \cdot x_o \quad (7.10)$$

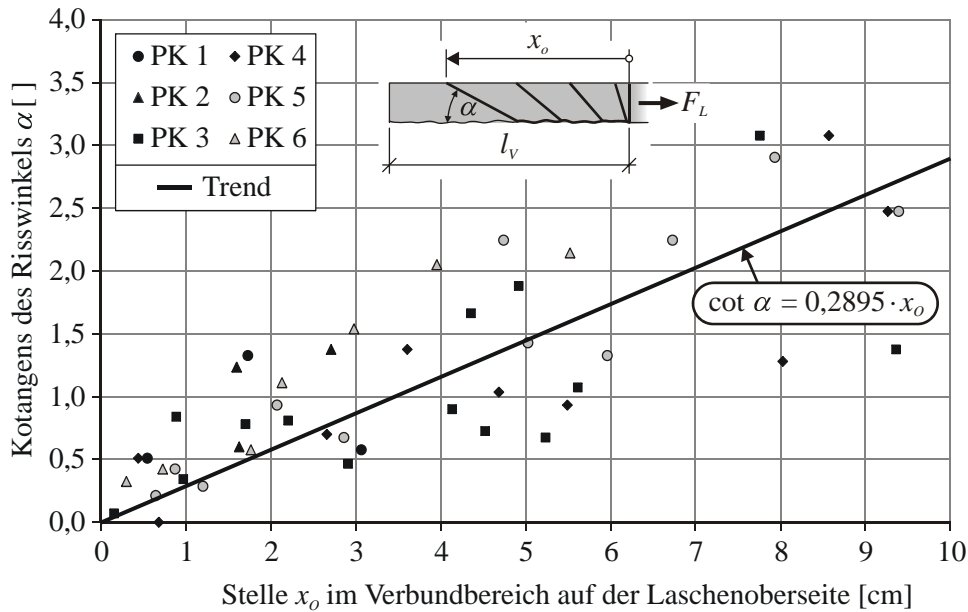


Bild 7.55 Ergebnis der linearen Regression für die Versuchsserie aus Bild 7.54

7.3.10 Diskussion der Ergebnisse

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, unterscheidet sich das Verbundverhalten von Textilbetonverstärkungsschichten grundsätzlich vom bekannten Verhalten der Klebelamellen. Demnach darf die vermeintliche Ähnlichkeit zu Klebelamellen nicht zu sehr in den Vordergrund gerückt werden. Es ist zu berücksichtigen, dass es sich hierbei lediglich um geometrische Ähnlichkeiten handelt (vgl. hierzu Abschnitt 2.6, Bild 2.17). Die Materialeigenschaften von Textilbeton sind nicht mit den linear-elastischen Eigenschaften von Stahl oder CFK/GFK vergleichbar.

Oggleich mit der im Abschnitt 7.3.7 dargestellten rissbildorientierten Methode eine wesentlich genauere Messung der Verformungen ermöglicht wird, als bei der Verwendung klassischer Messtechnik und der damit verbundenen festen Intervallwahl erreichbar wäre, ist das traditionell angewendete Differenzenverfahren von an der Oberfläche gemessenen Verformungen nicht zur Ermittlung von Schubspannungen in der Verbundfuge einer textildbewehrten Feinbetonverstärkung geeignet. Mit dem erweiterten Differenzenverfahren (siehe Abschnitt 7.3.2) ist es zwar theoretisch möglich, bekannte Verbundansätze bzw. Auswertelgorithmen von Klebearmierungen auf die Textilbetonverstärkung zu übertragen, indem anstelle eines konstanten E-Moduls eine von der Dehnung abhängige veränderliche Variable eingeführt wird. Aus solchen Ansätzen kann auch eine Verbundspannung berechnet werden (siehe Abschnitt 7.3.7) – jedoch entsprechen die auf diese Weise erzielten Ergebnisse nicht der Realität.

Dem Differenzenverfahren zur Bestimmung der Schubspannung aus gemessenen Dehnungen liegen Annahmen zugrunde, welche die Berechnung vereinfachen bzw. überhaupt möglich machen. So ist insbesondere die Annahme einer konstanten Dehnungsverteilung über die Dicke der Verstärkungsschicht Voraussetzung für die Lösbarkeit der DGL des verschieblichen Verbundes. Im Abschnitt 7.3.8 wurde jedoch nachgewiesen, dass diese Voraussetzung bei textildbewehrtem Beton nicht gegeben ist. Die Dehnungen sind über die Dicke der Ver-

stärkungsschicht veränderlich, was mit der Entstehung von Schrägrissen (vgl. Abschnitt 7.3.9) zusammenhängt. Aus diesem Grund unterliegt die auf eine oberflächliche Verformungsmessung aufbauende Ermittlung der Längsspannungen in der Verstärkungslasche mit Hilfe einer separat bestimmten nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehung nicht kalkulierbaren Unsicherheiten. Die aus der so ermittelten Längsspannung zu errechnenden Schubspannungen können in Folge dessen auch nicht sicher angegeben werden.

Des Weiteren ist der Verbundbereich einer Verstärkung aus textilbewehrtem Beton durch eine ausgeprägte Einzelrissbildung gekennzeichnet. Dies bedeutet konkret, dass aus den experimentellen Untersuchungen im genauesten Fall die Rissbreiten dieser Einzelrisse bestimmt werden können. Die Verformungen des Feinbetons zwischen den Rissen sind dagegen vernachlässigbar gering. Daraus resultiert ein unstetiges Verschiebungsbild, aus welchem nur unter bestimmten Voraussetzungen Dehnungen ermittelt werden können (siehe Abschnitt 7.3.7). Monoton verlaufende Dehnungen über die Verbundlänge, wie bei linear-elastischen Materialien, sind materialbedingt nicht bestimmbar.

Ein weiteres Problem liegt bei der Übertragbarkeit der im einaxialen Zugversuch ermittelten Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeit auf die Verhältnisse im Verankerungsbereich. Durch die Verzahnung mit dem Altbetonuntergrund ergibt sich im Verbund eine Dehnungsbehinderung, welche zu einer Diskrepanz gegenüber dem Zugkörper führt. Im Bild 7.56 sind die Dehnungen des im Abschnitt 7.3.7 beschriebenen Versuches und die daraus mit Hilfe der einaxialen Spannungs-Dehnungs-Abhängigkeit ermittelte Längsspannung im Vergleich dargestellt. Die Lage der wandernden Verbundrisspitze unterteilt den Verbundbereich in einen ungerissenen Bereich (Zustand I) und einen gerissenen Bereich (Zustand II). Im Dehnungsbild des Verbundbereiches zeichnet sie sich durch ein Maximum ab. Auch im einaxialen Zugversuch vollzieht sich ein Übergang von Zustand I in den Zustand II. Dieser zeichnet sich durch einen Knick in der Spannungs-Dehnungs-Linie ab und findet sich auch in dem daraus berechneten Spannungsbild wider (Bild 7.56, mitte). Der Vergleich zwischen Dehnungs- und Spannungsbild offenbart eine nicht zu vernachlässigende Diskrepanz zwischen dem Übergangspunkt vom Zustand I in den Zustand II. Die Rissbildung setzt im Verbund später (d. h. bei einer höheren Spannung) ein als im einaxialen Zugversuch. Die Textilbetonverstärkungsschicht bleibt im Verbund länger ungerissen als im Dehnkörper, was auf die Dehnungsbehinderung durch den Altbetonuntergrund zurückzuführen ist. Die Spannungs-Dehnungs-Linie vom einaxialen Zugversuch ist demnach auf die im Verbund wirkende Textilbetonverstärkungsschicht nicht einmal näherungsweise anwendbar.

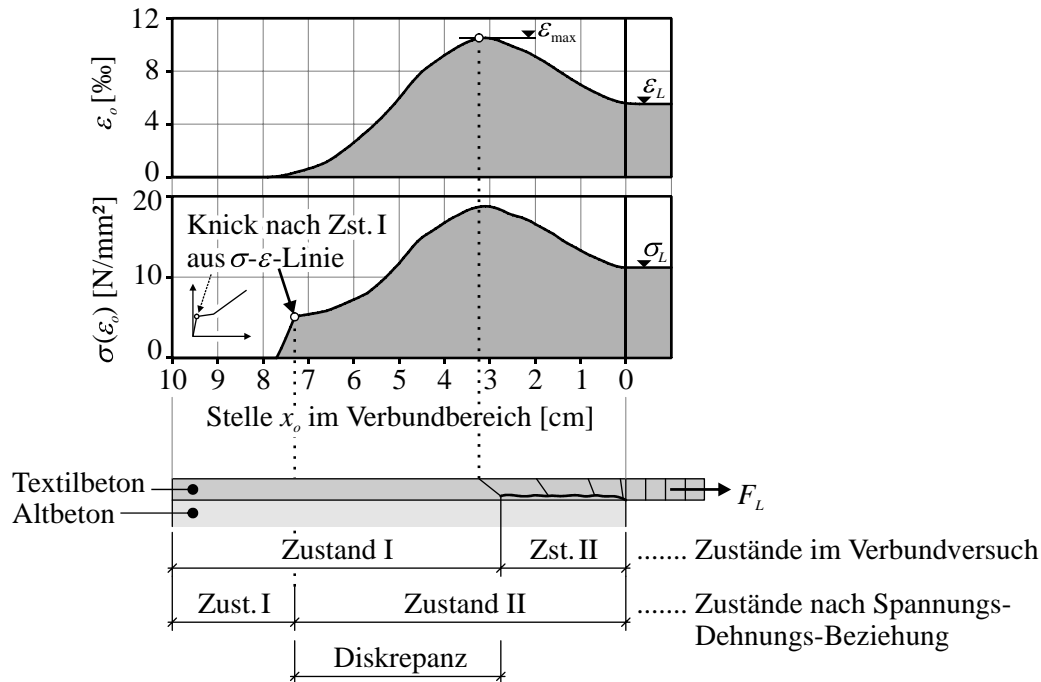


Bild 7.56 Diskrepanz zwischen der Verformungsmessung im Verbundversuch und den berechneten Spannungen aus der Spannungs-Dehnungs-Linie aus einaxialem Zugversuch

Das traditionell zur Analyse des Verbundverhaltens von linear-elastischen Materialien angewendete Differenzenverfahren ist nicht in der Lage, bei Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton aus den messtechnisch an der Oberfläche erfassbaren Verformungen, Schubspannungen in der Verbundfuge zu ermitteln.

7.3.11 Verbundrisseentwicklung

Eine alternative Möglichkeit zur Beurteilung des Verbundverankerungsmechanismus ist die Untersuchung des Verbundrissewachstums mit zunehmender zu verankernder Kraft in der Verstärkungsschicht. Das Verbundrissewachstum findet größtenteils entlang der untersten, dem Altbetonuntergrund zugewandten Textilebene statt, in einigen Fällen auch entlang der oberflächennahen Altbetonschicht. Dies kommt insbesondere bei Textilien mit einem großen wirksamen Flächenanteil vor. Entscheidend ist somit die Beobachtung der Risseentwicklung entlang der Unterseite der Verstärkungsschicht. Die photogrammetrische Verformungsmessung liefert die Position und Breite der Schrägrisse auf der Laschenoberseite. Wird diese Messung mit der Erfassung der Rissneigungswinkel über die Verbundlänge, ausgedrückt über eine Risswinkelfunktion, kombiniert, lässt sich daraus die Lage der Schrägrisse auf der Laschenunterseite bestimmen.

Mit der Entstehung eines neuen Schrägrisses im Verbundbereich muss gleichzeitig der Verbundriss wachsen, da die zur Rissentstehung erforderliche Verformung sonst nicht gewährleistet ist. Dieser Fakt wird durch die Beobachtung der Laschenstirnseiten mit Hilfe der photogrammetrischen Spiegelaufnahmen bestätigt. Gleichzeitig mit der Entstehung neuer Schrägrisse ergeben sich an dieser Stelle rechnerisch maximale Dehnungswerte. Das Wachs-

tum des Verbundrisses zeichnet sich somit durch das Hineinwandern des Dehnungsmaximums in den Verbundbereich ab (vgl. Abschnitt 7.3.7, Bild 7.47).

Das Wachstum des Verbundrisses im Zuge der Entstehung der Schrägrisse im Verbundbereich ist im Bild 7.57 über die zu verankernde Zugkraft in der Verstärkungsschicht bis hin zum Bruch schematisch dargestellt. Bei Beginn der Laststeigerung ist zunächst der gesamte Verbundbereich (Verbundlänge l_v) ungerissen, d. h. der gesamte Verbundbereich befindet sich im Zustand I. Ab einer bestimmten Laststufe setzt die Rissbildung im Verbundbereich ein. Mit Beginn der Rissbildung teilt sich der Verbundbereich in zwei Bereiche:

- einen gerissenen Bereich (Zst. II) am lastseitigen Beginn des Verbundbereiches, welcher auf der Laschenunterseite der Länge des Verbundrisses entspricht, und
- einen ungerissenen Restbereich (Zst. I) am lastabgewandten Ende des Verbundbereiches.

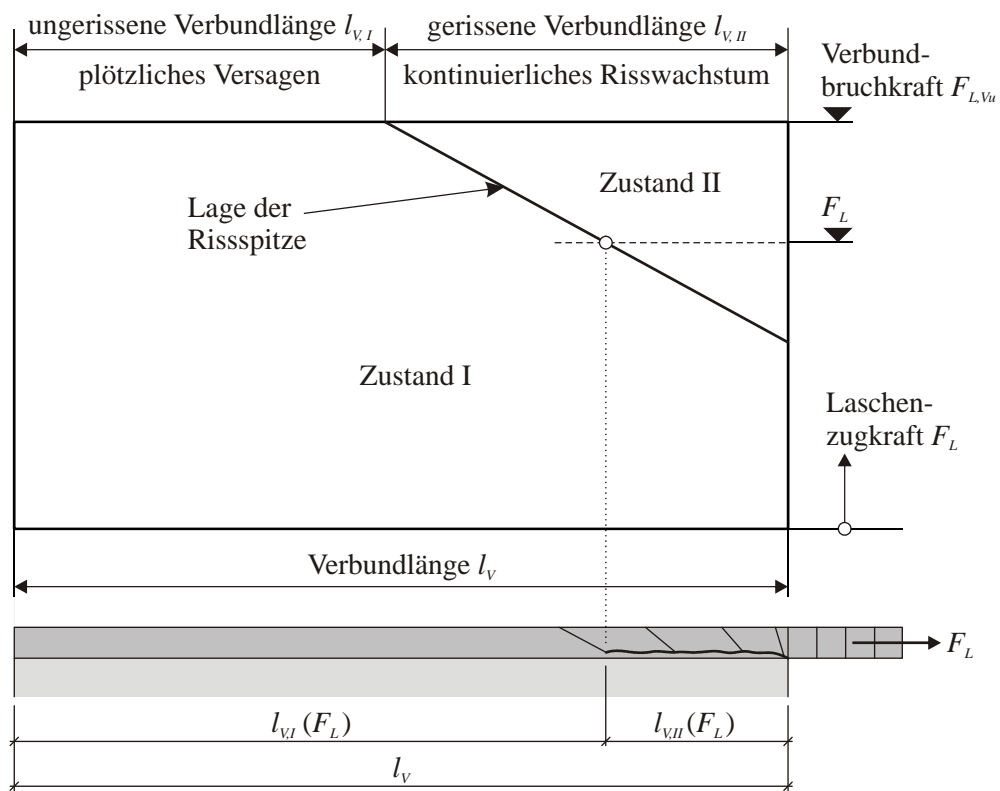


Bild 7.57 Änderung der Bereichsgrenze zwischen Zustand I und II im Verbundbereich mit zunehmender Belastung

Mit zunehmender Laststeigerung vergrößert sich der gerissene Bereich der Verbundlänge $l_{v,II}$. Dies geht einher mit einer kontinuierlichen Verbundrissbildung entlang der untersten Lage der textilen Bewehrung (siehe Abschnitt 7.2.2, Bild 7.17). Der ungerissene Restbereich der Verbundlänge $l_{v,I}$ verkürzt sich dabei entsprechend. Charakteristisch ist, dass der hintere Teil des Verbundbereiches bis zum Schluss keine Rissbildung zeigt und kaum Verformungen erhält. Auf das kontinuierliche Risswachstum im vorderen Teil des Verbundbereiches folgt im Grenzzustand der Tragfähigkeit ein plötzliches Versagen des restlichen Verbundbereiches.

ches. Dieses tritt bei Erreichen einer minimalen Restverbundlänge $l_{v,i,u}$ ein, wenn dort der Haftverbund die entstehenden Quersugkräfte nicht mehr übertragen kann (vgl. Abschnitt 7.2.3). Deutlich sichtbar wird dieser Effekt bei Probekörpern, die durch einen Mischbruch versagen. Die Bereichsgrenze zeichnet sich hier unmittelbar durch das Umschlagen der Versagensebene ab (siehe Anhang A 5.3, Bild A 5.3.18).

Eine genauere Möglichkeit zur Untersuchung der Verbundrissentwicklung entlang der Laschenunterseite ist die direkte Beobachtung der Stirnseiten der Verstärkungslasche. Die Bildaufnahmen der digitalen Photogrammetrie ermöglichen durch die seitlich angebrachten Spiegel eine Detektion neu entstehender Schrägrisse auf den Laschenstirnseiten. Aufgrund der geringen geometrischen Abmessungen der Stirnseitenbereiche und weiterer Einschränkungen wie Verdrehungen der Spiegel während des Versuches ist eine automatisierte Rissdetektion mit Hilfe von Methoden der digitalen Photogrammetrie hier nicht möglich. Jedoch besteht die Möglichkeit der manuellen Rissdetektion durch visuelle Beurteilung der einzelnen Aufnahmen. Ein neuer Schrägriss wird gefunden, sobald dieser optisch sichtbar wird und damit etwas später als unter Anwendung photogrammetrischer Methoden erkannt. Da diese Art der Auswertung zudem einen sehr hohen zeitlichen Aufwand darstellt, wurde sie auf ausgewählte Versuche beschränkt. Hierzu wurden Versuche mit zwei unterschiedlichen Versagensebenen ausgewählt.

Bild 7.58 zeigt die Länge des sich entwickelnden Verbundrisses mit zunehmender Kraft in der Verstärkungsschicht für zwei beispielhafte Versuche. Beim Versuch 1 entwickelte sich zunächst mit zunehmender Belastung ein Verbundriss entlang der ersten Textilebene bevor der endgültige Bruch durch ein plötzliches Versagen der Restverbundlänge im Altbeton eintrat (Versagensart 5, vgl. Abschnitt 7.2.1, Bild 7.13). Die Position jedes neu entstandenen Schrägrisses auf der Laschenunterseite wurde auf beiden Laschenstirnseiten ausgemessen und die dem entsprechenden Lastbild zugehörige Laschenkraft zugeordnet. Es zeigt sich ein deutlicher linearer Trend des Wachstums des Verbundrisses mit steigender Laschenzugkraft. Die auf beiden Stirnseiten der Lasche ermittelten Punkte liegen nahezu aufeinander und die Trendlinien verlaufen parallel zueinander. Die Trendlinien schneiden die y-Achse bei $\approx 21,5$ kN. Erst ab dieser Laststufe, bei 89% der Bruchlast, beginnt das Wachstum des Verbundrisses.

Es ist charakteristisch für alle Versuche, dass das Risswachstum im Verbundbereich sehr spät, d. h. nahe der Bruchlast, einsetzt. Der Zeitpunkt bzw. die Laststufe ist dabei abhängig von dem Widerstand, den die spätere Rissebene der Entstehung des Verbundriss entgegensetzt. Dieser wird in der Ebene der textilen Bewehrung maßgeblich durch den wirksamen Flächenanteil beeinflusst. In dem im Bild 7.58 dargestellten Versuch 1 wurde ein weitmaschiges Bewehrungstextil mit einem wirksamen Flächenanteil von $k_{A,eff} = 0,58$ eingesetzt. Im Vergleich dazu ist in dem im Abschnitt 7.3.7 ausführlich erläuterten Versuch (Versuch 2 im Bild 7.58) ein engmaschigeres Textil mit einem wirksamen Flächenanteil von $k_{A,eff} = 0,21$ als Bewehrung der Verstärkungsschicht verwendet worden. Aufgrund des geringeren Widerstandes gegenüber der bei der Krafteinleitung auftretenden Scherbelastung beginnt das Risswachstum beim Versuch 2 bereits bei einer geringeren Laststufe. Das endgültige Versagen trat bei diesem Versuch infolge des niedrigen wirksamen Flächenanteiles durch Delamination in der Textilebene (Versagensebene 3, vgl. Bild 4.1) ein.

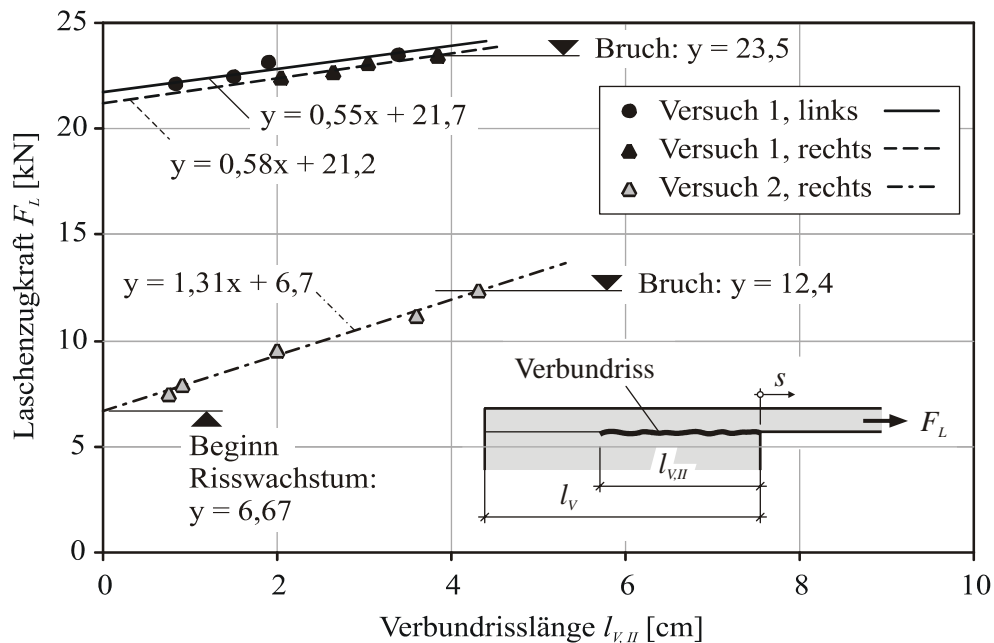


Bild 7.58 Zusammenhang zwischen der Länge des sich entwickelnden Verbundrisses und der einzuleitenden Zugkraft aus der Verstärkungslasche

Allen Versuchen mit den verschiedenen textilen Bewehrungen gemeinsam ist jedoch das kontinuierliche Verbundrisswachstum mit steigender Belastung. Ab Beginn der Rissbildung verlängert sich der Verbundriss im gleichen Maße wie die Zugkraft in der Verstärkungsschicht ansteigt. Die im Diagramm in Bild 7.58 dargestellten Messwerte liegen sehr deutlich auf einer Regressionsgeraden, was ein progressives Fortschreiten des Verbundrisses mit der Zunahme der zu verankernden Kraft zeigt. Das endgültige Versagen wird hier durch den Verbundbruch der ungerissenen Restverbundlänge ausgelöst bevor die maximale Zugkraft der Verstärkungslasche erreicht ist. Bezüglich einer modellhaften Betrachtung wird auf Abschnitt 9.4.2 verwiesen.

7.4 Verbundtragfähigkeit

7.4.1 Allgemeines

Die Ermittlung der Tragfähigkeit des Verbundes ist das Hauptanwendungsgebiet der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen. Für eine Bemessung des Verankerungsbereiches eines verstärkten Bauteiles ist die Frage, welche Verankerungslänge für eine bestimmte zu verankernde Kraft aus der Verstärkungsschicht benötigt wird, von besonderer Wichtigkeit. Dies betrifft ebenso die Frage, welche Kraft aus der Verstärkungsschicht bei einer bestimmten kürzeren zur Verfügung stehenden Verbundlänge maximal im Altbetonuntergrund verankert werden kann. Das Verformungsverhalten der Verstärkungsschicht im Verankerungsbereich ist in diesem Zusammenhang eher von untergeordneter Bedeutung.

Die Gesamttragfähigkeit des Verbundes ergibt sich nach Gl. (7.11) aus der maßgebenden Tragfähigkeit der möglichen Versagensebenen (vgl. Abschnitt 4.4.2, Bild 4.3):

$$R_V = \min(R_{V,c}, R_{V,bj}, R_{V,tx}, R_{V,po}) \quad (7.11)$$

- mit R_V Verbundtragfähigkeit
 $R_{V,c}$... Verbundtragfähigkeit im Altbeton
 $R_{V,bj}$.. Verbundtragfähigkeit in der Verbundfuge
 $R_{V,tx}$.. Verbundtragfähigkeit in der Textilebene (Delaminationswiderstand)
 $R_{V,po}$.. Verbundtragfähigkeit der Filamentgarne (Auszugswiderstand)

Unter Ausschluss eines Versagens in der Verbundfuge durch Vorgabe einer Mindestrautiefe sowie eines Versagens des inneren Verbundes (Filamentgarnauszug) durch Einsatz geeigneter Bewehrungstextilien ergeben sich für die Tragfähigkeit des Verbundes zwei mögliche Versagensebenen, deren Tragfähigkeiten getrennt zu betrachten sind:

1. die Tragfähigkeit des Altbetonuntergrundes und
2. die Tragfähigkeit der textilen Bewehrungsebene.

Der Gesamtwiderstand gegen ein Versagen der Verbundverankerung wird somit durch den kleineren der beiden Widerstände im Altbetonuntergrund bzw. der Ebene der textilen Bewehrung bestimmt (Gl. (7.12)).

$$R_V = \min(R_{V,c}, R_{V,tx}) \quad (7.12)$$

Zwischen der übertragbaren Verbundkraft F_{Vu} und der dazu erforderlichen Verbundlänge l_V besteht ein Zusammenhang, welcher vom Widerstand der maßgebenden Versagensebene abhängt. HOLZENKÄMPFER [44] fand für geklebte Stahllamellen die im Bild 7.59 dargestellte Beziehung: für kleine Verbundlängen nimmt die übertragbare Verbundkraft F_{Vu} nichtlinear zu, bis sie ein Maximum $F_{Vu,max}$ erreicht und dann auf dem horizontalen Niveau verbleibt. Größere Verbundkräfte sind selbst durch eine Erhöhung der Verbundlänge nicht übertragbar – es kommt bei großen Verbundlängen zu einem reißverschlussartigen Versagen.

Für Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton wurde im Rahmen dieser Arbeit durch experimentelle Untersuchungen überprüft, ob hier ein ähnlicher Zusammenhang existiert. Die beiden zu unterscheidenden Versagensebenen Altbetonuntergrund und textile Bewehrungsebene wurden dabei getrennt betrachtet. Zusätzlich zu diesen beiden Versagensebenen ist bei Textilbeton im Unterschied zu hochtragfähigen Stahl- oder CFK-Verstärkungen die Zugtragfähigkeit der Verstärkungsschicht für die erforderlichen Verbundlängen von Bedeutung. Bei einer vergleichsweise geringen Zugtragfähigkeit der Verstärkungsschicht F_{Lu} wird die maximale Verbundbruchkraft $F_{Vu,max}$ nicht erreicht, so dass in diesem Fall kürzere Verbundlängen $l_V(F_{Lu})$ zur Verankerung der Zugkraft genügen (Bild 7.59, a)). Erst bei höher bewehrten Verstärkungsschichten mit einer entsprechend großen Zugtragfähigkeit F_{Lu} wird die tatsächlich ausnutzbare Zugkraft der Verstärkungsschicht durch die maximal übertragbare Verbundbruchkraft $F_{Vu,max}$ begrenzt (Bild 7.59, b)). Die erforderliche Verankerungslänge l_V ergibt sich aus dem Punkt, ab welchem die aufnehmbare Verbundkraft nicht mehr ansteigt.

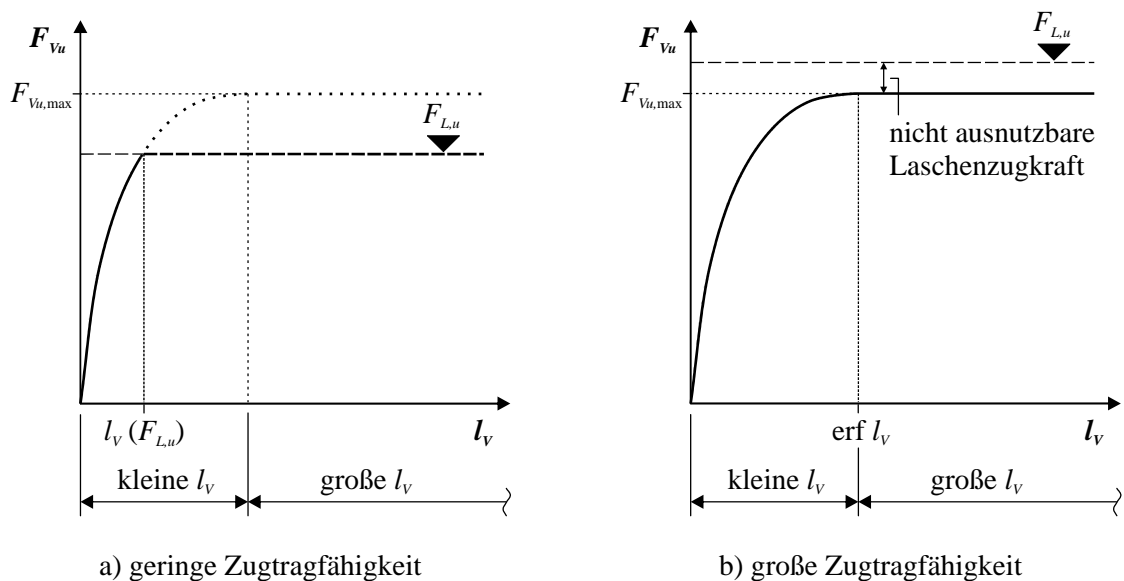


Bild 7.59 Bruchkräfte und erforderliche Verankerungslängen in Abhängigkeit von der Zugtragfähigkeit der Verstärkungsschicht

7.4.2 Einflussparameter auf die Tragfähigkeit des Verbundes

Die Tragfähigkeit des Verbundes wird durch eine Reihe von Einflussparametern bestimmt (vgl. Abschnitt 7.1.5). Die Anzahl der Textillagen bestimmt die Zugtragfähigkeit der Verstärkungsschicht und gibt somit die maximal durch den Verbund zu verankernde Belastung vor. Bestimmend für die Tragfähigkeit der Verankerung sind insbesondere die Tragfähigkeit des Altbetonuntergrundes und die Beschaffenheit der textilen Bewehrung im Zusammenhang mit der zur Verfügung stehenden Verankerungslänge. Auf diese beiden Haupteinflussgrößen wird in den nachfolgenden Abschnitten separat eingegangen. Weitere Einflussparameter auf die Tragfähigkeit des Verbundes sind die Rautiefe des Altbetonuntergrundes, der Einsatz einer mineralischen Haftbrücke sowie das Aufbringverfahren und die Aufbringrichtung der Verstärkungsschicht.

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen des Parameters *Rautiefe* haben ergeben, dass ein Versagen der Verbundfuge unter Schubbeanspruchung ab einer Rautiefe von 0,5 mm nicht mehr maßgebend wird. Zur Vermeidung eines vorzeitigen Verbundversagens in der Verbundfuge wird eine Mindestrautiefe von 1 mm empfohlen, um auf der sicheren Seite zu liegen.

Der Einsatz einer *mineralischen Haftbrücke* bewirkt keine Verbesserungen der Verbundtragfähigkeit unter Schubbeanspruchung gegenüber dem direkten Aufbringen der Feinbetonverstärkungsschicht auf die sandgestrahlte Oberfläche. Der Verbund zwischen dem Feinbeton und dem Altbeton ist bei der empfohlenen Rautiefe so gut, dass kein zusätzlicher Haftvermittler benötigt wird. Im Gegenteil besteht durch unsachgemäße Anwendung des Haftvermittlers sogar die Gefahr der Verschlechterung der Verbundtragfähigkeit.

Zusätzlich zu dem standardmäßig eingesetzten *Aufbringverfahren* Laminieren wurde stichprobenartig die Änderung der Verbundtragfähigkeit bei Einsatz des Sprühverfahrens zur Aufbringung der textilbewehrten Feinbetonschicht geprüft. Dieser Parameter ist jedoch nur

relevant, wenn die maßgebende Versagensebene in der Verstärkungsschicht und nicht im Altbeton liegt. Die für die Untersuchung des Parameters Aufbringverfahren verwendete textile Struktur NWM3-004-01 besitzt einen niedrigen wirksamen Flächenanteil, so dass hier die Ebene der textilen Bewehrung für das Verbundversagen maßgebend wird. Für die im Sprühverfahren beschichteten Probekörper ergab sich im Schnitt eine um $\approx 3\%$ verminderte Verbundtragfähigkeit (Bild 7.60). Das Ergebnis zeigt, dass der Einfluss des Aufbringverfahrens auf die Tragfähigkeit des Verbundes als eher gering einzuschätzen ist.

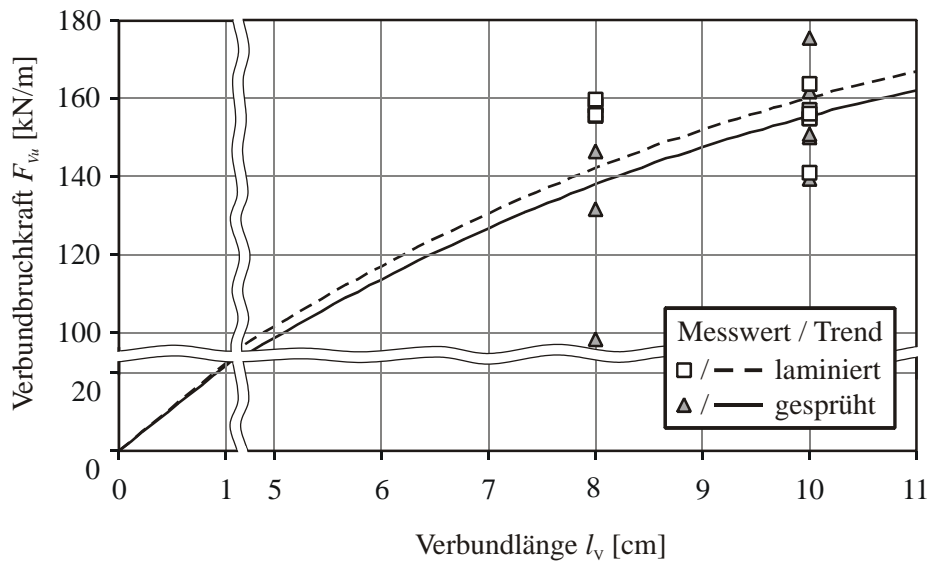


Bild 7.60 Einfluss des Aufbringverfahrens

Bezüglich des praktischen Einsatzes der textilbewehrten Verstärkung ist die Frage, ob sich das Verbundverhalten ändert, wenn die Verstärkungsschicht statt auf einer horizontalen Oberfläche auf eine senkrechte Fläche aufgebracht wird, von wesentlicher Bedeutung. Dies betrifft u. a. die Aufbringung einer Verstärkungsschicht an Balkenstegen. Auch der Parameter der *Aufbringrichtung* ist nur relevant, wenn die maßgebende Versagensebene in der Verstärkungsschicht und nicht im Altbeton liegt. Zur Untersuchung dieses Parameters wurde eine Serie mit dem Bewehrungstextil NWM3-013-01 im Sprühverfahren senkrecht stehend beschichtet. Die Herstellung dieser Probekörper erwies sich aufgrund des nicht vorhandenen Haftuntergrundes im Bereich der freien Laschenlänge als außerordentlich schwierig. Für die geprüfte Serie mit vertikaler Aufbringrichtung ergab sich eine um $\approx 15\%$ verminderte Verbundtragfähigkeit gegenüber einer vergleichbaren Versuchsserie mit horizontal verstärkten Probekörpern (Bild 7.61). Das Ergebnis bestätigt somit die auch schon beim Tragverhalten unter Haftzugbeanspruchung festgestellte Tendenz (vgl. Abschnitt 6.6.3). Bei der Ermittlung von Werten für die Verbundtragfähigkeit für senkrechte Flächen ist daher ein Abminderungsfaktor von 0,85 gegenüber den an horizontal verstärkten Probekörpern ermittelten Werten zu berücksichtigen.

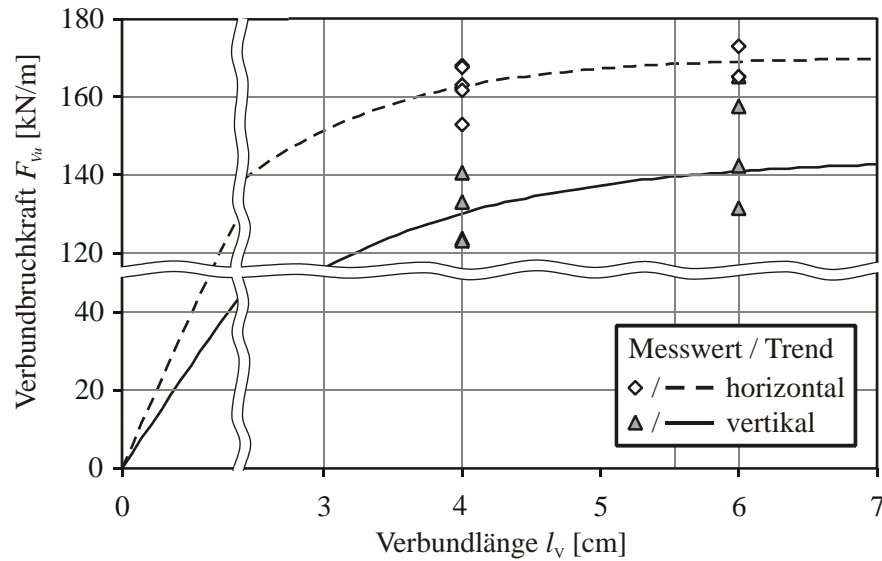


Bild 7.61 Einfluss der Aufbringrichtung

7.4.3 Verbundtragfähigkeit des Altbetonuntergrundes

Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen übertragbarer Verbundkraft und der zugehörigen Verbundlänge wurden im Rahmen dieser Arbeit 366 Verbundversuche durchgeführt. Ein großer Teil dieser Versuche versagte durch Überschreiten der Zugtragfähigkeit der Verstärkungsschicht, während die anderen Versuche durch verschiedene Arten des Verbundbruchs oder durch Mischbrüche versagten. Auf die reine Versagensart Verbundbruch im Altbetonuntergrund entfallen davon 72 Versuche. Die Auftragung der gemessenen Verbundbruchkraft bezogen auf 1 m Verstärkungsschichtbreite über die geprüfte Verbundlänge ergibt für diese Versuche das Diagramm in Bild 7.62.

Die dargestellten Versuchsdaten für das Verbundversagen im Altbetonuntergrund zeigen deutlich einen Verlauf, der dem im Bild 7.59 gezeigten Verlauf entspricht. Bei kleinen Verbundlängen steigt die übertragbare Verbundkraft zunächst fast gleichmäßig an. Mit weiterer Vergrößerung der Verbundlänge verringert sich die Steigerung der übertragbaren Verbundkraft zunehmend, bis sie schließlich auf einem horizontalen Plateau verbleibt. Dieses entspricht der maximal vom Altbetonuntergrund übertragbaren Verbundkraft. Somit konnte festgestellt werden, dass ebenso wie für Klebelamellen auch für Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton eine maximal übertragbare Verbundkraft existiert, die selbst durch eine Vergrößerung der Verankerungslänge nicht mehr gesteigert werden kann. Hieraus leitet sich die maximal mögliche Verstärkungswirkung ohne Anwendung einer zusätzlichen mechanischen Endverankerung ab.

Zur formelmäßigen Beschreibung der übertragbaren Verbundkraft bei einer bestimmten Verankerungslänge eignet sich eine tanh-Funktion nach Gl. (7.13), die sich aus der Lösung der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes für einen linearen Verbundansatz ableitet (ULAGA [100]). Da diese Funktion einem Asymptotenwert zustrebt, besitzt sie kein eigentliches Maximum. HOLZENKÄMPFER [44] bestimmte die zur Übertragung der maximalen Verbundkraft zugehörige Verankerungslänge durch Suche nach der Verbundlänge, bei welcher 97% der maximalen Verbundkraft erreicht ist.

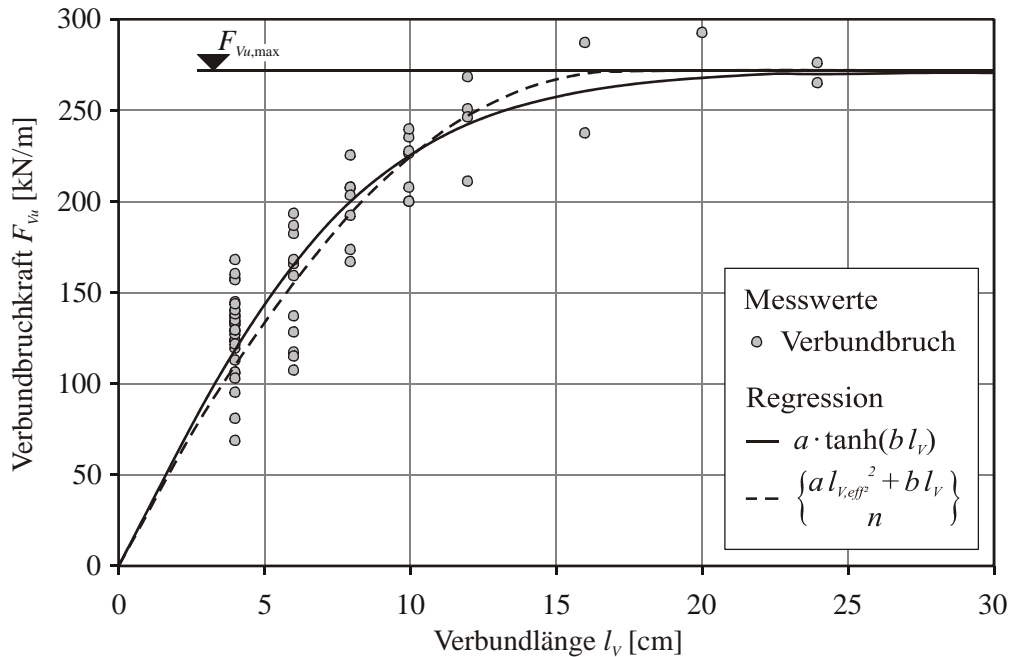


Bild 7.62 Zusammenhang zwischen übertragbarer Verbundkraft und Verbundlänge im Versagensfall Altbetonbruch

$$F_{L,Vu} = a \cdot \tanh(b \cdot l_v) \quad (7.13)$$

mit $F_{L,Vu}$.. Verbundbruchkraft
 l_v Verbundlänge
 a, b Parameter

Für die Bemessung empfiehlt HOLZENKÄMPFER [44] vereinfachend eine zusammengesetzte Parabel-Geraden-Funktion, wie sie in Gl. (7.14) dargestellt ist, als gute Näherung anstelle der tanh-Funktion zu verwenden. Unter der Bedingung, dass der Funktionswert des Parabelscheitels der maximal übertragbaren Verbundkraft entspricht, kann der Parameter b durch den Parameter a ausgedrückt werden (Gl. (7.15)). So muss nur noch ein freier Parameter durch Regression ermittelt werden.

$$F_{L,Vu} = \begin{cases} a \cdot l_v^2 + b \cdot l_v \\ \max F_{L,Vu} \end{cases} \text{ für } \begin{cases} l_v \leq l_v(\max F_{L,Vu}) \\ l_v > l_v(\max F_{L,Vu}) \end{cases} \quad (7.14)$$

$$F_{L,Vu} = \begin{cases} a \cdot l_v^2 + 2\sqrt{-a \cdot \max F_{L,Vu}} \cdot l_v \\ \max F_{L,Vu} \end{cases} \text{ für } \begin{cases} l_v \leq -\frac{1}{a}\sqrt{-a \cdot \max F_{L,Vu}} \\ l_v > -\frac{1}{a}\sqrt{-a \cdot \max F_{L,Vu}} \end{cases} \quad (7.15)$$

Die Regression der Versuchsdaten liefert für die beiden Ansätze nach Gl. (7.13) und Gl. (7.14) für den Versagensfall Verbundbruch im Altbetonuntergrund die folgenden empirischen Berechnungsformeln für die übertragbare Verbundkraft $F_{L,Vu}$ in Abhängigkeit von der vorhandenen Verankerungslänge l_v (Gl. (7.16) und Gl. (7.17)).

$$F_{L,Vu}^{[kN/m]} = 270,0 \cdot \tanh\left(0,1193 \cdot l_V^{[cm]}\right) \quad (7.16)$$

$$F_{L,Vu}^{[kN/m]} = \begin{cases} -0,9 \cdot l_V^{2[cm]} + 31,17 \cdot l_V^{[cm]} \\ 270 \end{cases} \text{ für } \begin{cases} l_V \leq 17,32 \text{ cm} \\ l_V > 17,32 \text{ cm} \end{cases} \quad (7.17)$$

7.4.4 Verbundtragfähigkeit der textilen Bewehrungsebene

Von den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Verbundversuchen versagten 95 Probekörper infolge reiner Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung. Diese werden zur Auswertung der Verbundtragfähigkeit in der Textilebene herangezogen. Die Auftragung der gemessenen Verbundbruchkraft über die geprüfte Verbundlänge wie beim Altbetonversagen liefert für den Versagensfall Delamination in der Textilebene jedoch keine aussagefähige Darstellung.

Der Grund liegt darin, dass die Beschaffenheit der textilen Bewehrungsstruktur eine entscheidende Rolle bei der Tragfähigkeit in dieser Ebene spielt. So beeinflusst insbesondere der wirksame Flächenanteil der textilen Bewehrung die Verbundkraftübertragung in der Bewehrungsebene. Während im Altbetonuntergrund die gesamte Verbundfläche mit der Verbundlänge l_V zur Kraftübertragung zur Verfügung steht (Bild 7.63), wird diese in der Ebene der textilen Bewehrung infolge der Störwirkung der Fäden auf eine wirksame Fläche zwischen den Fäden reduziert (Bild 7.64, a)). Betrachtet man einen Plattenstreifen der festen Breite b_L , so kann diese wirksame Fläche in Belastungsrichtung vereinfachend in eine zugehörige äquivalente Fläche gleichen Flächeninhalts überführt werden (Bild 7.64, b)). Diese Vereinfachung liefert für baupraktisch üblich Geometrien von Verankerungsbereichen eine gute Näherung. Aus dieser Umrechnung ergibt sich für die Ebene der textilen Bewehrung eine gegenüber der eigentlichen Verbundlänge l_V reduzierte wirksame Verbundlänge $l_{V,eff}$, die vom wirksamen Flächenanteil der jeweiligen textilen Bewehrung abhängt (Gl. (7.18)).

$$A_{V,eff} = k_{A,eff} \cdot A_V \Leftrightarrow l_{V,eff} \cdot b_L = k_{A,eff} \cdot l_V \cdot b_L \Leftrightarrow l_{V,eff} = k_{A,eff} \cdot l_V \quad (7.18)$$

mit $k_{A,eff}$... wirksamer Flächenanteil,
 A_V Verbundfläche,
 $A_{V,eff}$.. wirksame Verbundfläche,
 l_V Verbundlänge,
 $l_{V,eff}$... wirksame Verbundlänge und
 b_L Laschenbreite.

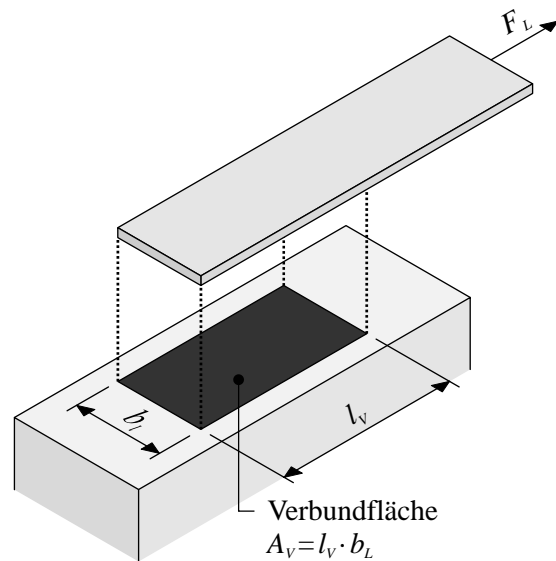


Bild 7.63 Verbundfläche im Versagensfall Altbetonbruch

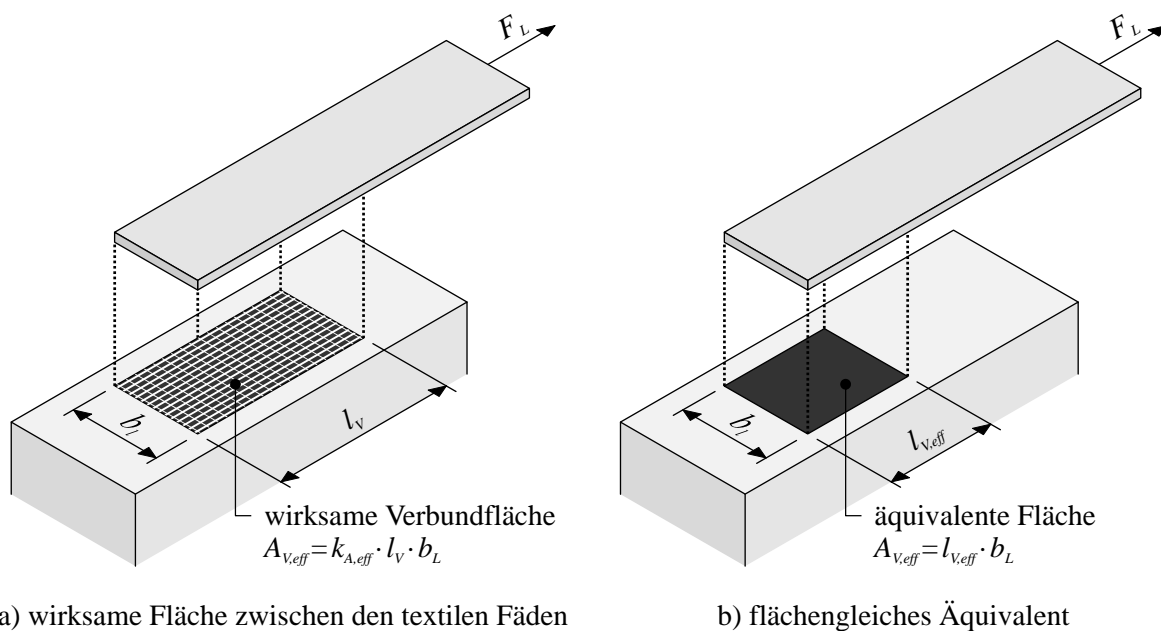


Bild 7.64 Verbundfläche im Versagensfall Delamination in der Textilebene

Die zu verankernde Zugkraft verteilt sich in der Verstärkungsschicht auf mehrere Textillagen. Die aus jeder einzelnen Textillage zu verankernden Verbundkräfte summieren sich in Richtung des Altbetonuntergrundes auf (Bild 7.65). Die unterste, dem Altbeton zugewandte Textilebene ist deshalb der höchsten Verbundbeanspruchung ausgesetzt und wird demzufolge für das Versagen maßgebend. Der Widerstand gegen Delamination in der Textilebene ist somit nur von den geometrischen Eigenschaften dieser maßgebenden Textillage abhängig.

Wird die gemessene Verbundbruchkraft bezogen auf 1 m Breite über diese wirksame Verbundlänge aufgetragen, ergibt sich Bild 7.66. In dieser Darstellung ist der Einfluss des wirksamen Flächenanteiles der verschiedenen Textilstrukturen enthalten. Wie das Diagramm deutlich zeigt, ergibt sich so ein erkennbarer Zusammenhang, der dem im Versagensfall Alt-

betonbruch ermittelten Zusammenhang entspricht. Für den Versagensfall Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung kann demzufolge festgestellt werden, dass auch hier die übertragbare Verbundkraft bei kleinen wirksamen Verbundlängen zunächst fast gleichmäßig ansteigt, sich mit weiterer Vergrößerung der wirksamen Verbundlänge die Steigerung der übertragbaren Verbundkraft zunehmend verringert, bis sie schließlich auf einem horizontalen Plateau verbleibt. Dieses entspricht der maximal von der Ebene der textilen Bewehrung übertragbaren Verbundkraft.

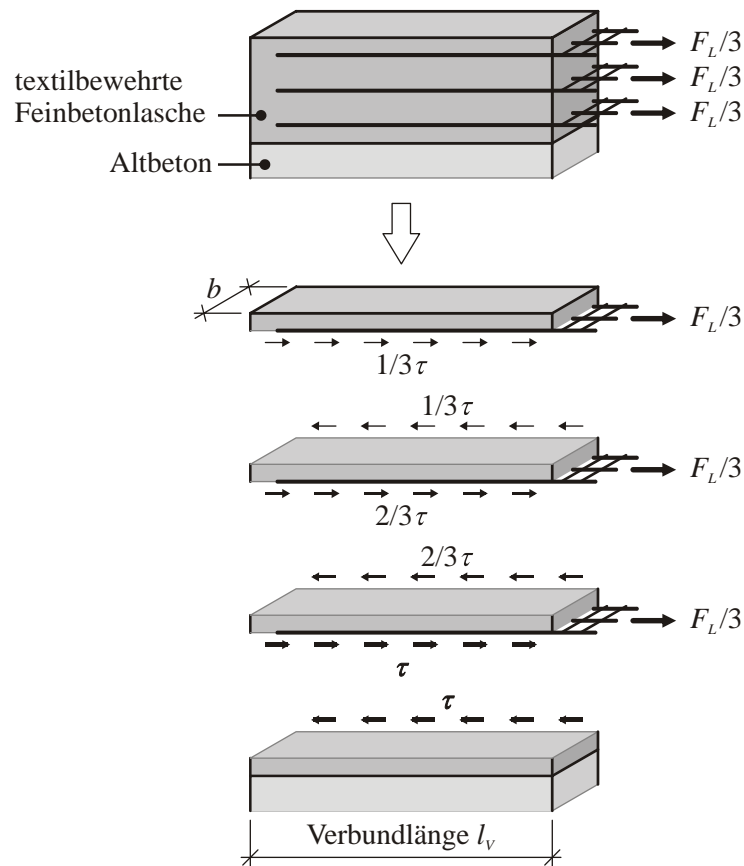


Bild 7.65 Aufsummation der Verbundkräfte über die Textillagen zum Altbetonuntergrund hin

Mit Hilfe der Regressionsrechnung können auch für den Versagensfall Delamination in der Textilebene für die beiden in Gl. (7.13) und Gl. (7.14) dargestellten Ansätze empirische Berechnungsformeln für die übertragbare Verbundkraft $F_{L,Vu}$ ermittelt werden, wobei in diesem Fall die Verbundlänge l_v durch die wirksame Verbundlänge $l_{v,eff}$ zu ersetzen ist (Gl. (7.19) und Gl. (7.20)).

$$F_{L,Vu}^{[\text{kN/m}]} = 249,4 \cdot \tanh\left(0,3793 \cdot l_{v,eff}^{[\text{cm}]}\right) \quad (7.19)$$

$$F_{L,Vu}^{[\text{kN/m}]} = \begin{cases} -7,5 \cdot l_{v,eff}^{2[\text{cm}]} + 86,60 \cdot l_{v,eff}^{[\text{cm}]} \\ 25 \end{cases} \text{ für } \begin{cases} l_{v,eff} \leq 5,77 \text{ cm} \\ l_{v,eff} > 5,77 \text{ cm} \end{cases} \quad (7.20)$$

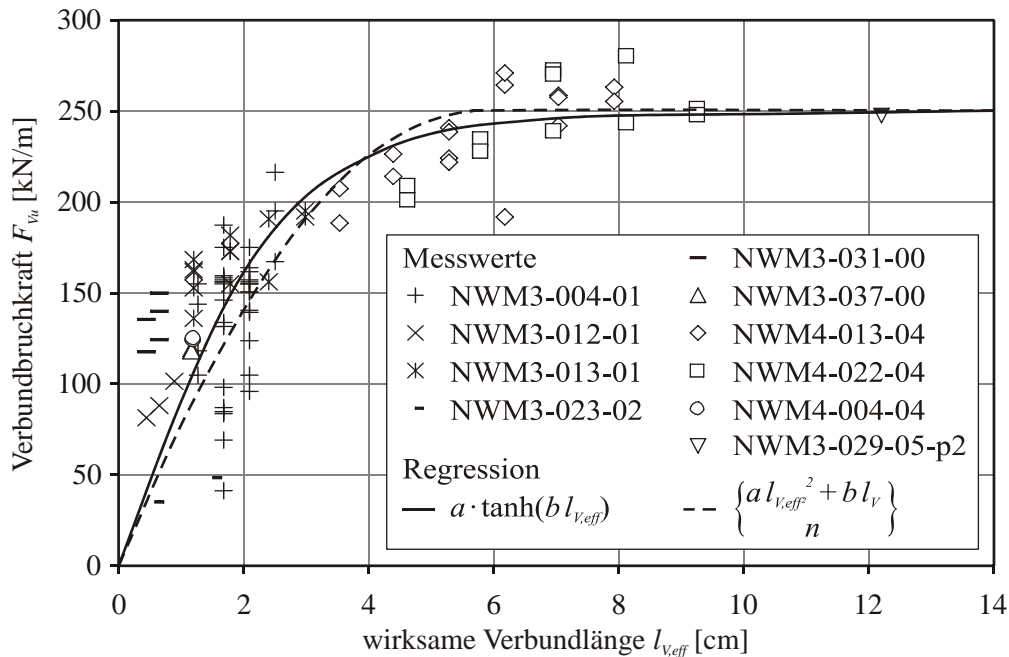


Bild 7.66 Zusammenhang zwischen übertragbarer Verbundkraft und wirksamer Verbundlänge im Versagensfall Delamination in der Textilebene

Für jeden wirksamen Flächenanteil existiert somit ein anderer Zusammenhang zwischen der übertragbaren Verbundkraft $F_{L,Vu}$ und der tatsächlichen Verankerungslänge l_v (Gl. (7.21)). Für die verschiedenen Werte des wirksamen Flächenanteiles ergibt sich damit eine Kurvenschar. Diese ist im Bild 7.67 für $k_{A,eff} = \{0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0\}$ anhand der empirischen Formel aus Gl. (7.21) dargestellt. Der Wert 1,0 entspricht dabei dem oberen Grenzwert für den reinen ungestörten Feinbeton ohne textile Bewehrungsfäden. Aus dem Diagramm im Bild 7.67 kann für jede beliebige Verbundlänge l_v die in der Textilebene pro Meter Breite übertragbare Verbundkraft $F_{L,Vu}$ in Abhängigkeit vom wirksamen Flächenanteil $k_{A,eff}$ abgelesen werden. Zwischenwerte sind zu interpolieren oder nach Gl. (7.21) zu berechnen.

$$F_{L,Vu}^{[kN/m]} = 249,4 \cdot \tanh\left(0,3793 \cdot k_{A,eff} \cdot l_v^{[cm]}\right) \quad (7.21)$$

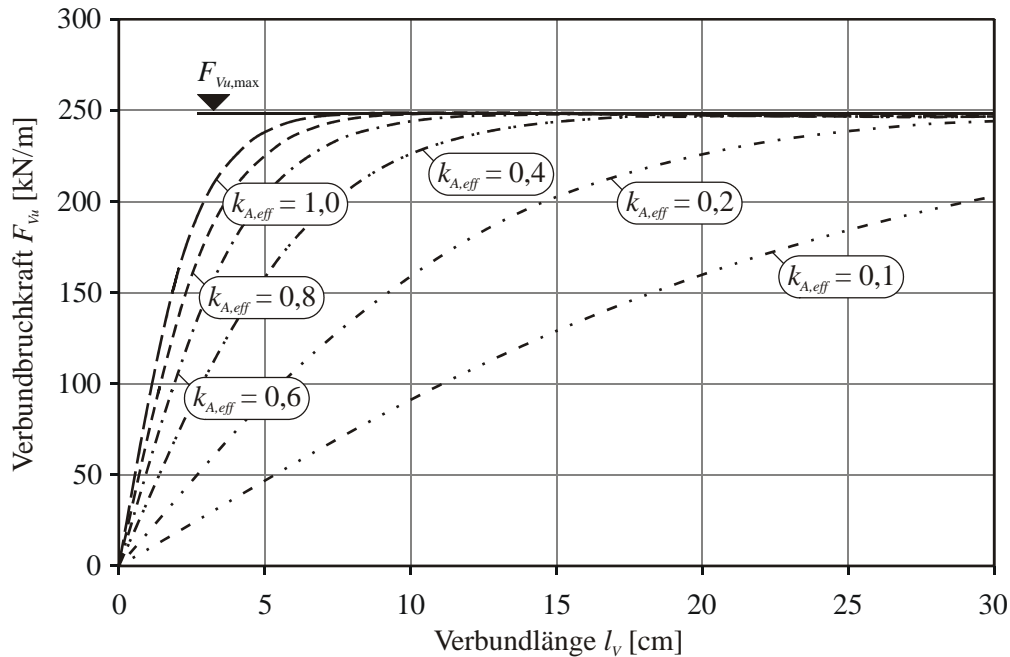


Bild 7.67 Zusammenhang zwischen übertragbarer Verbundkraft und Verbundlänge in Abhängigkeit vom wirksamen Flächenanteil

7.4.5 Verbundtragfähigkeit am Gesamtsystem

Die Tragfähigkeit des Verbundes am Gesamtsystem wird durch die Tragfähigkeit der maßgebenden Versagensebene bestimmt. D. h., der kleinere der beiden Widerstände im Altbetonuntergrund bzw. in der Ebene der textilen Bewehrung ist für den Widerstand des Gesamtsystems gegen ein Verbundversagen ausschlaggebend (siehe Abschnitt 7.4.1, Gl. (7.12)). Während die Tragfähigkeit in der Ebene der textilen Bewehrung maßgeblich vom wirksamen Flächenanteil abhängt, existiert für den untersuchten Altbeton genau eine Grenzlinie. Die Überlagerung beider Versagensarten ist in Bild 7.68 dargestellt. Die maximal vom Altbeton und von der Ebene der textilen Bewehrung übertragbare Verbundbruchkraft liegt auf ähnlichem Niveau. Die Grenzlinie des Altbetonversagens bei kleineren Verbundlängen teilt die Kurvenschar für ein Verbundversagen in der Textilebene in zwei Teile:

1. Die Kurven mit einem geringen wirksamen Flächenanteil verlaufen unterhalb der Altbetongrenzlinie. Hier wird die Verbundtragfähigkeit am Gesamtsystem durch die Tragfähigkeit der Textilebene bestimmt – die Tragfähigkeit des Altbetonuntergrundes kann bei Verwendung von Textilien mit einem geringen wirksamen Flächenanteil nicht ausgenutzt werden.
2. Die Kurven mit einem hohen wirksamen Flächenanteil verlaufen oberhalb der Altbetongrenzlinie. In diesen Fällen wird die Verbundtragfähigkeit am Gesamtsystem durch die Tragfähigkeit des Altbetonuntergrundes bestimmt. Dies bedeutet genauer gesagt, dass die Verbundtragfähigkeit von Textilien mit einem sehr hohen wirksamen Flächenanteil nicht ausgenutzt werden kann.

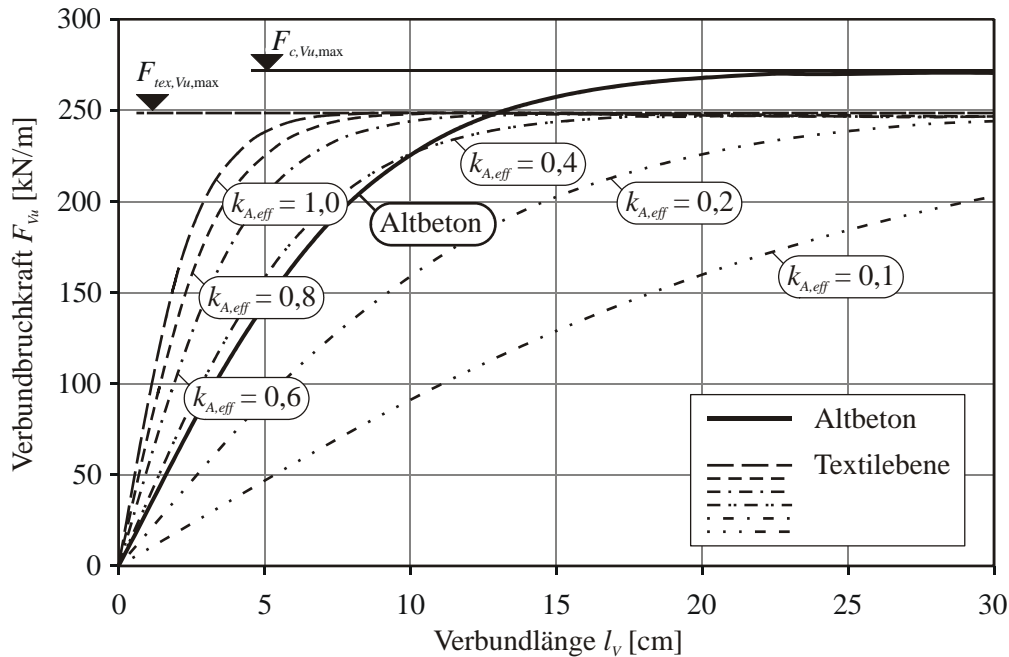


Bild 7.68 Zusammenhang zwischen übertragbarer Verbundkraft und Verbundlänge für die Versagensfälle Altbetonbruch und Delamination in der Textilebene

Erst kurz vor Erreichen der maximalen Verbundbruchlast schneidet die Altbetongrenzlinie weitere Grenzlinien der Textilebene wie z. B. $k_{A,eff} = 0,4$. In diesem Bereich wird dann die Verbundtragfähigkeit der Feinbetonmatrix in der Textilebene maßgebend.

Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten heraus sollte die Verbundtragfähigkeit der Verstärkungsschicht mindestens so gut sein, dass das Verstärkungspotential des Untergrundes ausgenutzt werden kann. Um die Tragfähigkeit des Altbetonuntergrundes voll ausnutzen zu können, muss das zu verwendende Bewehrungstextil also mindestens den wirksamen Flächenanteil besitzen, dessen Versagenskurve der Grenzlinie für ein Altbetonversagen entspricht. Aus der Bedingung, dass die Anstiege beider Kurven in Nullpunkt gleich sein sollen, ergibt sich bei dem hier verwendeten Altbeton ein wirksamer Flächenanteil von $k_{A,eff} = 0,36$ als Grenzwert für die textile Bewehrung. D. h. bei einer textilen Bewehrung, die genau diesen wirksamen Flächenanteil aufweist, entspricht die Tragfähigkeit der Textilebene in etwa der Tragfähigkeit des verwendeten Altbetons.

Die Verbundtragfähigkeit des Gesamtsystems ergibt sich entsprechend Gl. (7.12) aus der jeweils maßgebenden Versagensgrenzlinie in Abhängigkeit vom wirksamen Flächenanteil der textilen Bewehrung. Die Interaktion aus Gl. (7.16) und Gl. (7.21) ergibt die Verbundtragfähigkeit des Gesamtsystems nach Gl. (7.22).

$$F_{L,Vu}^{[kN/m]} = \min \left(270,0 \cdot \tanh \left(0,1193 \cdot l_v^{[cm]} \right), 249,4 \cdot \tanh \left(0,3793 \cdot k_{A,eff} \cdot l_v^{[cm]} \right) \right) \quad (7.22)$$

7.4.6 Anforderungen an die textile Bewehrung

Ein wirksamer Flächenanteil, der den im Abschnitt 7.4.5 ermittelten Grenzwert übersteigt, bringt bei einem Untergrund, der dem hier untersuchten Altbeton entspricht, im Bereich kleiner Verbundlängen keine Erhöhung der Verbundtragfähigkeit. Er macht sich erst bei großen zu verankernden Kräften nahe der maximalen Verbundtragfähigkeit bemerkbar. Ein Textil mit einem höheren wirksamen Flächenanteil ist bei dem für die Untersuchungen verwendeten Altbetonuntergrund im Bereich kleiner Verbundlängen bezüglich der Verbundeigenschaften „überdimensioniert“. Aufgrund der Begrenzung der Gesamttragfähigkeit durch die Tragfähigkeit des vorhandenen Altbetonuntergrundes ist hier ein höherer wirksamer Flächenanteil der textilen Bewehrung im Regelfall nicht erforderlich.

Im Hinblick auf einen wirtschaftlichen Einsatz der Bewehrungstextilien ist in diesem Fall eine Verringerung des Fadenabstandes zur Erhöhung der Zugtragfähigkeit sinnvoll, so dass jedoch der Grenzwert des wirksamen Flächenanteiles geradeso nicht unterschritten wird. Dadurch lässt sich ein höherer Bewehrungsgrad pro Textillage erzielen, so dass für dieselbe Verstärkungswirkung entsprechend weniger Textillagen einzubringen sind. Ein Bewehrungstextil mit optimalen Eigenschaften für einen wirtschaftlichen Einsatz besitzt demnach einen wirksamen Flächenanteil von wenigstens 0,36 bei gleichzeitig möglichst hoher Zugtragfähigkeit.

8 Untersuchungen zum Versagen des inneren Verbundes

8.1 Notwendigkeit der Untersuchungen

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen zum Verbundtragverhalten unter Schubbeanspruchung hat sich herausgestellt, dass beim Einsatz bestimmter textiler Bewehrungsstrukturen auch ein Versagen des inneren Verbundes zwischen den Filamentgarnen der textilen Bewehrung und der sie umgebenden Feinbetonmatrix eintreten kann. Da auch diese Versagensart maßgebend für ein Versagen des Verankerungsbereiches werden kann, wurden zusätzliche experimentelle Untersuchungen in das Versuchsprogramm aufgenommen, um diesen Versagensmechanismus getrennt zu untersuchen.

Ziel dieser zusätzlichen experimentellen Untersuchungen ist die Ermittlung der Filamentgarnauszugslängen verschiedener textiler Bewehrungsstrukturen. Im Gegensatz zu einfachen Auszugsversuchen an einem einzelnen Filamentgarn wird bei den hier durchgeführten Versuchen der Einfluss der Querbewehrung auf die Auszugskräfte berücksichtigt. Dies ist nach KRÜGER [51] insbesondere bei imprägnierten Textilien von Bedeutung, da durch die Imprägnierung (Beschichtung) der Knotenwiderstand verändert und auch der Garnquerschnitt entlang der Faserachse stark beeinflusst wird. Da die Versagensart Verbundversagen infolge Garnauszug in der Praxis möglichst ausgeschlossen werden soll, ist das Hauptziel dieser Untersuchungen das Finden eines Grenzwertes wie z. B. der Faserfeinheit oder der notwendigen Beschichtung der Filamentgarne, ab welchem diese Versagensart nicht mehr maßgebend wird.

Die separat durchgeführten Untersuchungen zum Filamentgarnauszug eröffneten zudem die Möglichkeit, eine Beziehung zwischen Laschenzugkraft und der Rissöffnung am Einzelriss messtechnisch zu erfassen. Diese kann für die Auswertung der im Kapitel 7 beschriebenen experimentellen Untersuchungen herangezogen werden. Die ermittelten Werte der Filamentgarnauszugslängen dienen zudem einer Abschätzung für die erforderliche Übergreifungslänge der textilen Bewehrung wie beispielsweise bei der Umwicklung zu verstärkender Stützen (AL-JAMOUS ET AL. [1]) oder der notwendigen Überlappung einer rechts- und linksseitig angebrachten Querkraftverstärkung unterhalb des Steges eines Plattenbalkens.

8.2 Versuchsaufbau zum Filamentgarnauszug

Der Versuchsaufbau zur Untersuchung der Filamentgarnauszugslängen wurde unter Zugrundelegung der Dehnkörperversuche von JESSE [45] und der im Kapitel 7 beschriebenen Schubversuche entwickelt (Bild 8.1). Die Filamentgarnauszugsversuche sollten den Versagensfall Garnauszug, welcher bei den Schubversuchen aufgetreten war, erfassen.

Da im Endverankerungsbereich der Textilbetonlasche im Schubversuch keine Querdruckspannungen vorherrschen, durfte an dem zu untersuchenden Ende des Probekörpers keine Klemmverankerung als Lasteinleitungsstruktur verwendet werden. D. h. die Lasteinleitung sollte ebenfalls ohne Querdruck funktionieren, um eine Vergleichbarkeit mit den Bedin-

gungen im Verbundbereich der Schubversuche zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurde eine Lasteinleitung mittels aufgeklebter Bleche gewählt (Bild 8.2, rechts). Die bei dieser Art der Lasteinleitung auftretenden Querdzugspannungen stehen in keinem Widerspruch zu den im Verbundbereich der Schubversuche auftretenden Haftzugspannungen.

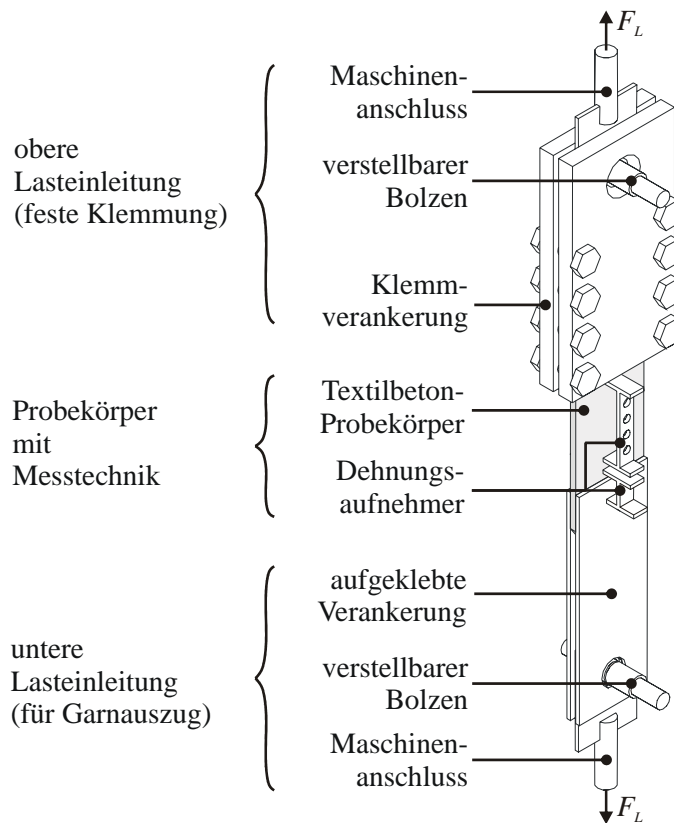


Bild 8.1 Versuchsaufbau für die Filamentgarnauszugsversuche

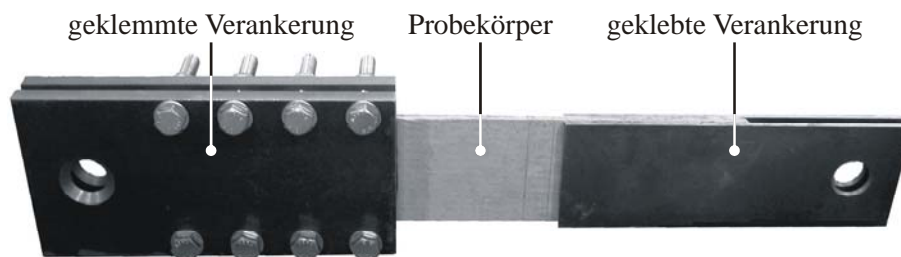


Bild 8.2 Probekörper mit Lasteinleitungsklemmböcken und -klebelaschen

Am oberen Ende des Probekörpers wurde als Lasteinleitung eine Klemmverankerung analog der Lasteinleitung der von GLÖCKNER [36] durchgeführten Dehnkörperversuche unter dynamischer Belastung mit einer Klemmlänge von 20 cm gewählt (Bild 8.2, links). Der aufgebrachte Querdruck und die große Verbundlänge sollen ein Versagen des Verbundes am falschen Ende des Probekörpers verhindern. Die Klebeverbundlänge am zu untersuchenden Ende des Probekörpers ist variabel von 0–20 cm. Durch schräges Besägen des Probekörpers

im Winkel von 45° ist es möglich, mit einem Versuch nicht nur eine Verbundlänge, sondern einen Verbundlängenbereich von 5 cm mit einem Probekörper zu untersuchen (Bild 8.3).

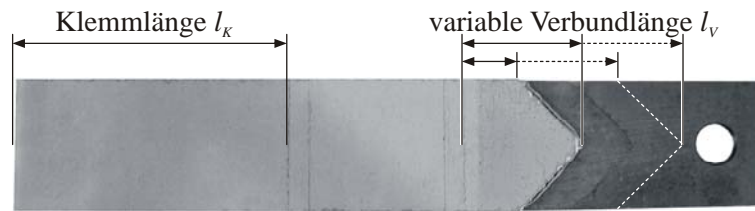
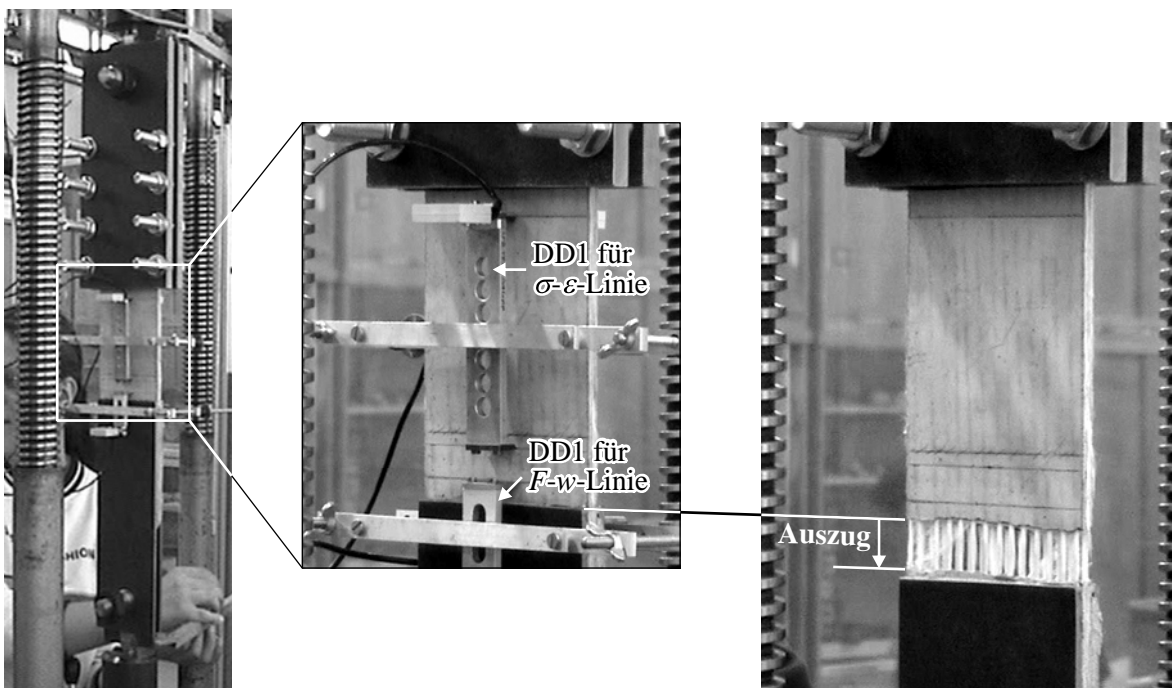


Bild 8.3 Probekörper für die Filamentgarnauszugsversuche

Während des Versuches werden zusätzlich zur Zugkraft zwei Verformungswerte gemessen (Bild 8.4, a)). Dabei handelt es sich zum einen um die Dehnung im Bereich der freien Länge. Hieraus kann die Spannungs-Dehnungs-Linie bis zum Versagenszeitpunkt ermittelt werden. Zum anderen wird die Rissöffnung des letzten Einzelrisses direkt vor der Klebeverankerung gemessen. Mit Hilfe dieses Wertes lässt sich eine Kraft-Rissöffnungs-Beziehung für das jeweilige Bewehrungstextil ableiten. Nach Erreichen der Bruchkraft wird die Messtechnik entfernt und durch Aufbringung weiterer Verformung ein vollständiges Ausziehen der noch intakten Filamentgarne erreicht (Bild 8.4, b)). Im Anschluss wird die Garnauszugslänge ausgemessen. Weitere Einzelheiten zur Versuchsdurchführung inklusive der Vor- und Nachbereitung der Probekörper sind dem Anhang A 3.3 zu entnehmen.



a) Versuchsstand mit Detail Messtechnik

b) Ausziehen der Filamentgarne

Bild 8.4 Versuchsanordnung und Messtechnik zur Ermittlung des Filamentgarnauszugsverhaltens

8.3 Versuchsergebnisse

8.3.1 Filamentgarnauszugslängen

Die Auszugslänge eines Filamentgarnes einer textilen Gelegestruktur gibt die Länge an, welche notwendig ist, um die Kraft im Filamentgarn vollständig in die umgebende Feinbetonmatrix einzuleiten. Sie kann somit als Maß für die Verankerungslänge einer textilen Bewehrungsstruktur angesehen werden. Anhand des im Bild 8.3 dargestellten Probekörpers kann die Verankerungslänge der Filamentgarne durch Vermessung des Versagensbildes bestimmt werden (Bild 8.5). Die Filamentgarne, deren Verbundlänge im Probekörper kürzer als die gesuchte Verankerungslänge ist, werden im Lasteinleitungsbereich aus der Feinbetonmatrix ausgezogen, während die Filamentgarne, deren Verbundlänge im Probekörper länger als die gesuchte Verankerungslänge ist, durch Abriss versagen. Die Grenze zwischen Auszug und Abriss gibt die erforderliche Verankerungslänge der textilen Bewehrungsstruktur in der Feinbetonmatrix an.

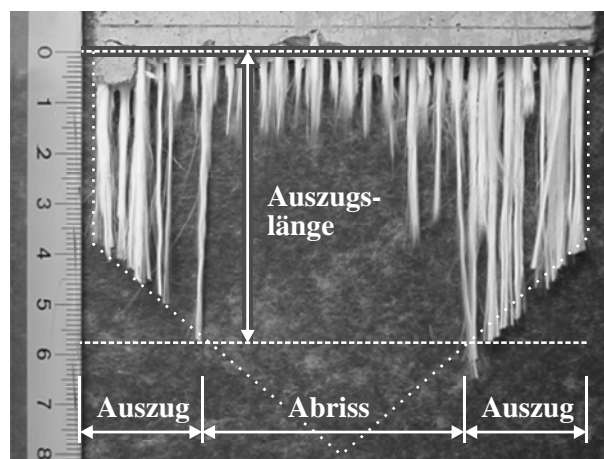


Bild 8.5 Ermittlung der Filamentgarnauszugslänge

Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen haben bestätigt, dass eine nachträgliche Beschichtung der textilen Bewehrungsstrukturen eine Erhöhung des Auszugswiderstandes bewirkt. Während bei unbeschichteten Textilien die tragenden Filamentgarne auf voller Länge (über 20 cm) aus der Feinbetonmatrix herausgezogen wurden, konnte bei beschichteten Textilien mit gleichartigen tragenden Filamentgarnen eine bemerkenswerte Verkürzung der Auszugslänge festgestellt werden (Bild 8.6). Es ist anzumerken, dass die im Diagramm eingetragene Auszugslänge der unbeschichteten Textilstruktur durch die maximal prüfbare Länge beschränkt ist. Die Auszugslänge der unbeschichteten Struktur ist tatsächlich größer. Unbeschichtete Textilstrukturen sind somit nicht als Bewehrungsmaterial für Verstärkungsschichten an Bauteilen geeignet, wo kurze Verankerungslängen benötigt werden. Da die sehr große Verankerungslänge der Fasern in der Feinbetonmatrix maßgebend wird, kann die Tragfähigkeit des (Scher-)Verbundes bei diesem Material weder in der Textilebene noch im Altbetonuntergrund (vgl. Abschnitt 7.4.5) ausgenutzt werden.

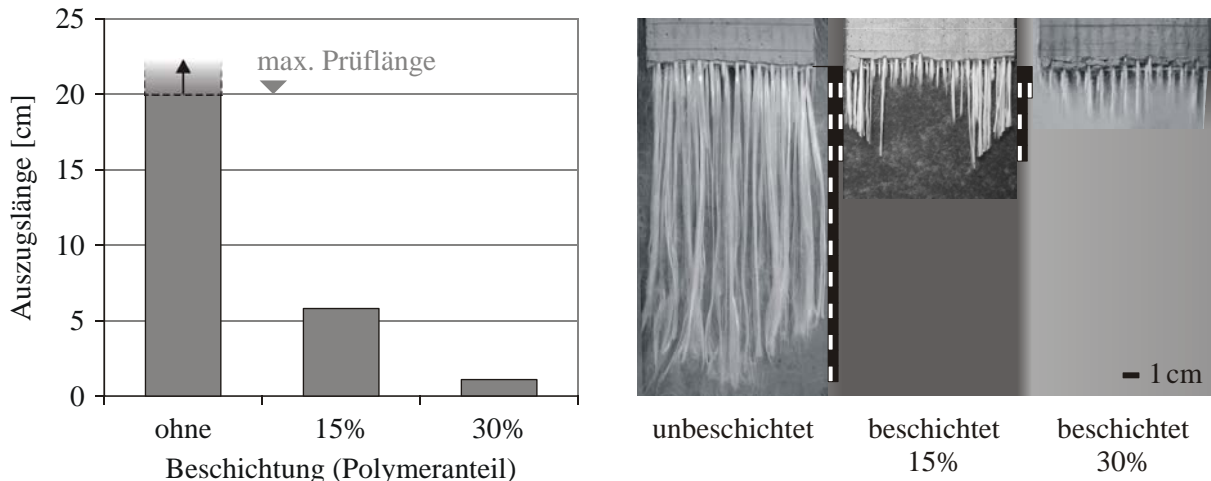


Bild 8.6 Einfluss einer nachträglichen Beschichtung der Textilien auf die Auszugslänge

Die Vergrößerung des Auszugswiderstandes durch eine nachträglich aufgebraachte Beschichtung kann zum einen darauf zurückgeführt werden, dass der Nähfaden in Verbindung mit der nach dem Wirkvorgang aufgebraachten Beschichtung eine Rippung bewirkt (KRÜGER [51]). Eine solche Umschlingung der Filamentgarne durch den Nähfaden ist jedoch nur bei den Kettfäden der textilen Struktur gegeben. Durch die Beschichtung konnte aber auch eine Verbundverbesserung in der Schussfadenrichtung festgestellt werden. Dies legt nahe, dass außer der Rippenwirkung des Nähfadens noch ein weiterer Effekt an der Verbesserung des Verbundes beteiligt ist. KRÜGER [51] stellte fest, dass bei unbeschichteten AR-Glasfilamentgarnen im Gegensatz zu Kohlefasern kein reiner Filamentgarnauszug stattfindet. Bei unbeschichteten AR-Glasfilamentgarnen werden im Wesentlichen die inneren Filamente (Kernfasern) des Garns ausgezogen, während die Randfilamente, die im direkten Kontakt zur Feinbetonmatrix stehen, ein Zugversagen zeigen (sog. Faserkernauszug). Dies liegt in einem sehr geringen Verbund der Filamente untereinander innerhalb des Filamentgarnes begründet. Dieser Effekt des Faserkernauszugs verstärkt sich mit einer Vergrößerung der Garnfeinheit.

Bei der nachträglichen Beschichtung der textilen Strukturen entsteht durch die in die Filamentgarne eindringende polymere Beschichtung eine Art Verklebung der Filamente untereinander, welche zu einer Erhöhung des Verbundes der Filamente innerhalb des Filamentgarnes führt. Offensichtlich wird durch dieses verbesserte Zusammenwirken der Rand- und Kernfilamente infolge der nachträglichen Beschichtung der Auszugswiderstand des Filamentgarnes signifikant erhöht.

Die nachträgliche Beschichtung bringt neben dem Vorteil des verbesserten Verbundes auch den Nachteil einer größeren Biegesteifigkeit mit sich, welcher insbesondere bei der Bauteilverstärkung von Bedeutung ist, wo die Bewehrungsstruktur um Bauteilkanten geführt werden muss. Zu diesem Zweck wurde eine textile Struktur mit einer Beschichtung mit einer verminderten Menge an polymeren Bestandteilen in der Suspension beschichtet. Diese mit der Hälfte des regulären Polymeranteils beschichtete Struktur zeigt eine geringere Biegesteifigkeit als standardmäßig mit 30% Polymeranteil beschichtete Textilstrukturen. Diese Flexibilität wird z. B. für die Umwicklung von Stützen mit rechteckigem Querschnitt benötigt. Die durchgeführten Auszugsversuche haben gezeigt, dass bereits bei einem geringen Beschich-

tungsgrad von 15% Polymeranteil eine erhebliche Verkürzung der Auszugslänge der textilen Struktur erreicht wird (Bild 8.6).

Bei beschichteten Textilien wird das Verbundverhalten der Filamentgarne einer textilen Struktur zusätzlich durch die Anordnung der Querfäden beeinflusst. Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Verringerung des Querfadenabstandes eine Verbunderhöhung und somit eine Verkürzung der Auszugslänge der beschichteten Textilstruktur bewirkt (Bild 8.7). KRÜGER [51] berichtet von Untersuchungen an imprägnierten Kohlefaser-textilien, bei welchen festgestellt wurde, dass die Querschnittsänderung über die Länge des Filamentgarnes für eine Verbunderhöhung verantwortlich ist. Insbesondere an den Kreuzungsstellen mit den orthogonal verlaufenden Filamentgarnen ergibt sich dabei eine starke Querschnittsveränderung.

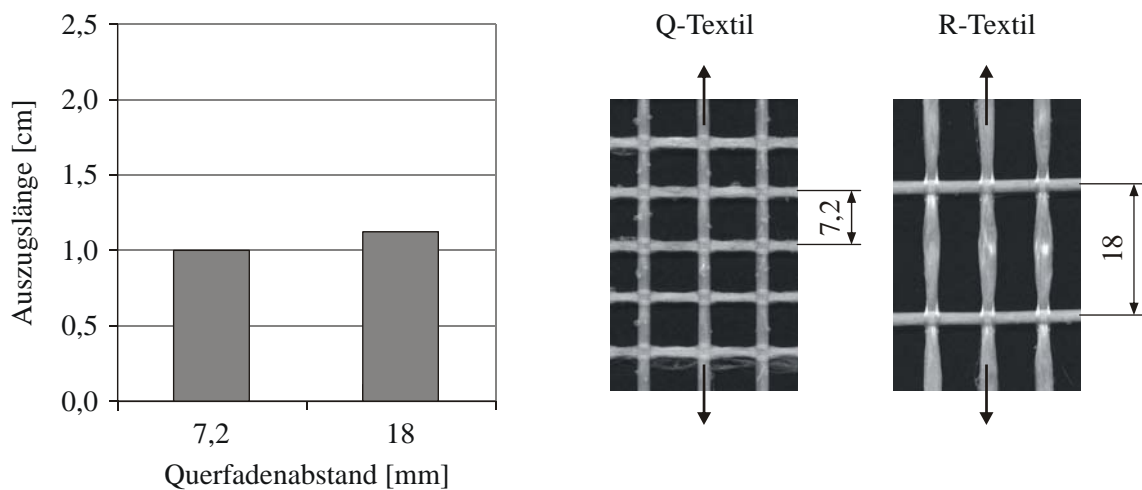


Bild 8.7 Einfluss des Querfadenabstandes beschichteter Textilien auf die Auszugslänge

Bei den untersuchten beschichteten AR-Glas-Textilien werden die Querfäden durch die Beschichtung mit den Längsfäden verklebt, so dass die Querfäden als zusätzliche Verankerungselemente für die auf Auszug beanspruchten Längsfäden wirken. Bei einem geringeren Querfadenabstand erhöht sich somit die Anzahl der Verankerungselemente des beanspruchten Filamentgarnes. Diese führt folglich zu einer Erhöhung des Auszugswiderstandes und damit zu kürzeren Auszugslängen.

Hieraus ist zu schlussfolgern, dass die Verankerungslänge nicht allein von den Eigenschaften der Filamentgarne in Belastungsrichtung abhängig ist. Stattdessen ist die gesamte Textilstruktur zu betrachten. Infolge des Einflusses der Rippenwirkung des Nähfadens ist bei ein und demselben Filamentgarn zunächst zwischen Kett- und Schussfäden zu unterscheiden. Des weiteren darf auch der Querfadenabstand nicht außer Acht gelassen werden. Somit muss genau genommen statt einer Filamentgarnauszugslänge von einer Textilauszugslänge gesprochen werden.

8.3.2 Kraft-Rissöffnungsverhalten am Einzelriss

Während der Auszugsversuche wurde die Rissöffnung des letzten Einzelrisses direkt vor der Klebeverankerung gemessen und daraus für jedes geprüfte Textil eine Kraft-Rissöffnungs-Beziehung ermittelt. Der ansteigende Ast der so ermittelten Kurven dient der Auswertung der im Kapitel 7 beschriebenen Verbundversuche unter Schubbeanspruchung.

Die Auswertung der Kraft-Rissöffnungs-Beziehungen für verschiedene textile Strukturen bestätigt die bereits im vorangegangenen Abschnitt festgestellten Einflüsse. Zum einen wird auch hier deutlich, dass eine nachträgliche Beschichtung der textilen Bewehrungsstrukturen eine signifikante Verbesserung der Verbundeigenschaften der Filamentgarne in der Feinbetonmatrix mit sich bringt (Bild 8.8).

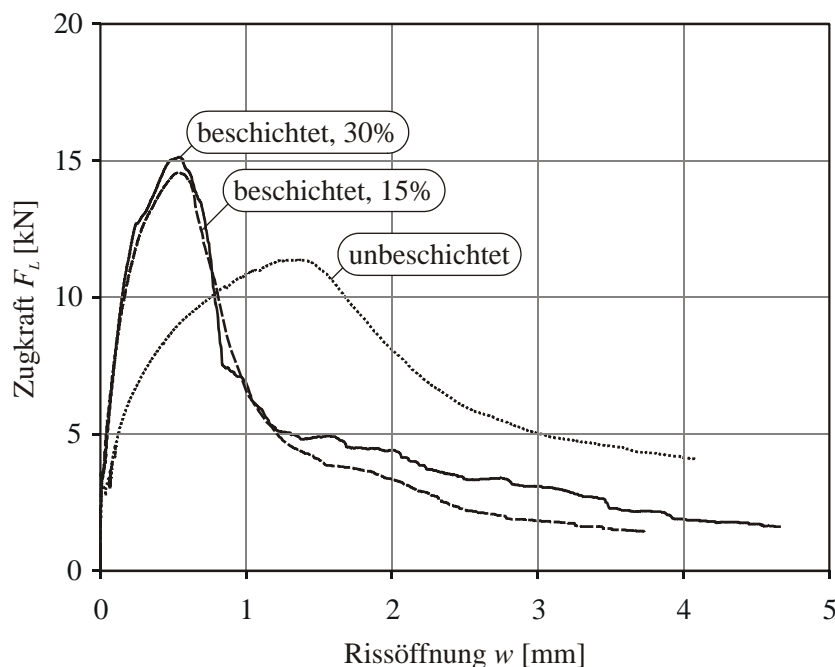


Bild 8.8 Einfluss einer nachträglichen Beschichtung der Textilien

Der im Abschnitt 8.3.1 festgestellte Einfluss des Querfadenabstandes bei beschichteten Textilien wird anhand der Kraft-Rissöffnungs-Beziehungen bestätigt. Es zeigt sich, dass eine Verkürzung des Querfadenabstandes zu einer Erhöhung der verankerbaren Kräfte führt (Bild 8.9). D. h., dass ein Q-Textil aufgrund des geringeren Querfadenabstandes gegenüber einem R-Textil die besseren Verbundeigenschaften besitzt.

Ein weiterer Einfluss ist die Anordnung der auf Auszug belasteten bzw. zu verankernden Filamentgarne im Textil, d. h. ob es sich um die Kett- oder Schussfadenrichtung handelt. Hier ergeben sich bezüglich der Verbundkraftübertragung zwischen den Filamentgarne und der sie umgebenden Feinbetonmatrix zum Teil erhebliche Unterschiede, die hauptsächlich auf der Wirkung des Nähfadens beruhen (JESSE [45]).

Bezüglich der Verankerung der Filamentgarne in der Feinbetonmatrix ist zwischen unbeschichteten und beschichteten Textilien zu unterscheiden. Der Einfluss des Nähfadens auf die

Verbundeigenschaften des Kettfadens gegenüber denen des Schussfadens ist bei unbeschichteten und beschichteten Textilien gegenläufig (Bild 8.10). Bei unbeschichteten Textilien wirkt der Nähfaden bei den in Kettrichtung verlaufenden Filamentgarnen verbundstörend. Daraus ergibt sich eine Pseudoduktilität gegenüber den in Schussrichtung verlaufenden Filamentgarnen, die im Diagramm deutlich sichtbar wird. Zur Übertragung der gleichen Kraft kommt es beim Kettfaden zu einer wesentlich größeren Verformung als beim Schussfaden.

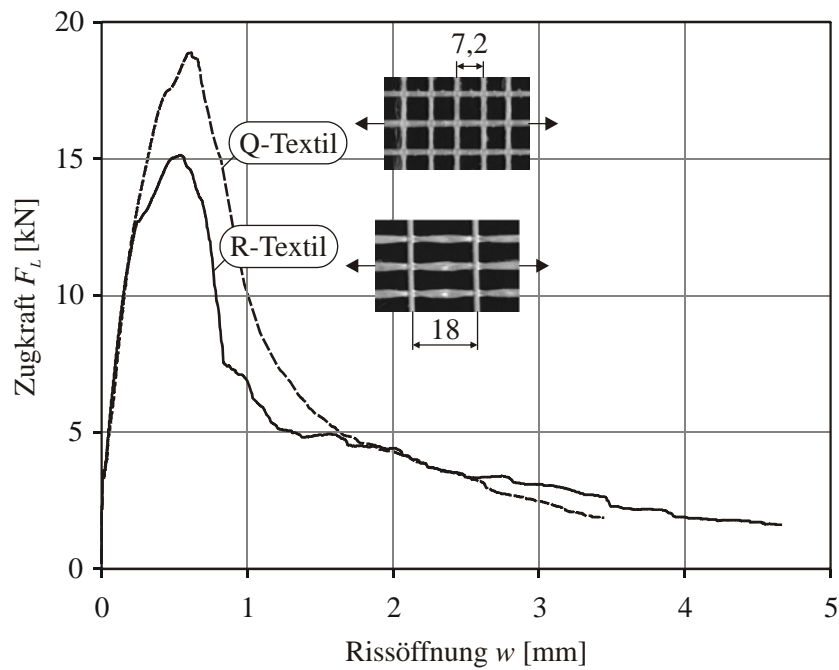


Bild 8.9 Einfluss des Querfadenabstandes beschichteter Textilien

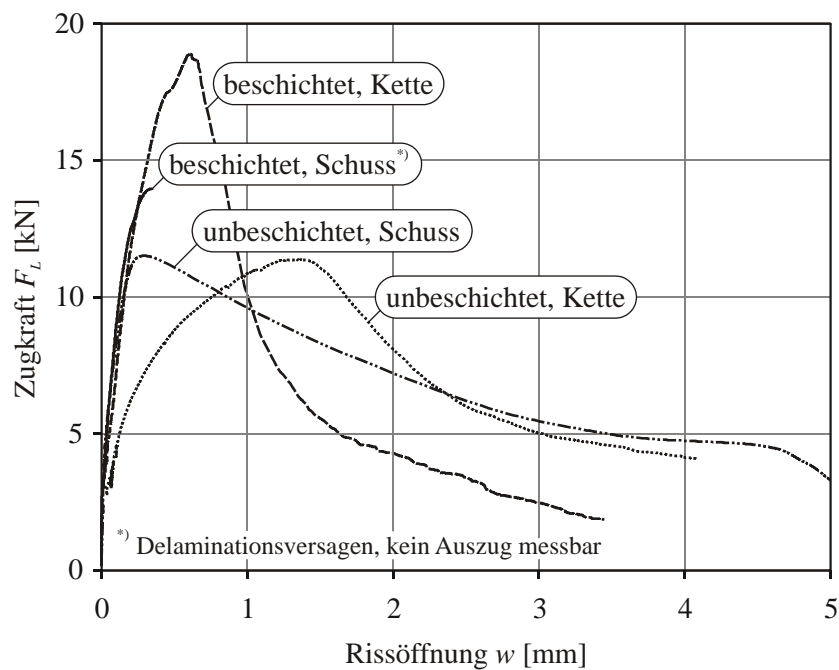


Bild 8.10 Einfluss der Fadenrichtung im Textil

Bei beschichteten Textilien bewirkt der Nähfaden einen gegenteiligen Effekt. Infolge der Verklebung des Nähfadens mit dem Filamentgarn entsteht eine Art Rippenwirkung, welche zu einer Verbunderhöhung des Kettfadens gegenüber dem Schussfaden führt. Durch diese zusätzlichen Rippen können aus den Kettfäden beschichteter Textilien größere Kräfte in der Feinbetonmatrix verankert werden als aus den vergleichbaren Schussfäden.

Auf eine intensive Betrachtung des mechanischen Hintergrundes der Verbundeigenschaften am Filamentgarn wird, da es sich bei diesen Untersuchungen nur um ein Randthema der vorliegenden Arbeit handelt, an dieser Stelle verzichtet und auf die einschlägige Literatur zu dieser Thematik verwiesen (z. B. Banholzer [5], JESSE [45], KONRAD & CHUDOBA [50], KRÜGER [51], SCHORN [93]).

8.3.3 Anforderungen an die textile Bewehrung

Die Untersuchungen zum Auszugsverhalten textiler Strukturen haben gezeigt, dass eine nachträgliche Beschichtung zur Sicherstellung des inneren Verbundes der AR-Glasfilamentgarne in der Feinbetonmatrix unbedingt erforderlich ist. Es wurde festgestellt, dass bereits die Hälfte des regulären Beschichtungsgrades mit 15% Anteil an polymeren Substanzen einen großen Effekt bewirken kann.

Bei beschichteten Textilstrukturen zeigen die Kettfäden gegenüber den Schussfäden bessere Verbundeigenschaften. Bei vorwiegend einaxialer Beanspruchung der textilen Bewehrung sollte daher die Kettfadenrichtung als tragende Bewehrung bevorzugt werden.

Für einaxiale Belastung kommen im üblichen Stahlbetonbau R-Matten mit 20% Querbewehrungsgrad zum Einsatz. Diese besitzen eine rechteckige Öffnungsweite und in Querrichtung geringere Durchmesser als in der Tragrichtung. In Anlehnung an diese Geometrie wurde im Kapitel 7 für eine einaxiale Verstärkung eine Textilstruktur entwickelt, die bezüglich des Abstandes zwischen den Filamentgarnen und der Durchmesser diesen Eigenschaften entspricht und gleichzeitig eine große Öffnungsweite besitzt, um ein Verbundversagen durch Delamination auszuschließen. Dieses R-Textil ist im Bild 8.11, mitte im Vergleich zu einem Q-Textil für zweiaxiale Beanspruchung (Bild 8.11, links) dargestellt.

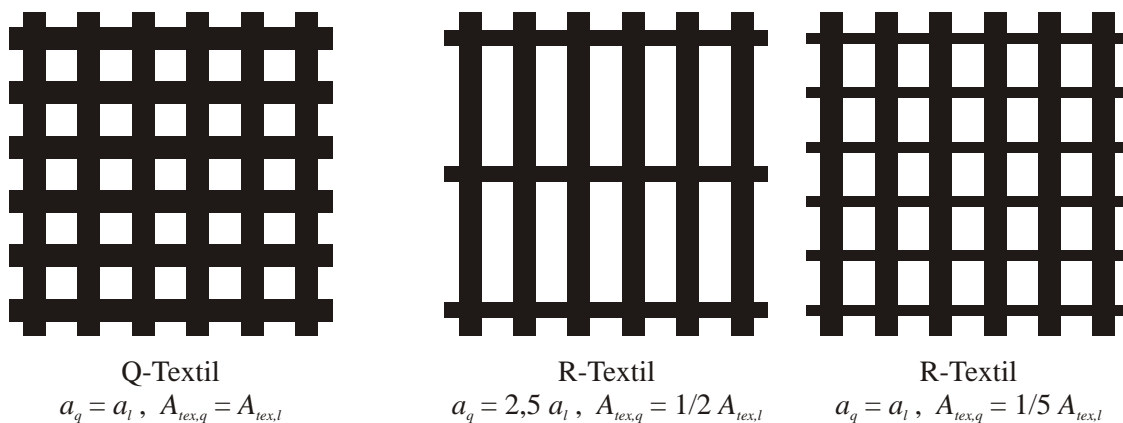


Bild 8.11 Konfigurationsmöglichkeiten eines R-Textils im Vergleich zum Q-Textil

Die Untersuchungen zum Auszugsverhalten haben gezeigt, dass sich ein kurzer Querschnitt bei einem Textil mit quadratischer Öffnungsweite gegenüber einem größeren Querschnitt günstig auf die Verankerungslänge der textilen Strukturen in der Feinbetonmatrix auswirkt. Aus diesem Grund ist eine Korrektur der Konfiguration des R-Textils empfehlenswert. Entsprechend den Erkenntnissen aus Abschnitt 7.4.6, dass bei einem durchschnittlich tragfähigen Altbetonuntergrund eine geringere Öffnungsweite der textilen Struktur zur Sicherstellung der Schubübertragung in der Ebene der textilen Bewehrung ausreichend ist, erscheint eine Konfiguration mit quadratischer Öffnungsweite und dafür entsprechend geringerem Querschnitt des Querschnitts sinnvoll (Bild 8.11, rechts).

9 Modellierung des Verbundverhaltens

9.1 Allgemeines

Die Untersuchungen im Abschnitt 7.3 haben gezeigt, dass das traditionell zur Analyse des Verbundverhaltens von linear-elastischen Materialien angewendete Differenzenverfahren nicht in der Lage ist, aus den messtechnisch an der Oberfläche erfassbaren Verformungen Schubspannungen in der Verbundfuge einer textilbewehrten Betonverstärkungsschicht zu ermitteln. Eine Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung stellt demzufolge kein geeignetes Werkzeug zur Beschreibung des Verbundverhaltens von Textilbetonverstärkungsschichten dar. Für Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton sind alternative Ansätze zur Beschreibung des Verbundverhaltens zu entwickeln.

Dabei sind die beiden Verbundbeanspruchungsarten senkrecht und parallel zur Verbundfuge zu beachten. In den folgenden Abschnitten werden einige einfach gehaltene Modellvorschläge gegeben. Zunächst wird bei der Modellierung der Verbundtragfähigkeit zwischen den beiden Beanspruchungsarten Verbund unter Haftzugbeanspruchung und Verbund unter Scherbeanspruchung unterschieden. Nachfolgend werden Ansätze aufgezeigt, die beide Einflüsse zu einer Interaktion zusammenführen.

9.2 Verbundtragfähigkeit unter Haftzugbeanspruchung

Die Haftzugfestigkeit eines Verstärkungssystems aus Altbetonuntergrund und textilbewehrter Feinbetonverstärkungsschicht kann mit dem in Abschnitt 6.6.8 erarbeiteten Modell beschrieben werden (Gl. (9.1)). Die Versagensgrenzlinie ergibt sich dabei einerseits aus dem wirksamen Flächenanteil der textilen Bewehrung und andererseits aus der Haftzugfestigkeit des zu verstärkenden Altbetonuntergrundes (s. Abschnitt 6.6.8, Bild 6.35 und Bild 6.36).

$$f_{at} = \min(f_{c,at}, f_{tex,at}) = \min(f_{c,at}, k_{A,eff} \cdot f_{fc,at}) \quad (9.1)$$

mit f_{at} Haftzugfestigkeit des Verbundsystems,
 $f_{c,at}$... Haftzugfestigkeit des Altbetonuntergrundes,
 $f_{tex,at}$.. Haftzugfestigkeit in der Ebene der textilen Bewehrung,
 $f_{fc,at}$.. Haftzugfestigkeit des Feinbetons und
 $k_{A,eff}$.. wirksamer Flächenanteil.

Unter Voraussetzung der Gültigkeit der in Gl. (6.23) angegebenen Beziehung für die Feinbetonmatrix kann Gl. (9.1) auf die leichter bestimmbare Biegezugfestigkeit am Mörtelprisma bezogen werden (Gl. (9.2)).

$$f_{at} = \min(f_{c,at}, 0,7 \cdot k_{A,eff} \cdot f_{fct,fl}) \quad (9.2)$$

mit $f_{fct,fl}$. Biegezugfestigkeit des Feinbetons (am Mörtelprisma)

9.3 Verbundtragfähigkeit unter Schubbeanspruchung

Im Kapitel 7 wurde festgestellt, dass sich unter zunehmender Beanspruchung der Verstärkungsschicht im Verbundbereich ein Verbundriss entlang der ersten textilen Bewehrungsebene bzw. im oberflächlichen Altbeton entwickelt. Diese geht einher mit einer zunehmenden Rissbildung der Verstärkungsschicht im Verbundbereich. Die Lage der fortschreitenden Verbundrisspitze unterteilt den Verbundbereich l_v in einen ungerissenen Bereich $l_{v,I}$ (Zustand I) und einen gerissenen Bereich $l_{v,II}$ (Zustand II), die sich beide an der Verbundkraftübertragung beteiligen (vgl. Abschnitt 7.3.11). Im Bild 9.1 sind die geometrischen Verhältnisse für eine Verstärkungsschicht der Dicke t_L unter der Zugbelastung F_L dargestellt. Der letzte Schrägriss trennt den gerissenen vom ungerissenen Bereich der Verbundlänge. Aufgrund der Rissneigung α unterscheiden sich die Abmessungen der Bereiche im Zustand I und II auf der Oberseite (Index o) und Unterseite (Index u) der Verstärkungslasche.

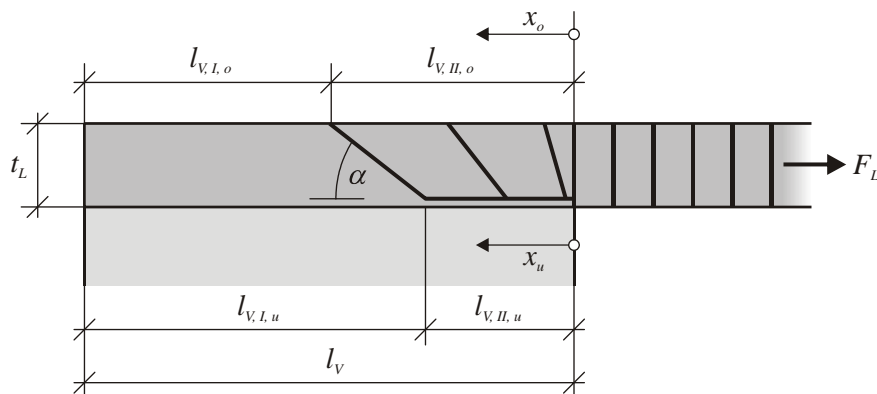


Bild 9.1 Definition der Bezeichnungen

Die messtechnische Ermittlung der Risslage mit Hilfe der digitalen Photogrammetrie kann nur auf der Laschenoberseite geschehen. D. h. nach Auswertung der photogrammetrisch ermittelten Messdaten aus einem Versuch (vgl. Abschnitt 7.3.7) sind zunächst die Längen $l_{v,I,o}$ und $l_{v,II,o}$ auf der Laschenoberseite bekannt. Für eine modellmäßige Umsetzung sind jedoch die Längenverhältnisse $l_{v,I,u}$ und $l_{v,II,u}$ auf der Laschenunterseite interessant, da sich hier der Verbundriss bildet, aus welchem schließlich der Bruchquerschnitt entsteht. Aus diesem Grund muss zunächst zwischen diesen beiden Maßen unterschieden werden. Eine Umrechnung der Längenverhältnisse auf der Oberseite in die auf der Unterseite der Lasche gelingt auf einfache Weise über den Risswinkel α und die Laschendicke t_L (siehe Abschnitt 7.3.9).

Zunächst wird vereinfachend angenommen, dass die in der Verstärkungslasche vorhandene Zugkraft F_L in Form von Verbundschubspannungen über die Verbundfuge im Altbeton verankert wird. Für die Modellierung der Verbundschubspannungsübertragung interessieren insbesondere die geometrischen Verhältnisse auf der Unterseite der Verstärkungsschicht. Bei der nachfolgenden Modellentwicklung werden deshalb nur noch die Bereiche „gerissen“ und „ungerissen“ auf der Laschenunterseite als Bezugsebene betrachtet. Vereinfachend wird hierfür im Folgenden nur der zweite Index I und II verwendet, der die Zustände I (ungeris-

sen) und II (gerissen) bezeichnet (Bild 9.2). Die maximal über den Verbund übertragbare Kraft im Bruchzustand wird mit $F_{L,Vu}$ bezeichnet.

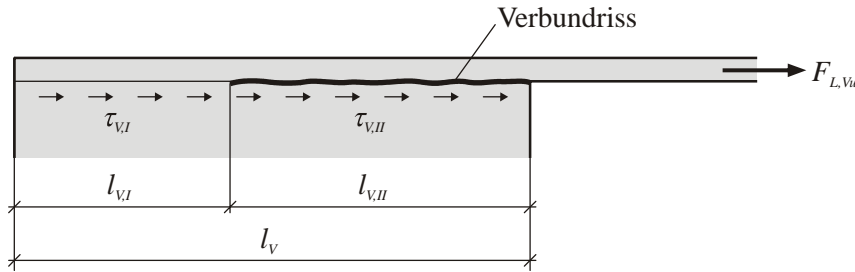


Bild 9.2 Definition der Bezeichnungen für die Modellbildung

Die Verbundbruchkraft $F_{L,Vu}$ setzt sich aus dem Verbundkraftanteil im gerissenen Bereich ($l_{V,II}$), der über den Verbundriss übertragen wird, und dem Verbundkraftanteil im ungerissenen Restbereich der Verbundlänge ($l_{V,I}$) im Bruchzustand zusammen (Gl. (9.3)).

$$F_{L,Vu} = b_L \cdot (l_{V,I} \cdot \tau_{V,I} + l_{V,II} \cdot \tau_{V,II}) \quad (9.3)$$

- mit $F_{L,Vu}$.. Verbundbruchkraft,
 b_L Breite der Verstärkungsschicht,
 $l_{V,I}$ Länge des ungerissenen Bereiches der Verbundlänge,
 $l_{V,II}$ Länge des gerissenen Bereiches der Verbundlänge,
 $\tau_{V,I}$... Verbundbruchspannung in $l_{V,I}$ und
 $\tau_{V,II}$... Verbundspannung in $l_{V,II}$.

Entlang des Verbundrisses findet das Versagen in Abhängigkeit vom wirksamen Flächenanteil der textilen Bewehrungsstruktur entweder in der Ebene der textilen Bewehrung oder in der oberflächennahen Altbetonschicht statt. Dabei ist der kleinere der beiden Werte für die durch Rissreibung zu übertragende Verbundspannung $\tau_{V,II}$ im Verbundriss $l_{V,II}$ maßgebend (Gl. (9.4)).

$$\tau_{V,II} = \min(\tau_{V,II,c}, \tau_{V,II,tx}) \quad (9.4)$$

- mit $\tau_{V,II,c}$.. Verbundspannung in $l_{V,II}$ im Altbeton und
 $\tau_{V,II,tx}$.. Verbundspannung in $l_{V,II}$ in der Textilebene.

Die Verbundspannung $\tau_{V,II,tx}$ in der Ebene der textilen Bewehrung bezieht sich zunächst auf die Fläche des gesamten Verbundrisses. Berücksichtigt man, dass die Schubkraft in der Textilebene nur durch den Feinbetonmatrixanteil zwischen den Fäden der textilen Struktur übertragen wird, so ergibt sich eine wirksame durch Rissreibung im Feinbeton zu übertragende Verbundspannung, die sich nach Gl. (9.5) bestimmt.

$$\tau_{V,II,fc} = \frac{\tau_{V,II,tx}}{k_{A,eff}} \quad (9.5)$$

Für den ungerissenen Restbereich der Verbundlänge $l_{V,I}$ sind wiederum zwei verschiedene mögliche Versagensebenen zu unterscheiden. Zum einen kann sich das plötzliche Versagen des Restbereiches in der Textilebene fortsetzen, wenn sich der wachsende Verbundriss entlang der Textilebene gebildet hat. In diesem Falle ist, genau wie beim oben beschriebenen Verbundriss, die wirksame Feinbetonfläche in der entstehenden Bruchebene zu berücksichtigen. D. h. die effektive Verbundspannung im Feinbeton im Bruchzustand bestimmt sich analog dem oben angegebenen Zusammenhang für den Verbundriss aus der Bruchschubspannung $\tau_{Vu,I}$ für die gesamte Restfläche nach Gl. (9.6).

$$\tau_{V,I,fcu} = \frac{\tau_{Vu,I}}{k_{A,eff}} \quad (9.6)$$

Zum anderen kann der bis zum Bruch im Zustand I verbleibende Restbereich der Verbundlänge auch im Altbetonuntergrund versagen. Dieser Fall tritt insbesondere dann ein, wenn sich der wachsende Verbundriss entlang der oberflächennahen Altbetonschicht gebildet hat. Ein plötzliches Versagen des Restbereiches im Altbetonuntergrund kann aber auch einem Verbundrisswachstum entlang der Textilebene folgen. Der Altbeton selbst ist nicht durch eine textile Bewehrung gestört. Somit ist die Verbundschubspannung im Altbeton im Bruchzustand identisch mit der Bruchschubspannung $\tau_{Vu,I}$ für die bis dahin noch im Zustand I befindliche Restfläche (Gl. (9.7)).

$$\tau_{V,I,cu} = \tau_{Vu,I} \quad (9.7)$$

Die maßgebende Versagensebene ist auch im ungerissenen Restbereich der Verbundlänge abhängig vom wirksamen Flächenanteil $k_{A,eff}$ in der Ebene der textilen Bewehrung. Maßgebend für das Versagen ist demnach die kleinere der beiden Bruchschubspannungen $\tau_{Vu,I}$, die sich aus der Schubspannung des Altbetons bzw. des Feinbetons in der Textilebene ergeben (Gl. (9.8)).

$$\tau_{Vu,I} = \min\left(\tau_{V,I,cu}, k_{A,eff} \cdot \tau_{V,I,fcu}\right) \quad (9.8)$$

Somit kann für die Verbundbruchkraft $F_{L,Vu}$ aus Gl. (9.3) geschrieben werden (Gl. (9.9)):

$$F_{L,Vu} = b_L \cdot \left(l_{V,I} \cdot \min\left(\tau_{V,I,cu}, k_{A,eff} \cdot \tau_{V,I,fcu}\right) + l_{V,II} \cdot \min\left(\tau_{V,II,c}, k_{A,eff} \cdot \tau_{V,II,fc}\right) \right) \quad (9.9)$$

Die maximal von einer bestimmten Verbundlänge l_V aufnehmbare Kraft $F_{L,Vu}$ kann auf diese Weise aus der über Rissreibung im Feinbeton oder im Altbetonuntergrund übertragbaren Schubspannung und der Bruchschubspannung des Alt- bzw. Feinbetons parallel zur Verbundfuge ermittelt werden. Der hier entwickelte Modellvorschlag gilt unter der Annahme, dass im gesamten Verbundbereich eine reine Scherbeanspruchung vorliegt.

9.4 Interaktion von Schub- und Haftzugbeanspruchung

9.4.1 Allgemeines

Anhand der sich entwickelnden Schrägrisse in der textilbewehrten Feinbetonverstärkungsschicht innerhalb des Verankerungsbereiches (siehe Abschnitt 7.2.2, Bild 7.17) zeigt sich eindeutig, dass entlang der Verbundfuge keine reine Scherbeanspruchung herrscht. Die Neigung der schrägen Risse weist darauf hin, dass die Hauptzugspannungen im Verankerungsbereich nicht parallel zur Verstärkungsschicht verlaufen sondern auch eine Querkzugkomponente besitzen. Diese Querkzugkomponente entspricht einer Oberflächenhaftzugbeanspruchung und ist zusätzlich zur Betrachtung der Verbundschubspannungen bei der Modellbildung zu beachten. Zur Interaktion zwischen Schub- und Haftzugbeanspruchung im Verankerungsbereich werden im Folgenden einige Modellierungsansätze gegeben.

9.4.2 Erweiterter Schub-Haftzug-Ansatz

Aufgrund der Interaktion zwischen Schub- und Haftzugbeanspruchung im Verankerungsbereich ist eine Berücksichtigung der Mixed-Mode-Beanspruchung erforderlich. Das im Abschnitt 9.3 vorgestellte einfache Modell ist daher um den Einfluss der zusätzlichen ortsabhängigen Schälbeanspruchung (Mode I) im ungerissenen Bereich der Verbundlänge zu erweitern. Der Einfluss der Schälbeanspruchung (Mode I) wurde mit Hilfe der im Kapitel 6 dargestellten Haftzugversuche von der Scherbeanspruchung (Mode II) getrennt untersucht.

Bild 9.3 zeigt die notwendige Erweiterung des reinen Schub-Modells aus Bild 9.2 um die infolge Zugkraftumlenkung entstehende Querkzugbeanspruchung. Diese ist gleichbedeutend mit einer Haftzugbeanspruchung σ_{at} (Mode I) des ungerissenen Verbundbereiches. Das vertikale Kräftegleichgewicht ergibt eine dieser Haftzugkraft äquivalente Querkdruckkraft, welche die Übertragung von Rissreibungskräften im gerissenen Bereich der Verbundlänge ermöglicht. Die in der Verstärkungslasche vorhandene Zugkraft wird nach Gl. (9.3) über einen Anteil Haftscherverbund im ungerissenen Bereich und einen Anteil Reibungsverbund im Bereich des Verbundrisses in den Altbeton übertragen. Zusätzlich wird die infolge des Kraftversatzes zwischen der Zugkraft in der Verstärkungsschicht und der resultierenden Verankerungskraft im Altbetonuntergrund entstehende Querkzugkraft über den Haftverbund im ungerissenen Bereich der Verbundlänge übertragen. Mit fortschreitendem Verbundrisswachstum verkürzt sich der zur Übertragung der Haftzugkräfte zur Verfügung stehende ungerissene Verbundbereich (siehe Abschnitt 7.3.11). Das Überschreiten der Haftzugfestigkeit im ungerissenen Bereich führt letztendlich zum plötzlichen Versagen des gesamten Verbundbereiches. Auf die genauen mechanischen Zusammenhänge soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Sie lassen sich sehr gut anhand eines Stabwerkmodells erklären, welches in den nachfolgenden Abschnitten eingeführt wird.

Die erforderliche Verankerungslänge $l_{V,erf}$ für eine bestimmte Zugkraft F_L ergibt sich additiv aus der zum Versagen des Haftverbundes führenden Länge $l_{V,I,u}$ und der Verbundrisslänge $l_{V,II}$. Mit der Haftzugfestigkeit als Bruchkriterium kann die Länge des ungerissenen Bereiches im Bruchzustand für eine bestimmte zu verankernde Laschenzugkraft bestimmt wer-

den, so dass die zur Verfügung stehende ungerissene Restfläche zur Übertragung der maximal aufnehmbaren Haftzugspannung genügt. Über Haftscherverbund kann über diesen Bereich ein Teil der Laschenzugkraft verankert werden. Der andere Teil der Laschenzugkraft wird durch Reibungskräfte über den Verbundriss übertragen. Die zugehörige Länge des Verbundrisses ergibt sich somit aus der Kraftaufteilung der Laschenzugkraft zwischen Haftscher- und Reibungsverbund.

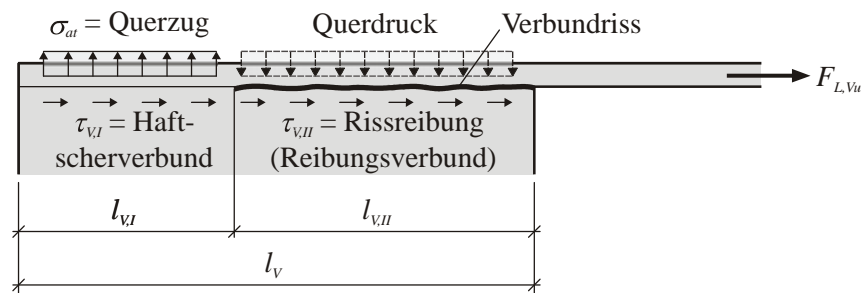


Bild 9.3 Bezeichnungen im erweiterten Modell

9.4.3 Stabwerkmodell

Die Verankerung einer Zugkraft aus einem Bewehrungselement in der umgebenden Betonmatrix lässt sich auf elegante Weise durch ein Stabwerkmodell beschreiben (SCHLAICH & SCHÄFER [92]). Dies gilt ebenfalls für eine nachträglich von außen aufgeklebte Verstärkung (vgl. Abschnitt 2.2, Bild 2.4, a)). Bemerkenswert ist, dass bei den im Kapitel 2.2 genannten Autoren kein Stabwerkmodell zur Anwendung gekommen ist, obwohl dies eigentlich ein einfach handhabbares Werkzeug zur Beschreibung des Verankerungsbereiches darstellt. Die Autoren konzentrieren sich vielmehr auf eine Beschreibung des Zusammenhanges zwischen einer Verbundspannung und der zugehörigen Verschiebung der Verstärkungsschicht an einem bestimmten Punkt des Verankerungsbereiches. Da sich eine solche Betrachtungsweise für Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton nicht eignet, ist die Anwendung eines Stabwerkmodells zur Beschreibung der Endverankerung einer textilbewehrten Feinbetonverstärkung auf einem Altbetonuntergrund naheliegend.

Bild 9.4 zeigt den Kräfteverlauf für den im Kapitel 7 untersuchten Probekörper anhand eines Stabwerkmodells. Die aus den Verstärkungslaschen eingeleitete Zugkraft stützt sich über schräge Druckstreben gegen das Widerlager ab. Entsprechende Zug- und Druckstreben stellen das Gleichgewicht in den Knoten her.

Das Detail des Verankerungsbereiches der textilbewehrten Feinbetonlasche ist in Bild 9.5 dargestellt (CURBACH & ORTLEPP [22]). Das Bild zeigt die angenommenen Zug- und Druckstreben im Verbundbereich eines halben Probekörpers. Die Zugstreben werden in das Modell senkrecht zur Oberfläche eingeführt. Entsprechend der Spannungstrajektorien müssten die Zugstreben zwar theoretisch schräg verlaufen, doch lassen sich die experimentell ermittelbaren Werkstoffkennwerte zur Haftzugfestigkeit nur durch senkrecht zur Oberfläche verlaufende Zugstreben in das Modell integrieren.

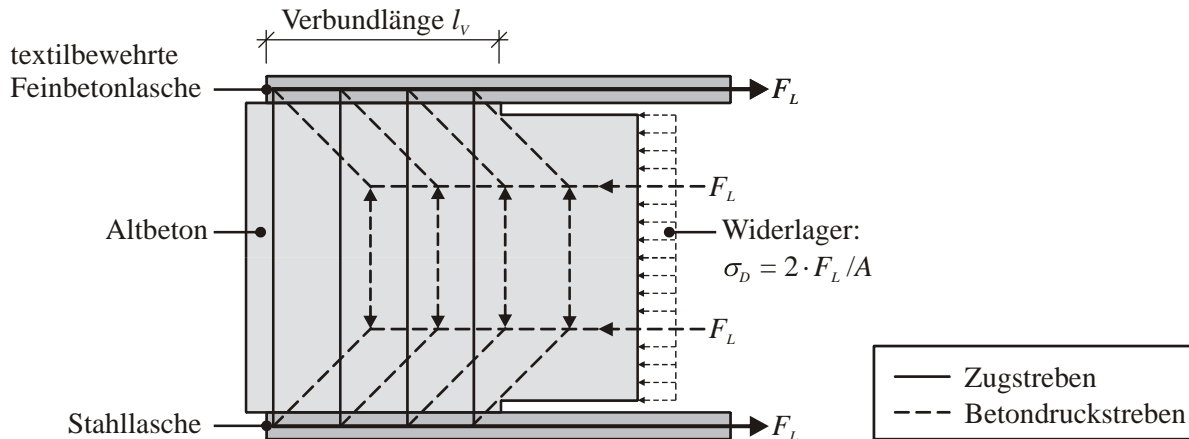


Bild 9.4 Stabwerkmodell für den im Kapitel 7 untersuchten Probekörper

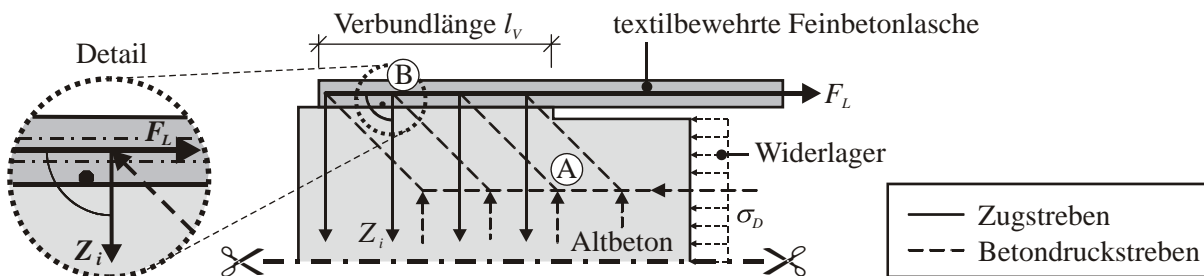


Bild 9.5 Stabwerkmodell für den Verbundbereich aus ORTLEPP, ORTLEPP & CURBACH [77]

Die textilbewehrte Feinbetonlasche wird durch eine Zugkraft F_L belastet, welche über den Verankerungsbereich in den Altbetongrundkörper eingeleitet werden muss. Hierzu steht eine bestimmte Verbundlänge l_v zur Verfügung. Infolge des horizontalen Kräftegleichgewichts wirkt im Altbeton vom Widerlager ausgehend eine der Zugkraft F_L entsprechende Druckkraft entgegen. Diese wird zum Bereich der Verbundlänge in ihrer Richtung umgelenkt. Die schrägen Druckstreben werden für die einfache Betrachtungsweise in erster Näherung einheitlich zu 45° angenommen.

Damit an den Umlenkpunkten **(A)** das Gleichgewicht der Kräfte erhalten bleibt, bauen sich Druckstreben in Querrichtung auf. Diese können problemlos von Altbeton aufgenommen werden. Die entstehenden schrägen Druckstreben stützen sich gegen die Zugstrebe aus der Verstärkungsschicht. Sie ersetzen die in anderen Modellvorstellungen verwendeten Schubspannungen parallel zur Verbundfuge. Zur Gewährleistung des Kräftegleichgewichts an den in den Verstärkungsschicht entstehenden Knotenpunkten **(B)** sind Zugstreben Z_i erforderlich. Senkrecht zur Verstärkungsschicht angetragen charakterisieren sie die aus der Umlenkwirkung der einzuleitenden Laschenkraft entstehende Haftzugspannung.

Ein solcher Knotenpunkt in der Verstärkungslasche ist im Bild 9.5 als Detail dargestellt. Die senkrecht auf der Laschenkraft F_L stehende Zugkraft Z_i stellt das Gleichgewicht im Knoten her und ist dafür verantwortlich, dass die Feinbetonlasche das Bestreben hat, sich vom Altbeton abzuschälen. Wird die vorhandene Verankerungslänge l_v unter ein bestimmtes erforderliches Maß verkürzt, können diese senkrechten Zugkräfte nicht mehr vom Verbundsystem

aufgenommen werden – es kommt zum Verbundversagen. Ein solches Versagen infolge Abheben der Lasche wird auch als „Schälbruch“ bezeichnet.

Betrachtet man das in Versuchen auftretende Rissbild in der Verstärkungslasche und die Veränderung der Rissneigungswinkel (siehe Bild 7.53) innerhalb der Verbundlänge, so wird deutlich, dass die Annahme der Betondruckstreben zu einheitlich 45° tatsächlich nicht gewährleistet ist. Hierauf wird in den folgenden Abschnitten genauer eingegangen.

9.4.4 Einfluss der Rissneigungswinkel

Zusätzlich zu der im Abschnitt 9.3 gezeigten Unterteilung des Verbundbereiches in einen gerissenen und einen ungerissenen Bereich ist bei Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton besonders Augenmerk auf die Entwicklung der Schrägrissbildung zu richten. Anhand der entstehenden Risswinkel (siehe auch Bild 7.17 und Bild 7.53) kann zweifelsfrei festgestellt werden, dass sich die Neigung der Hauptzugspannung zum Zeitpunkt der Rissentstehung entlang der Verbundlänge verändert. Die Risse werden im hinteren Verbundbereich, d. h. in Richtung des unbelasteten Verbundbereichsendes, zunehmend flacher. Da ein Riss durch Überschreiten der Hauptzugspannung im Beton im rechten Winkel zu dieser entsteht, können aus den Rissneigungswinkeln Rückschlüsse auf die Richtung der Hauptzugspannung zum Zeitpunkt der Rissentstehung gezogen werden. Die zum unbelasteten Verbundbereichsende hin flacher werdenden Risse zeigen somit deutlich, dass die Neigung der Hauptzugspannung zum Ende des Verbundbereichs hin steiler wird. Die aus der Hauptzugspannung σ_1 resultierende Hauptzugkraft F_1 im Riss kann in eine parallel zur Verstärkungsschicht verlaufende Komponente S und eine senkrecht darauf stehende Komponente Z zerlegt werden (Bild 9.6), wobei die Kraft S eine Scherbeanspruchung der Verbundfuge und die Zugkraft Z eine Abschälbeanspruchung der Verstärkungsschicht repräsentiert. Die beiden Kraftkomponenten S und Z der Hauptzugkraft F_1 am Riss berechnen sich in Abhängigkeit vom Risswinkel α nach Gl. (9.10) und Gl. (9.11).

$$S(\alpha) = \sin \alpha \cdot F_1 \quad (9.10)$$

$$Z(\alpha) = \cos \alpha \cdot F_1 \quad (9.11)$$

Wie in Bild 9.6 zu sehen ist, ändert sich mit dem Risswinkel α die Neigung der Hauptzugkraft F_1 und mit ihr das Verhältnis S/F ihrer Komponenten senkrecht und parallel zur Verstärkungsschicht. Die Änderung des Kräfteverhältnisses S/F entspricht hierbei einer Änderung des Verhältnisses zwischen der Schälbeanspruchung Z und der Abscherbeanspruchung S . Es ist zu erkennen, dass mit flacher werdender Neigung des Risswinkels α Die Größe der Abschälkomponente Z im Verhältnis zur Größe der Scherkraftkomponente S zunimmt.

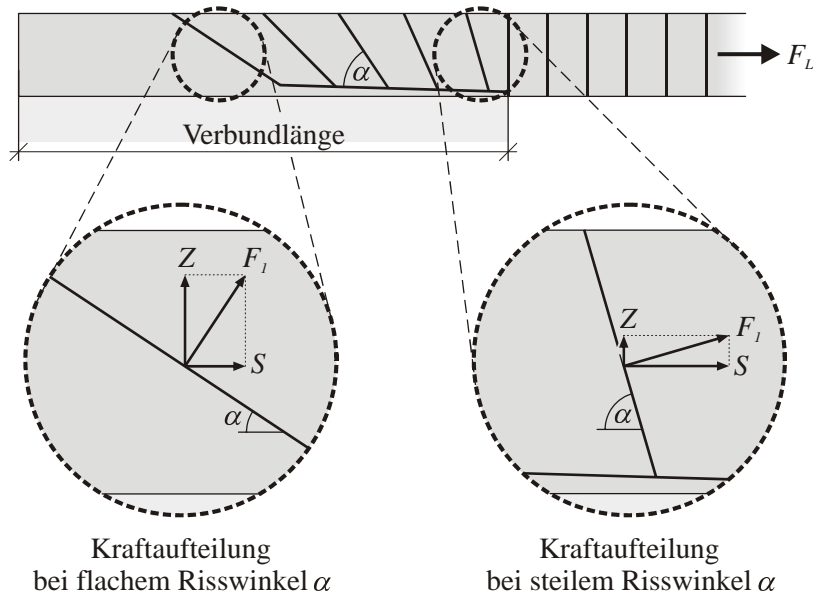


Bild 9.6 Kräfteverhältnisse bei unterschiedlichen Rissneigungswinkeln

Bild 9.7 zeigt die Entwicklung der Scher- bzw. Abschälkomponente, jeweils bezogen auf die Hauptzugkraft F_1 , aufgetragen über die Verbundlänge l_v . Man sieht, dass mit zunehmender Koordinate x in Richtung des unbelasteten Endes des Verbundbereiches (im Diagramm links) die Scherbeanspruchung langsam abnimmt. Die Schälbeanspruchung hingegen steigt vom Wert Null am belasteten Anfang der Verbundlänge schon zur Mitte des Verbundbereiches hin stark an. Zum unbelasteten Ende des Verbundbereiches hin steigt die Schälbeanspruchung langsamer aber stetig weiter an.

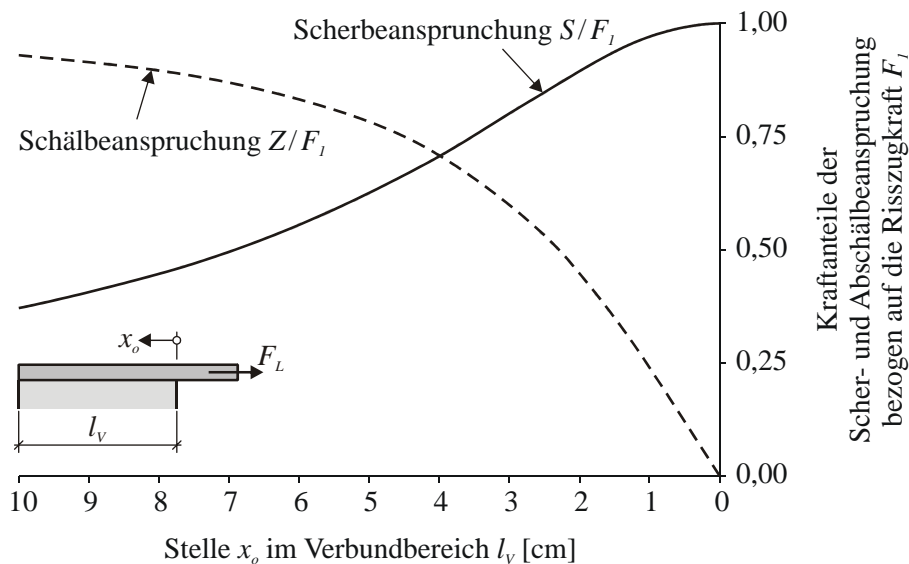


Bild 9.7 Verläufe der bezogenen Scher- und Abschälkräfte über die Verbundlänge

Es ist deutlich zu erkennen, dass am belasteten Anfangsbereich der Verbundlänge die Scherbeanspruchung überwiegt. Zum unbelasteten Ende des Verbundbereiches hin überwiegt jedoch zunehmend der Anteil der Schälbeanspruchung. Betrachtet man die Summe der Anteile

Scher- und Abschälbeanspruchung aus Bild 9.7 und normiert diese auf den Wert „1“, ergibt sich die Darstellung in Bild 9.8.

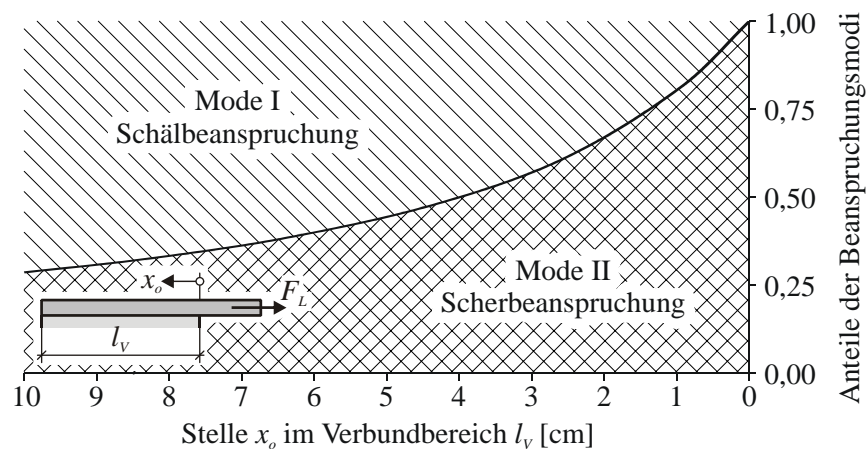


Bild 9.8 Anteile der Mode I und Mode II-Beanspruchung im Verbundbereich

Eine reine Scherbeanspruchung, wie sie an der Stelle $x = 0$ vorliegt, wird nach der Bruchmechanik auch als „Mode II“-Beanspruchung bezeichnet. Sie entspricht in diesem Fall der Kraftkomponente S parallel zur Verstärkungsschicht. Bei der Kraftkomponente Z , die senkrecht zur Verstärkungsschicht wirkt, handelt es sich hingegen um eine Zugbeanspruchung. Diese wird nach der Bruchmechanik als „Mode I“-Beanspruchung bezeichnet.

Wie Bild 9.8 deutlich zeigt, liegt nur am Anfang des Verbundbereiches bei $x = 0$ eine reine Mode II-Beanspruchung des Verbundbereiches (Scherbeanspruchung) vor. Mit zunehmendem x in Richtung des unbelasteten Endes des Verbundbereiches kommt verstärkt eine Mode I-Beanspruchung (Schälbeanspruchung) hinzu. Das bedeutet, dass im Verbundbereich eine Mixed-Mode-Beanspruchung herrscht, wobei im lastabgewandten hinteren Bereich der Verbundlänge sogar die abschälende Mode I-Beanspruchung zunehmend überwiegt.

Aus diesem Grund ist eine Berücksichtigung der Mixed-Mode-Beanspruchung erforderlich. Eine entsprechende notwendige Erweiterung des vorgeschlagenen einfachen Modells um den Einfluss der zusätzlichen ortsabhängigen Schälbeanspruchung (Mode I) wurde bereits im Abschnitt 9.4.2 behandelt. Bei der Beschreibung mittels Stabwerkmodell wird der Einfluss einer Schälbeanspruchung durch die Zugstreben automatisch berücksichtigt.

9.4.5 Stabwerkmodell mit veränderlicher Druckstrebenneigung

Die im Abschnitt 9.4.3 getroffene Annahme der Neigungswinkel der Betondruckstreben muss unter Beachtung des in der Verstärkungsschicht entstehenden Rissbildes im Verbundbereich präzisiert werden. Die energetisch günstigste Wahl der Zug- und Druckstreben in einem Stabwerkmodell entspricht der Ausrichtung der Hauptspannungen. Während die Hauptzugspannung, die zur Bildung der Schrägrisse im Verbundbereich führt, senkrecht zu diesen wirkt, verläuft die orthogonal zur Hauptzugspannung wirkende Hauptdruckspannung parallel zu den entstehenden Schrägrissen. Die schrägen Betondruckstreben werden unter

Zugrundelegung der im Abschnitt 7.3.9 ermittelten Risswinkelbeziehung (Bild 7.55) mit einem veränderlichen Neigungswinkel entsprechend dem Rissbild in der Verstärkungsschicht in das Modell eingeführt (Bild 9.9). Bei der Wahl der Zugstreben wird zugunsten der Implementierungsfähigkeit des experimentell ermittelbaren Werkstoffkennwertes der Oberflächenhaftzugfestigkeit auf eine Anordnung entsprechend der Hauptzugspannung bewusst verzichtet.

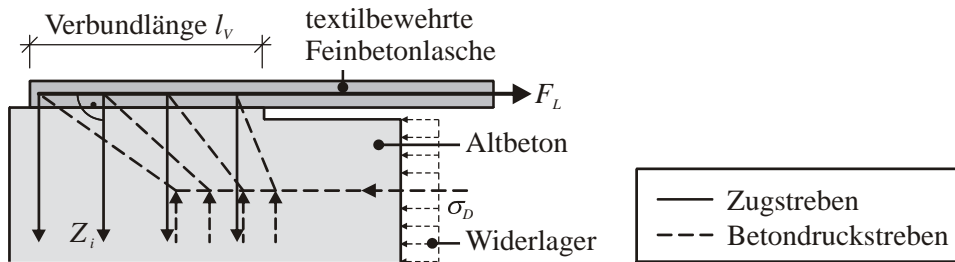


Bild 9.9 Stabwerkmodell für den Verbundbereich mit veränderlicher Druckstrebenneigung

Unterstellt man nun, dass die in der Verstärkungsschicht vorhandene Zugkraft F_L zu gleichen Teilen über die Knotenpunkte in den schrägen Druckstreben verankert wird, so ergibt sich am lastseitigen Beginn der Verankerungslänge infolge der veränderlichen Druckstrebenneigung eine höhere Belastung der Zugstreben als am lastabgewandten Ende (Bild 9.10, a)).

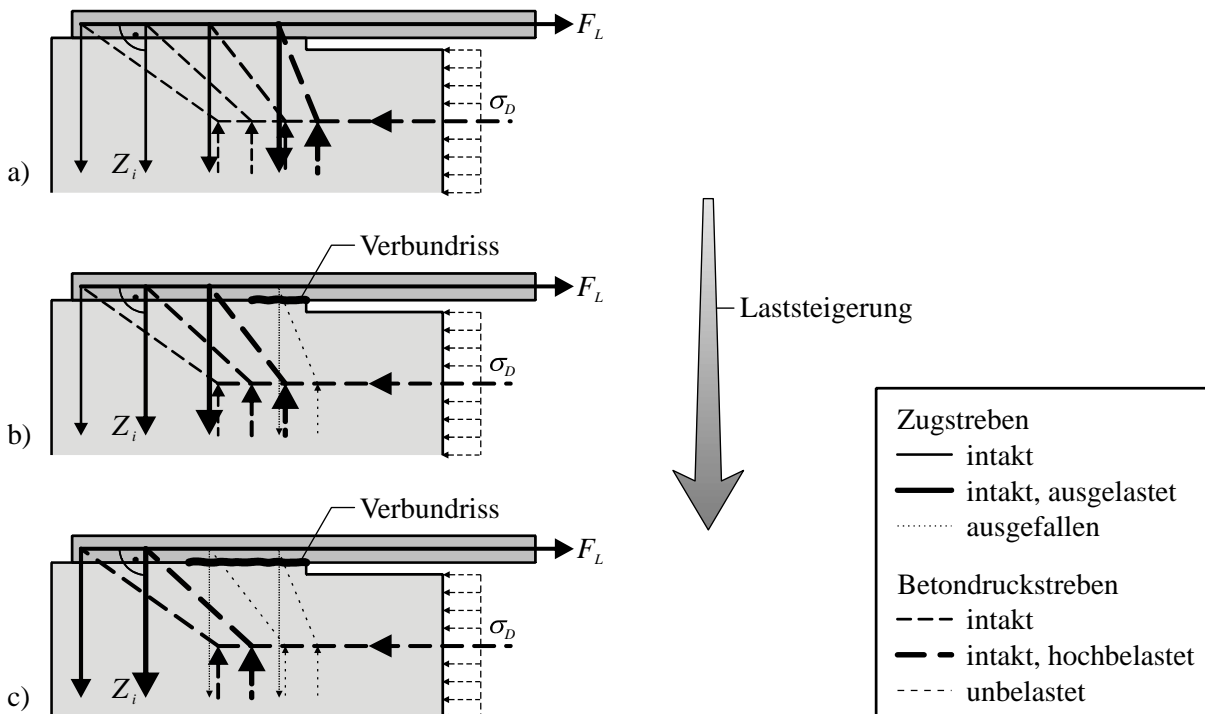


Bild 9.10 ausfallende Zugstreben bei Verbundrissbildung

Bei einer Steigerung der Zugkraft in der Verstärkungsschicht führt die damit verbundene Lasterhöhung in den Zugstreben zum Erreichen der Haftzugfestigkeit am lastseitigen Beginn

der Verbundlänge. Bei Überschreiten der Haftzugfestigkeit fallen die entsprechenden Zugstreben aus, was zur Bildung eines Verbundrisses führt (Bild 9.10, b)), der mit weiterer Steigerung der Laschenzugkraft vom lastseitigen Beginn in den Verbundbereich hineinwächst, wenn in den dahinterliegenden Bereichen der Verbundlänge weitere Zugstreben ausfallen (Bild 9.10, c)).

9.4.6 Mechanische Zusammenhänge der Verbundkraftübertragung

Die im Bild 9.10 gezeigte schematische Darstellung der im Zuge der Verbundrissbildung ausfallenden Zugstreben des Stabwerkmodells suggeriert die alleinige Verbundkraftübertragung über den ungerissenen Restbereich der Verankerungslänge, da sich in dieser vereinfachten Darstellung infolge des vertikalen Kräftegleichgewichts am Knoten dann auch die schrägen Druckstreben zu Null ergeben. Dabei würde jedoch der über Rissreibung im Verbundriss übertragbare Verbundkraftanteil vernachlässigt.

Um die Kraftübertragung über den Verbundriss zu berücksichtigen, ist eine genauere Betrachtung der mechanischen Zusammenhänge unter Berücksichtigung der Rissbreite des sich entwickelnden Verbundrisses anzustellen. Bild 9.11 veranschaulicht die Vorgänge im Verankerungsbereich unter fortschreitendem Verbundrisswachstum.

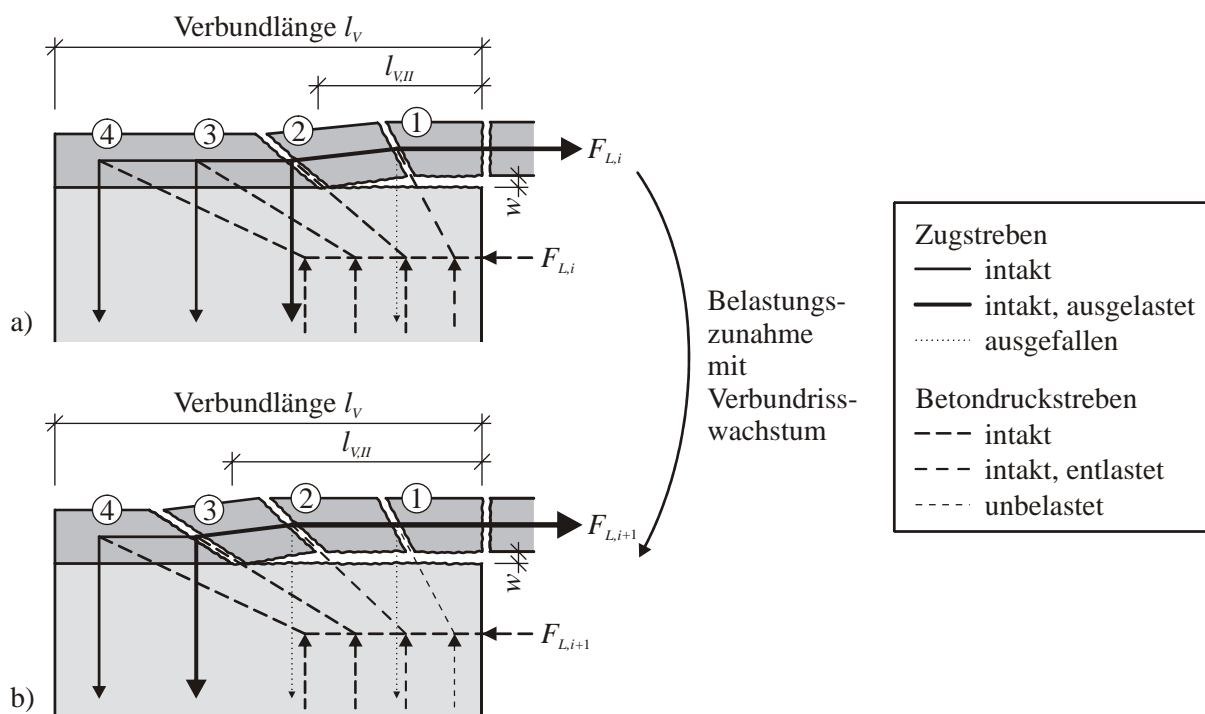


Bild 9.11 mechanische und geometrische Zusammenhänge beim Verbundrisswachstum

Die textilbewehrte Feinbetonschicht wird auf das zu verstärkende Altbetonbauteil oberflächlich aufgebracht. Somit ist im Verbundbereich kein Querdruck vorhanden, welcher die Verstärkungsschicht zu einer festen, formschlüssigen Verbindung mit dem Altbetonuntergrund zwingen würde. Der im ungerissenen Zustand vorhandene Formschluss wird lediglich durch

bestehende Haftzugkräfte aufrechterhalten. Wenn die von der Verbundfuge aufnehmbaren Haftzugkräfte überschritten werden, kommt es zur Bildung eines Verbundrisses. Im Stabwerkmodell fällt in diesem Fall eine Zugstrebe aus und entlastet damit die im selben Knoten ① angreifende Druckstrebe (Bild 9.11, a)).

Die Dehnung der Verstärkungsschicht unter der vorhandenen Zugbelastung führt zu einer Relativverschiebung in horizontaler Richtung der beiden Rissufer gegeneinander. Infolge der Rauigkeit der Rissufer und der vorhandenen Verzahnung öffnet sich der Verbundriss um eine Breite w , da sich die Verstärkungsschicht aufgrund des fehlenden Querdruckes im gerissenen Bereich von der Altbetonoberfläche wegbewegen kann. Das Abheben des gerissenen Laschenbereiches führt zur Schiefstellung des letzten Segmentes zwischen den Rissen ① und ②. Somit ergibt sich in diesem Bereich eine schiefe Rissöffnung und damit ein Verdrehen des einzelnen Segmentes zwischen den Rissen, was auch in der photogrammetrischen Aufnahme beobachtet werden konnte.

Die Rissöffnung w bewirkt im Knoten ① eine Umlenkung der Zugkraft in der textilbewehrten Verstärkungsschicht (Bild 9.11, a)). Infolge dieser Umlenkung wird in diesem Knoten trotz der ausgefallenen Zugstrebe eine schräge Druckstrebe aufgebaut. Diese Druckstrebe ermöglicht die Übertragung von Reibungskräften über die Kornverzahnung im Verbundriss. Diese ist im Bereich der schiefen Rissöffnung am größten, da sich die Kornverzahnung bei kleinen Rissbreiten am stärksten auswirkt.

Ab einer bestimmten Rissbreite w haben sich die Rissufer soweit voneinander entfernt, dass keine Kornverzahnung mehr vorhanden ist, über die Schubkräfte übertragen werden können (Bild 9.12, rechts). Der Versatz der Zugkraft innerhalb der Verstärkungsschicht infolge der Rissöffnung führt ebenso zu einer Umlenkung der Zugkraft im Knoten ② (Bild 9.11, a)). Die im letzten Schrägriss angreifende Zugstrebe wird demnach stärker belastet als die dahinterliegenden Zugstreben ③ und ④.

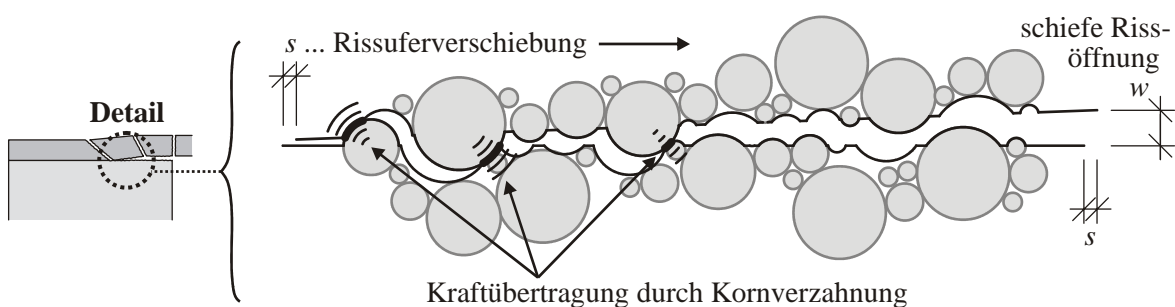


Bild 9.12 Kornverzahnung infolge Relativverschiebung bei schiefer Rissöffnung

Bei weiterer Steigerung der zu verankernden Zugkraft der Verstärkungsschicht führt die hohe Auslastung der ersten, noch intakten Zugstrebe ② im Bild 9.11, a) zum Ausfall dieser und somit zum weiteren Wachstum des Verbundrisses mit gleichzeitiger Bildung eines neuen, flacher geneigten Schrägrisses ③ (Bild 9.11, b)). Infolge der rauen Rissufer hebt sich das Segment zwischen den Rissen ① und ② im Ganzen vom Altbetonuntergrund ab, während sich das dahinterliegende Segment zwischen den Rissen ② und ③ schief stellt. Der Bereich

der schiefen Rissöffnung verschiebt sich also mit wachsendem Verbundriss in Richtung des unbelasteten Endes des Verankerungsbereiches.

Mit dem nun eintretenden Ausfall der Zugstrebe ② geht eine Entlastung der im Knoten ② angreifenden Druckstrebe einher, welche nun nur noch durch die Umlenkung der Laschenzugkraft belastet wird (Bild 9.11, b)). Diese Druckstrebe ist gleichbedeutend mit der über Rissreibung übertragbaren Schubkraft im Verbundriss. Gleichzeitig verschwindet die Umlenkung der Laschenzugkraft im Knoten ① fast völlig, so dass die dort angreifende Druckstrebe nahezu keine Last mehr erhält. Die Veränderung der Knotengeometrie mit der entlasteten Druckstrebe beschreibt die nunmehr vergrößerte Rissbreite w , ab der keine Kornverzahnung zur Schubkraftübertragung mehr vorhanden ist. Reibungskräfte über den Verbundriss sind demnach im Wesentlichen nur im Bereich der schiefen Rissöffnung übertragbar, wo infolge der Umlenkung der Laschenzugkraft der dazu notwendige Querdruck induziert wird.

Der Ausfall der Zugstreben ① und ② im Bild 9.11, b) im Bereich des Verbundrisses führt des Weiteren zu einer Umlagerung der Haftzugkräfte auf den hinteren ungerissenen Teil des Verankerungsbereiches, der sich mit zunehmendem Verbundrisswachstum verkürzt. Die Auslastung der verbleibenden Zugstreben steigt mit zunehmender Zugbelastung der Verstärkungsschicht und gleichzeitiger Verkürzung des ungerissenen Restbereiches. Die Belastung der im letzten Schrägriss angreifenden Zugstrebe ③ erhöht sich gegenüber der dahinterliegenden Zugstrebe ④ zusätzlich durch den Zugkraftversatz zwischen Knoten ② und ③.

Wenn die in der Verstärkungsschicht vorhandene und zu verankernde Zugkraft einen bestimmten kritischen Wert erreicht, geht das bis dahin stabile Verbundrisswachstum in ein instabiles Risswachstum über. Dies ist der Fall, wenn die mit dem Ausfallen einer Zugstrebe verbundene Umlagerung der Querkraft auf die dahinterliegende Zugstrebe so groß wird, dass diese wiederum ausfällt und sich das Versagen ohne weitere Laststeigerung bis zum Ende des Verbundbereiches fortsetzt. Dieser Effekt ist dafür verantwortlich, dass die verankerbare Zugkraft ab einem bestimmten Niveau trotz Vergrößerung der Verbundlänge nicht mehr gesteigert werden kann. Im Bild 7.62 und Bild 7.66 ist dieser Effekt durch den horizontal verlaufenden Kurvenabschnitt im Verbundkraft-Verbundlängen-Diagramm erkennbar.

9.5 Berechnungsmodell zur Ermittlung der Verankerungslänge

Zwei unterschiedliche Versagensmechanismen, das Verbundversagen im Altbetonuntergrund und das Verbundversagen durch Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung bedingen zwei unterschiedliche Beziehungen zwischen der übertragbaren Verbundkraft und der dazugehörigen Verankerungslänge. Im Versagensfall Delamination in der Textilebene ist diese Beziehung abhängig von den Flächenverhältnissen in der Ebene der textilen Bewehrung. Die erforderliche Verbundlänge zur Verankerung einer bestimmten Verbundkraft kann durch Erhöhung des wirksamen Flächenanteiles verkürzt werden. Dies funktioniert bis zu einem Grenzwert, ab dem das Versagen im Altbetonuntergrund maßgebend wird (Bild 9.13, Gl. (7.22)). Eine weitere Erhöhung des wirksamen Flächenanteiles jenseits dieser Grenze bewirkt keine Verkürzung der Verankerungslänge mehr. Wird Gl. (7.22) nach der Verbundlänge umgestellt, so ergibt sich Gl. (9.12) als Bestimmungsgleichung zur Ermittlung der für

eine bestimmte zu verankernde Zugkraft erforderliche Verankerungslänge. Bild 9.13 gibt die in Gl. (7.22) bzw. Gl. (9.12) beschriebene Interaktion als Ablesediagramm an.

$$\text{erf } l_v^{[\text{cm}]} = \min \left(\frac{1}{0,1193} \cdot \text{arctanh} \left(\frac{F_{L,Vu}^{[\text{kN/m}]}}{270,0} \right), \frac{1}{0,3793 \cdot k_{A,\text{eff}}} \cdot \text{arctanh} \left(\frac{F_{L,Vu}^{[\text{kN/m}]}}{249,4} \right) \right) \quad (9.12)$$

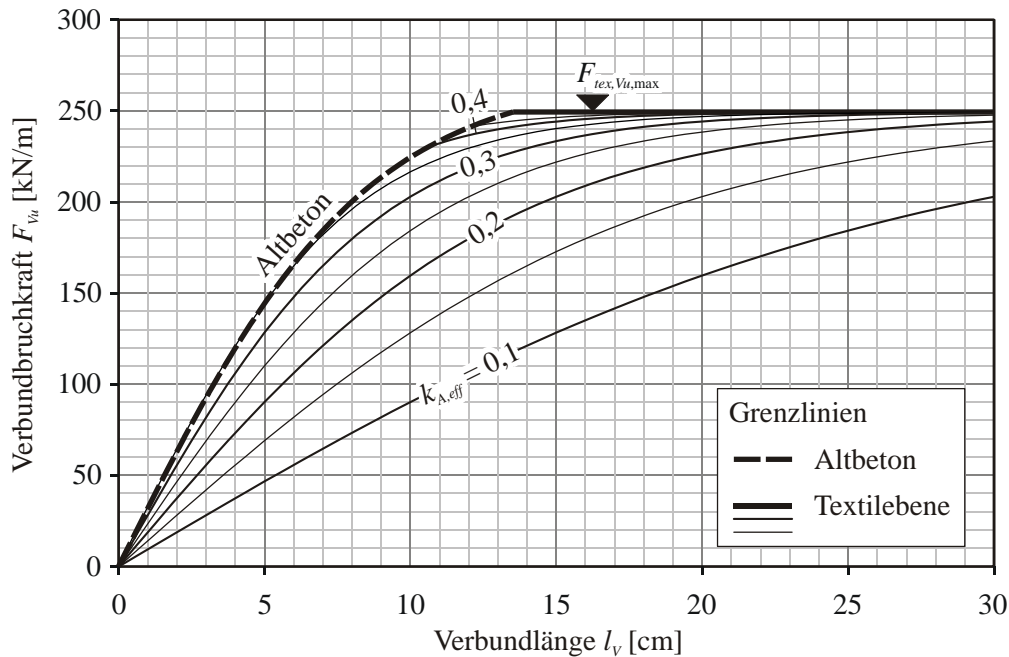


Bild 9.13 Ablesediagramm zur Bestimmung der erforderlichen Verbundbruchkraft bzw. Verankerungslänge

Aus dem Diagramm im Bild 9.13 kann die erforderliche Verankerungslänge l_v für jede zu verankernde Verbundkraft $F_{L,Vu}$ in Abhängigkeit vom wirksamen Flächenanteil $k_{A,\text{eff}}$ abgelesen werden. Zwischenwerte von $k_{A,\text{eff}}$ sind dabei zu interpolieren oder nach Gl. (9.12) zu berechnen. Bild 9.14 zeigt Kurven aus dem Diagramm im Bild 9.13 mit den dazugehörigen Versuchswerten.

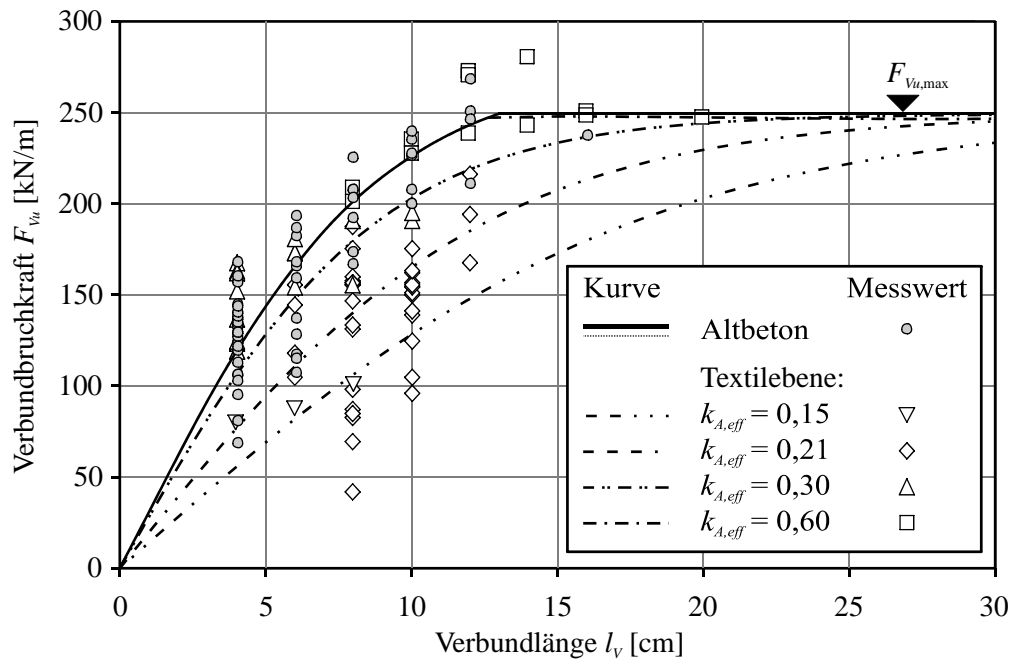


Bild 9.14 Verbundbruchkurven und Versuchswerte

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Textilbewehrter Beton steht für eine neue Verstärkungstechnologie, mit der sowohl die Tragfähigkeit als auch die Gebrauchstauglichkeit bestehender Bauwerke verbessert werden kann. Bei dieser Verstärkungstechnologie wird auf die zuvor aufgeraute Oberfläche des Altbetons eine textilbewehrte Feinbetonschicht aufgebracht. Die textile Bewehrung besteht aus Filamentgarnen, die durch einen Nähfaden miteinander verbunden und im Feinbeton eingebettet sind.

Im Vergleich zu einer Verstärkung aus stahlbewehrtem Spritzbeton bietet der textilbewehrte Beton entscheidende Vorteile. Da die nichtmetallischen Fasern im Beton nicht rosten, entfällt die übliche erforderliche Betondeckung zum Schutz der Bewehrung. Somit wird die Applikation von extrem dünnen Betonverstärkungsschichten ermöglicht, die zum einen die Zunahme des Eigengewichtes infolge der Verstärkung begrenzen und zum anderen die geometrischen Bauteilabmessungen weitestgehend erhalten. Mögliche Anwendungen sind die Verstärkung von Platten bei vorwiegender Biegebeanspruchung oder die Verstärkung von Balken bei vorherrschender Schubbeanspruchung. Mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen konnte die Wirksamkeit von Verstärkungen aus textilbewehrtem Feinbeton nachgewiesen werden.

Für die Entwicklung von Querschnittsbemessungsmodellen für verstärkte Bauteile sind Aussagen über die aufnehmbare Zugkraft in der textilbewehrten Verstärkungsschicht und die dafür erforderlichen Verankerungslängen notwendig. Die Mechanismen der Kraftübertragung von der textilbewehrten Verstärkungsschicht in den Altbeton wurden im Rahmen dieser Arbeit auf experimentellem Weg an unterschiedlichen Probekörperformen untersucht.

Als Versagenskriterium für die Verankerung sind drei mögliche Versagensebenen zu berücksichtigen, die eine getrennte Betrachtung erfordern. Dies sind der Altbetonuntergrund an sich, die Verbundfuge zwischen Alt- und Neubeton sowie die unterste, dem Altbeton zugewandte Ebene der textilen Bewehrung, wo ein Verbundversagen durch Delamination eintreten kann. Die durchgeführten Parameterstudien haben ergeben, dass ein Versagen in der Verbundfuge zwischen Altbeton und der neu aufgetragenen Textilbetonschicht ausgeschlossen werden kann, wenn eine gewisse Mindestauflagehöhe des Altbetonuntergrundes gewährleistet werden kann. Um auf der sicheren Seite zu liegen, wird hierfür ein Wert von 1 mm vorgeschlagen.

Im Zuge der experimentellen Schubuntersuchungen hat sich herausgestellt, dass zusätzlich zu den drei genannten Versagensebenen ein weiterer Mechanismus für die erforderliche Verankerungslänge maßgebend werden kann. Es handelt sich um ein mögliches Versagen des inneren Verbundes zwischen den Filamentgarnen und der sie umgebenden Feinbetonmatrix innerhalb der textilbewehrten Feinbetonschicht. Durch zusätzlich in das Versuchsprogramm aufgenommene experimentelle Untersuchungen zum Filamentgarnauszugsverhalten konnten wichtige Randbedingungen geklärt werden, unter welchen Umständen ein solches vorzeitiges Versagen des inneren Verbundes ausgeschlossen werden kann. Die wichtigste Rolle spielt dabei eine zusätzlich auf die Textilien aufzubringende Beschichtung. Auch ein kurzer Quer-

fadenabstand wirkt sich günstig auf die Verankerung der textilen Bewehrung in der Feinbetonmatrix aus.

Ohne die beiden positiv beeinflussbaren Versagensmechanismen bleiben zwei genauer zu untersuchende Versagensgrenzfälle: das Verbundversagen im Altbetonuntergrund sowie das Versagen durch Delamination in der Ebene der textilen Bewehrung. Während die erstgenannte Versagensgrenze lediglich von den vorgefundenen Eigenschaften des zu verstärkenden Altbetonuntergrundes abhängt und somit nicht durch entsprechende Maßnahmen verbessert werden kann, wird der Verbund in der textilen Bewehrungsebene von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst.

Mit Hilfe experimenteller Haftzuguntersuchungen wurde ein breit gefächertes Spektrum möglicher Einflussparameter auf die Tragfähigkeit des Verbundes in der Ebene der textilen Bewehrung untersucht. Den untersuchten Einflussfaktoren kommt dabei eine unterschiedliche Bedeutung zu. Während das Aufbringverfahren die Verbundtragfähigkeit kaum beeinflusst, wurde ein etwas größerer Einfluss der Aufbringrichtung festgestellt. Den ausschlaggebenden Einfluss auf die Tragfähigkeit des Haftverbundes in der Ebene der textilen Bewehrung liefert jedoch die textile Bewehrung selbst. Als Ergebnisse der zahlreichen Versuche ist festzuhalten, dass insbesondere die Fläche, welche zwischen den Filamentgarnen der textilen Bewehrung für die Feinbetonmatrix zur Verfügung steht, im direkten Zusammenhang mit der Haftzugfestigkeit in der Textilebene steht. Dies kann nur mit einer Störwirkung der Filamentgarne erklärt werden, da diese in Querrichtung keine Zugkräfte übertragen können. Diese Störwirkung kann auch durch eine zusätzliche Beschichtung der Textilien nicht vermindert werden. Die beschichteten Filamentgarne besitzen zwar gegenüber den unbeschichteten Filamentgarnen eine gewisse Querstabilität, jedoch kann die Kraftübertragung im Bereich der durch die Feinbetonmatrix vorgegebenen Verformungen nicht aktiviert werden. Zur Beschreibung der Störwirkung der textilen Bewehrung wird ein wirksamer Flächenanteil $k_{A,eff}$ eingeführt, der als Anteil der Feinbetonmatrix in der Ebene der textilen Bewehrung zu interpretieren ist und gleichzeitig als Werkstoffkennwert für die textile Bewehrung angesehen werden kann.

Aufgrund der herausragenden Bedeutung des wirksamen Flächenanteiles der textilen Bewehrung wird ein zuverlässiges Verfahren zur Ermittlung dieses Werkstoffkennwertes benötigt. Der wirksame Flächenanteil konnte mit bisherigen Verfahren nur unzureichend genau bestimmt werden und unterlag zudem subjektiven Einflüssen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren entwickelt, mit welchem eine objektive und zugleich sehr genaue Ermittlung dieses Wertes möglich ist.

Der wirksame Flächenanteil beeinflusst in gleichem Maße auch das Verbundtragverhalten unter Schubbeanspruchung. Hier steht die zur Übertragung einer bestimmten Zugkraft erforderliche Verankerungslänge in direktem Zusammenhang mit dem in der Textilebene vorhandenen wirksamen Flächenanteil. Unter Berücksichtigung dieses Wertes wurde eine wirksame Verbundlänge $l_{V,eff}$ definiert, welche eine regressive Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Verbundkraft und Verbundlänge für den Versagensfall Delamination in der Textilebene ermöglicht. Die maximal übertragbare Verbundkraft wird demnach unmittelbar durch die Scherfestigkeit der verwendeten Betonmatrix beeinflusst.

Als Ergebnis der durchgeführten Schubversuche wurde eine Näherungsfunktion zur Bestimmung der Verankerungslänge in Abhängigkeit von der Größe der zu verankernden Zugkraft ermittelt. Damit können Grenzlinien des Zusammenhanges zwischen Verbundkraft und Verbundlänge für jeden wirksamen Flächenanteil angegeben werden. Diese werden nach oben hin durch die Grenzlinie für die Versagensebene Altbetonuntergrund begrenzt. Daraus wurde ein unterer Mindestwert von $k_{A,eff} = 0,36$ für das optimale Textil zur wirtschaftlichen Ausnutzung der Verbundtragfähigkeit der Textilschicht ermittelt.

Bei Klebeverstärkungen ist die Angabe einer Beziehung zwischen Verbundspannung und Verschiebung der Verstärkungsschicht üblich, die am Schubprobekörper gewöhnlich mit Hilfe des Differenzenverfahrens ermittelt wird. Das Verhalten von Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Feinbeton unterscheidet sich allerdings beträchtlich von bekannten Klebeverbindungen, so dass hier völlig neue Wege zu beschreiten sind. So ergeben sich aufgrund der Materialeigenschaften spezielle Problemstellungen bei der Messdatenerfassung der Verbundversuche und der Auswertung der Ergebnisse. Dabei sind Effekte wie die Rissbildung der Verstärkungsschicht im Verbundbereich zu beachten. Diese Effekte führen dazu, dass konventionelle Messmethoden wie DMS oder IWA's hier nicht zum Einsatz kommen können. Selbst bei Einsatz der digitalen Photogrammetrie musste festgestellt werden, dass eine Messung in vor dem Versuch festgelegten konstanten Messintervallen (sog. Punktmessung) nicht zum Ziel führt.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung wurde ein neues Verfahren entwickelt, das eine rissbildorientierte Verformungsmessung ermöglicht. Damit wird es erstmals möglich, die auf der Oberfläche der Verstärkung auftretenden Relativverschiebungen kontinuierlich über den Verbundbereich zu erfassen. Die so ermittelten Daten führten zu dem Ergebnis, dass aus den stark durch Einzelrissbildung beeinflussten Verformungen unter Zuhilfenahme der zugehörigen am Dehnkörper bestimmten Spannungs-Dehnungs-Beziehung keine plausiblen Werte für Schubspannungen im Verbundbereich ermittelbar sind. Mit dem derzeitigen Kenntnisstand ist es daher nicht möglich, für das Verstärkungsmaterial Textilbeton eine Schubspannungs-Schlupf-Beziehung anzugeben. Die Verwendung einer solchen Modellvorstellung ist nach Ansicht der Verfasserin nur für Verstärkungsmaterialien mit linear-elastischem Materialverhalten geeignet.

Für die Beschreibung des Verbundverhaltens werden einige alternative Modellvorschläge angegeben. Für bewehrten Beton haben sich insbesondere Stabwerkmodelle als zweckmäßig erwiesen. Da es sich bei der textilbewehrten Feinbetonverstärkungsschicht ebenfalls um ein solches Material bewehrter Beton handelt, wird die Anwendung eines Stabwerkmodells für den Verankerungsbereich favorisiert. Dabei wird die Einbeziehung der Rissneigungswinkel im Verbundbereich zur Festlegung der Druckstrebenneigungswinkel als sinnvoll erachtet.

Die vorliegende Arbeit erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Als vermutlich erste Auseinandersetzung mit dem Thema der Verbundverankerung einer textilbewehrten Feinbetonverstärkung kann diese Arbeit hauptsächlich als Wegbereiter für hoffentlich weitere Forschungsarbeiten zu diesem Thema dienen. Großer Wert wurde neben der Ermittlung einer Berechnungsformel für die erforderlichen Verbundlängen u. a. auf die Entwicklung funktionsstüchtiger Werkzeuge zur Verformungsmessung und der Ermittlung des wirksamen Flächenanteiles gelegt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse auch teilweise nicht zum Ziel führender Wege sollen für nachfolgende Forschungen einen Anhaltspunkt geben, nach alternati-

ven Lösungsmöglichkeiten zu suchen und bereits erkannte Sachgassen nicht noch einmal zu betreten.

10.2 Ausblick und mögliche Anwendungsgebiete

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich nach meinen Recherchen um die erste Arbeit ihrer Art zum Thema des Verbundverhaltens von Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton. Zum Verbundverhalten eines vergleichbaren Verstärkungsmaterials, sogenannte TRM-Verstärkungsschichten, sind nur wenige Untersuchungen bekannt. Eine einzelne Arbeit kann bei weitem nicht alle offenen Fragen zu einer solch umfangreichen Thematik abdecken, wie am Beispiel der Klebeverstärkung deutlich wird. Hier sind im Laufe der Jahre mehr als zehn Dissertationen entstanden, die sich mit dem Verbundverhalten auf Beton aufgeklebter linear-elastischer Stahl- oder CFK-Lamellen beschäftigen. Dennoch besteht bei der Untersuchung dieser Materialien noch immer Forschungsbedarf.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Endverankerung für Textilbetonverstärkungen mit Bewehrungstextilien aus AR-Glasfaserfilamentgarnen. Aufgrund der vergleichbar höheren Effizienz von Kohlefasern erscheint ein zukünftiger Einsatz von textilen Bewehrungen aus Kohlefasern im Textilbeton sinnvoll. Während im Haftzugversuch keine Unterschiede zwischen Glas- und Kohlefasertextilien festgestellt werden konnten, wurden bei Versuchen zur Biegeverstärkung bereits Unterschiede im Verbundverhalten gegenüber Textilien aus AR-Glasfasern erkannt. Somit besteht in der Untersuchung des Verbundtragverhaltens von Kohlefasertextilien unter Schubbeanspruchung dringender Forschungsbedarf.

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit beschränken sich auf das Verhalten unter vorwiegend ruhender Belastung. Weitgehend unbekannt ist das Verbundverhalten unter zyklischer oder sogar nicht ruhender Belastung. Erste Vorversuche mit zwei zusätzlichen Belastungszyklen haben keine negativen Auswirkungen auf die Tragfähigkeit des Verbundes gezeigt, da die Zugtragfähigkeit der Verstärkungsschicht bei Bewehrungstextilien aus AR-Glas durch wiederholte Belastung negativ beeinflusst wird. Eine geringere Tragfähigkeit der Verstärkungsschicht führt zu einer Reduzierung der über den Verbund zu verankernden Kraft, was auf die Verankerung eher einen günstigen Einfluss ausübt.

Ebenso unbekannt ist das Verbundverhalten von mit Kohlefasertextilien bewehrtem Beton unter zyklischer Belastung. Da hier sowohl andere Materialeigenschaften als bei AR-Glasfasern vorliegen und zudem andere Verbundmechanismen zu vermuten sind, handelt es hierbei um eine eigenständig zu untersuchende Fragestellung.

Aus den speziellen Einsatzgebieten der Textilbetonverstärkung ergeben sich weitere offene Fragen, auf die im folgenden näher eingegangen wird.

Im Endverankerungsbereich einer Querkraftverstärkung ist aus der Betrachtung des aus der Querkraftbelastung herrührenden Fachwerkmodells, bestehend aus Zug- und Druckstreben, ein zweiachsiger Spannungszustand vorherrschend. Für die Anwendung der Ergebnisse des Verbundtragverhaltens auf die Verankerung einer Querkraftverstärkung wäre konsequenterweise ein zweiachsiger Spannungszustand zu betrachten, da der aus der auflagnahen

Druckstrebe resultierende Querdruck zusätzliche Auswirkungen auf die erforderlichen Verankerungslängen haben wird. Die Überlagerung aus der modellmäßig beschreibbaren Hauptzugbelastung (Bild 9.5) mit der zusätzlichen Hauptdruckbelastung liefert ein dreidimensionales Stabwerkmodell (Bild 10.1). Dabei können die Senkrechten Lastpfade je nach dem Zug- zu Druckspannungsverhältnis $F_{L,Z}/F_{L,D}$ entweder zu Druck oder zu Zugstreben werden. Eine intensivere Betrachtung dieser Zusammenhänge wäre die Aufgabe einer weiterführenden Arbeit.

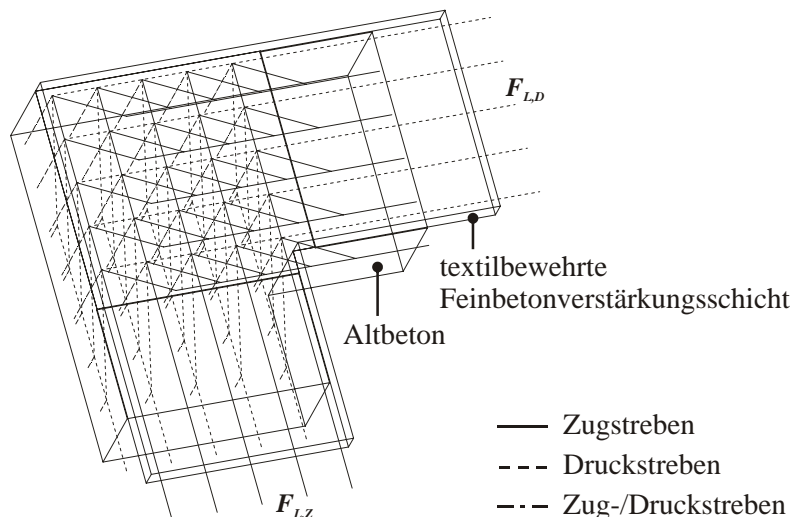


Bild 10.1 dreidimensionales Stabwerkmodell für zweiachsiges Zug-Druck-Belastung in der Verstärkungsschicht

Des Weiteren wurde bei der Anwendung zur Querkraftverstärkung von Plattenbalken festgestellt, dass die Tragfähigkeit der geprüften Plattenbalken bei höher bewehrten Verstärkungsschichten durch eine zusätzliche Verankerung der Verstärkungsschicht in der Druckzone maßgeblich gesteigert werden kann. Offen ist bisher die Frage, welche Arten zusätzlicher Verbundmittel zu einer Erhöhung der über eine relativ kurze zur Verfügung stehende Verankerungslänge zu übertragenden Schubkraft beitragen können und in welcher Größenordnung diese Erhöhung liegen wird. Beispielhaft sei hier die Behinderung der Verbundrissöffnung durch einen zusätzlich aufgebracht Querdruck genannt.

Bei einer Biegeverstärkung wird die in der Verstärkungsschicht vorhandene Zugkraft über den Bereich abfallender Momentenbeanspruchung über die gesamte zur Verfügung stehende Länge bis zum Auflager hin sukzessive in den Altbetonuntergrund eingeleitet. Interessant ist hier die Untersuchung des Verbundverhaltens am sogenannten Zwischenrisselement, was sich grundsätzlich von der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Endverankerung unterscheidet. Während für Klebelamellen aus CFK zu dieser Problematik schon einige Forschungsarbeiten vorliegen, besteht für Verstärkungen aus textilbewehrtem Beton hier noch Forschungsbedarf.

11 Literatur

- [1] AL-JAMOUS, A.; ORTLEPP, R.; ORTLEPP, S.; CURBACH, M.: Experimental investigations about construction members strengthened with textile reinforcement. In: HEGGER, J. (Hrsg.), BRAMESHUBER, W. (Hrsg.), WILL, N. (Hrsg.): *Textile Reinforced Concrete : Proceedings of the 1st International RILEM Symposium (ICTRC 2006), Aachen, 6.–7.9.2006*. Bagnaux : RILEM, PRO 50, 2006, S. 161–170. – ISBN 2-912143-97-7
- [2] AUSBILDUNGSBEIRAT VERARBEITEN VON KUNSTSTOFFEN IM BETONBAU BEIM DEUTSCHEN BETON- UND BAUTECHNIK-VEREIN E.V. (Hrsg.): *SIVV-Handbuch Schützen, Instandsetzen, Verbinden und Verstärken von Betonbauteilen*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2004.
- [3] BERGMEISTER, K.: *Kohlenstofffasern im Konstruktiven Ingenieurbau*. Berlin : Ernst & Sohn, 2003. – ISBN 3-433-02847-8
- [4] BRAMESHUBER, W. (Hrsg.): *Textile Reinforced Concrete : State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201 – TRC: Textile Reinforced Concrete*. Bagnaux : RILEM, Report 36, 2006. – ISBN 2-912143-99-3
- [5] BANHOLZER, B.: *Bond Behaviour of a Multi-Filament Yarn embedded in a Cementitious Matrix*. Aachen, RWTH, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Bauforschung, Diss., 2004.
- [6] BIZINDAYI, L.; NEALE, K.: Transfer Length and Bond Strengths for Composites Bonded to Concrete. In: *Journal of Composites for Construction* 3 (1999), Nr. 4, S. 153–160.
- [7] BLASCHKO, M. A.: *Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit in Schlitz eingeklebten CFK-Lamellen*. München, Technische Universität, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Diss., 2001.
- [8] BRESSON, J.: Nouvelles recherches et applications concernant l'utilisation des collages dans les structures. Béton plaqué. In: *Annales I. T. B. T. P.* Nr. 278 (1971) Série Béton, Béton armé, Nr. 116, S. 68–70.
- [9] BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Textile Reinforced Concrete – Applications and Bond Specifics. In: CEB-FIP (Hrsg.): *Proceedings of the fib-Symposium „Concrete Structures – the Challenge of Creativity“*, Avignon, 26.–28.4.2004, S. 162–162. – Book of Abstracts and CD-ROM
- [10] BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Textile Reinforced Concrete for Strengthening in Bending and Shear. In: *Materials and Structures* 39 (2006), Nr. 8, S. 741–748 – doi: 10.1617/s11527-005-9027-2
- [11] BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; WEILAND S.; CURBACH, M.: Shear Strengthening with Textile Reinforced Concrete. In: HAMELIN, P. (Hrsg.); BIGAUD, D. (Hrsg.); FERRIER, E. (Hrsg.); JAQUELIN, E. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd International Conference on Composites in Construction, Lyon, 11.–13.07.2005*. Université Lyon I, Labora-

- toire Mécanique Matériaux et Structures, Lyon : Eigenverlag, 2005, Bd. 2, S. 1307–1314
- [12] BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; WEILAND S.; CURBACH, M.: Structures for Shear Strengthening. In: ALEXANDER, M. (Hrsg.); BEUSHAUSEN, H.-D. (Hrsg.); DEHN, F. (Hrsg.); MOYO, P. (Hrsg.): *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting. Proceedings of the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, 21.–23.11.2005*. London : Taylor & Francis Group, 2005, S. 456–457 – Book of Abstracts and CD-ROM
- [13] BUNDESANSTALT FÜR STRABENWESEN (Hrsg.): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING)*. Dortmund : Verkehrsblatt-Verlag, 2003.
- [14] CHAJES, M. J.; FINCH, W. W.; JANUSZKA, T. F.; THOMSON JR., T. A.: Bond and Force Transfer of Composite Material Plates Bonded to Concrete. In: *ACI Structural Journal* 93 (1996), Nr. 2, S. 208–217.
- [15] CHEN, J. F.; YANG, Z. J.; PAN, X. M.; HOLT, G. D.: Effects of Test Methods on Plate-to-Concrete Bond Strength. In: BURGOYNE, C. J. (Hrsg.): *Proceedings of the 5th International Conference on Fibre-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures – FRPRCS-5, Cambridge, 16.–18.07.2001*. Thomas Telford : London, 2001, S. 429–438. – ISBN 07277-3009-6
- [16] CURBACH, M. (Hrsg.): *Sonderforschungsbereich 528 – Arbeits- und Ergebnisbericht für die Periode II/1999–I/2002*. SFB 528, TU Dresden, D–01062 Dresden : Eigenverlag, 2001.
- [17] CURBACH, M.; BAUMANN, L.; BEYER, R. (jetzt ORTLEPP, R.): Flächige Übertragung der Schubspannungen vom Altbeton in den textilbewehrten Beton. In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Sonderforschungsbereich 528 – Arbeits- und Ergebnisbericht für die Periode II/1999–I/2002*. SFB 528, TU Dresden, D–01062 Dresden : Eigenverlag, 2001, S. 207–246.
- [18] CURBACH, M.; BRÜCKNER, A.: Textile Strukturen zur Querkraftverstärkung von Stahlbetonbauteilen. In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures : Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, Sept./Okt. 2003*. SFB 528, Technische Universität Dresden, D–01062 Dresden : Eigenverlag, 2003, S. 347–360. – ISBN 3-86005-386-8
- [19] CURBACH, M.; JESSE, F.: Experimentelle Ermittlung des einaxialen Stoffgesetzes von textilbewehrtem Beton. In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Sonderforschungsbereich 528 – Arbeits- und Ergebnisbericht für die Periode II/1999–I/2002*. SFB 528, Technische Universität Dresden, D–01062 Dresden : Eigenverlag, 2001, S. 165–206.
- [20] CURBACH, M.; JESSE, F.; ORTLEPP, R.: *Versuche zur Wirkung einer Querkraftverstärkung mit Carbon-Tüchern ohne Umgreifung der Druck- und Zugzone*. Dresden, Technische Universität, Institut für Massivbau. – Forschungsbericht, in Bearbeitung
- [21] CURBACH, M.; JESSE, F.; ORTLEPP, R.; WAGNER, A.: Verstärkung von Stahlbetontragwerken mit textilen Bewehrungen. In: MÖLLER, B. (Hrsg.): *6. Dresdener Baustatik-Seminar „Rekonstruktion und Revitalisierung aus statisch-konstruktiver*

- Sicht*“, Dresden, 18.10.2002. Dresden : Lehrstuhl für Statik, TU Dresden, Mommsenstr. 13, D-01062 Dresden, S. 153–178. – ISSN 1615-9795
- [22] CURBACH, M.; ORTLEPP, R.: Besonderheiten des Verbundverhaltens von Verstärkungsschichten aus textilbewehrtem Beton. In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures : Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, Sept./Okt. 2003*. SFB 528, TU Dresden, D–01062 Dresden : Eigenverlag, 2003, S. 361–374. – ISBN 3-86005-386-8
- [23] CURBACH, M.; ORTLEPP, R.: Untersuchungen zum Verbundtragverhalten zwischen Altbeton und textilbewehrtem Beton. In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Textile Bewehrungen zur Bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung – SFB 528 Finanzierungsantrag für die Periode II/2005–I/2008*. SFB 528, TU Dresden, D–01062 Dresden : Eigenverlag, 2005, S. 313–338.
- [24] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): *Erläuterungen zu DIN 1045-1*. Heft 525 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin : Beuth, 2003.
- [25] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (Hrsg.): *Richtlinie für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, Teil I bis IV*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Berlin: Beuth 1991/1992.
- [26] DIN 1045: *Beton und Stahlbeton – Bemessung und Ausführung*. Berlin : Beuth, 1988.
- [27] DIN 1045-1: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. Berlin : Beuth, 2001.
- [28] DIN 1048: *Prüfverfahren für Beton. Festbeton in Bauwerken und Bauteilen*. Berlin : Beuth, 1991.
- [29] DIN 18551: *Spritzbeton – Anforderungen, Herstellung, Bemessung und Konformität*. Berlin : Beuth, 2005.
- [30] DIN EN 196-1: *Prüfverfahren für Zement. Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*. Berlin : Beuth, 2005.
- [31] DIN EN 1015-11: *Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk. Teil 11: Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit von Festmörtel*. Berlin : Beuth, 1999.
- [32] EIBL, J., IVANYI, G.: *Studie zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton*. Heft 260 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin : Ernst & Sohn, 1976.
- [33] FENWICK, R. C.; SUE, C. F. C.: The influence of water gain upon the tensile strength of concrete. In: *Magazine of concrete research* 34 (1982), Nr. 120, S. 139–145.
- [34] FRANZKE, G.; HEMPEL, R.; ENGLER, T.; SCHIERZ, M.; BRÜCKNER, A.; PROSKE, D.; ORTLEPP, S.: Betonmastensanierung mit mehraxialen Gelegen aus alkaliresistentem Glas. In: *Bautechnik* 79 (2002), Nr. 6, S. 368–374.
- [35] VAN GEMERT, D.: Force transfer in epoxy bonded steel/concrete joints. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 1 (1980), Nr. 2, S. 67–72.

- [36] GLÖCKNER, A.: *Textilbewehrter Beton unter dynamischer Beanspruchung*. Dresden, Technische Universität, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau, Diplomarbeit, 2004.
- [37] HANKERS, CH.: Spritzbeton für die Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbeton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (2005), Nr. S1, S. 49–56.
- [38] HANKERS, CH.: Möglichkeiten zur Verstärkung von Stahlbetonbauteilen. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 95 (2000), Nr. 9, S. 531–536.
- [39] HANKERS, CH.: *Zum Verbundtragverhalten laschenverstärkter Betonbauteile unter nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung*. Heft 473 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin : Beuth, 1997.
- [40] HEGGER, J.; KERKENI, N.: *Spritzbetonverstärkte Stahlbetonstützen – Bemessungskonzept*. Stuttgart : Fraunhofer IRB, 1997 (Schlussbericht T 2804 zum AiF-Forschungsvorhaben 10.263). – ISBN 3-8167-5490-2
- [41] HEILMANN, H.: Beziehungen zwischen Zug- und Druckfestigkeit des Betons. In: *Beton* 19 (1969), Nr. 2, S. 68–70.
- [42] HEILMANN, H. G.; HILSDORF, H.; FINSTERWALDER, K.: *Festigkeit und Verformung von Beton unter Zugspannungen*. Heft 203 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin : Ernst & Sohn, 1969.
- [43] HEMPEL, R.; FRANZKE, G.; CURBACH, M.; OFFERMANN, P.: Improvement of the Properties of Concrete by Means of Textile Reinforcements Made of Alkali Resistant Glass Filament Yarn. In: CONCRETE SOCIETY (Hrsg); GRCA (Hrsg): *Proceedings of the 12th Congress of the International Glassfibre Reinforced Concrete Association – GRC2001, Dublin, 14.–16.5.2001*. – CD-ROM
- [44] HOLZENKÄMPFER, P.: *Ingenieurmodelle des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile*. Heft 473 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin : Beuth, 1997.
- [45] JESSE, F.: *Tragverhalten von unidirektionalen und textilen Bewehrungen aus Multifilamentgarnen in einer zementgebundenen Matrix*. Dresden, Technische Universität, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau, Diss., 2004.
- [46] JESSE, F.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Tensile Stress-Strain Behaviour of Textile Reinforced Concrete. In: COROTIS, R. B. (Hrsg.); SCHUËLLER, G. I. (Hrsg.); SHINOZUKA, M. (Hrsg.): *Proceedings of the IABSE Symposium, "Towards a better built environment – innovation, sustainability, information technology", Melbourne, September 2002*, S. 376–377. – Book of Abstracts and CD-ROM. – ISBN 3-85748-107-2
- [47] KAUFMANN, N.: Das Sandflächenverfahren. In: *Strassenbau-Technik* 24 (1971), Nr. 3, S. 131–135.
- [48] KAISER, H.: *Bewehren von Stahlbeton mit kohlenstoffaserverstärkten Epoxidharzen*. Zürich, ETH, Institut für Baustatik und Konstruktion, Diss., 1989.

- [49] KLEES, M.: *Sachstandsbericht zur Bemessung von Bauteilen mit Klebeverstärkung*. Kaiserslautern, Technische Universität, Institut für Massivbau und Baukonstruktion, Diplomarbeit, 2004.
- [50] KONRAD, M.; CHUDOBA, R.: The Influence of Disorder in Multifilament Yarns on the Bond Performance in Textile Reinforced Concrete. In: *Acta Polytechnica* 44 (2004), Nr. 5-6, S. 186–193.
- [51] KRÜGER, M.: *Vorgespannter textilbewehrter Beton*. Stuttgart, Universität, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Diss., 2004.
- [52] KUNTZ, S.: *Verbundverhalten von laschenverstärkten Stahlbetonzuggliedern*. Braunschweig, Technische Universität, Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau, Diplomarbeit, 1993.
- [53] MARKOVIC, I.; WALRAVEN, J. C.; VAN MIER, J. G. M.: Experimental Evaluation of Fibre Pullout from Plain and Fibre Reinforced Concrete. In: NAAMAN, A. E. (Hrsg.); REINHARDT, H. W. (Hrsg.): *Proceedings of the RILEM-International Workshop „High Performance Fiber Reinforced Cement Composites – HPFRCC 4“*, Ann Arbor, 15.–18.6.2003. Bagnoux : RILEM, 2003, S. 419–436. – ISBN 2-9121143-37-3.
- [54] MAAS, H.-G.; HAMPEL, U.: Photogrammetrische Erfassung der Verformungs-, Riß- und Schädigungsentwicklung bei mechanischen Untersuchungen textilverstärkter Bauteile. In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Textile Bewehrungen zur Bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung – SFB 528 Finanzierungsantrag für die Periode II/2005–I/2008*. SFB 528, TU Dresden, D–01062 Dresden : Eigenverlag, 2005, S. 619–644.
- [55] MAAS, H.-G.; HAMPEL, U.; SCHULZE, M.: Photogrammetrische und computertomographische Erfassung von Deformationen, Rissentwicklungen und Strukturveränderungen bei Belastungsversuchen von textilverstärkten Probekörpern. In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Textile Reinforced Structures : Proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden, Sept./Okt. 2003*. SFB 528, TU Dresden, D–01062 Dresden : Eigenverlag, 2003, S. 187–199. – ISBN 3-86005-386-8
- [56] MELLMANN, G.; MEINHOLDT, U.; MAULTZSCH, M.: Untergrundvorbehandlung bei der Anwendung von Spritzbeton. In: BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG UND –PRÜFUNG (BAM) (Hrsg.): *Tagungsbericht Sonderkapitel aus dem Brücken- und Ingenieurbau, Berlin, 21.-22.Okt. 2003*. Bremerhaven : Wirtschaftsverlag NW, 2003, S. 72–75. – ISBN 3-86509-043-5
- [57] MENN, CH.: *Bonding of Old and New Concrete for Monolithic Behaviour*. Basel : Birkhäuser, 1991 (Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich; Bericht Nr. 185). – ISBN 3-7643-2712-X
- [58] MENN, CH.; BRENNI, P.; KELLER, T.; PELLEGRINELLI, L.: *Verbindung von altem und neuem Beton*. Basel : Birkhäuser, 1992 (Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich; Bericht Nr. 193). – ISBN 3-7643-2825-8

- [59] MEYER, A.: Glasfaserbeton – Ein Baustoff mit vielen Chancen. In: *Betonwerk und Fertigteil-Technik* 68 (2002), Nr. 3+4.
- [60] MÖLLER, B.; BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; STEINIGEN, F.: Verstärken mit textilbewehrtem Beton – Experimente und numerische Simulation. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 99 (2004), Nr. 6, S. 466–471.
- [61] MOLTER, M.: *Zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton*. Aachen, RWTH, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau, Diss., 2005.
- [62] MOMAYEZ, A.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; RAJAIE, H.; EHSANI, M. R.: Bi-Surface Shear Test for Evaluating Bond between Existing and New Concrete. In: *ACI Materials Journal* 101 (2004), Nr. 2, S. 99–106.
- [63] MÜLLER, A.: Beton – ein Baustoff der (sich) verbindet. In: FÖRDERVEREIN MASSIVBAU DER TU MÜNCHEN E.V. (Hrsg.): *Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch*. Berlin : Springer, 2005. S. 485–490. – ISBN 3-540-22541-2
- [64] MÜLLER, A.: Zum Ermüdungstragverhalten unbewehrter Betonschubfugen. In: BERGMEISTER, K. (Hrsg.): *Tagungsband Doktorandensymposium 45. Forschungskolloquium des DAfStb, Wien, 6.-7.Okt. 2005*. Berlin : Ernst & Sohn, 2005, S. 145–148.
- [65] NAAMAN, A. E.: *Ferrocement & laminated cementitious composites*. Ann Arbor : Techno Press 3000, 2000. – ISBN 0-9674939-0-0
- [66] NEUBAUER, U.: *Verbundtragverhalten geklebter Lamellen aus Kohlenstoffaser-Verbundwerkstoff zur Verstärkung von Betonbauteilen*. Braunschweig, Technische Universität, Fakultät Bauingenieurwesen, iBMB, Diss., 2000.
- [67] NIEDERMEIER, R.: *Zugkraftdeckung bei klebarmierten Bauteilen*. München, Technische Universität, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Diss., 2001.
- [68] NISSEN, I.: *Rissverzahnung des Betons – gegenseitige Rissuferverschiebungen und übertragene Kräfte*. München, Technische Universität, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Diss., 1987.
- [69] OFFERMANN, P.; ABDKADER, A.; ENGLER, TH.; SCHIERZ, M.: Grundlagen textiler Bewehrungsstrukturen zur Verstärkung bestehender Bauwerke. In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Sonderforschungsbereich 528 – Arbeits- und Ergebnisbericht für die Periode II/1999–I/2002*. SFB 528, Technische Universität Dresden, D-01062 Dresden : Eigenverlag, 2001, S. 25–736.
- [70] OFFERMANN, P.; CURBACH, M.: *Flächengebilde zur Sanierung von Stahlbewehrten Betonelementen - Maste, Schalen, Platten*. AiF-Forschungsbericht Nr. 11981 B, 2001.
- [71] OHNO, S.: *Stress Transfer in Polypropylene Fibre Reinforced Cement*. London, University of Surrey, PH. D. Thesis, 1990.
- [72] OHNO, S.; HANNANT, D. J.: Modeling the Stress-Strain Response of Continuous Fiber Reinforced Cement Composites. In: *ACI Materials Journal* 91 (1994) Nr. 3, S. 306–312.

- [73] ORTLEPP, R.: Verbundversagen von textilbewehrten Verstärkungslaschen. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (2005), Nr. S2, S. 157–160 – doi:10.1002/best.200590262
- [74] ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Bond Failure Mechanisms of Strengthening Layers made of Textile Reinforced Concrete. In: CONCRETE SOCIETY (Hrsg.); GRCA (Hrsg.): *Proceedings of the 13th Congress of the International Glassfibre Reinforced Concrete Association – GRC2003, Barcelona, 6.–8.10.2003.* – Book of Abstracts and CD-ROM. – ISBN 1-904482-04-X
- [75] ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Bonding Behaviour of Textile Reinforced Concrete Strengthening. In: NAAMAN, A. E. (Hrsg.); REINHARDT, H. W. (Hrsg.): *Proceedings of the RILEM-International Workshop „High Performance Fiber Reinforced Cement Composites – HPFRCC 4“, Ann Arbor, 15.–18.6.2003.* Bagnaux : RILEM, 2003, S. 517–527. – ISBN 2-9121143-37-3
- [76] ORTLEPP, R.; HAMPEL, U.; CURBACH, M.: A new Approach for Evaluating Bond Capacity of TRC Strengthening. In: *Cement and Concrete Composites* 28 (2006), Nr. 7, S. 589–597 – doi: 10.1016/j.cemconcomp.2006.05.003
- [77] ORTLEPP, R.; ORTLEPP, S.; CURBACH, M.: Stress Transfer in the Bond Joint of Subsequently Applied Textile Reinforced Concrete Strengthening. In: di PRISCO, M.; FELICETTI, R.; PLIZZARI, G. A. (Hrsg.): *Fibre-Reinforced Concretes : Proceedings of the „Sixth International RILEM-Symposium – BEFIB 2004“, Varenna, 20.–22.9.2004.* Bagnaux : RILEM, 2004, S. 1483–1494. – ISBN 2-912143-51-9
- [78] PICHLER, D.: *Die Wirkung von Anpressdrücken auf die Verankerung von Klebelamellen.* Innsbruck, Universität, Diss., 1993.
- [79] RANDL, N.: *Untersuchungen zur Kraftübertragung zwischen Alt- und Neubeton bei unterschiedlichen Fugenrauigkeiten.* Innsbruck, Universität, Fakultät für Bauingenieurwesen und Architektur, Diss., 1997.
- [80] RANDL, N.; MÜNGER, F.; WICKE, M.: Verstärkung von Brückentragwerken durch Aufbeton. In: *Bauingenieur* 80 (2005), Nr. 4, S. 207–214.
- [81] RANDL, N.; WICKE, M.: Schubübertragung zwischen Alt- und Neubeton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 95 (2000), Nr. 8, S. 461–473.
- [82] RANISCH, E.-H.: *Zur Tragfähigkeit von Verklebungen zwischen Baustahl und Beton – Geklebte Bewehrung.* Braunschweig, Technische Universität, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 54, Diss., 1982.
- [83] REINECKE, R.: *Haftverbund und Rissverzahnung in unbewehrten Betonschubfugen.* München, Technische Universität, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Diss., 2004.
- [84] REINECKE, R.: Numerische Vergleichsberechnung der Rissverzahnung unter Berücksichtigung der tatsächlichen Oberflächenrauheit. In: ZILCH, K. (Hrsg.): *Massivbau 2003 - Forschung, Entwicklung und Anwendung. Tagungsband zum 7. Münchener Massivbauseminar, München, 06.-07.03.2003.* München : Springer-VDI, 2003, S. 65–78. – ISBN 3-935065-06-X

- [85] REINECKE, R.: Tragverhalten der Schubfuge zwischen Fertigteilen aus hochfestem Beton und Ortbetoneergänzungen aus Normalbeton. In: ZILCH, K.; SCHIEBL, P. (Hrsg.): *38. Forschungskolloquium des DAfStb, München, 02.-03.03.2000*. München : Technische Universität, 2000, S. 187–194.
- [86] ROSTASY, F. S.; RANISCH, E.-H.: *Verstärkung von Stahlbetonplatten durch angeklebte Laschen aus glasfaserverstärktem Kunststoff*. Braunschweig, Technische Universität, Institut für Baustoffe, Forschungsbericht, 1983.
- [87] RUTH, J.: *Werkstoffverhalten in Grenzflächenbereichen der Tragelemente von Bauwerken*. Stuttgart, Univ., Institut für Tragwerksentwurf und Konstruktion, Diss., 1993.
- [88] SCHÄFER, H. G.; BÄÄTJER, G.: *Verbundmittel in spitzbetonverstärkten Stahlbetonbauteilen*. Abschlussbericht Deutscher Beton Verein Nr. 127, 1998.
- [89] SCHÄFER, H. G.; BLOCK, K; DRELL, R.: *Oberflächenrauheit und Haftverbund*. Heft 456 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin : Beuth, 1997, S. 75–93.
- [90] SCHÄFER, H. G. ET. AL.: *Verstärken von Stahlbetonbauteilen – Sachstandsbericht*. Heft 467 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin : Beuth, 1996.
- [91] SCHILDE, K.: *Untersuchungen zum Verbund zwischen Beton und nachträglich aufgeklebten Kohlefaserlamellen am Zwischenrisselement*. Kassel, Univ., Institut für Bauwerkserhaltung und Holzbau, Diss., 2005.
- [92] SCHLAICH, J.; SCHÄFER, K.: Konstruieren im Stahlbetonbau. In: *Betonkalender* 2001, T. II, S. 311–492, Berlin : Ernst und Sohn, 2001.
- [93] SCHORN, H.: Ein Verbundmodell für Glasfaserbewehrungen im Beton. In: *Bautechnik* 80 (2003), Nr. 3, S. 174–180.
- [94] SCHORN, H.; SONNENBERG, R.; MAURER, P.: *Spritzbeton*. Düsseldorf : Bau+Technik, 2005 (Schriftenreihe Spezialbetone; Bd. 6). – ISBN 3-7640-0452-5
- [95] SCHULZ, R.-R.: *Beton als Beschichtungsuntergrund – Über die Prüfung des Festigkeitsverhaltens von Betonoberflächen mit dem Abreißversuch*. Aachen, RWTH, Institut für Bauforschung, Diss., 1984.
- [96] SCHULZ, R.-R.; WESCHE, K.: *Die Vorbereitung von Betonoberflächen für Beschichtungen – Bearbeitung, Beschaffenheit und Prüfung –*. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 333, 1981, S.33–111.
- [97] SONDERFORSCHUNGSBEREICH 528 (Hrsg.): *Teilprojekt E3 – Beurteilung des Sicherheitsniveaus textilverstärkter Bauwerke*. Version: 02.12.2005. <http://sfb528.tu-dresden.de/e3/index.html>. – Online-Ressource, Abruf 11.04.2006 – Ziele, Methoden und Ergebnisse
- [98] STÖCKL, S.: *Das unterschiedliche Verformungsverhalten der Rand- und Kernzone von Beton*. Heft. 185 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin : Ernst & Sohn, 1966.

- [99] STRITZKE, J.; CURBACH, M.; BÖSCHE, A.; WAGNER, A.: Verstärkung von Balken, Platten und Plattenbalken mit textilbewehrtem Beton. In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Sonderforschungsbereich 528 – Arbeits- und Ergebnisbericht für die Periode II/1999–I/2002*. SFB 528, TU Dresden, D–01062 Dresden : Eigenverlag, 2001, S. 359–404.
- [100] ULAGA, T.: *Betonbauteile mit Stab- und Lamellenbewehrung: Verbund- und Zuggliedmodellierung*. Zürich, ETH, Institut für Baustatik und Konstruktion, Diss., 2003.
- [101] VOLKERSEN, O.: Die Nietkraftverbindung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. In: *Luftfahrtforschung* 15 (1938), S. 41–47.
- [102] WALL, J. S.; SHRIVE, N. G.: Factors affecting Bond between new and old Concrete. In: *ACI Materials Journal* 85 (1988), Nr. 2, S. 117–125.
- [103] WALRAVEN, J. C.: *Aggregate Interlock: a theoretical and experimental analysis*. Delft, Technische Universität, Diss., 1980.
- [104] WALRAVEN, J. C.; REINHARDT, H. W.: Theory and Experiments on The Mechanical Behaviour of Cracks in Plain and Reinforced Concrete Subjected to Shear Loading. In: *Heron* 26 (1981), Nr. 1A.
- [105] WEILAND, S.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Strengthening of predeformed slabs with textile reinforced concrete. In: CEB-FIP (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd fib-Congress, Neapel, 5.–8.6.2006*. – Book of Abstracts and CD-ROM, Bd. 2, S. 428–430 – ID 14-22.
- [106] WINKLER, H; GRUNER, K.: Abzugfestigkeit von Beton prüfen, Einfluß von Versuchsbedingungen. In: *Materialprüfung* 36 (1994), Nr. 9, S. 367–371.
- [107] WINTSCHER, V.: *Verbundverhalten von Rippenstahl in Spritzbeton*. Dortmund, Universität, Fakultät Bauwesen, Diss., 2002.
- [108] WÖRNER, R.: *Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Spritzbeton*. Karlsruhe, Universität, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, Diss., 1994.
- [109] WU, Z.; YUAN, H.; NIU, H.: Stress Transfer and Fracture Propagation in Different Kinds of Adhesive Joints. In: *Journal of Engineering Mechanics* 128 (2002), Nr. 5, S. 562–573.
- [110] ZEHETMAIER, G.: *Zusammenwirken einbetonierter Bewehrung mit Klebarmierung bei verstärkten Betonbauteilen*. München, Technische Universität, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Diss., 2006.
- [111] ZEHETMAIER, G.: Die Endverankerung von Klebarmierung: Interaktion von angeklebter und einbetonierter Bewehrung. In: ZILCH, K. (Hrsg.): *Massivbau 2003 - Forschung, Entwicklung und Anwendung. Tagungsband zum 7. Münchener Massivbau-seminar, München, 06.-07.03.2003*. München : Springer-VDI, 2003, S. 276–287. – ISBN 3-935065-06-X
- [112] ZILCH, K. ; MAINZ, J.: *Schubtragfähigkeit von Betonergänzungen an nachträglich aufgerauten Betonoberflächen bei Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen*.

- Heft 528 der Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin : Beuth, 2002.
- [113] ZILCH, K.; MÜLLER, A.: *Experimentelle Untersuchung zum Ermüdungstragverhalten von unbewehrten Schubfugen an nachträglich ergänzten Betonbauteilen*. Abschlussbericht zum DafStb-Forschungsvorhaben V 422. Lehrstuhl für Massivbau, TU München, 2004.
- [114] ZILCH, K.; NIEDERMEIER, R.: *Ermittlung der charakteristischen Verbundbruchkraft für auf Betonbauteile aufgeklebte Stahllaschen*. Bd. Abschlussbericht DIBt. München : Eigenverlag, 1999.
- [115] ZIRBA, Y. N.; BALUCH, M. H.; BASUNBUL, I. A.; AZAD, A. K.; AL-SULAIMANI, G. J.; SHARIF, A. M.: Combined experimental – numerical approach to characterisation of steel-glue-concrete. In: *Materials and Structures* 28 (1995), Nr. 9, S. 518–525.

12 Bezeichnungen und Abkürzungen

Abkürzungen

AR	alkaliresistent
ARG	alkaliresistentes Glas
CF	Kohlenstofffaser (Carbonfaser)
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DD1	Anklemmdehnungsaufnehmer (HBM)
DGL	Differentialgleichung
DIN	Deutsche Industrienorm
DMS	Dehnungsmessstreifen
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVK	faserverstärkter Kunststoff
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
HDW	Hochdruckwasser(-strahlen)
IWA	induktiver Wegaufnehmer
LS	Laststufe
MC	Model Code
NEG	Nippon Electric Glass Co., Ltd.
NWM3	Nähwirkmaschine Malimo 14024 (multiaxial)
NWM4	Nähwirkmaschine Malimo 14022 (biaxial)
PG	Photogrammetrie
PP	Polypropylen
TEN	Tenax Fibers GmbH
TRC	Textilbeton (textile reinforced concrete)
TRM	textile reinforced mortar
VET	Saint-Gobain Vetrotex Deutschland GmbH
WEK	Westfalia Kunststoffe GmbH

Lateinische Großbuchstaben

A	Fläche; Querschnittsfläche
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft
G	Schubmodul; spezifische Energie
R	Widerstand
S	Schwellwert

Lateinische Kleinbuchstaben

a	Abstand, freier Parameter
b	Breite, freier Parameter
d	Durchmesser
f	Festigkeit, aufnehmbare Spannung
h	Häufigkeit
k	Beiwert; Faktor
l	Länge
n	Anzahl, freier Parameter
r	Radius
s	Schlupf
t	Dicke
u	Umfang
x	Koordinate
y	Koordinate
z	Koordinate

Griechische Buchstaben

α	Winkel
γ	Grauwert
σ	(Normal-)Spannung
ε	Dehnung
ν	Querdehnzahl
τ	Schub- bzw. Verbundspannung

Indizes

A	Fläche
at	Haftzug (adhesive tensile)
b	Verbund
bj	Verbundfuge (bond joint)
c	Altbeton / Beton (concrete)
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
D	Druck
eff	wirksam (effective)
f	Faden

fc	Feinbeton (fine-grained concrete)	Pxl	Pixel
fl	Biege- (flexure)	S	Stahl
ges	gesamt	Schuss	Schussfaden
i	Zählvariable	t	Zug (tension)
iV	innerer Verbund	TRC	Textilbeton (textile reinforced concrete)
K	Kleber	tex	Textil; Textilebene
Kett	Kettfaden	u	Bruch
L	Lasche	V	Verbund
m	Matrix; Mittelwert	Z	Zug
öff	Öffnung zw. den Textilfäden		
o	Ausgangswert (original)		
po	Auszug (pull-out)		

13 Anhang

Anhang 1	Übersicht der verwendeten Baustoffe.....	215
A 1.1	Betoneigenschaften.....	215
A 1.2	Bewehrungstextilien	217
Anhang 2	Ermittlung des wirksamen Flächenanteiles der Textilien.....	228
A 2.1	Scanmethode nach CURBACH, BAUMANN & BEYER [18].....	228
A 2.2	Subjektive Auswertemethoden	228
A 2.3	Darstellung der Scanmethoden und Histogrammanalyseverfahren.....	229
A 2.4	Ergebnisse des Histogrammanalyseverfahrens mit Durchlichtscan.....	230
Anhang 3	Probekörperherstellung und Versuchsdurchführung	232
A 3.1	Haftzugversuche	232
A 3.2	Verbundversuche unter Schubbeanspruchung.....	233
A 3.3	Filamentgarnauszugsversuche	236
Anhang 4	Versuchsdaten.....	238
A 4.1	Haftzugversuche	238
A 4.2	Verbundversuche unter Schubbeanspruchung.....	278
A 4.3	Filamentgarnauszugsversuche	288
Anhang 5	Ergebnisse der photogrammetrischen Verformungsmessung	289
A 5.1	Versuch C1-31-3.....	289
A 5.2	Versuch C1-31-4.....	299
A 5.3	Versuch C1-T-26-3.....	307

Anhang 1 Übersicht der verwendeten Baustoffe

A 1.1 Betoneigenschaften

Tab. A 1.1.1 Rezeptur des verwendeten Feinbetons

Bestandteil	Menge [kg/m ³]
Zement CEM III B 32,5	628,0
Steinkohlenflugasche	265,6
Mikrosilika-Suspension	100,5
Sand 0/1	942,0
Zugabewasser	214,6
Fließmittel FM 30	10,5

Tab. A 1.1.2 Mischreihenfolge und Mischzeit des verwendeten Feinbetons

Mischreihenfolge	Mischzeit [min]
1. Zuschlag+Zement	1,0
2. Wasser	2,0
3. Mikrosilica	2,0
4. FM	2,0
5. nach Reinigung von Mischer und Mischwerkzeugen	1,0

Tab. A 1.1.3 Mechanische Eigenschaften des verwendeten Feinbetons

Eigenschaft	Mittelwert	Standardabw.	5%-Fraktilwert	95%-Fraktilwert
Druckfestigkeit ¹⁾	75,1 N/mm ²	3,8 N/mm ²	65,9 N/mm ²	89,7 N/mm ²
Biegezugfestigkeit ¹⁾	7,03 N/mm ²	0,99 N/mm ²	5,47 N/mm ²	8,39 N/mm ²
Elastizitätsmodul ²⁾	28.500 N/mm ²	–	–	–
Dichte ²⁾	2,17 g/cm ³	–	–	–

Tab. A 1.1.4 Rezeptur des verwendeten Altbetons

Bestandteil	Menge [kg/m ³]
Zement CEM I 32,5R	300
Sand 0/1	951
Kies 2/8	843
Wasser (gesamt)	233

¹⁾ ermittelt an Mörtelprismen 40x40x160 mm am Tag der Versuchsdurchführung nach ≥ 28 Tagen

²⁾ Wert entnommen aus JESSE [45]

Tab. A 1.1.5 Mischreihenfolge und Mischzeit des verwendeten Altbetons

Mischreihenfolge	Mischzeit [min]
1. Zuschlag+Zement	0,5
2. Wasser	1,5

Tab. A 1.1.6 Mechanische Eigenschaften des verwendeten Altbetons

Eigenschaft	Mittelwert	Standardabw.	5%-Fraktilwert	95%-Fraktilwert
Würfeldruckfestigkeit ^{1) 2)}	32,40 N/mm ²	2,80 N/mm ²	27,44 N/mm ²	36,20 N/mm ²
Spaltzugfestigkeit ^{2) 3)}	2,57 N/mm ²	0,24 N/mm ²	2,13 N/mm ²	2,87 N/mm ²
Elastizitätsmodul ^{2) 3)}	25.154 N/mm ²	1.990 N/mm ²	22.543 N/mm ²	28.839 N/mm ²
Zentrische Zugfestigkeit ^{2) 4)}	2,08 N/mm ²	0,18 N/mm ²	1,84 N/mm ²	2,36 N/mm ²
Würfeldruckfestigkeit ^{1) 5)}	32,85 N/mm ²	2,96 N/mm ²	27,63 N/mm ²	39,07 N/mm ²

¹⁾ am 15er Würfel

²⁾ nach 28 Tagen

³⁾ am Zylinder 150x300 mm

⁴⁾ am eingeschnürten Zylinder 150/120x300 mm

⁵⁾ am Tag der Versuchsdurchführung nach ≥ 52 Tagen

A 1.2 Bewehrungstextilien

Tab. A 1.2.1 Übersicht der in den Bewehrungstextilien verwendeten Multifilamentgarne

Bezeichnung ¹⁾	Multifilamentgarne						Filamente	
	Material	Feinheit ²⁾ [tex]	Schlichte	Dehnung [%]	Festigkeit [N/mm ²]	E-Modul [GPa]	Anzahl	Dichte [g/cm ³]
NEG-ARG155-01 ³⁾	AR-Glas	154	–	1,44	1094	79,28	400	2,83
NEG-ARG310-01	AR-Glas	309	–	1,89	1357	79,95	800	2,80
NEG-ARG620-01	AR-Glas	614	–	1,81	1341	82,38	1600	2,79
NEG-ARG620-01-2b	AR-Glas	659	2b	275	2002	77,67	1600	2,79
NEG-ARG620-05 ³⁾	AR-Glas	617	–	1,03	751	78,40	1600	2,78
NEG-ARG620-05-2b	AR-Glas	– ⁴⁾	2b	– ⁴⁾	– ⁴⁾	– ⁴⁾	1600	2,78
NEG-ARG1100-01	AR-Glas	1114	–	0,74	574	81,17	2000	2,80
NEG-ARG1100-01-2b	AR-Glas	– ⁴⁾	2b	– ⁴⁾	– ⁴⁾	– ⁴⁾	2000	2,80
VET-ARG640-03	AR-Glas	665	–	2,18	1445	74,10	1600	2,75
VET-ARG640-03-p2	AR-Glas	– ⁴⁾	p2	– ⁴⁾	– ⁴⁾	– ⁴⁾	1600	2,75
VET-ARG640-03-sb	AR-Glas	– ⁴⁾	sb	– ⁴⁾	– ⁴⁾	– ⁴⁾	1600	2,75
VET-ARG1200-02	AR-Glas	1274	–	1,99	12,31	74,45	1600	2,74
VET-ARG1200-02-p2	AR-Glas	– ⁴⁾	p2	– ⁴⁾	– ⁴⁾	– ⁴⁾	1600	2,74
VET-ARG1200-02-sb	AR-Glas	– ⁴⁾	sb	– ⁴⁾	– ⁴⁾	– ⁴⁾	1600	2,74
VET-ARG2400-02	AR-Glas	2356	–	1,92	1208	74,96	1600	2,75
VET-ARG2400-02-2b	AR-Glas	– ⁴⁾	2b	– ⁴⁾	– ⁴⁾	– ⁴⁾	1600	2,75
TEN-CF-800-01	Kohle	803	–	0,58	1032	222,98	12000	1,79
TEN-CF-800-01-2b	Kohle	930	2b	1,51	2723	204,40	12000	1,79
WEK-PP(B)220-01 ³⁾	Polyprop.	219	–	5,67	463	10,29	– ⁵⁾	– ⁵⁾

¹⁾ Bezeichnung: HERSTELLER-MATERIAL-Feinheit-Chargennummer-Schlichte (Abkürzungen s. Kapitel 12)

²⁾ tatsächlicher Wert (Ist-Wert); dabei ist 1 tex = 1 g/km

³⁾ nur als Querbewehrung verwendet

⁴⁾ keine Mess- bzw. Prüfdaten vorhanden

⁵⁾ kein Multifilamentgarn

Tab. A 1.2.2 Übersicht der bei Versuchen eingesetzten Bewehrungstextilien

Textil Bezeichnung ¹⁾	Kettfaden			Schussfaden			Bindung		Versuchsart		
	Bezeichnung ²⁾	Feinheit ³⁾ [tex]	Abstand [mm]	Bezeichnung ²⁾	Feinheit ³⁾ [tex]	Abstand [mm]	Art	Stichlänge [mm]	HZ	S	FA
NWM3-020-00	NEG-ARG620-01	620	3,6	NEG-ARG310-01	310	7,2	Trikot	2,5	x	x	
NWM3-030-00	NEG-ARG310-01	310	7,2	WEK-PP(B)220-01	220	7,2	Trikot	3,5	x		
NWM3-031-00	2·NEG-ARG310-01	620	7,2	WEK-PP(B)220-01	220	7,2	Trikot	3,5	x	x	
NWM3-032-00	NEG-ARG620-01	620	7,2	WEK-PP(B)220-01	220	7,2	Trikot	3,5	x		
NWM3-033-00	2·NEG-ARG310-01	620	7,2	WEK-PP(B)220-01	220	7,2	Trikot gegenlegig	3,5	x	x	
NWM3-035-00	2·NEG-ARG310-01	620	7,2	WEK-PP(B)220-01	220	7,2	Trikot gegenlegig	2,0	x		
NWM3-037-00	2·NEG-ARG310-01	620	7,2	WEK-PP(B)220-01	220	7,2	Franse Trikot	3,5	x	x	
NWM3-004-01	2·NEG-ARG310-01	620	3,6	2·NEG-ARG155-01	310	7,2	Trikot	2,5	x	x	
NWM3-005-01	NEG-ARG1100-01	1100	7,2	2·NEG-ARG155-01	310	7,2	Trikot	2,5	x	x	
NWM3-012-01	2·NEG-ARG1100-01	2200	10,2	2·NEG-ARG1100-01	2200	10,2	Trikot	4,5	x	x	
NWM3-013-01	NEG-ARG1100-01	1100	7,2	2·NEG-ARG155-01	310	7,2	Trikot	2,5	x	x	
NWM3-023-02	2·NEG-ARG1100-01	2200	10,2	2·NEG-ARG1100-01	2200	10,2	Trikot	4,5	x	x	x
NWM3-003-04-2b	TEN-CF-800-01-2b	800	10,7	NEG-ARG620-05-2b	620	7,1	Trikot gegenlegig	3,5	x		
NWM3-004-04-2b	VET-ARG2400-02-2b	2400	10,7	VET-AR640-03-2b	640	10,7	Trikot gegenlegig	3,6	x		
NWM3-025-05	VET-ARG1200-02	1200	7,2	VET-ARG1200-02	1200	7,2	Trikot gegenlegig	4,0	x		

¹⁾ Bezeichnung: MASCHINE-lfd.Nummer-Herstelljahr-Schlichte (Abkürzungen s. Kapitel 12)

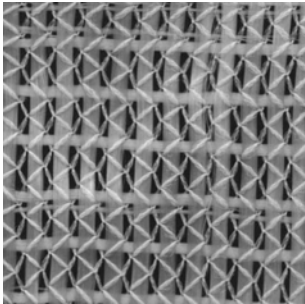
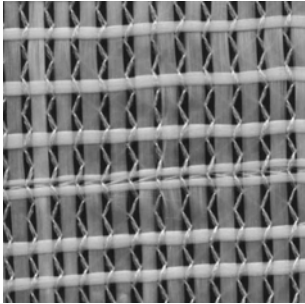
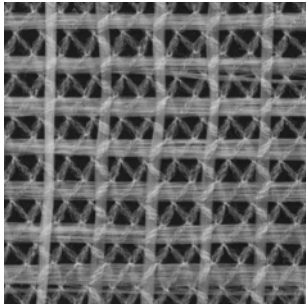
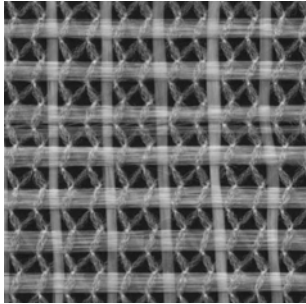
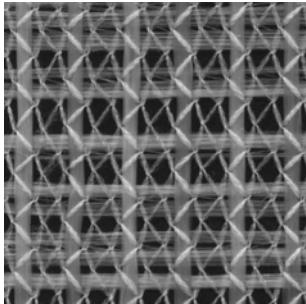
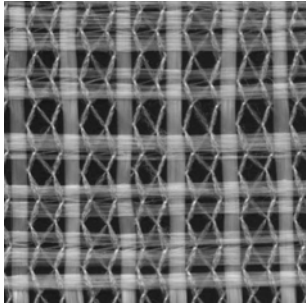
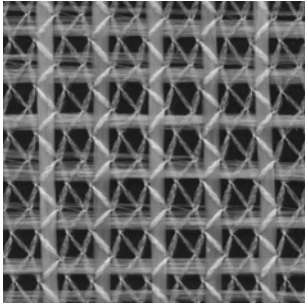
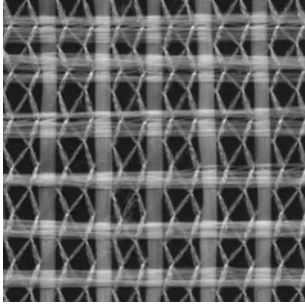
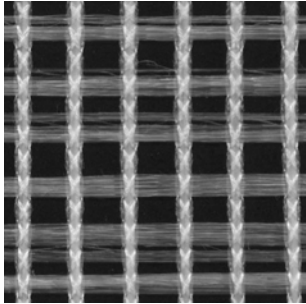
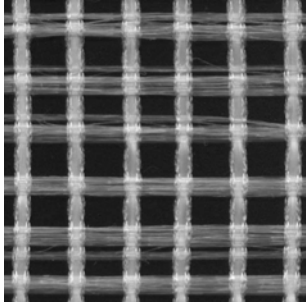
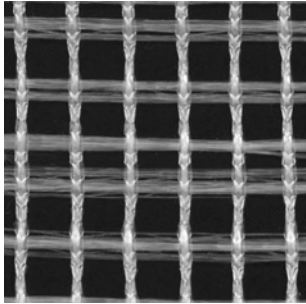
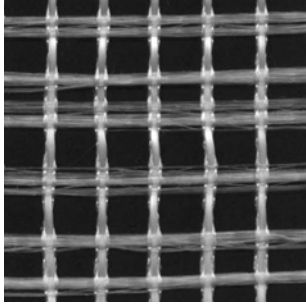
²⁾ Bezeichnung: HERSTELLER-MATERIAL-Feinheit-Chargennummer-Schlichte (Abkürzungen s. Kapitel 12)

³⁾ theoretischer Wert (Soll-Wert); dabei ist 1 tex = 1 g/km

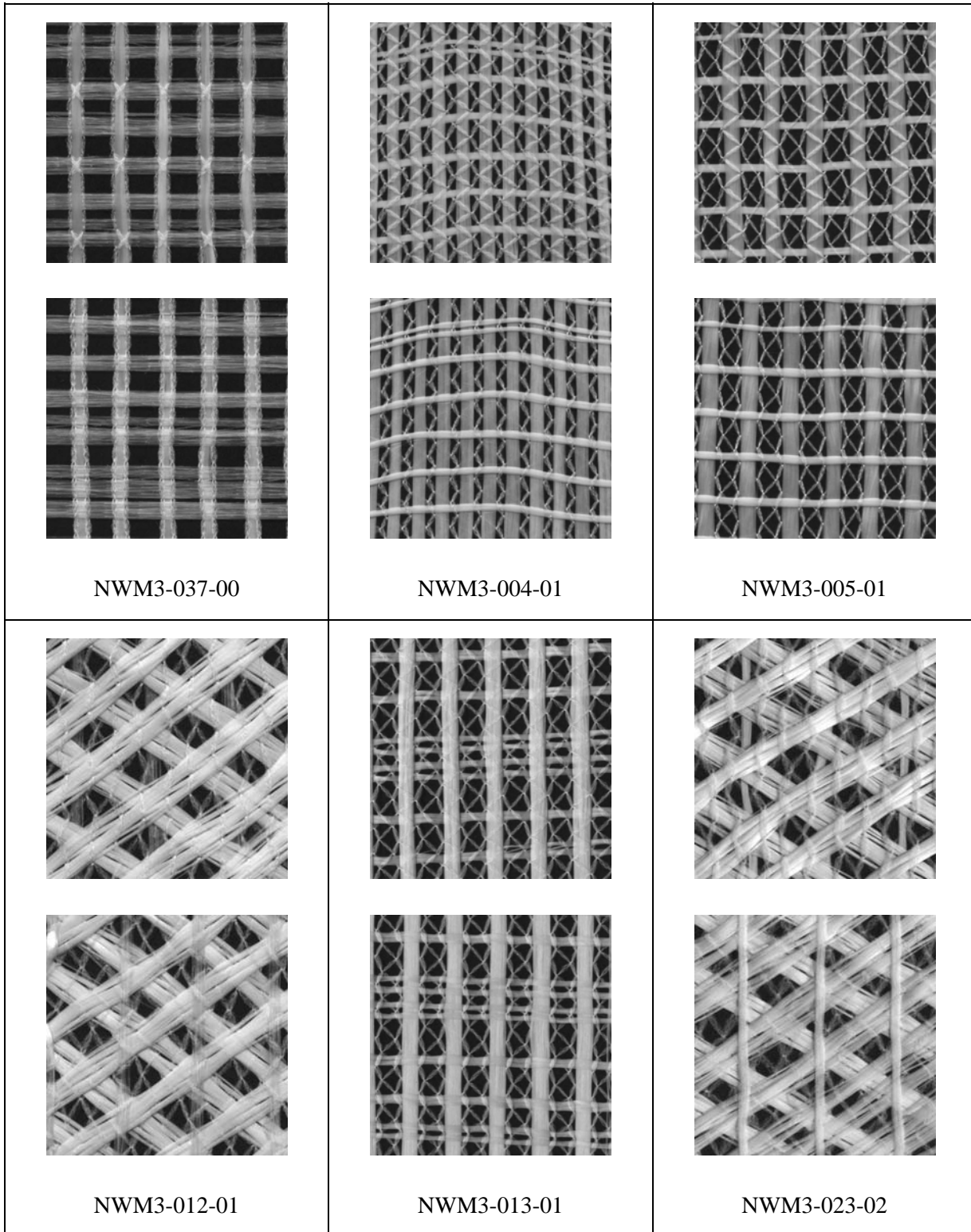
Textil Bezeich- nung ¹⁾	Kettfaden			Schussfaden			Bindung		Versuchsart		
	Bezeich- nung ²⁾	Fein- heit ³⁾ [tex]	Ab- stand [mm]	Bezeich- nung ²⁾	Fein- heit ³⁾ [tex]	Ab- stand [mm]	Art	Stich- länge [mm]	HZ	S	FA
NWM3- 001-05-p	VET- ARG1200 -02	1200	7,2	VET- ARG1200- 02	1200	7,2	Trikot gegen- legig	5,0			
NWM3- 025-05- p2	VET- ARG1200 -02	1200	7,2	VET- ARG1200- 02	1200	7,2	Trikot gegen- legig	4,0			
NWM3- 026-05	VET- ARG1200 -02	1200	7,2	VET- ARG1200- 02	1200	7,2	Trikot gegen- legig	2,0	x		x
NWM3- 026-05- p2	VET- ARG1200 -02	1200	7,2	VET- ARG1200- 02	1200	7,2	Trikot gegen- legig	2,0	x	x	x
NWM3- 027-05- sb	VET- ARG640- 03	640	18,0	VET- ARG1200- 02	1200	7,2	Trikot gegen- legig	2,0	x	x	x
NWM3- 028-05	VET- ARG1200 -02	1200	7,2	VET- ARG640- 03	640	10,2	Trikot gegen- legig	2,0	x		x
NWM3- 028-05- p2	VET- ARG1200 -02	1200	7,2	VET- ARG640- 03	640	10,2	Trikot gegen- legig	2,0			x
NWM3- 029-05- p2	VET- ARG1200 -02	1200	7,2	VET- ARG640- 03	640	18,0	Trikot gegen- legig	3,5	x	x	x
NWM3- 001-06	VET- ARG640- 03	640	18,0	VET- ARG1200- 02	1200	7,2	Trikot gegen- legig	2,0	x		x
NWM3- 001-06- sb	VET- ARG640- 03	640	18,0	VET- ARG1200- 02	1200	7,2	Trikot gegen- legig	2,0	x	x	x
NWM4- 001-01	NEG- ARG620- 05	620	7,2	NEG- ARG620- 05	620	7,2	Trikot gegen- legig	2,4	x		
NWM4- 002-03	TEN- CF800-01	800	7,2	NEG- ARG620- 05	620	10,8	Trikot gegen- legig	2,4	x		
NWM4- 002-03- 2b	TEN- CF800- 01-2b	800	7,2	NEG- ARG620- 05-2b	620	10,8	Trikot gegen- legig	2,4	x		
NWM4- 003-03	NEG- ARG1100 -01	1100	7,2	NEG- ARG620- 05	620	10,8	Trikot gegen- legig	1,8	x		
NWM4- 003-03- 2b	NEG- ARG1100 -01-2b	1100	7,2	NEG- ARG620- 05-2b	620	10,8	Trikot gegen- legig	1,8	x	x	
NWM4- 004-03	NEG- ARG620- 01	620	7,2	NEG- ARG620- 05	620	10,8	Trikot gegen- legig	2,4	x		

Textil Bezeich- nung ¹⁾	Kettfaden			Schussfaden			Bindung		Versuchsart		
	Bezeich- nung ²⁾	Fein- heit ³⁾ [tex]	Ab- stand [mm]	Bezeich- nung ²⁾	Fein- heit ³⁾ [tex]	Ab- stand [mm]	Art	Stich- länge [mm]	HZ	S	FA
NWM4- 004-03- 2b	NEG- ARG620- 01-2b	620	7,2	NEG- ARG620- 05-2b	620	10,8	Trikot gegen- legig	2,4	x		
NWM4- 005-03	NEG- ARG620- 05	620	7,2	NEG- ARG620- 05	620	10,8	Trikot gegen- legig	2,4	x		
NWM4- 005-03- 2b	NEG- ARG620- 05-2b	620	7,2	NEG- ARG620- 05-2b	620	10,8	Trikot gegen- legig	2,4	x		
NWM4- 011-03	VET- ARG2400 -02	2400	10,8	VET- ARG640- 03	640	10,8	Trikot gegen- legig	3,6	x	x	x
NWM4- 012-03	2·VET- ARG640- 03	1280	10,8	VET- ARG640- 03	640	27,0	Trikot gegen- legig	3,6	x		
NWM4- 001-04	2·VET- ARG640- 03	1280	10,8	2·VET- ARG640- 03	1280	10,8	Trikot gegen- legig	3,6	x		
NWM4- 002-04	2·VET- ARG640- 03	1280	10,8	2·VET- ARG640- 03	1280	10,8	Franse Trikot	3,6	x		
NWM4- 003-04	2·VET- ARG640- 03	1280	10,8	VET- ARG640- 03	640	27,0	Franse Trikot	3,6	x		
NWM4- 004-04	2·VET- ARG640- 03	1280	7,2	2·VET- ARG640- 03	1280	7,2	Franse Trikot	3,6	x	x	x
NWM4- 005-04	2·VET- ARG640- 03	1280	7,2	VET- ARG640- 03	640	18,0	Franse Trikot	3,6	x	x	x
NWM4- 006-04	2·VET- ARG640- 03	1280	7,2	VET- ARG640- 03	640	18,0	Trikot gegen- legig	3,6	x	x	x
NWM4- 013-04	2·VET- ARG640- 03	1280	7,2	2·VET- ARG640- 03	1280	7,2	Trikot gegen- legig	3,6	x	x	
NWM4- 022-04	VET- ARG640- 03	640	18,0	2·VET- ARG640- 03	1280	7,2	Trikot gegen- legig	3,6	x	x	x

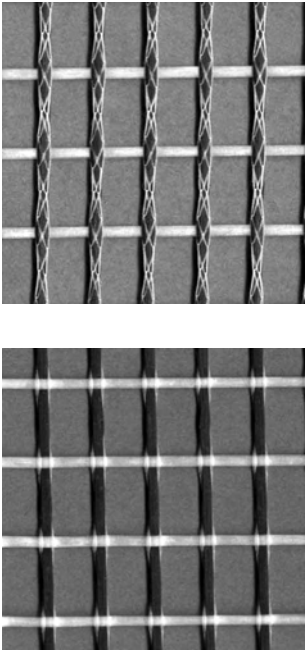
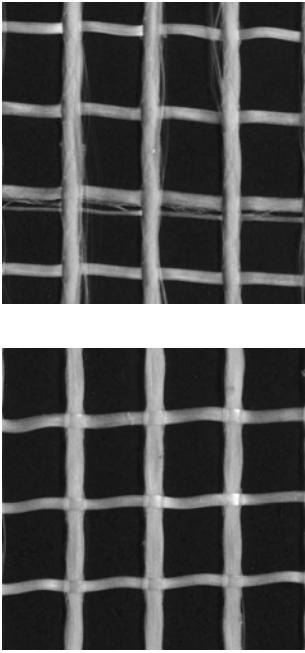
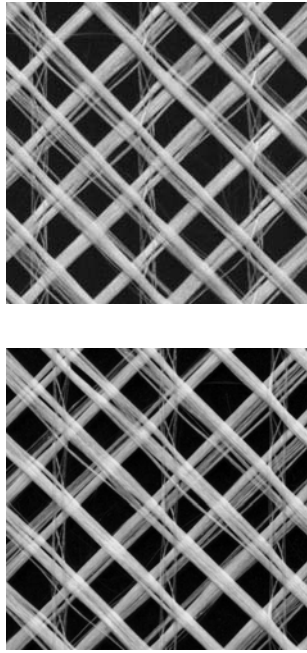
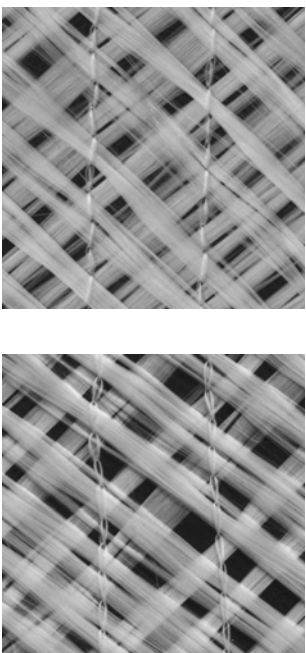
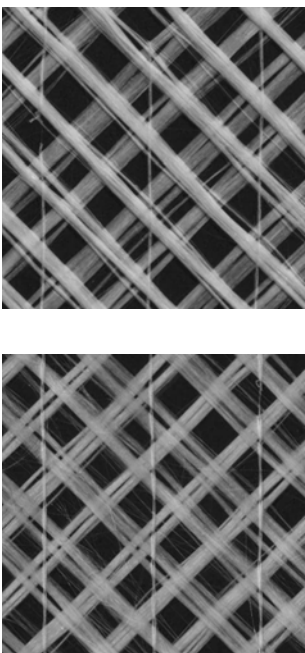
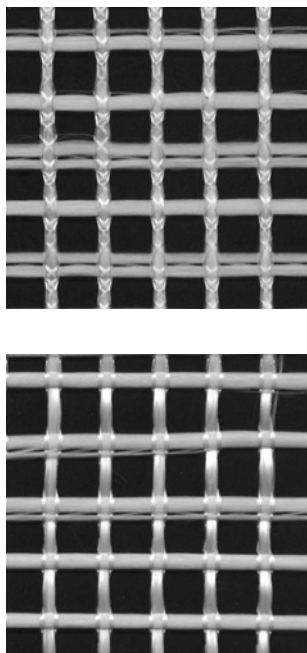
Tab. A 1.2.3 Fotografische Darstellung der Bewehrungstextilien (Vorder-/Rückseite)

  NWM3-020-00	  NWM3-030-00	  NWM3-031-00
  NWM3-032-00	  NWM3-033-00	  NWM3-035-00

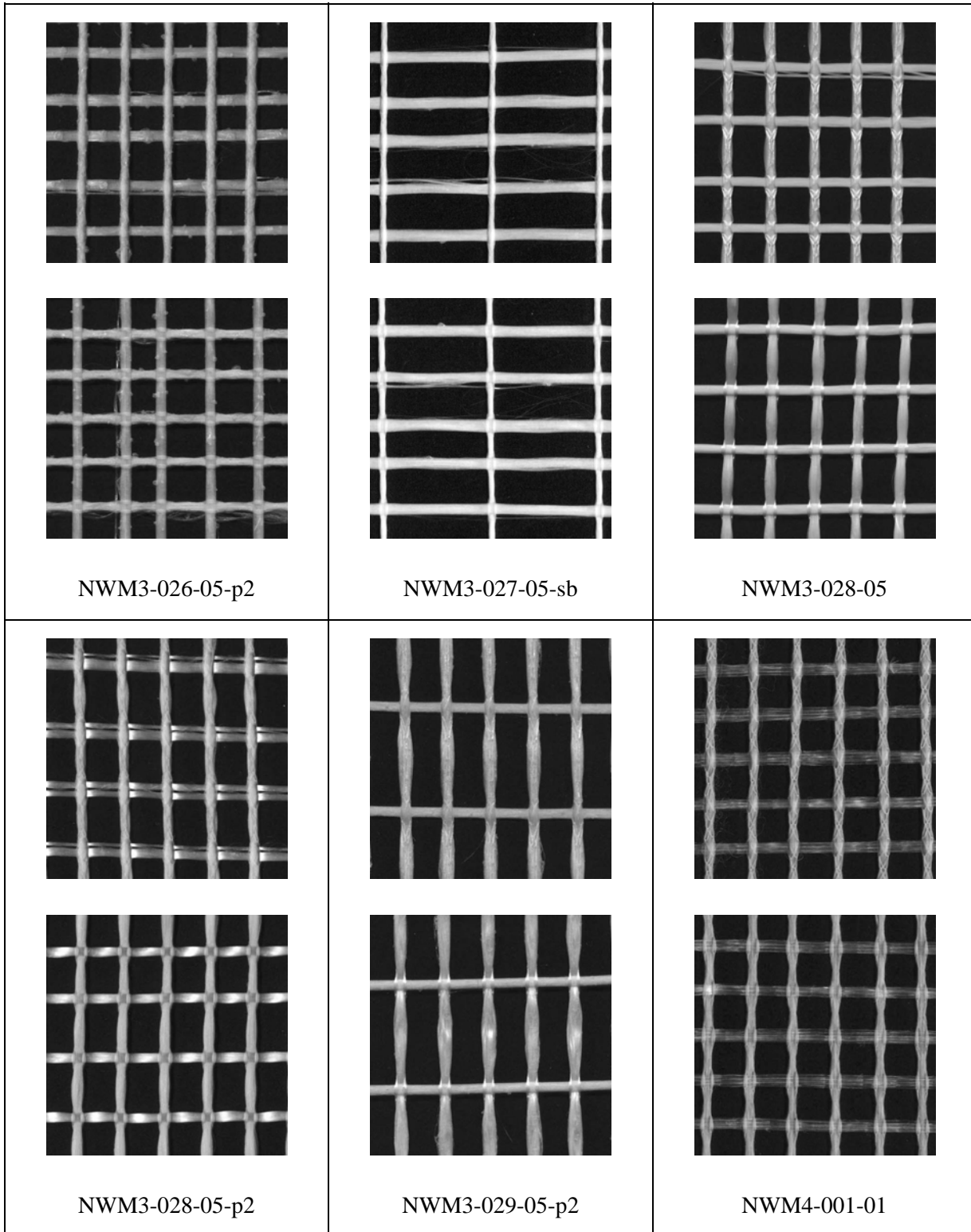
Maßstab |——| 1 cm



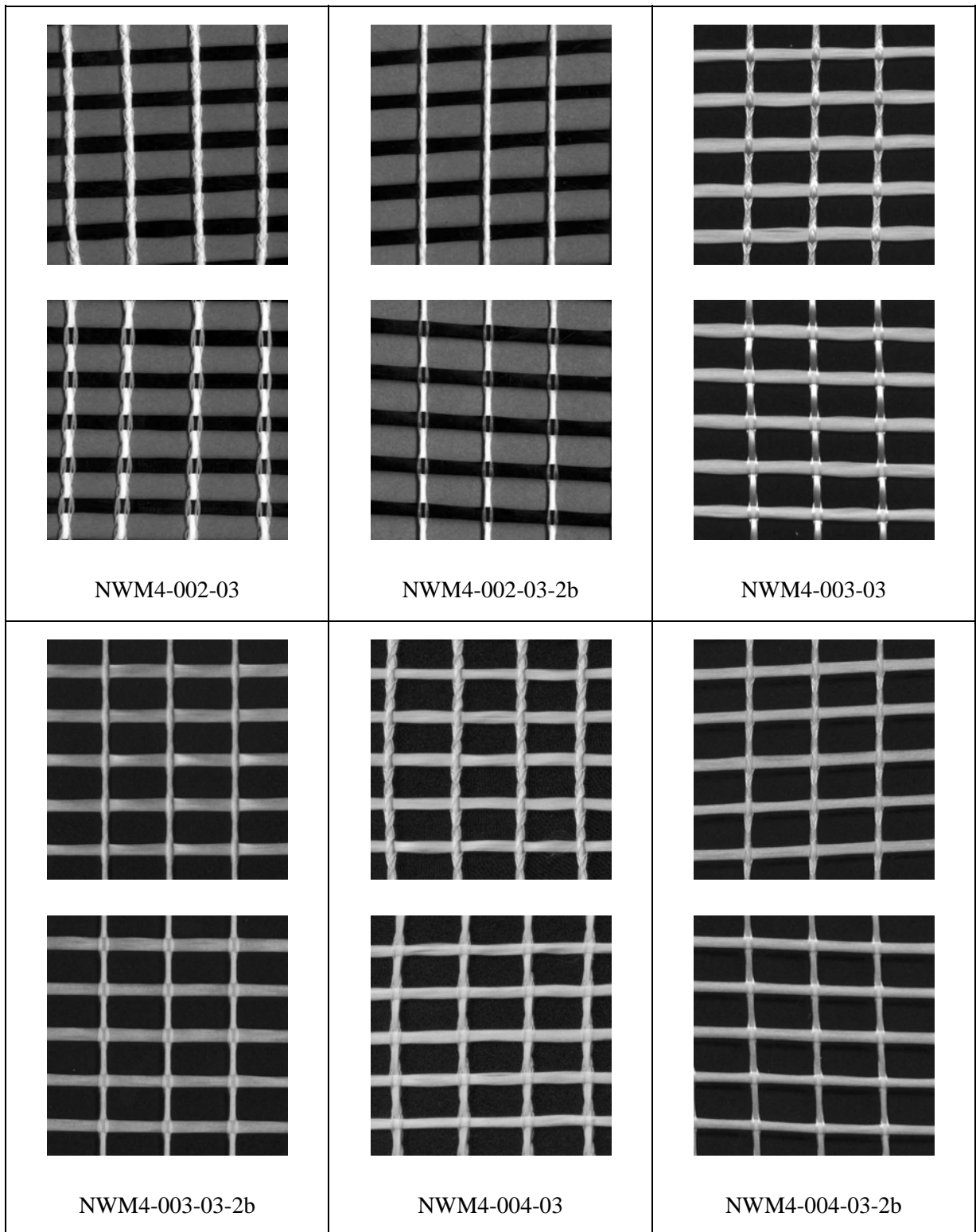
Maßstab |——| 1 cm

 <p data-bbox="316 943 545 976">NWM3-003-04-2b</p>	 <p data-bbox="724 943 954 976">NWM3-004-04-2b</p>	 <p data-bbox="1145 943 1375 976">NWM3-001-05-p</p>
 <p data-bbox="331 1711 529 1744">NWM3-025-05</p>	 <p data-bbox="724 1711 954 1744">NWM3-025-05-p2</p>	 <p data-bbox="1145 1711 1375 1744">NWM3-026-05</p>

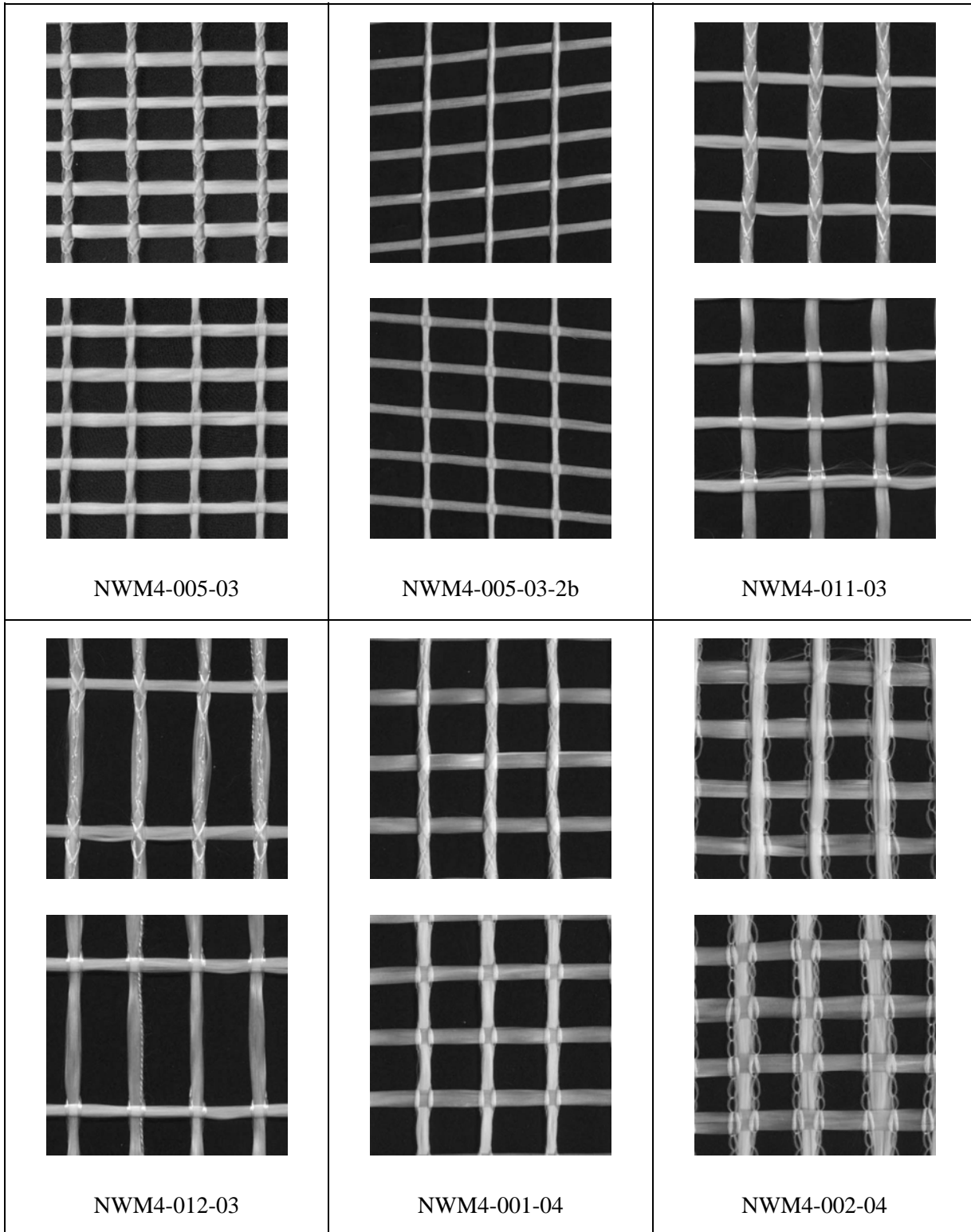
Maßstab |——| 1 cm



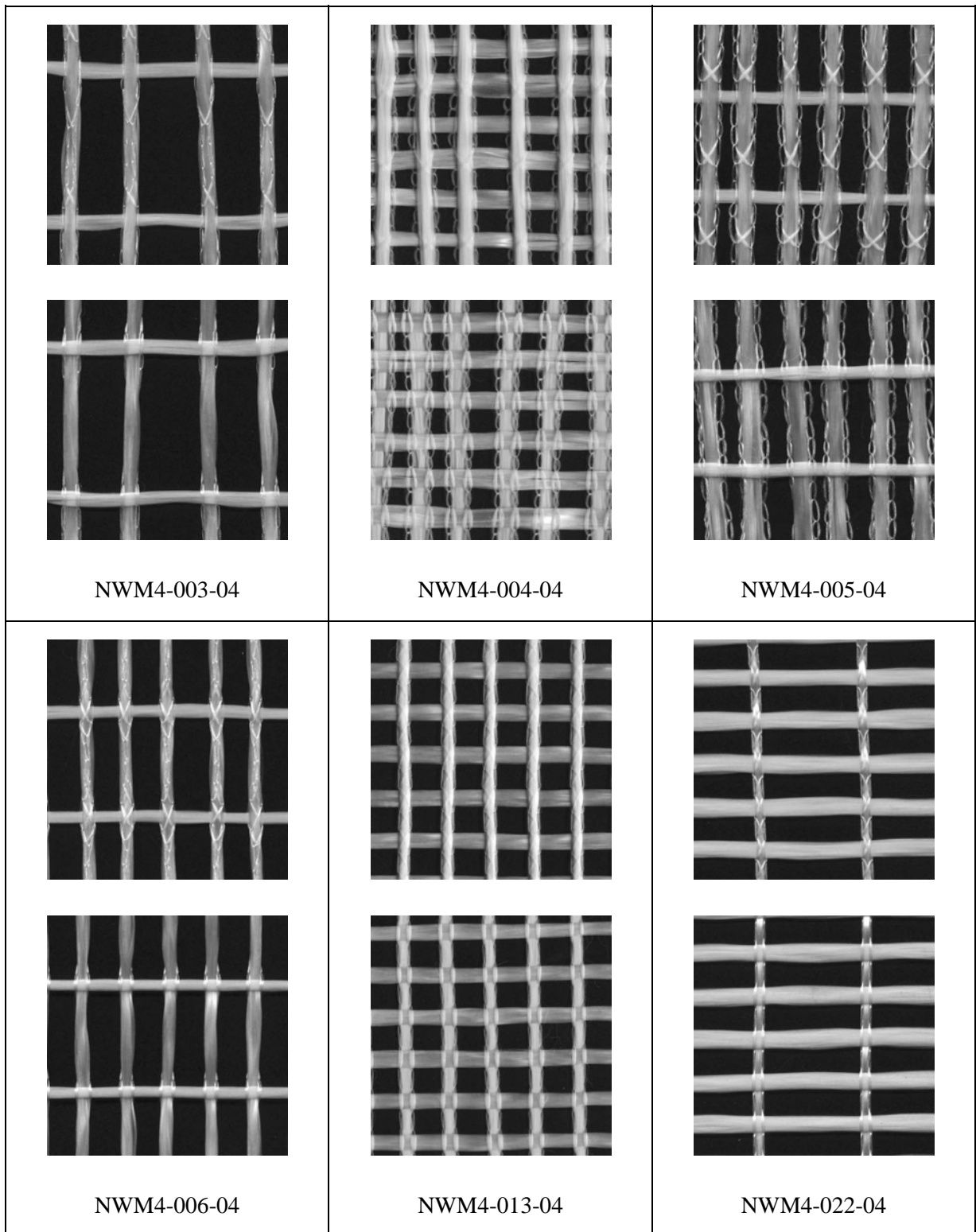
Maßstab |——| 1 cm



Maßstab |——| 1 cm



Maßstab |——| 1 cm



Maßstab |——| 1 cm

Anhang 2 Ermittlung des wirksamen Flächenanteiles der Textilien

A 2.1 Scanmethode nach CURBACH, BAUMANN & BEYER [17]

Bei der Scanmethode nach CURBACH, BAUMANN & BEYER [17] wurden die textilen Strukturen im Auflichtscanverfahren vor einem schwarzen Hintergrund mit einer Auflösung von 300 dpi und einer Bildgröße vom 7 x 13 cm gescannt. Die Bilddaten wurden anschließend einer automatischen Tonwertkorrektur unterzogen und als Graustufenbild abgespeichert. Zur Ermittlung der Flächenverhältnisse wurden diese Graustufenbilddaten mittels manueller Schwellwertwahl in ein Schwarz-Weiß-Bitmap umgewandelt (vgl. Anhang A 2.2, Methode 1), um sodann die Anzahl schwarzer Pixel auszuzählen.

A 2.2 Subjektive Auswertemethoden

Auswertemethode 1:

1. manuelle Wahl eines Schwellwertes (Standardwert = 128)
2. Umwandlung in ein Schwarz-Weiß-Bitmap mit Hilfe des gewählten Schwellwertes
3. Auszählen der schwarzen Pixel
4. der Quotient schwarze Pixel / Gesamtpixel ergibt den wirksamen Flächenanteil

Diese Methode ist von der subjektiven Einschätzung des Bearbeiters abhängig, da die Wahl des Schwellwertes für die Anzahl der schwarzen Pixel und somit für das Ergebnis entscheidend ist.

Auswertemethode 2:

1. manuelle Korrektur des Kontrastes mit Hilfe von Gradationskurven
2. Umwandlung in ein Schwarz-Weiß-Bitmap mit Hilfe des Standardschwellwertes 128
3. Auszählen der schwarzen Pixel
4. der Quotient schwarze Pixel / Gesamtpixel ergibt den wirksamen Flächenanteil

Diese Methode ist ebenfalls von der subjektiven Einschätzung des Bearbeiters abhängig, da hier die manuelle Kontrastkorrektur für die Anzahl der schwarzen Pixel und somit für das Ergebnis entscheidend ist.

Auswertemethode 3:

1. manuelle Aufhellung von dunkel erscheinenden Stellen der textilen Struktur
2. Umwandlung in ein Schwarz-Weiß-Bitmap mit Hilfe des Standardschwellwertes 128
3. Auszählen der schwarzen Pixel
4. der Quotient schwarze Pixel / Gesamtpixel ergibt den wirksamen Flächenanteil

Diese Methode ist stark von der subjektiven Einschätzung des Bearbeiters abhängig, da hier die Einschätzung, welche Graubereiche noch dem Textil zuzuordnen sind, vom Bearbeiter getroffen werden muss. Für die Anzahl der schwarzen Pixel und damit für das Ergebnis ist es entscheidend, wie viele Bereiche manuell nachbearbeitet werden.

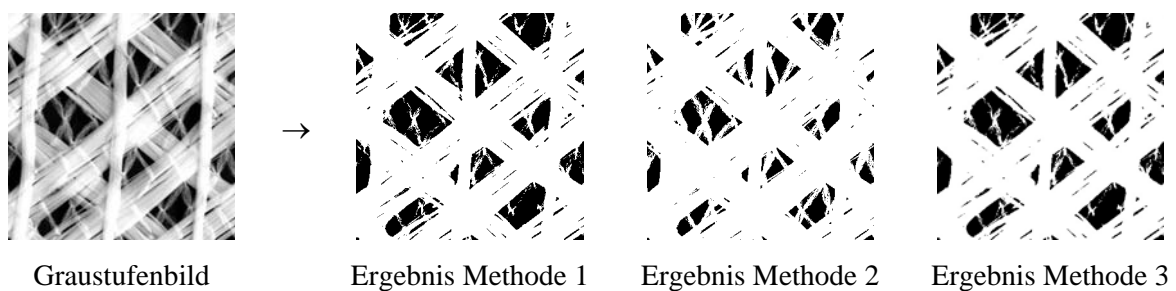


Bild A 2.2.1 Ergebnisse der drei Auswertemethoden am Beispiel des Textils NWM3-023-02

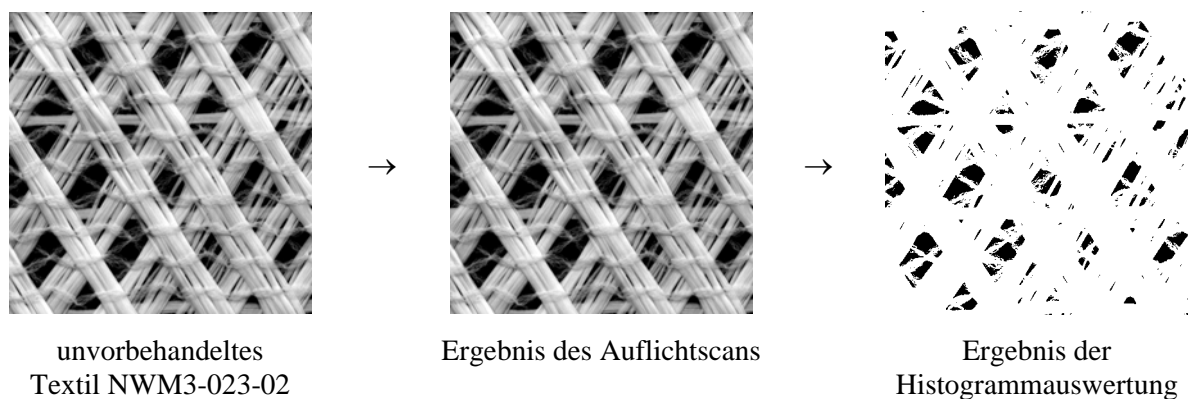
A 2.3 Darstellung der Scanmethoden und Histogrammanalyseverfahren

Bild A 2.2.2 Histogrammauswertung des Auflichtscans am unvorbehandelten Textil



Bild A 2.2.3 Histogrammauswertung des Auflichtscans am weiß vorbehandelten Textil

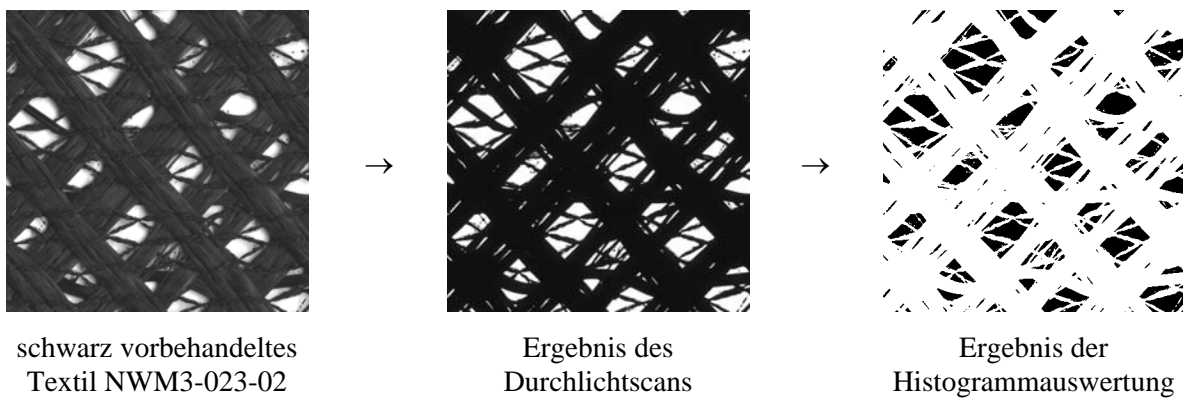


Bild A 2.2.4 Histogrammauswertung des Durchlichtscans am schwarz vorbehandelten Textil

A 2.4 Ergebnisse des Histogrammanalyseverfahrens mit Durchlichtscan

Tab. A 2.4.1 wirksamer Flächenanteil der Textilien

Textil Bezeichnung	wirksamer Flächenanteil $k_{A,eff}$
NWM4-001-01	0,63
NWM4-002-03	0,61
NWM4-002-03-2b	0,61
NWM4-003-03	0,65
NWM4-003-03-2b	0,64
NWM4-004-03	0,68
NWM4-004-03-2b	0,69
NWM4-005-03	0,62
NWM4-005-03-2b	0,69
NWM4-011-03	0,62
NWM4-012-03	0,74
NWM4-001-04	0,62
NWM4-002-04	0,49

Textil Bezeichnung	wirksamer Flächenanteil $k_{A,eff}$
NWM4-003-04	0,68
NWM4-004-04	0,3
NWM4-005-04	0,48
NWM4-006-04	0,62
NWM4-013-04	0,44
NWM4-022-04	0,58
NWM3-020-00	0,2
NWM3-030-00	0,21
NWM3-031-00	0,11
NWM3-032-00	– ¹⁾
NWM3-033-00	0,33
NWM3-035-00	0,48
NWM3-037-00	0,29
NWM3-004-01	0,21
NWM3-005-01	0,32
NWM3-012-01	0,11
NWM3-013-01	0,3
NWM3-023-02	0,15
NWM3-003-04-2b	0,68
NWM3-004-04-2b	0,65
NWM3-001-05-p	0,38
NWM3-025-05	0,22
NWM3-025-05-p2	0,31
NWM3-026-05	0,46
NWM3-026-05-p2	0,50
NWM3-027-05-sb	0,62
NWM3-028-05	0,61
NWM3-028-05-p2	0,60
NWM3-029-05-p2	0,61

¹⁾ Wert wurde nicht ermittelt, da kein ausreichend großes Textilstück mehr vorhanden war

Anhang 3 Probekörperherstellung und Versuchsdurchführung

A 3.1 Haftzugversuche

Herstellung der Altbetongrundkörper (nur bei Serien mit Altbetonuntergrund):

- 3 Platten zu je 60 x 60 x 10 cm (Rezeptur siehe Anhang A 1.1)
- Regelkörper:
 - 6 Würfel 15 x 15 cm für Druckprüfung, davon
 - 3 Würfel mit Normlagerung (28d)
 - 3 Würfel mit Lagerung neben den Platten bis zur Prüfung
- 9 Zylinder mit Normlagerung (28d) für 3x Spaltzug, 3x Zug, 3x E-Modul (nicht bei allen Serien)
- Mischer- und Werkzeugreinigung
- Ausschalen am nächsten Tag
- Beschriften der Platten und Regelprüfkörper jeweils mit Seriennummer und Betonierdatum

Oberflächenvorbereitung der Altbetonplatten (nur bei Serien mit Altbetonuntergrund):

- in der vierten Woche nach Herstellung wird die glatte Schalseite der Versuchsplatte sandgestrahlt
- Rauigkeitsvorgabe je nach Serie
- Bestimmung der Rautiefe nach KAUFMANN [47]

Beschichten mit der Feinbetonschicht:

- Zuschneiden der Textilien auf die Plattengröße
- Anfeuchten der Altbetonplatten vor dem Beschichten (nur bei Serien mit Altbetonuntergrund)
- bei einigen Versuchen Aufbringen einer mineralischen Haftbrücke, auf die dann frisch in frisch der Feinbeton aufgebracht wird (nur bei Serien mit Altbetonuntergrund)
- lagenweises Einbringen der Textilien in die Feinbetonmatrix (laminieren bzw. mit Sprühpistole); Eindrücken der Textilien in die Matrix mittels Spachtel
- glattes Abziehen der letzten Feinbetonschicht

- Regelkörper:
 - 6 Mörtelprismen zur Biegezug- und Druckprüfung mit Lagerung neben den beschichteten Platten bis zur Prüfung
- Einwickeln der beschichteten Platten (nur bei Serien mit Altbetonuntergrund) bzw. der Feinbetonplatten (nur bei Serien ohne Altbetonuntergrund) mit Feuchttüchern und Folie zur Nachbehandlung
- Ausschalen nach drei Tagen
- wiederholtes Einwickeln mit Feuchttüchern und Folie zur weiteren Nachbehandlung
- nach sieben Tagen Abnehmen der Feuchttücher

Vorbereitung zur Prüfung:

- eine Woche vor Prüfung (\approx 3 Wochen nach Beschichten der Platten) Einbringen der Ringbohrungen und Beschriften der freigebohrten Zylinder mit der Probekörpernummer
- Anschleifen der Feinbetonoberfläche im Bereich der freigebohrten Zylinder
- Bestimmung der Probekörperabmessungen
- Aufkleben der freigebohrten Feinbetonzylinder mittels Zwei-Komponenten-Epoxydharzkleber auf eine Stahlplatte (nur bei Serien ohne Altbetonuntergrund)
- mind. 2 Tage vor der Prüfung Aufkleben der Prüfstempel mittels Zwei-Komponenten-Epoxydharzkleber

Durchführung der Prüfung:

- Aufbringen der Haftzugkraft mittels Handkurbel, Richtgeschwindigkeit 100 N/sec
- Ablesen der Bruchkraft und Berechnen der Bruchspannung

Nachbereitung der Prüfung

- fotografische Dokumentation der Versuchsplatten und aller Einzelversuche sowohl Ober- als auch Unterseite der Bruchflächen

A 3.2 Verbundversuche unter Schubbeanspruchung

Herstellung der Altbetongrundkörper:

- 6 Prismen zu je 15 x 15 x 40 cm (Rezeptur siehe Anhang A 1.1)
- Regelkörper:
 - 6 Würfel 15 x 15 cm für Druckprüfung, davon

- 3 Würfel mit Normlagerung (28d)
- 3 Würfel mit Lagerung neben den Prismen bis zur Prüfung
- 9 Zylinder mit Normlagerung (28d) für 3x Spaltzug, 3x Zug, 3x E-Modul (nicht bei allen Serien)
- Mischer- und Werkzeugreinigung
- Ausschalen am nächsten Tag
- Beschriften der Prismen und Regelprüfkörper jeweils mit Seriennummer, Probekörpernummer und Betonierdatum

Oberflächenvorbereitung der Altbetongrundkörper:

- in der vierten Woche nach Herstellung werden die beiden glatten, gegenüberliegenden Schalseiten der Versuchskörper sandgestrahlt; bei der Stahlflasche genügt ein Streifen ausreichender Breite in der Mitte
- ggf. wurde der Verbundbereich rauer gestrahlt (je nach Serie)
- Bestimmung der Rautiefe nach KAUFMANN [47]

Beschichten mit den textilibewehrten Feinbetonlaschen:

- Abkleben außerhalb des Verbundbereichs mit PVC-Klebeband (als Verbundstörung)
- Zuschneiden der Textilien für die entsprechende Verbundlänge
- Anfeuchten der Altbetonprismen im Verbundbereich vor dem Beschichten
- bei einigen Versuchen Aufbringen einer mineralischen Haftbrücke, auf die dann frisch in frisch der Feinbeton aufgebracht wird
- lagenweises Einbringen der Textilien in die Feinbetonmatrix (laminieren bzw. mit Sprühpistole); Einarbeiten der Textilien in die Matrix mittels Spachtel
- glattes Abziehen der letzten Feinbetonschicht
- Regelkörper:
 - 6 Mörtelprismen zur Biegezug- und Druckprüfung mit Lagerung neben den Prismen bis zur Prüfung
- Einwickeln der Frischbetonkörper mit Feuchttüchern und Folie zur Nachbehandlung
- Ausschalen nach drei Tagen
- wiederholtes Einwickeln mit Feuchttüchern und Folie zur weiteren Nachbehandlung
- nach sieben Tagen Abnehmen der Feuchttücher

Vorbereitung zur Prüfung:

- eine Woche vor Prüfung (\approx 3 Wochen nach Beschichten der Laschen) Anschleifen der Feinbetonlaschen im Bereich der Lasteinleitung und im Messbereich der Photogrammetrie
- bei einigen Serien: Aufkleben der DMS
- mind. 2 Tage vor der Prüfung Aufkleben der Stahllaschen mittels Zwei-Komponenten-Epoxydharzkleber mit gesamter Länge der Stahllaschen
- Aufkleben der Messböckchen für die seitlichen DD1 im Bereich der freien Laschenlänge
- Bestimmung der Probekörperabmessungen
- Versiegeln der Seitenflächen der Feinbetonlaschen im Verbundbereich mit verdünntem Nitrolack zur nachträglichen Risswinkelanalyse
- am Prüftag Vorbereitung des Messbereiches mit Kontrastspray für die photogrammetrische Messung

Durchführung der Prüfung:

- Einstellung des Achsabstandes der Lasteinleitungskonstruktion auf den Achsabstand der Laschen im Verbundbereich, um Biegung infolge Exzentrizitäten zu minimieren
- Nullabgleich für die Kraftmessdose
- Nullabgleich für DMS und DD1 bei Vorlast von 1 kN
- Versuchsstart bei Vorlast von 1 kN
- Protokollieren der wichtigsten Eckdaten wie Versagensbild und Bruchkraft nach Versuchsende
- Abspeichern und Exportieren der Messdaten nach Versuchsende

Nachbereitung der Prüfung:

- Einreiben der mit Nitrolack beschichteten Flächen mit pigmentierter schwarzer Tinte zum Sichtbarmachen der Risse – überschüssige Tinte ist abzuwischen, so dass die Risse deutlich sichtbar werden
- Markierung des Verbundbereiches und fotografische Dokumentation der Probekörper, insbes. im Verbundbereich und der Laschen jeweils als Drauf- und ggf. Untersicht sowie der Stirnseiten im Verbundbereich für die Risswinkelanalyse
- Entfernen der Stahllaschen und Säubern von Klebstoffresten

A 3.3 Filamentgarnauszugsversuche

Herstellen der Feinbetonplatten:

- Zuschneiden der Textilien auf die Schalungsabmessungen
- lagenweises Einbringen der Textilien in die Feinbetonmatrix (laminieren bzw. mit Sprühpistole); Eindrücken der Textilien in die Matrix mittels Spachtel
- glattes Abziehen der letzten Feinbetonschicht
- Regelkörper:
 - 6 Mörtelprismen zur Biegezug- und Druckprüfung
mit Lagerung neben den Feinbetonprobekörpern bis zur Prüfung
- Einwickeln der Feinbetonplatten mit Feuchttüchern und Folie zur Nachbehandlung
- Ausschalen nach drei Tagen
- wiederholtes Einwickeln mit Feuchttüchern und Folie zur weiteren Nachbehandlung
- nach sieben Tagen Abnehmen der Feuchttücher

Vorbereitung zur Prüfung:

- eine Woche vor Prüfung (≈ 3 Wochen nach Herstellung der Platten) Aussägen der Probekörper mit 10 cm Breite aus der Platte und Anschrägen des Verbundbereiches
- Bestimmung der Probekörperabmessungen
- mind. 2 Tage vor der Prüfung Aufkleben der Stahlsteinleitungsplatten im Verbundbereich mittels Zwei-Komponenten-Epoxydharzkleber
- Versiegeln der Oberfläche im Messbereich mit verdünntem Nitrolack zur nachträglichen Rissbilddokumentation

Durchführung der Prüfung:

- Einstellung der Lasteinleitungsbolzen auf die Achsabstände der geklebten und geschraubten Lasteinleitungsplatten (in Abhängigkeit von der Probekörperdicke)
- Nullabgleich für DMS und DD1 bei Vorlast von 1 kN
- Versuchsstart bei Vorlast von 1 kN
- Protokollieren der wichtigsten Eckdaten wie Versagensbild und Bruchkraft nach Versuchsende
- Abspeichern und Exportieren der Messdaten nach Versuchsende

Nachbereitung der Prüfung:

- Einreiben der mit Nitrolack beschichteten Flächen mit pigmentierter schwarzer Tinte zum Sichtbarmachen der Risse – überschüssige Tinte ist abzuwischen, so dass die Risse deutlich sichtbar werden
- fotografische Dokumentation der Probekörper, insbes. im Verbundbereich mit Versagensbild sowie Rissbild
- Entfernen der geklebten Stahlplatten und Säubern von Klebstoffresten

Anhang 4 Versuchsdaten

A 4.1 Haftzugversuche

In den nachfolgenden Tabellen sind die Daten der durchgeführten Haftzugversuche getrennt nach Versagensebenen zusammengefasst. Nicht auswertbare Versuche, z. B. infolge Klebstoffversagen, entfallen.

Tab. A 4.1.1 Ergebnisse der Haftzugversuche – Versagen durch Delamination in der Textilebene

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brüc- ke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ³⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
13H-1	3-004-01	1	L	h	–	0,84	1,02	34,10	–	71,70	7,20
13H-2	3-004-01	1	L	h	–	0,84	0,56	34,10	–	71,70	7,20
13H-3	3-004-01	1	L	h	–	0,84	0,61	34,10	–	71,70	7,20
13H-4	3-004-01	1	L	h	–	0,84	0,97	34,10	–	71,70	7,20
13H-5	3-004-01	1	L	h	–	0,84	0,87	34,10	–	71,70	7,20
13H-6	3-004-01	1	L	h	–	0,84	0,77	34,10	–	71,70	7,20
13H-7	3-004-01	1	L	h	–	0,84	0,61	34,10	–	71,70	7,20
13H-8	3-004-01	1	L	h	–	0,84	1,07	34,10	–	71,70	7,20
13H-9	3-004-01	1	L	h	–	0,84	1,58	34,10	–	71,70	7,20
13H-10	3-004-01	1	L	h	–	0,84	0,61	34,10	–	71,70	7,20
13H-11	3-004-01	1	L	h	–	0,84	1,28	34,10	–	71,70	7,20
13H-12	3-004-01	1	L	h	–	0,84	1,12	34,10	–	71,70	7,20
13H-13	3-004-01	1	L	h	–	0,84	1,43	34,10	–	71,70	7,20
13H-14	3-004-01	1	L	h	–	0,84	0,82	34,10	–	71,70	7,20
13H-15	3-004-01	1	L	h	–	0,84	0,61	34,10	–	71,70	7,20
13H-16	3-004-01	1	L	h	–	0,84	1,17	34,10	–	71,70	7,20
14H-1	3-030-00	1	L	h	–	0,81	1,17	34,10	–	71,70	7,20
14H-3	3-030-00	1	L	h	–	0,81	1,48	34,10	–	71,70	7,20
14H-4	3-030-00	1	L	h	–	0,81	1,94	34,10	–	71,70	7,20
14H-5	3-030-00	1	L	h	–	0,81	1,63	34,10	–	71,70	7,20
14H-7	3-030-00	1	L	h	–	0,81	1,28	34,10	–	71,70	7,20
14H-9	3-030-00	1	L	h	–	0,81	1,28	34,10	–	71,70	7,20
14H-10	3-030-00	1	L	h	–	0,81	1,84	34,10	–	71,70	7,20
14H-11	3-030-00	1	L	h	–	0,81	2,14	34,10	–	71,70	7,20
14H-12	3-030-00	1	L	h	–	0,81	1,94	34,10	–	71,70	7,20
14H-13	3-030-00	1	L	h	–	0,81	1,43	34,10	–	71,70	7,20
14H-14	3-030-00	1	L	h	–	0,81	2,40	34,10	–	71,70	7,20
14H-15	3-030-00	1	L	h	–	0,81	1,07	34,10	–	71,70	7,20
14H-16	3-030-00	1	L	h	–	0,81	2,19	34,10	–	71,70	7,20
16H-5	3-005-01	1	L	h	–	0,84	2,45	33,17	–	69,30	6,10
16H-7	3-005-01	1	L	h	–	0,84	2,45	33,17	–	69,30	6,10
16H-9	3-005-01	1	L	h	–	0,84	2,30	33,17	–	69,30	6,10

¹⁾ L = Laminieren, S = Sprühen, K = Kleben

²⁾ h = horizontal, v = vertikal, üK = über Kopf

³⁾ Regelprüfung am 15er Würfel

⁴⁾ nach 28d

⁵⁾ am Prüftag der Haftzugprüfung (= 28d-Festigkeit des Feinbetons)

⁶⁾ Regelprüfung am Mörtelprisma

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ³⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]
16H-12	3-005-01	1	L	h	-	0,84	2,65	33,17	-	69,30	6,10
16H-13	3-005-01	1	L	h	-	0,84	2,35	33,17	-	69,30	6,10
16H-14	3-005-01	1	L	h	-	0,84	1,99	33,17	-	69,30	6,10
17H-9	3-005-01	1	K	h	-	0,86	1,58	33,17	-	69,30	6,10
17H-10	3-005-01	1	K	h	-	0,86	1,63	33,17	-	69,30	6,10
17H-11	3-005-01	1	K	h	-	0,86	1,28	33,17	-	69,30	6,10
17H-13	3-005-01	1	K	h	-	0,86	1,53	33,17	-	69,30	6,10
17H-14	3-005-01	1	K	h	-	0,86	1,63	33,17	-	69,30	6,10
17H-15	3-005-01	1	K	h	-	0,86	1,22	33,17	-	69,30	6,10
17H-16	3-005-01	1	K	h	-	0,86	1,94	33,17	-	69,30	6,10
18H-1	3-005-01	1	S	h	-	0,84	2,45	33,17	-	69,30	6,10
18H-2	3-005-01	1	S	h	-	0,84	2,14	33,17	-	69,30	6,10
18H-3	3-005-01	1	S	h	-	0,84	1,99	33,17	-	69,30	6,10
18H-4	3-005-01	1	S	h	-	0,84	2,45	33,17	-	69,30	6,10
18H-6	3-005-01	1	S	h	-	0,84	1,94	33,17	-	69,30	6,10
18H-7	3-005-01	1	S	h	-	0,84	1,73	33,17	-	69,30	6,10
18H-9	3-005-01	1	S	h	-	0,84	1,79	33,17	-	69,30	6,10
18H-10	3-005-01	1	S	h	-	0,84	1,99	33,17	-	69,30	6,10
18H-13	3-005-01	1	S	h	-	0,84	2,55	33,17	-	69,30	6,10
18H-14	3-005-01	1	S	h	-	0,84	1,99	33,17	-	69,30	6,10
18H-16	3-005-01	1	S	h	-	0,84	1,79	33,17	-	69,30	6,10
19H-1	3-031-00	1	L	h	-	0,91	1,02	32,53	-	71,80	6,60
19H-2	3-031-00	1	L	h	-	0,91	2,40	32,53	-	71,80	6,60
19H-3	3-031-00	1	L	h	-	0,91	1,07	32,53	-	71,80	6,60
19H-4	3-031-00	1	L	h	-	0,91	0,97	32,53	-	71,80	6,60
19H-5	3-031-00	1	L	h	-	0,91	1,07	32,53	-	71,80	6,60
19H-6	3-031-00	1	L	h	-	0,91	1,58	32,53	-	71,80	6,60
19H-7	3-031-00	1	L	h	-	0,91	1,48	32,53	-	71,80	6,60
19H-8	3-031-00	1	L	h	-	0,91	1,02	32,53	-	71,80	6,60
19H-9	3-031-00	1	L	h	-	0,91	0,92	32,53	-	71,80	6,60
19H-10	3-031-00	1	L	h	-	0,91	1,63	32,53	-	71,80	6,60
19H-11	3-031-00	1	L	h	-	0,91	1,22	32,53	-	71,80	6,60
19H-12	3-031-00	1	L	h	-	0,91	0,66	32,53	-	71,80	6,60
19H-13	3-031-00	1	L	h	-	0,91	0,66	32,53	-	71,80	6,60
19H-14	3-031-00	1	L	h	-	0,91	1,07	32,53	-	71,80	6,60
19H-15	3-031-00	1	L	h	-	0,91	0,77	32,53	-	71,80	6,60
19H-16	3-031-00	1	L	h	-	0,91	1,48	32,53	-	71,80	6,60
20H-1	3-033-00	1	L	h	-	0,84	1,99	32,53	-	71,80	6,60
20H-2	3-033-00	1	L	h	-	0,84	1,58	32,53	-	71,80	6,60
20H-3	3-033-00	1	L	h	-	0,84	1,84	32,53	-	71,80	6,60
20H-4	3-033-00	1	L	h	-	0,84	1,94	32,53	-	71,80	6,60
20H-5	3-033-00	1	L	h	-	0,84	1,73	32,53	-	71,80	6,60
20H-6	3-033-00	1	L	h	-	0,84	1,33	32,53	-	71,80	6,60
20H-7	3-033-00	1	L	h	-	0,84	1,73	32,53	-	71,80	6,60
20H-8	3-033-00	1	L	h	-	0,84	2,14	32,53	-	71,80	6,60
20H-9	3-033-00	1	L	h	-	0,84	2,24	32,53	-	71,80	6,60
20H-10	3-033-00	1	L	h	-	0,84	1,79	32,53	-	71,80	6,60
20H-11	3-033-00	1	L	h	-	0,84	1,99	32,53	-	71,80	6,60
20H-12	3-033-00	1	L	h	-	0,84	2,35	32,53	-	71,80	6,60
20H-14	3-033-00	1	L	h	-	0,84	1,73	32,53	-	71,80	6,60
20H-15	3-033-00	1	L	h	-	0,84	1,48	32,53	-	71,80	6,60
20H-16	3-033-00	1	L	h	-	0,84	1,89	32,53	-	71,80	6,60
21H-2	3-035-00	1	L	h	-	0,84	2,45	32,53	-	71,80	6,60
21H-5	3-035-00	1	L	h	-	0,84	2,24	32,53	-	71,80	6,60
21H-12	3-035-00	1	L	h	-	0,84	2,81	32,53	-	71,80	6,60

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brüc- ke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
22H-1	3-037-00	1	L	h	–	0,99	2,50	36,70	–	75,85	6,30
22H-3	3-037-00	1	L	h	–	0,99	1,89	36,70	–	75,85	6,30
22H-4	3-037-00	1	L	h	–	0,99	1,84	36,70	–	75,85	6,30
22H-5	3-037-00	1	L	h	–	0,99	1,73	36,70	–	75,85	6,30
22H-6	3-037-00	1	L	h	–	0,99	1,79	36,70	–	75,85	6,30
22H-7	3-037-00	1	L	h	–	0,99	1,89	36,70	–	75,85	6,30
22H-9	3-037-00	1	L	h	–	0,99	1,63	36,70	–	75,85	6,30
22H-10	3-037-00	1	L	h	–	0,99	1,94	36,70	–	75,85	6,30
22H-11	3-037-00	1	L	h	–	0,99	1,63	36,70	–	75,85	6,30
22H-13	3-037-00	1	L	h	–	0,99	2,60	36,70	–	75,85	6,30
22H-15	3-037-00	1	L	h	–	0,99	1,84	36,70	–	75,85	6,30
22H-16	3-037-00	1	L	h	–	0,99	2,19	36,70	–	75,85	6,30
23H-1	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,10	43,87	–	74,36	5,35
23H-2	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,10	43,87	–	74,36	5,35
23H-3	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,10	43,87	–	74,36	5,35
23H-4	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,10	43,87	–	74,36	5,35
23H-5	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,10	43,87	–	74,36	5,35
23H-6	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,20	43,87	–	74,36	5,35
23H-7	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,15	43,87	–	74,36	5,35
23H-8	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,15	43,87	–	74,36	5,35
23H-9	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,18	43,87	–	74,36	5,35
23H-10	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,66	43,87	–	74,36	5,35
23H-11	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,26	43,87	–	74,36	5,35
23H-12	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,26	43,87	–	74,36	5,35
23H-14	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,41	43,87	–	74,36	5,35
23H-15	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,87	43,87	–	74,36	5,35
23H-16	3-020-00	1	L	h	–	0,99	0,15	43,87	–	74,36	5,35
24H-1	3-004-01	1	L	h	–	0,41	1,32	–	41,75	71,25	6,55
24H-2	3-004-01	1	L	h	–	0,41	1,46	–	41,75	71,25	6,55
24H-3	3-004-01	1	L	h	–	0,41	1,05	–	41,75	71,25	6,55
24H-4	3-004-01	1	L	h	–	0,41	0,80	–	41,75	71,25	6,55
24H-5	3-004-01	1	L	h	–	0,41	0,56	–	41,75	71,25	6,55
24H-6	3-004-01	1	L	h	–	0,41	1,10	–	41,75	71,25	6,55
24H-7	3-004-01	1	L	h	–	0,41	1,30	–	41,75	71,25	6,55
24H-8	3-004-01	1	L	h	–	0,41	0,60	–	41,75	71,25	6,55
25H-1	3-004-01	1	L	h	–	0,77	1,19	–	41,75	71,25	6,55
25H-2	3-004-01	1	L	h	–	0,77	0,92	–	41,75	71,25	6,55
25H-3	3-004-01	1	L	h	–	0,77	1,09	–	41,75	71,25	6,55
25H-4	3-004-01	1	L	h	–	0,77	1,60	–	41,75	71,25	6,55
25H-5	3-004-01	1	L	h	–	0,77	0,82	–	41,75	71,25	6,55
25H-6	3-004-01	1	L	h	–	0,77	0,68	–	41,75	71,25	6,55
25H-7	3-004-01	1	L	h	–	0,77	0,40	–	41,75	71,25	6,55
25H-8	3-004-01	1	L	h	–	0,77	0,60	–	41,75	71,25	6,55
26H-1	3-004-01	1	L	h	–	1,52	1,95	–	41,75	71,25	6,55
26H-2	3-004-01	1	L	h	–	1,52	1,24	–	41,75	71,25	6,55
26H-3	3-004-01	1	L	h	–	1,52	1,30	–	41,75	71,25	6,55
26H-4	3-004-01	1	L	h	–	1,52	1,92	–	41,75	71,25	6,55
26H-5	3-004-01	1	L	h	–	1,52	1,85	–	41,75	71,25	6,55
26H-6	3-004-01	1	L	h	–	1,52	1,81	–	41,75	71,25	6,55
26H-7	3-004-01	1	L	h	–	1,52	1,20	–	41,75	71,25	6,55
26H-8	3-004-01	1	L	h	–	1,52	1,79	–	41,75	71,25	6,55
27H-1	3-013-01	1	L	h	–	0,41	2,20	–	41,75	71,25	6,55
27H-2	3-013-01	1	L	h	–	0,41	2,22	–	41,75	71,25	6,55
27H-3	3-013-01	1	L	h	–	0,41	2,25	–	41,75	71,25	6,55
27H-4	3-013-01	1	L	h	–	0,41	2,34	–	41,75	71,25	6,55

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ³⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]
27H-5	3-013-01	1	L	h	-	0,41	1,95	-	41,75	71,25	6,55
27H-6	3-013-01	1	L	h	-	0,41	2,41	-	41,75	71,25	6,55
27H-7	3-013-01	1	L	h	-	0,41	2,18	-	41,75	71,25	6,55
27H-8	3-013-01	1	L	h	-	0,41	2,40	-	41,75	71,25	6,55
28H-2	3-013-01	1	L	h	-	0,77	2,49	-	41,75	71,25	6,55
28H-3	3-013-01	1	L	h	-	0,77	1,87	-	41,75	71,25	6,55
28H-5	3-013-01	1	L	h	-	0,77	2,23	-	41,75	71,25	6,55
28H-6	3-013-01	1	L	h	-	0,77	2,70	-	41,75	71,25	6,55
28H-7	3-013-01	1	L	h	-	0,77	1,95	-	41,75	71,25	6,55
29H-1	3-013-01	1	L	h	-	1,52	2,61	-	41,75	71,25	6,55
29H-2	3-013-01	1	L	h	-	1,52	2,28	-	41,75	71,25	6,55
29H-3	3-013-01	1	L	h	-	1,52	2,58	-	41,75	71,25	6,55
29H-5	3-013-01	1	L	h	-	1,52	2,50	-	41,75	71,25	6,55
29H-6	3-013-01	1	L	h	-	1,52	2,55	-	41,75	71,25	6,55
30H-1	3-004-01	1	L	h	Ja	0,78	0,21	35,60	40,67	80,98	5,71
30H-2	3-004-01	1	L	h	Ja	0,78	0,31	35,60	40,67	80,98	5,71
30H-3	3-004-01	1	L	h	Ja	0,78	0,23	35,60	40,67	80,98	5,71
30H-4	3-004-01	1	L	h	Ja	0,78	0,18	35,60	40,67	80,98	5,71
30H-5	3-004-01	1	L	h	Ja	0,78	0,35	35,60	40,67	80,98	5,71
30H-6	3-004-01	1	L	h	Ja	0,78	0,58	35,60	40,67	80,98	5,71
30H-7	3-004-01	1	L	h	Ja	0,78	0,41	35,60	40,67	80,98	5,71
30H-8	3-004-01	1	L	h	Ja	0,78	0,26	35,60	40,67	80,98	5,71
31H-1	3-004-01	1	L	h	Ja	1,05	0,48	35,60	40,67	80,98	5,71
31H-2	3-004-01	1	L	h	Ja	1,05	0,21	35,60	40,67	80,98	5,71
31H-3	3-004-01	1	L	h	Ja	1,05	0,48	35,60	40,67	80,98	5,71
31H-4	3-004-01	1	L	h	Ja	1,05	0,26	35,60	40,67	80,98	5,71
31H-5	3-004-01	1	L	h	Ja	1,05	0,33	35,60	40,67	80,98	5,71
31H-6	3-004-01	1	L	h	Ja	1,05	0,22	35,60	40,67	80,98	5,71
31H-7	3-004-01	1	L	h	Ja	1,05	0,21	35,60	40,67	80,98	5,71
31H-8	3-004-01	1	L	h	Ja	1,05	0,26	35,60	40,67	80,98	5,71
32H-1	3-004-01	1	L	h	Ja	1,41	0,35	35,60	40,67	80,98	5,71
32H-2	3-004-01	1	L	h	Ja	1,41	0,58	35,60	40,67	80,98	5,71
32H-3	3-004-01	1	L	h	Ja	1,41	0,78	35,60	40,67	80,98	5,71
32H-4	3-004-01	1	L	h	Ja	1,41	0,60	35,60	40,67	80,98	5,71
32H-5	3-004-01	1	L	h	Ja	1,41	0,61	35,60	40,67	80,98	5,71
32H-6	3-004-01	1	L	h	Ja	1,41	0,68	35,60	40,67	80,98	5,71
32H-7	3-004-01	1	L	h	Ja	1,41	0,61	35,60	40,67	80,98	5,71
32H-8	3-004-01	1	L	h	Ja	1,41	0,26	35,60	40,67	80,98	5,71
33H-1	3-013-01	1	L	h	Ja	0,78	1,68	35,60	40,67	80,98	5,71
33H-2	3-013-01	1	L	h	Ja	0,78	1,52	35,60	40,67	80,98	5,71
33H-3	3-013-01	1	L	h	Ja	0,78	2,00	35,60	40,67	80,98	5,71
33H-4	3-013-01	1	L	h	Ja	0,78	2,00	35,60	40,67	80,98	5,71
33H-5	3-013-01	1	L	h	Ja	0,78	1,16	35,60	40,67	80,98	5,71
33H-6	3-013-01	1	L	h	Ja	0,78	1,38	35,60	40,67	80,98	5,71
33H-7	3-013-01	1	L	h	Ja	0,78	1,92	35,60	40,67	80,98	5,71
33H-8	3-013-01	1	L	h	Ja	0,78	2,05	35,60	40,67	80,98	5,71
34H-2	3-013-01	1	L	h	Ja	1,05	1,75	35,60	40,67	80,98	5,71
34H-3	3-013-01	1	L	h	Ja	1,05	2,00	35,60	40,67	80,98	5,71
34H-4	3-013-01	1	L	h	Ja	1,05	2,28	35,60	40,67	80,98	5,71
34H-5	3-013-01	1	L	h	Ja	1,05	2,34	35,60	40,67	80,98	5,71
34H-6	3-013-01	1	L	h	Ja	1,05	1,60	35,60	40,67	80,98	5,71
34H-7	3-013-01	1	L	h	Ja	1,05	1,20	35,60	40,67	80,98	5,71
35H-1	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	1,82	35,60	40,67	80,98	5,71
35H-2	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	1,45	35,60	40,67	80,98	5,71
35H-3	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	1,48	35,60	40,67	80,98	5,71

Versuch Nr. C1-...	Textil Bezeichnung NWM...		Aufbringung Art ¹⁾ Richtung ²⁾		Fuge Haft- brücke Rau- tiefe [mm]		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
								Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ³⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
35H-4	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	2,10	35,60	40,67	80,98	5,71
35H-5	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	1,60	35,60	40,67	80,98	5,71
35H-6	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	2,30	35,60	40,67	80,98	5,71
35H-7	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	2,10	35,60	40,67	80,98	5,71
35H-8	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	2,60	35,60	40,67	80,98	5,71
36H-1	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,32	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-2	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,39	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-3	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,17	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-4	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,37	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-5	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,99	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-6	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,30	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-7	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,53	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-8	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,33	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-9	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,75	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-10	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,43	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-11	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,64	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-12	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,37	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-13	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,47	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-14	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,31	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-15	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,70	30,10	32,90	72,90	6,00
36H-16	3-004-01	1	L	h	Ja	0,66	0,48	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-1	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,09	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-2	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,08	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-3	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,12	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-4	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,31	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-5	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,06	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-6	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,07	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-7	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,41	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-8	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,34	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-9	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,02	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-10	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,09	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-11	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,12	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-12	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,64	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-13	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,08	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-14	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,11	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-15	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,10	30,10	32,90	72,90	6,00
37H-16	3-004-01	1	L	h	Ja	0,98	0,04	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-1	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,02	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-2	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,04	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-3	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,22	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-4	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,26	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-5	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,04	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-6	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,04	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-7	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,27	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-8	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,50	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-9	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,22	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-10	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,19	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-11	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,19	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-12	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,28	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-13	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,21	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-14	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,32	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-15	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,50	30,10	32,90	72,90	6,00
38H-16	3-004-01	1	L	h	Ja	1,44	0,36	30,10	32,90	72,90	6,00
39H-1	3-013-01	1	L	h	Ja	0,65	1,39	32,00	35,50	74,00	5,83
39H-2	3-013-01	1	L	h	Ja	0,65	1,66	32,00	35,50	74,00	5,83

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ³⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]
39H-6	3-013-01	1	L	h	Ja	0,65	1,70	32,00	35,50	74,00	5,83
39H-7	3-013-01	1	L	h	Ja	0,65	1,33	32,00	35,50	74,00	5,83
39H-8	3-013-01	1	L	h	Ja	0,65	1,95	32,00	35,50	74,00	5,83
39H-9	3-013-01	1	L	h	Ja	0,65	1,82	32,00	35,50	74,00	5,83
39H-10	3-013-01	1	L	h	Ja	0,65	1,80	32,00	35,50	74,00	5,83
39H-11	3-013-01	1	L	h	Ja	0,65	1,56	32,00	35,50	74,00	5,83
39H-12	3-013-01	1	L	h	Ja	0,65	1,68	32,00	35,50	74,00	5,83
39H-13	3-013-01	1	L	h	Ja	0,65	1,41	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-1	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	1,74	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-2	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	1,79	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-3	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	1,50	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-4	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	1,71	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-5	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	1,74	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-6	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	1,88	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-7	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	1,48	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-8	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	1,71	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-9	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	1,51	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-10	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	2,00	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-11	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	1,52	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-12	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	1,84	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-13	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	2,01	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-14	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	1,50	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-15	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	1,52	32,00	35,50	74,00	5,83
40H-16	3-013-01	1	L	h	Ja	0,96	1,58	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-1	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	1,88	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-2	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	2,13	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-3	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	2,18	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-4	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	2,01	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-5	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	2,15	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-6	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	2,12	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-7	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	2,00	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-8	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	1,83	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-9	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	2,08	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-10	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	1,71	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-11	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	1,70	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-12	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	2,15	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-13	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	2,03	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-14	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	2,02	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-15	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	1,94	32,00	35,50	74,00	5,83
41H-16	3-013-01	1	L	h	Ja	1,41	1,95	32,00	35,50	74,00	5,83
42H-1	3-031-00	1	S	h	-	1,15	0,53	28,97	32,00	74,00	5,83
42H-2	3-031-00	1	S	h	-	1,15	1,22	28,97	32,00	74,00	5,83
42H-5	3-031-00	1	S	h	-	1,15	0,73	28,97	32,00	74,00	5,83
42H-6	3-031-00	1	S	h	-	1,15	1,26	28,97	32,00	74,00	5,83
42H-7	3-031-00	1	S	h	-	1,15	1,01	28,97	32,00	74,00	5,83
42H-9	3-031-00	1	S	h	-	1,15	0,89	28,97	32,00	74,00	5,83
42H-10	3-031-00	1	S	h	-	1,15	0,30	28,97	32,00	74,00	5,83
42H-11	3-031-00	1	S	h	-	1,15	0,99	28,97	32,00	74,00	5,83
42H-12	3-031-00	1	S	h	-	1,15	1,28	28,97	32,00	74,00	5,83
42H-13	3-031-00	1	S	h	-	1,15	0,69	28,97	32,00	74,00	5,83
42H-14	3-031-00	1	S	h	-	1,15	1,21	28,97	32,00	74,00	5,83
42H-15	3-031-00	1	S	h	-	1,15	1,30	28,97	32,00	74,00	5,83
42H-16	3-031-00	1	S	h	-	1,15	0,72	28,97	32,00	74,00	5,83
43H-1	3-033-00	1	S	h	-	1,07	1,04	28,97	32,00	74,00	5,83
43H-4	3-033-00	1	S	h	-	1,07	0,83	28,97	32,00	74,00	5,83

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
43H-5	3-033-00	1	S	h	–	1,07	1,14	28,97	32,00	74,00	5,83
43H-6	3-033-00	1	S	h	–	1,07	1,10	28,97	32,00	74,00	5,83
43H-7	3-033-00	1	S	h	–	1,07	1,72	28,97	32,00	74,00	5,83
43H-8	3-033-00	1	S	h	–	1,07	0,77	28,97	32,00	74,00	5,83
43H-9	3-033-00	1	S	h	–	1,07	0,62	28,97	32,00	74,00	5,83
43H-10	3-033-00	1	S	h	–	1,07	0,58	28,97	32,00	74,00	5,83
43H-11	3-033-00	1	S	h	–	1,07	0,77	28,97	32,00	74,00	5,83
43H-12	3-033-00	1	S	h	–	1,07	0,50	28,97	32,00	74,00	5,83
43H-13	3-033-00	1	S	h	–	1,07	0,62	28,97	32,00	74,00	5,83
43H-14	3-033-00	1	S	h	–	1,07	0,49	28,97	32,00	74,00	5,83
43H-15	3-033-00	1	S	h	–	1,07	0,44	28,97	32,00	74,00	5,83
45H-3	3-035-00	1	S	h	–	1,05	2,60	30,10	31,30	77,00	6,83
45H-6	3-035-00	1	S	h	–	1,05	1,99	30,10	31,30	77,00	6,83
45H-7	3-035-00	1	S	h	–	1,05	1,91	30,10	31,30	77,00	6,83
45H-11	3-035-00	1	S	h	–	1,05	2,42	30,10	31,30	77,00	6,83
45H-14	3-035-00	1	S	h	–	1,05	2,40	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-1	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,32	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-2	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,10	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-3	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,19	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-4	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,25	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-5	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,35	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-6	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,15	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-7	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,15	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-8	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,21	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-9	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,37	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-10	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,18	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-11	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,10	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-12	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,10	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-13	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,35	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-14	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,21	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-15	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,25	30,10	31,30	77,00	6,83
46H-16	3-004-01	1	S	h	–	1,00	0,30	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-2	3-013-01	1	S	h	–	1,09	1,08	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-3	3-013-01	1	S	h	–	1,09	1,30	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-6	3-013-01	1	S	h	–	1,09	0,65	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-7	3-013-01	1	S	h	–	1,09	0,67	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-8	3-013-01	1	S	h	–	1,09	1,18	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-9	3-013-01	1	S	h	–	1,09	2,07	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-10	3-013-01	1	S	h	–	1,09	0,36	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-11	3-013-01	1	S	h	–	1,09	0,32	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-12	3-013-01	1	S	h	–	1,09	1,04	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-13	3-013-01	1	S	h	–	1,09	1,78	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-14	3-013-01	1	S	h	–	1,09	0,60	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-15	3-013-01	1	S	h	–	1,09	0,60	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-16	3-013-01	1	S	h	–	1,09	1,83	30,10	31,30	77,00	6,83
48H-1	3-031-00	1	S	v	–	1,07	0,29	28,83	29,30	77,00	6,83
48H-3	3-031-00	1	S	v	–	1,07	0,31	28,83	29,30	77,00	6,83
48H-4	3-031-00	1	S	v	–	1,07	0,56	28,83	29,30	77,00	6,83
48H-5	3-031-00	1	S	v	–	1,07	1,11	28,83	29,30	77,00	6,83
48H-6	3-031-00	1	S	v	–	1,07	0,40	28,83	29,30	77,00	6,83
48H-7	3-031-00	1	S	v	–	1,07	0,15	28,83	29,30	77,00	6,83
48H-8	3-031-00	1	S	v	–	1,07	1,34	28,83	29,30	77,00	6,83
48H-9	3-031-00	1	S	v	–	1,07	0,81	28,83	29,30	77,00	6,83
48H-10	3-031-00	1	S	v	–	1,07	0,30	28,83	29,30	77,00	6,83
48H-11	3-031-00	1	S	v	–	1,07	0,22	28,83	29,30	77,00	6,83

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ³⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]
48H-12	3-031-00	1	S	v	–	1,07	1,15	28,83	29,30	77,00	6,83
48H-13	3-031-00	1	S	v	–	1,07	0,19	28,83	29,30	77,00	6,83
48H-14	3-031-00	1	S	v	–	1,07	0,36	28,83	29,30	77,00	6,83
48H-15	3-031-00	1	S	v	–	1,07	0,35	28,83	29,30	77,00	6,83
48H-16	3-031-00	1	S	v	–	1,07	0,52	28,83	29,30	77,00	6,83
49H-3	3-033-00	1	S	v	–	1,02	1,08	28,83	29,30	77,00	6,83
49H-5	3-033-00	1	S	v	–	1,02	1,87	28,83	29,30	77,00	6,83
49H-6	3-033-00	1	S	v	–	1,02	0,71	28,83	29,30	77,00	6,83
49H-7	3-033-00	1	S	v	–	1,02	1,70	28,83	29,30	77,00	6,83
49H-8	3-033-00	1	S	v	–	1,02	2,05	28,83	29,30	77,00	6,83
49H-9	3-033-00	1	S	v	–	1,02	1,41	28,83	29,30	77,00	6,83
49H-10	3-033-00	1	S	v	–	1,02	1,11	28,83	29,30	77,00	6,83
49H-11	3-033-00	1	S	v	–	1,02	1,50	28,83	29,30	77,00	6,83
50H-4	3-037-00	1	S	v	–	0,98	0,68	28,83	29,30	77,00	6,83
50H-6	3-037-00	1	S	v	–	0,98	0,15	28,83	29,30	77,00	6,83
50H-7	3-037-00	1	S	v	–	0,98	0,50	28,83	29,30	77,00	6,83
50H-10	3-037-00	1	S	v	–	0,98	2,64	28,83	29,30	77,00	6,83
50H-11	3-037-00	1	S	v	–	0,98	0,59	28,83	29,30	77,00	6,83
50H-13	3-037-00	1	S	v	–	0,98	0,99	28,83	29,30	77,00	6,83
50H-14	3-037-00	1	S	v	–	0,98	0,69	28,83	29,30	77,00	6,83
50H-15	3-037-00	1	S	v	–	0,98	1,15	28,83	29,30	77,00	6,83
50H-16	3-037-00	1	S	v	–	0,98	1,01	28,83	29,30	77,00	6,83
51H-16	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,09	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-1	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,28	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-2	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,32	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-3	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,02	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-4	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,40	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-5	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,31	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-7	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,20	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-8	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,38	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-9	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,28	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-10	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,18	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-11	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,25	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-12	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,13	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-13	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,28	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-14	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,38	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-15	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,22	30,17	33,83	88,87	6,20
52H-16	3-004-01	1	S	v	–	1,02	0,36	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-1	3-013-01	1	S	v	–	1,02	1,31	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-2	3-013-01	1	S	v	–	1,02	1,00	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-3	3-013-01	1	S	v	–	1,02	0,79	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-4	3-013-01	1	S	v	–	1,02	1,27	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-5	3-013-01	1	S	v	–	1,02	0,52	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-6	3-013-01	1	S	v	–	1,02	0,39	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-7	3-013-01	1	S	v	–	1,02	0,29	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-8	3-013-01	1	S	v	–	1,02	0,21	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-9	3-013-01	1	S	v	–	1,02	0,38	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-10	3-013-01	1	S	v	–	1,02	0,48	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-11	3-013-01	1	S	v	–	1,02	0,22	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-12	3-013-01	1	S	v	–	1,02	0,22	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-13	3-013-01	1	S	v	–	1,02	0,44	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-14	3-013-01	1	S	v	–	1,02	0,60	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-15	3-013-01	1	S	v	–	1,02	0,59	30,17	33,83	88,87	6,20
53H-16	3-013-01	1	S	v	–	1,02	1,82	30,17	33,83	88,87	6,20
54H-3	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	2,41	28,93	30,97	88,87	6,20

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brüc- ke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
54H-4	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	2,09	28,93	30,97	88,87	6,20
54H-6	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	2,01	28,93	30,97	88,87	6,20
54H-10	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	2,19	28,93	30,97	88,87	6,20
54H-12	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	1,65	28,93	30,97	88,87	6,20
54H-14	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	2,00	28,93	30,97	88,87	6,20
54H-15	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	1,59	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-3	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	2,42	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-6	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	2,60	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-8	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	1,29	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-16	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	1,83	28,93	30,97	88,87	6,20
58H-1	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	0,23	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-2	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	0,20	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-3	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	0,70	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-4	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	0,55	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-5	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	0,75	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-6	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	0,80	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-7	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	0,22	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-8	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	0,43	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-9	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	1,51	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-10	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	0,69	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-11	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	0,82	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-13	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	0,38	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-14	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	0,47	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-15	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	0,20	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-16	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	0,32	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-5	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	2,10	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-6	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	2,11	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-9	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	1,71	26,27	29,83	82,78	6,69
61H-1	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,75	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-2	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,51	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-3	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,48	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-4	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,75	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-5	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,46	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-6	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,23	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-7	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,91	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-8	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,22	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-9	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,69	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-10	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,71	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-11	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,04	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-12	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,58	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-13	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,04	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-14	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,53	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-15	3-012-01	1	S	v	–	1,09	0,60	30,30	32,53	82,78	6,69
61H-16	3-012-01	1	S	v	–	1,09	1,04	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-1	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	1,31	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-2	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	1,10	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-3	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	0,99	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-4	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	0,79	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-5	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	0,98	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-6	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	0,89	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-7	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	0,42	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-8	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	1,20	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-9	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	0,89	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-10	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	0,79	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-11	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	0,92	30,30	32,53	82,78	6,69

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]
62H-12	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	0,93	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-13	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	1,06	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-14	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	0,63	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-15	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	0,52	30,30	32,53	82,78	6,69
62H-16	3-012-01	1	S	üK	–	1,11	1,31	30,30	32,53	82,78	6,69
63H-1	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	1,30	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-2	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	0,76	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-3	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	1,04	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-4	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	1,60	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-5	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	1,01	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-6	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	1,47	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-7	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	1,18	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-8	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	0,88	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-9	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	1,39	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-10	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	1,68	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-11	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	1,01	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-12	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	1,68	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-13	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	1,47	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-14	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	1,18	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-15	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	1,50	31,70	31,57	72,24	8,20
63H-16	3-031-00	1	L	h	Ja	1,02	1,22	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-2	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	1,90	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-3	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	2,02	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-4	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	2,09	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-6	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	2,06	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-9	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	1,63	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-10	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	1,99	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-11	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	1,91	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-14	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	2,11	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-16	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	1,50	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-1	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	2,38	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-2	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	2,38	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-3	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	2,24	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-4	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	2,39	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-10	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	2,10	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-12	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	2,20	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-13	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	1,71	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-14	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	1,70	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-15	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	1,60	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-16	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	1,84	31,70	31,57	72,24	8,20
66H-1	3-031-00	1	L	h	–	0,63	0,83	31,97	31,70	78,13	7,76
66H-2	3-031-00	1	L	h	–	0,63	1,69	31,97	31,70	78,13	7,76
66H-4	3-031-00	1	L	h	–	0,63	1,49	31,97	31,70	78,13	7,76
66H-5	3-031-00	1	L	h	–	0,63	1,45	31,97	31,70	78,13	7,76
66H-6	3-031-00	1	L	h	–	0,63	1,89	31,97	31,70	78,13	7,76
66H-7	3-031-00	1	L	h	–	0,63	1,49	31,97	31,70	78,13	7,76
66H-8	3-031-00	1	L	h	–	0,63	1,50	31,97	31,70	78,13	7,76
66H-9	3-031-00	1	L	h	–	0,63	0,99	31,97	31,70	78,13	7,76
66H-10	3-031-00	1	L	h	–	0,63	1,41	31,97	31,70	78,13	7,76
66H-11	3-031-00	1	L	h	–	0,63	1,45	31,97	31,70	78,13	7,76
66H-13	3-031-00	1	L	h	–	0,63	1,14	31,97	31,70	78,13	7,76
66H-14	3-031-00	1	L	h	–	0,63	0,90	31,97	31,70	78,13	7,76
66H-15	3-031-00	1	L	h	–	0,63	1,04	31,97	31,70	78,13	7,76
66H-16	3-031-00	1	L	h	–	0,63	0,54	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-3	3-033-00	1	L	h	–	0,63	2,38	31,97	31,70	78,13	7,76

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brüc- ke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
67H-8	3-033-00	1	L	h	–	0,63	2,45	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-9	3-033-00	1	L	h	–	0,63	1,98	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-10	3-033-00	1	L	h	–	0,63	2,02	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-12	3-033-00	1	L	h	–	0,63	2,11	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-3	3-037-00	1	L	h	–	0,63	1,21	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-4	3-037-00	1	L	h	–	0,63	1,49	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-6	3-037-00	1	L	h	–	0,63	1,89	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-8	3-037-00	1	L	h	–	0,63	1,49	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-9	3-037-00	1	L	h	–	0,63	1,25	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-10	3-037-00	1	L	h	–	0,63	1,49	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-14	3-037-00	1	L	h	–	0,63	1,98	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-15	3-037-00	1	L	h	–	0,63	1,54	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-16	3-037-00	1	L	h	–	0,63	1,97	31,97	31,70	78,13	7,76
69H-1	3-031-00	1	L	h	–	1,27	1,33	30,07	26,93	78,23	9,89
69H-2	3-031-00	1	L	h	–	1,27	1,40	30,07	26,93	78,23	9,89
69H-3	3-031-00	1	L	h	–	1,27	0,70	30,07	26,93	78,23	9,89
69H-4	3-031-00	1	L	h	–	1,27	0,11	30,07	26,93	78,23	9,89
69H-5	3-031-00	1	L	h	–	1,27	1,53	30,07	26,93	78,23	9,89
69H-6	3-031-00	1	L	h	–	1,27	1,71	30,07	26,93	78,23	9,89
69H-7	3-031-00	1	L	h	–	1,27	1,70	30,07	26,93	78,23	9,89
69H-8	3-031-00	1	L	h	–	1,27	0,40	30,07	26,93	78,23	9,89
69H-9	3-031-00	1	L	h	–	1,27	1,64	30,07	26,93	78,23	9,89
69H-10	3-031-00	1	L	h	–	1,27	2,20	30,07	26,93	78,23	9,89
69H-11	3-031-00	1	L	h	–	1,27	0,92	30,07	26,93	78,23	9,89
69H-12	3-031-00	1	L	h	–	1,27	0,62	30,07	26,93	78,23	9,89
69H-13	3-031-00	1	L	h	–	1,27	1,02	30,07	26,93	78,23	9,89
69H-14	3-031-00	1	L	h	–	1,27	1,85	30,07	26,93	78,23	9,89
69H-16	3-031-00	1	L	h	–	1,27	1,66	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-4	3-033-00	1	L	h	–	1,33	1,61	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-6	3-033-00	1	L	h	–	1,33	2,13	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-8	3-033-00	1	L	h	–	1,33	1,20	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-9	3-033-00	1	L	h	–	1,33	1,90	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-10	3-033-00	1	L	h	–	1,33	1,75	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-12	3-033-00	1	L	h	–	1,33	1,60	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-13	3-033-00	1	L	h	–	1,33	1,61	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-14	3-033-00	1	L	h	–	1,33	1,69	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-1	3-037-00	1	L	h	–	1,41	1,39	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-2	3-037-00	1	L	h	–	1,41	1,50	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-3	3-037-00	1	L	h	–	1,41	1,32	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-4	3-037-00	1	L	h	–	1,41	1,31	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-5	3-037-00	1	L	h	–	1,41	1,12	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-6	3-037-00	1	L	h	–	1,41	1,62	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-7	3-037-00	1	L	h	–	1,41	1,50	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-8	3-037-00	1	L	h	–	1,41	1,12	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-9	3-037-00	1	L	h	–	1,41	0,95	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-10	3-037-00	1	L	h	–	1,41	2,20	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-11	3-037-00	1	L	h	–	1,41	1,82	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-12	3-037-00	1	L	h	–	1,41	1,68	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-13	3-037-00	1	L	h	–	1,41	1,02	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-14	3-037-00	1	L	h	–	1,41	1,91	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-15	3-037-00	1	L	h	–	1,41	1,41	30,07	26,93	78,23	9,89
71H-16	3-037-00	1	L	h	–	1,41	1,10	30,07	26,93	78,23	9,89
73H-8	3-035-00	1	L	h	–	1,41	3,30	36,03	34,80	77,15	9,61
73H-14	3-035-00	1	L	h	–	1,41	2,67	36,03	34,80	77,15	9,61
73H-15	3-035-00	1	L	h	–	1,41	2,98	36,03	34,80	77,15	9,61

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ³⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]
74H-4	3-035-00	1	L	h	Ja	0,88	2,68	36,03	34,80	77,15	9,61
75H-1	3-037-00	1	S	h	-	0,86	2,39	31,47	30,67	81,75	8,40
75H-2	3-037-00	1	S	h	-	0,86	2,01	31,47	30,67	81,75	8,40
75H-3	3-037-00	1	S	h	-	0,86	2,07	31,47	30,67	81,75	8,40
75H-4	3-037-00	1	S	h	-	0,86	2,38	31,47	30,67	81,75	8,40
75H-5	3-037-00	1	S	h	-	0,86	2,40	31,47	30,67	81,75	8,40
75H-7	3-037-00	1	S	h	-	0,86	2,39	31,47	30,67	81,75	8,40
75H-8	3-037-00	1	S	h	-	0,86	2,83	31,47	30,67	81,75	8,40
75H-9	3-037-00	1	S	h	-	0,86	1,97	31,47	30,67	81,75	8,40
75H-10	3-037-00	1	S	h	-	0,86	2,15	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-1	3-023-02	1	S	h	-	0,84	1,31	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-2	3-023-02	1	S	h	-	0,84	0,91	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-3	3-023-02	1	S	h	-	0,84	1,57	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-4	3-023-02	1	S	h	-	0,84	1,25	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-5	3-023-02	1	S	h	-	0,84	0,85	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-6	3-023-02	1	S	h	-	0,84	0,70	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-7	3-023-02	1	S	h	-	0,84	0,95	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-8	3-023-02	1	S	h	-	0,84	1,00	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-9	3-023-02	1	S	h	-	0,84	0,89	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-10	3-023-02	1	S	h	-	0,84	0,53	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-11	3-023-02	1	S	h	-	0,84	1,10	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-12	3-023-02	1	S	h	-	0,84	1,20	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-13	3-023-02	1	S	h	-	0,84	1,00	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-14	3-023-02	1	S	h	-	0,84	1,38	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-15	3-023-02	1	S	h	-	0,84	1,02	31,47	30,67	81,75	8,40
76H-16	3-023-02	1	S	h	-	0,84	1,38	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-1	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,61	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-2	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,64	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-3	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,83	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-4	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,84	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-5	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,72	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-6	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,47	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-7	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,70	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-8	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,55	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-9	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,49	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-10	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,21	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-11	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,14	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-12	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,12	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-13	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,10	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-14	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,05	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-15	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,67	31,47	30,67	81,75	8,40
77H-16	3-023-02	1	S	h	-	0,45	1,20	31,47	30,67	81,75	8,40
78H-1	3-023-02	1	S	v	-	0,53	0,65	36,30	36,23	78,13	6,95
78H-2	3-023-02	1	S	v	-	0,53	0,66	36,30	36,23	78,13	6,95
78H-3	3-023-02	1	S	v	-	0,53	0,59	36,30	36,23	78,13	6,95
78H-4	3-023-02	1	S	v	-	0,53	0,56	36,30	36,23	78,13	6,95
78H-5	3-023-02	1	S	v	-	0,53	0,75	36,30	36,23	78,13	6,95
78H-6	3-023-02	1	S	v	-	0,53	0,62	36,30	36,23	78,13	6,95
78H-7	3-023-02	1	S	v	-	0,53	0,50	36,30	36,23	78,13	6,95
78H-8	3-023-02	1	S	v	-	0,53	0,98	36,30	36,23	78,13	6,95
78H-9	3-023-02	1	S	v	-	0,53	0,92	36,30	36,23	78,13	6,95
78H-10	3-023-02	1	S	v	-	0,53	0,66	36,30	36,23	78,13	6,95
78H-11	3-023-02	1	S	v	-	0,53	0,27	36,30	36,23	78,13	6,95
78H-12	3-023-02	1	S	v	-	0,53	0,58	36,30	36,23	78,13	6,95
78H-13	3-023-02	1	S	v	-	0,53	0,83	36,30	36,23	78,13	6,95

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brüc- ke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
78H-14	3-023-02	1	S	v	–	0,53	0,79	36,30	36,23	78,13	6,95
78H-15	3-023-02	1	S	v	–	0,53	0,20	36,30	36,23	78,13	6,95
78H-16	3-023-02	1	S	v	–	0,53	0,51	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-1	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	0,90	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-2	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	0,79	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-3	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	1,37	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-4	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	0,48	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-5	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	0,80	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-6	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	0,98	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-7	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	0,89	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-8	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	0,56	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-9	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	0,69	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-10	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	0,57	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-11	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	0,72	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-12	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	0,52	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-13	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	1,12	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-14	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	1,14	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-15	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	0,79	36,30	36,23	78,13	6,95
79H-16	3-023-02	1	S	üK	–	0,61	0,75	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-5	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	1,93	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-6	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	1,69	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-7	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	1,87	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-9	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	2,15	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-14	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	1,97	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-15	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	1,74	36,30	36,23	78,13	6,95
81H-1	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,50	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-2	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,81	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-3	3-004-01	4	L	h	–	0,83	1,06	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-4	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,90	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-5	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,62	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-6	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,57	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-7	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,72	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-8	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,51	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-9	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,37	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-10	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,41	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-11	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,38	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-12	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,32	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-13	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,78	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-14	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,41	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-15	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,14	33,73	31,10	71,00	8,02
81H-16	3-004-01	4	L	h	–	0,83	0,18	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-1	3-013-01	6	L	h	–	0,79	1,15	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-2	3-013-01	6	L	h	–	0,79	1,12	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-3	3-013-01	6	L	h	–	0,79	0,82	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-4	3-013-01	6	L	h	–	0,79	1,29	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-5	3-013-01	6	L	h	–	0,79	1,61	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-6	3-013-01	6	L	h	–	0,79	0,92	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-7	3-013-01	6	L	h	–	0,79	1,19	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-8	3-013-01	6	L	h	–	0,79	1,09	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-9	3-013-01	6	L	h	–	0,79	1,73	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-10	3-013-01	6	L	h	–	0,79	1,28	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-11	3-013-01	6	L	h	–	0,79	1,25	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-12	3-013-01	6	L	h	–	0,79	1,23	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-13	3-013-01	6	L	h	–	0,79	1,64	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-14	3-013-01	6	L	h	–	0,79	1,49	33,73	31,10	71,00	8,02

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ³⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]
82H-15	3-013-01	6	L	h	-	0,79	1,19	33,73	31,10	71,00	8,02
82H-16	3-013-01	6	L	h	-	0,79	1,15	33,73	31,10	71,00	8,02
83H-1	3-004-01	4	S	h	-	0,83	0,49	33,73	31,10	71,17	6,26
83H-2	3-004-01	4	S	h	-	0,83	0,81	33,73	31,10	71,17	6,26
83H-3	3-004-01	4	S	h	-	0,83	0,46	33,73	31,10	71,17	6,26
83H-4	3-004-01	4	S	h	-	0,83	0,82	33,73	31,10	71,17	6,26
83H-5	3-004-01	4	S	h	-	0,83	0,71	33,73	31,10	71,17	6,26
83H-6	3-004-01	4	S	h	-	0,83	0,52	33,73	31,10	71,17	6,26
83H-7	3-004-01	4	S	h	-	0,83	0,32	33,73	31,10	71,17	6,26
83H-8	3-004-01	4	S	h	-	0,83	0,32	33,73	31,10	71,17	6,26
83H-9	3-004-01	4	S	h	-	0,83	0,41	33,73	31,10	71,17	6,26
83H-10	3-004-01	4	S	h	-	0,83	0,60	33,73	31,10	71,17	6,26
83H-11	3-004-01	4	S	h	-	0,83	0,50	33,73	31,10	71,17	6,26
83H-12	3-004-01	4	S	h	-	0,83	0,68	33,73	31,10	71,17	6,26
84H-1	3-013-01	6	S	h	-	1,09	1,35	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-2	3-013-01	6	S	h	-	1,09	1,55	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-3	3-013-01	6	S	h	-	1,09	1,60	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-4	3-013-01	6	S	h	-	1,09	1,55	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-5	3-013-01	6	S	h	-	1,09	1,32	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-6	3-013-01	6	S	h	-	1,09	1,63	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-7	3-013-01	6	S	h	-	1,09	1,29	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-8	3-013-01	6	S	h	-	1,09	0,81	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-9	3-013-01	6	S	h	-	1,09	1,29	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-10	3-013-01	6	S	h	-	1,09	1,50	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-11	3-013-01	6	S	h	-	1,09	1,15	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-12	3-013-01	6	S	h	-	1,09	0,77	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-13	3-013-01	6	S	h	-	1,09	1,34	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-14	3-013-01	6	S	h	-	1,09	1,35	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-15	3-013-01	6	S	h	-	1,09	0,98	34,37	32,73	70,17	6,67
84H-16	3-013-01	6	S	h	-	1,09	1,03	34,37	32,73	70,17	6,67
93H-1	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,23	32,63	33,77	69,98	7,10
93H-12	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,43	32,63	33,77	69,98	7,10
93H-13	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,40	32,63	33,77	69,98	7,10
93H-15	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,59	32,63	33,77	69,98	7,10
93H-16	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,50	32,63	33,77	69,98	7,10
95H-1	4-003-03-10	1	L	h	-	1,15	2,00	32,63	33,77	69,98	7,10
96H-1	4-003-03-2b	1	L	h	-	0,93	2,60	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-1	4-004-03-10	1	L	h	-	1,03	2,52	32,63	33,90	69,68	7,67
105H-1	4-005-04	1	L	h	-	0,78	3,47	34,40	39,07	70,02	6,66
105H-4	4-005-04	1	L	h	-	0,78	2,63	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-1	4-004-04	1	L	h	-	0,63	1,94	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-2	4-004-04	1	L	h	-	0,63	1,71	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-3	4-004-04	1	L	h	-	0,63	1,67	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-4	4-004-04	1	L	h	-	0,63	1,20	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-5	4-004-04	1	L	h	-	0,63	2,17	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-6	4-004-04	1	L	h	-	0,63	2,69	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-7	4-004-04	1	L	h	-	0,63	2,15	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-8	4-004-04	1	L	h	-	0,63	2,52	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-9	4-004-04	1	L	h	-	0,63	2,97	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-10	4-004-04	1	L	h	-	0,63	2,74	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-12	4-004-04	1	L	h	-	0,63	1,83	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-14	4-004-04	1	L	h	-	0,63	1,23	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-15	4-004-04	1	L	h	-	0,63	1,73	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-16	4-004-04	1	L	h	-	0,63	2,26	34,40	39,07	70,02	6,66
115H-1	3-035-00	1	L	h	-	-	1,08	-	-	68,02	6,33

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm, cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm, cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm, fl}$ [N/mm ²]
115H-2	3-035-00	1	L	h	–	–	0,66	–	–	68,02	6,33
115H-3	3-035-00	1	L	h	–	–	0,80	–	–	68,02	6,33
115H-4	3-035-00	1	L	h	–	–	0,88	–	–	68,02	6,33
115H-5	3-035-00	1	L	h	–	–	1,02	–	–	68,02	6,33
115H-6	3-035-00	1	L	h	–	–	0,99	–	–	68,02	6,33
115H-7	3-035-00	1	L	h	–	–	1,14	–	–	68,02	6,33
115H-8	3-035-00	1	L	h	–	–	1,82	–	–	68,02	6,33
115H-9	3-035-00	1	L	h	–	–	1,08	–	–	68,02	6,33
115H-10	3-035-00	1	L	h	–	–	1,07	–	–	68,02	6,33
115H-11	3-035-00	1	L	h	–	–	0,62	–	–	68,02	6,33
115H-12	3-035-00	1	L	h	–	–	0,70	–	–	68,02	6,33
115H-13	3-035-00	1	L	h	–	–	0,81	–	–	68,02	6,33
115H-14	3-035-00	1	L	h	–	–	1,33	–	–	68,02	6,33
115H-15	3-035-00	1	L	h	–	–	1,07	–	–	68,02	6,33
115H-16	3-035-00	1	L	h	–	–	0,99	–	–	68,02	6,33
116H-1	3-013-01	1	L	h	–	–	0,22	–	–	70,87	7,99
116H-2	3-013-01	1	L	h	–	–	0,39	–	–	70,87	7,99
116H-3	3-013-01	1	L	h	–	–	0,58	–	–	70,87	7,99
116H-4	3-013-01	1	L	h	–	–	0,91	–	–	70,87	7,99
116H-5	3-013-01	1	L	h	–	–	0,60	–	–	70,87	7,99
116H-6	3-013-01	1	L	h	–	–	0,84	–	–	70,87	7,99
116H-7	3-013-01	1	L	h	–	–	1,00	–	–	70,87	7,99
116H-8	3-013-01	1	L	h	–	–	1,29	–	–	70,87	7,99
116H-10	3-013-01	1	L	h	–	–	0,23	–	–	70,87	7,99
116H-11	3-013-01	1	L	h	–	–	0,08	–	–	70,87	7,99
116H-12	3-013-01	1	L	h	–	–	0,34	–	–	70,87	7,99
116H-13	3-013-01	1	L	h	–	–	0,16	–	–	70,87	7,99
116H-14	3-013-01	1	L	h	–	–	0,71	–	–	70,87	7,99
116H-15	3-013-01	1	L	h	–	–	0,30	–	–	70,87	7,99
116H-16	3-013-01	1	L	h	–	–	0,69	–	–	70,87	7,99
117H-1	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,99	–	–	67,20	6,85
117H-3	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,79	–	–	67,20	6,85
117H-6	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,25	–	–	67,20	6,85
117H-7	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,02	–	–	67,20	6,85
117H-9	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,70	–	–	67,20	6,85
117H-10	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,88	–	–	67,20	6,85
117H-11	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,43	–	–	67,20	6,85
117H-12	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,21	–	–	67,20	6,85
117H-14	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,90	–	–	67,20	6,85
117H-15	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,89	–	–	67,20	6,85
117H-16	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,58	–	–	67,20	6,85
120H-3	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,68	–	–	65,52	8,34
120H-4	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,71	–	–	65,52	8,34
120H-6	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,30	–	–	65,52	8,34
120H-7	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,18	–	–	65,52	8,34
120H-8	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,29	–	–	65,52	8,34
120H-9	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	2,82	–	–	65,52	8,34
120H-11	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,57	–	–	65,52	8,34
120H-14	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	2,67	–	–	65,52	8,34
120H-16	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,12	–	–	65,52	8,34
121H-1	4-004-03-10	1	L	h	–	–	2,78	–	–	65,52	8,34
121H-2	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,09	–	–	65,52	8,34
121H-3	4-004-03-10	1	L	h	–	–	2,83	–	–	65,52	8,34
121H-4	4-004-03-10	1	L	h	–	–	2,18	–	–	65,52	8,34
121H-5	4-004-03-10	1	L	h	–	–	2,28	–	–	65,52	8,34

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ³⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]
121H-6	4-004-03-10	1	L	h	-	-	2,24	-	-	65,52	8,34
121H-7	4-004-03-10	1	L	h	-	-	2,51	-	-	65,52	8,34
121H-8	4-004-03-10	1	L	h	-	-	2,74	-	-	65,52	8,34
121H-9	4-004-03-10	1	L	h	-	-	2,84	-	-	65,52	8,34
121H-10	4-004-03-10	1	L	h	-	-	2,69	-	-	65,52	8,34
121H-11	4-004-03-10	1	L	h	-	-	2,26	-	-	65,52	8,34
121H-12	4-004-03-10	1	L	h	-	-	2,62	-	-	65,52	8,34
121H-13	4-004-03-10	1	L	h	-	-	2,47	-	-	65,52	8,34
121H-14	4-004-03-10	1	L	h	-	-	2,38	-	-	65,52	8,34
121H-15	4-004-03-10	1	L	h	-	-	1,89	-	-	65,52	8,34
121H-16	4-004-03-10	1	L	h	-	-	3,25	-	-	65,52	8,34
122H-15	4-004-03-2b	1	L	h	-	-	3,36	-	-	65,52	8,34
123H-1	4-005-03-10	1	L	h	-	-	1,74	-	-	68,02	8,01
123H-5	4-005-03-10	1	L	h	-	-	3,12	-	-	68,02	8,01
123H-7	4-005-03-10	1	L	h	-	-	2,38	-	-	68,02	8,01
123H-9	4-005-03-10	1	L	h	-	-	3,34	-	-	68,02	8,01
123H-14	4-005-03-10	1	L	h	-	-	3,32	-	-	68,02	8,01
123H-15	4-005-03-10	1	L	h	-	-	2,94	-	-	68,02	8,01
124H-3	4-005-03-2b	1	L	h	-	-	2,10	-	-	78,02	6,57
124H-4	4-005-03-2b	1	L	h	-	-	1,58	-	-	78,02	6,57
124H-8	4-005-03-2b	1	L	h	-	-	1,62	-	-	78,02	6,57
124H-12	4-005-03-2b	1	L	h	-	-	1,28	-	-	78,02	6,57
124H-15	4-005-03-2b	1	L	h	-	-	2,63	-	-	78,02	6,57
124H-16	4-005-03-2b	1	L	h	-	-	2,26	-	-	78,02	6,57
125H-1	4-001-01	1	L	h	-	-	2,40	-	-	67,43	6,52
125H-2	4-001-01	1	L	h	-	-	2,48	-	-	67,43	6,52
125H-3	4-001-01	1	L	h	-	-	2,52	-	-	67,43	6,52
125H-5	4-001-01	1	L	h	-	-	2,50	-	-	67,43	6,52
125H-6	4-001-01	1	L	h	-	-	1,32	-	-	67,43	6,52
125H-7	4-001-01	1	L	h	-	-	1,14	-	-	67,43	6,52
125H-8	4-001-01	1	L	h	-	-	2,90	-	-	67,43	6,52
125H-9	4-001-01	1	L	h	-	-	2,43	-	-	67,43	6,52
125H-10	4-001-01	1	L	h	-	-	2,42	-	-	67,43	6,52
125H-11	4-001-01	1	L	h	-	-	1,85	-	-	67,43	6,52
125H-13	4-001-01	1	L	h	-	-	2,48	-	-	67,43	6,52
125H-14	4-001-01	1	L	h	-	-	2,57	-	-	67,43	6,52
125H-16	4-001-01	1	L	h	-	-	2,97	-	-	67,43	6,52
127H-1	4-005-04	1	L	h	-	-	0,72	-	-	76,02	7,99
127H-2	4-005-04	1	L	h	-	-	0,91	-	-	76,02	7,99
127H-3	4-005-04	1	L	h	-	-	0,96	-	-	76,02	7,99
127H-4	4-005-04	1	L	h	-	-	1,14	-	-	76,02	7,99
127H-5	4-005-04	1	L	h	-	-	0,93	-	-	76,02	7,99
127H-6	4-005-04	1	L	h	-	-	1,37	-	-	76,02	7,99
127H-7	4-005-04	1	L	h	-	-	1,25	-	-	76,02	7,99
127H-8	4-005-04	1	L	h	-	-	0,72	-	-	76,02	7,99
127H-9	4-005-04	1	L	h	-	-	0,81	-	-	76,02	7,99
127H-10	4-005-04	1	L	h	-	-	0,89	-	-	76,02	7,99
127H-11	4-005-04	1	L	h	-	-	1,00	-	-	76,02	7,99
127H-12	4-005-04	1	L	h	-	-	0,58	-	-	76,02	7,99
127H-13	4-005-04	1	L	h	-	-	0,60	-	-	76,02	7,99
127H-14	4-005-04	1	L	h	-	-	0,84	-	-	76,02	7,99
127H-15	4-005-04	1	L	h	-	-	0,39	-	-	76,02	7,99
127H-16	4-005-04	1	L	h	-	-	0,74	-	-	76,02	7,99
128H-1	4-006-04	1	L	h	-	-	1,80	-	-	68,05	6,33
128H-2	4-006-04	1	L	h	-	-	1,13	-	-	68,05	6,33

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm, cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm, cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm, fl}$ [N/mm ²]
128H-3	4-006-04	1	L	h	–	–	2,29	–	–	68,05	6,33
128H-4	4-006-04	1	L	h	–	–	2,04	–	–	68,05	6,33
128H-5	4-006-04	1	L	h	–	–	1,87	–	–	68,05	6,33
128H-6	4-006-04	1	L	h	–	–	1,28	–	–	68,05	6,33
128H-7	4-006-04	1	L	h	–	–	1,55	–	–	68,05	6,33
128H-8	4-006-04	1	L	h	–	–	1,12	–	–	68,05	6,33
128H-9	4-006-04	1	L	h	–	–	1,20	–	–	68,05	6,33
128H-10	4-006-04	1	L	h	–	–	1,26	–	–	68,05	6,33
128H-11	4-006-04	1	L	h	–	–	1,55	–	–	68,05	6,33
128H-12	4-006-04	1	L	h	–	–	1,48	–	–	68,05	6,33
128H-13	4-006-04	1	L	h	–	–	1,54	–	–	68,05	6,33
130H-1	4-013-04	1	L	h	–	–	1,98	–	–	73,57	7,19
130H-2	4-013-04	1	L	h	–	–	1,47	–	–	73,57	7,19
130H-3	4-013-04	1	L	h	–	–	1,70	–	–	73,57	7,19
130H-4	4-013-04	1	L	h	–	–	1,87	–	–	73,57	7,19
130H-5	4-013-04	1	L	h	–	–	2,32	–	–	73,57	7,19
130H-6	4-013-04	1	L	h	–	–	1,37	–	–	73,57	7,19
130H-7	4-013-04	1	L	h	–	–	2,25	–	–	73,57	7,19
130H-8	4-013-04	1	L	h	–	–	2,42	–	–	73,57	7,19
130H-9	4-013-04	1	L	h	–	–	2,31	–	–	73,57	7,19
130H-10	4-013-04	1	L	h	–	–	1,72	–	–	73,57	7,19
130H-11	4-013-04	1	L	h	–	–	2,38	–	–	73,57	7,19
130H-12	4-013-04	1	L	h	–	–	1,89	–	–	73,57	7,19
130H-13	4-013-04	1	L	h	–	–	2,35	–	–	73,57	7,19
130H-14	4-013-04	1	L	h	–	–	1,62	–	–	73,57	7,19
130H-15	4-013-04	1	L	h	–	–	1,74	–	–	73,57	7,19
130H-16	4-013-04	1	L	h	–	–	2,22	–	–	73,57	7,19
131H-3	4-003-04	1	L	h	–	–	1,82	–	–	63,55	5,80
131H-4	4-003-04	1	L	h	–	–	1,03	–	–	63,55	5,80
131H-5	4-003-04	1	L	h	–	–	1,93	–	–	63,55	5,80
131H-6	4-003-04	1	L	h	–	–	1,02	–	–	63,55	5,80
131H-7	4-003-04	1	L	h	–	–	1,49	–	–	63,55	5,80
131H-8	4-003-04	1	L	h	–	–	1,45	–	–	63,55	5,80
131H-9	4-003-04	1	L	h	–	–	2,11	–	–	63,55	5,80
131H-10	4-003-04	1	L	h	–	–	1,90	–	–	63,55	5,80
131H-11	4-003-04	1	L	h	–	–	1,38	–	–	63,55	5,80
131H-12	4-003-04	1	L	h	–	–	2,20	–	–	63,55	5,80
131H-14	4-003-04	1	L	h	–	–	2,42	–	–	63,55	5,80
131H-15	4-003-04	1	L	h	–	–	2,32	–	–	63,55	5,80
131H-16	4-003-04	1	L	h	–	–	1,64	–	–	63,55	5,80
132H-1	4-012-03	1	L	h	–	–	2,45	–	–	74,47	7,04
132H-2	4-012-03	1	L	h	–	–	2,58	–	–	74,47	7,04
132H-3	4-012-03	1	L	h	–	–	2,77	–	–	74,47	7,04
132H-5	4-012-03	1	L	h	–	–	2,09	–	–	74,47	7,04
132H-6	4-012-03	1	L	h	–	–	2,71	–	–	74,47	7,04
132H-9	4-012-03	1	L	h	–	–	1,83	–	–	74,47	7,04
132H-10	4-012-03	1	L	h	–	–	2,40	–	–	74,47	7,04
132H-13	4-012-03	1	L	h	–	–	2,52	–	–	74,47	7,04
132H-14	4-012-03	1	L	h	–	–	2,96	–	–	74,47	7,04
133H-1	4-002-04	1	L	h	–	–	2,09	–	–	66,08	6,40
133H-2	4-002-04	1	L	h	–	–	1,82	–	–	66,08	6,40
133H-4	4-002-04	1	L	h	–	–	2,90	–	–	66,08	6,40
133H-5	4-002-04	1	L	h	–	–	2,86	–	–	66,08	6,40
133H-6	4-002-04	1	L	h	–	–	2,72	–	–	66,08	6,40
133H-7	4-002-04	1	L	h	–	–	2,70	–	–	66,08	6,40

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm, cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ³⁾⁵⁾ $f_{cm, cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fcm, fl}$ [N/mm ²]
133H-8	4-002-04	1	L	h	–	–	2,75	–	–	66,08	6,40
133H-9	4-002-04	1	L	h	–	–	2,70	–	–	66,08	6,40
133H-10	4-002-04	1	L	h	–	–	2,64	–	–	66,08	6,40
133H-11	4-002-04	1	L	h	–	–	3,02	–	–	66,08	6,40
133H-12	4-002-04	1	L	h	–	–	2,61	–	–	66,08	6,40
133H-13	4-002-04	1	L	h	–	–	2,15	–	–	66,08	6,40
133H-14	4-002-04	1	L	h	–	–	2,48	–	–	66,08	6,40
133H-16	4-002-04	1	L	h	–	–	2,83	–	–	66,08	6,40
134H-2	4-001-04	1	L	h	–	–	3,14	–	–	68,68	7,64
134H-6	4-001-04	1	L	h	–	–	3,01	–	–	68,68	7,64
134H-7	4-001-04	1	L	h	–	–	2,92	–	–	68,68	7,64
134H-8	4-001-04	1	L	h	–	–	3,05	–	–	68,68	7,64
134H-10	4-001-04	1	L	h	–	–	2,81	–	–	68,68	7,64
134H-13	4-001-04	1	L	h	–	–	2,69	–	–	68,68	7,64
134H-14	4-001-04	1	L	h	–	–	3,03	–	–	68,68	7,64
134H-15	4-001-04	1	L	h	–	–	2,60	–	–	68,68	7,64
135H-1	4-022-04	1	L	h	–	–	2,17	–	–	70,23	6,91
135H-2	4-022-04	1	L	h	–	–	1,74	–	–	70,23	6,91
135H-3	4-022-04	1	L	h	–	–	1,67	–	–	70,23	6,91
135H-4	4-022-04	1	L	h	–	–	1,16	–	–	70,23	6,91
135H-5	4-022-04	1	L	h	–	–	2,06	–	–	70,23	6,91
135H-6	4-022-04	1	L	h	–	–	1,39	–	–	70,23	6,91
135H-7	4-022-04	1	L	h	–	–	0,90	–	–	70,23	6,91
135H-8	4-022-04	1	L	h	–	–	0,64	–	–	70,23	6,91
135H-9	4-022-04	1	L	h	–	–	2,82	–	–	70,23	6,91
135H-10	4-022-04	1	L	h	–	–	0,70	–	–	70,23	6,91
135H-11	4-022-04	1	L	h	–	–	0,77	–	–	70,23	6,91
135H-12	4-022-04	1	L	h	–	–	0,31	–	–	70,23	6,91
135H-13	4-022-04	1	L	h	–	–	1,52	–	–	70,23	6,91
135H-14	4-022-04	1	L	h	–	–	0,98	–	–	70,23	6,91
135H-15	4-022-04	1	L	h	–	–	0,62	–	–	70,23	6,91
135H-16	4-022-04	1	L	h	–	–	0,53	–	–	70,23	6,91
136H-1	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,99	–	–	67,20	6,85
136H-2	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,42	–	–	67,20	6,85
136H-3	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,79	–	–	67,20	6,85
136H-4	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,30	–	–	67,20	6,85
136H-5	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,35	–	–	67,20	6,85
136H-6	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,25	–	–	67,20	6,85
136H-7	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,02	–	–	67,20	6,85
136H-8	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,69	–	–	67,20	6,85
136H-9	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,70	–	–	67,20	6,85
136H-10	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,88	–	–	67,20	6,85
136H-11	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,43	–	–	67,20	6,85
136H-12	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,21	–	–	67,20	6,85
136H-13	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,28	–	–	67,20	6,85
136H-14	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,90	–	–	67,20	6,85
136H-15	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,89	–	–	67,20	6,85
136H-16	4-002-03-10	1	L	h	–	–	1,58	–	–	67,20	6,85
137H-1	4-002-03-2b	1	L	h	–	–	3,00	–	–	67,20	6,85
137H-2	4-002-03-2b	1	L	h	–	–	3,20	–	–	67,20	6,85
137H-3	4-002-03-2b	1	L	h	–	–	2,99	–	–	67,20	6,85
137H-4	4-002-03-2b	1	L	h	–	–	2,98	–	–	67,20	6,85
137H-5	4-002-03-2b	1	L	h	–	–	2,60	–	–	67,20	6,85
137H-6	4-002-03-2b	1	L	h	–	–	3,14	–	–	67,20	6,85
137H-7	4-002-03-2b	1	L	h	–	–	2,80	–	–	67,20	6,85

Versuch Nr. C1-...	Textil Bezeichnung NWM...	Lagen- anzahl	Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
			Art ¹⁾	Richtung ²⁾	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
137H-8	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	2,80	-	-	67,20	6,85
137H-9	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	2,30	-	-	67,20	6,85
137H-10	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	3,13	-	-	67,20	6,85
137H-12	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	3,00	-	-	67,20	6,85
137H-13	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	3,44	-	-	67,20	6,85
137H-14	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	3,20	-	-	67,20	6,85
137H-15	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	3,14	-	-	67,20	6,85
137H-16	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	3,00	-	-	67,20	6,85
138H-1	4-003-03-10	1	L	h	-	-	2,78	-	-	67,20	6,85
138H-2	4-003-03-10	1	L	h	-	-	2,40	-	-	67,20	6,85
138H-3	4-003-03-10	1	L	h	-	-	2,88	-	-	67,20	6,85
138H-4	4-003-03-10	1	L	h	-	-	2,61	-	-	67,20	6,85
138H-5	4-003-03-10	1	L	h	-	-	3,15	-	-	67,20	6,85
138H-6	4-003-03-10	1	L	h	-	-	2,78	-	-	67,20	6,85
138H-7	4-003-03-10	1	L	h	-	-	2,98	-	-	67,20	6,85
138H-8	4-003-03-10	1	L	h	-	-	2,98	-	-	67,20	6,85
138H-9	4-003-03-10	1	L	h	-	-	2,90	-	-	67,20	6,85
138H-10	4-003-03-10	1	L	h	-	-	2,98	-	-	67,20	6,85
138H-11	4-003-03-10	1	L	h	-	-	2,55	-	-	67,20	6,85
138H-12	4-003-03-10	1	L	h	-	-	2,90	-	-	67,20	6,85
138H-13	4-003-03-10	1	L	h	-	-	2,60	-	-	67,20	6,85
138H-14	4-003-03-10	1	L	h	-	-	3,00	-	-	67,20	6,85
138H-15	4-003-03-10	1	L	h	-	-	3,11	-	-	67,20	6,85
138H-16	4-003-03-10	1	L	h	-	-	3,09	-	-	67,20	6,85
139H-1	4-002-03-10	1	L	h	-	-	2,82	-	-	75,48	8,14
139H-2	4-002-03-10	1	L	h	-	-	2,76	-	-	75,48	8,14
139H-3	4-002-03-10	1	L	h	-	-	2,87	-	-	75,48	8,14
139H-4	4-002-03-10	1	L	h	-	-	2,52	-	-	75,48	8,14
139H-5	4-002-03-10	1	L	h	-	-	2,72	-	-	75,48	8,14
139H-6	4-002-03-10	1	L	h	-	-	2,90	-	-	75,48	8,14
139H-7	4-002-03-10	1	L	h	-	-	2,98	-	-	75,48	8,14
139H-8	4-002-03-10	1	L	h	-	-	2,88	-	-	75,48	8,14
139H-9	4-002-03-10	1	L	h	-	-	3,12	-	-	75,48	8,14
139H-10	4-002-03-10	1	L	h	-	-	3,08	-	-	75,48	8,14
139H-11	4-002-03-10	1	L	h	-	-	3,01	-	-	75,48	8,14
139H-12	4-002-03-10	1	L	h	-	-	3,06	-	-	75,48	8,14
139H-13	4-002-03-10	1	L	h	-	-	2,64	-	-	75,48	8,14
139H-14	4-002-03-10	1	L	h	-	-	2,70	-	-	75,48	8,14
139H-15	4-002-03-10	1	L	h	-	-	3,11	-	-	75,48	8,14
139H-16	4-002-03-10	1	L	h	-	-	2,69	-	-	75,48	8,14
140H-1	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	2,98	-	-	75,48	8,14
140H-2	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	2,80	-	-	75,48	8,14
140H-3	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	3,15	-	-	75,48	8,14
140H-4	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	2,38	-	-	75,48	8,14
140H-5	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	2,93	-	-	75,48	8,14
140H-6	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	3,19	-	-	75,48	8,14
140H-7	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	2,90	-	-	75,48	8,14
140H-8	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	2,42	-	-	75,48	8,14
140H-9	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	2,94	-	-	75,48	8,14
140H-10	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	3,11	-	-	75,48	8,14
140H-11	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	2,69	-	-	75,48	8,14
140H-12	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	2,78	-	-	75,48	8,14
140H-13	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	3,30	-	-	75,48	8,14
140H-14	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	2,90	-	-	75,48	8,14
140H-15	4-002-03-2b	1	L	h	-	-	2,81	-	-	75,48	8,14

Versuch Nr. C1-...	Textil Bezeichnung NWM...		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	La- gen- anzahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]	Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]		Druck- festig- keit ³⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]	
140H-16	4-002-03-2b	1	L	h	–	–	2,62	–	–	75,48	8,14
141H-1	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,00	–	–	66,90	7,18
141H-2	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,51	–	–	66,90	7,18
141H-3	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,19	–	–	66,90	7,18
141H-4	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,58	–	–	66,90	7,18
141H-5	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,07	–	–	66,90	7,18
141H-6	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,33	–	–	66,90	7,18
141H-7	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,32	–	–	66,90	7,18
141H-8	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,29	–	–	66,90	7,18
141H-9	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,45	–	–	66,90	7,18
141H-10	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,28	–	–	66,90	7,18
141H-11	4-003-03-10	1	L	h	–	–	4,04	–	–	66,90	7,18
141H-12	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,04	–	–	66,90	7,18
141H-13	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,84	–	–	66,90	7,18
141H-14	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,62	–	–	66,90	7,18
141H-15	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,68	–	–	66,90	7,18
141H-16	4-003-03-10	1	L	h	–	–	3,03	–	–	66,90	7,18
142H-1	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,27	–	–	66,90	7,18
142H-2	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,15	–	–	66,90	7,18
142H-3	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,34	–	–	66,90	7,18
142H-4	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,46	–	–	66,90	7,18
142H-5	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,65	–	–	66,90	7,18
142H-6	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,60	–	–	66,90	7,18
142H-7	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,25	–	–	66,90	7,18
142H-8	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,72	–	–	66,90	7,18
142H-9	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,44	–	–	66,90	7,18
142H-10	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,38	–	–	66,90	7,18
142H-11	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,61	–	–	66,90	7,18
142H-12	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,34	–	–	66,90	7,18
142H-13	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,24	–	–	66,90	7,18
142H-14	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,39	–	–	66,90	7,18
142H-15	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,49	–	–	66,90	7,18
142H-16	4-003-03-2b	1	L	h	–	–	3,04	–	–	66,90	7,18
143H-1	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,28	–	–	73,18	6,76
143H-2	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,38	–	–	73,18	6,76
143H-3	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,49	–	–	73,18	6,76
143H-4	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,37	–	–	73,18	6,76
143H-5	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,33	–	–	73,18	6,76
143H-6	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,64	–	–	73,18	6,76
143H-7	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,33	–	–	73,18	6,76
143H-8	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,83	–	–	73,18	6,76
143H-9	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,29	–	–	73,18	6,76
143H-10	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,27	–	–	73,18	6,76
143H-11	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,40	–	–	73,18	6,76
143H-12	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,98	–	–	73,18	6,76
143H-13	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,61	–	–	73,18	6,76
143H-14	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,86	–	–	73,18	6,76
143H-15	4-004-03-10	1	L	h	–	–	4,11	–	–	73,18	6,76
143H-16	4-004-03-10	1	L	h	–	–	3,81	–	–	73,18	6,76
144H-1	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,26	–	–	73,18	6,76
144H-2	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,10	–	–	73,18	6,76
144H-3	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,20	–	–	73,18	6,76
144H-4	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,27	–	–	73,18	6,76
144H-5	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,58	–	–	73,18	6,76
144H-6	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,15	–	–	73,18	6,76

Versuch Nr. C1-...	Textil Bezeichnung NWM...		Aufbringung Art ¹⁾ Richtung ²⁾		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
					Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
144H-7	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,32	–	–	73,18	6,76
144H-8	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,59	–	–	73,18	6,76
144H-9	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,74	–	–	73,18	6,76
144H-10	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,00	–	–	73,18	6,76
144H-11	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,33	–	–	73,18	6,76
144H-12	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,32	–	–	73,18	6,76
144H-13	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,49	–	–	73,18	6,76
144H-14	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,38	–	–	73,18	6,76
144H-15	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,38	–	–	73,18	6,76
144H-16	4-004-03-2b	1	L	h	–	–	3,28	–	–	73,18	6,76
145H-1	4-005-03-10	1	L	h	–	–	3,17	–	–	76,92	8,39
145H-2	4-005-03-10	1	L	h	–	–	3,23	–	–	76,92	8,39
145H-3	4-005-03-10	1	L	h	–	–	3,24	–	–	76,92	8,39
145H-4	4-005-03-10	1	L	h	–	–	3,13	–	–	76,92	8,39
145H-5	4-005-03-10	1	L	h	–	–	3,49	–	–	76,92	8,39
145H-6	4-005-03-10	1	L	h	–	–	2,85	–	–	76,92	8,39
145H-7	4-005-03-10	1	L	h	–	–	3,42	–	–	76,92	8,39
145H-8	4-005-03-10	1	L	h	–	–	3,64	–	–	76,92	8,39
145H-9	4-005-03-10	1	L	h	–	–	2,90	–	–	76,92	8,39
145H-10	4-005-03-10	1	L	h	–	–	3,21	–	–	76,92	8,39
145H-11	4-005-03-10	1	L	h	–	–	3,68	–	–	76,92	8,39
145H-12	4-005-03-10	1	L	h	–	–	3,13	–	–	76,92	8,39
145H-13	4-005-03-10	1	L	h	–	–	3,29	–	–	76,92	8,39
145H-14	4-005-03-10	1	L	h	–	–	3,74	–	–	76,92	8,39
145H-15	4-005-03-10	1	L	h	–	–	3,32	–	–	76,92	8,39
145H-16	4-005-03-10	1	L	h	–	–	3,45	–	–	76,92	8,39
146H-1	3-035-00	1	L	h	–	–	3,17	–	–	64,57	8,17
146H-2	3-035-00	1	L	h	–	–	3,15	–	–	64,57	8,17
146H-3	3-035-00	1	L	h	–	–	2,82	–	–	64,57	8,17
146H-4	3-035-00	1	L	h	–	–	3,03	–	–	64,57	8,17
146H-5	3-035-00	1	L	h	–	–	2,86	–	–	64,57	8,17
146H-6	3-035-00	1	L	h	–	–	3,25	–	–	64,57	8,17
146H-7	3-035-00	1	L	h	–	–	3,00	–	–	64,57	8,17
146H-8	3-035-00	1	L	h	–	–	3,21	–	–	64,57	8,17
146H-9	3-035-00	1	L	h	–	–	2,32	–	–	64,57	8,17
146H-10	3-035-00	1	L	h	–	–	2,32	–	–	64,57	8,17
146H-11	3-035-00	1	L	h	–	–	2,99	–	–	64,57	8,17
146H-12	3-035-00	1	L	h	–	–	2,88	–	–	64,57	8,17
146H-13	3-035-00	1	L	h	–	–	2,69	–	–	64,57	8,17
146H-14	3-035-00	1	L	h	–	–	3,00	–	–	64,57	8,17
146H-15	3-035-00	1	L	h	–	–	2,72	–	–	64,57	8,17
146H-16	3-035-00	1	L	h	–	–	2,42	–	–	64,57	8,17
147H-1	4-001-01	1	L	h	–	–	3,48	–	–	64,57	8,17
147H-2	4-001-01	1	L	h	–	–	3,28	–	–	64,57	8,17
147H-3	4-001-01	1	L	h	–	–	3,72	–	–	64,57	8,17
147H-4	4-001-01	1	L	h	–	–	3,90	–	–	64,57	8,17
147H-5	4-001-01	1	L	h	–	–	3,58	–	–	64,57	8,17
147H-6	4-001-01	1	L	h	–	–	3,58	–	–	64,57	8,17
147H-7	4-001-01	1	L	h	–	–	3,57	–	–	64,57	8,17
147H-9	4-001-01	1	L	h	–	–	4,03	–	–	64,57	8,17
147H-10	4-001-01	1	L	h	–	–	3,18	–	–	64,57	8,17
147H-11	4-001-01	1	L	h	–	–	3,88	–	–	64,57	8,17
147H-12	4-001-01	1	L	h	–	–	3,38	–	–	64,57	8,17
147H-13	4-001-01	1	L	h	–	–	3,54	–	–	64,57	8,17
147H-14	4-001-01	1	L	h	–	–	3,29	–	–	64,57	8,17

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ³⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]
147H-15	4-001-01	1	L	h	-	-	3,85	-	-	64,57	8,17
147H-16	4-001-01	1	L	h	-	-	3,48	-	-	64,57	8,17
148H-1	4-011-03	1	L	h	-	-	3,34	-	-	70,42	6,93
148H-2	4-011-03	1	L	h	-	-	3,50	-	-	70,42	6,93
148H-3	4-011-03	1	L	h	-	-	3,20	-	-	70,42	6,93
148H-4	4-011-03	1	L	h	-	-	4,00	-	-	70,42	6,93
148H-5	4-011-03	1	L	h	-	-	3,24	-	-	70,42	6,93
148H-6	4-011-03	1	L	h	-	-	3,08	-	-	70,42	6,93
148H-7	4-011-03	1	L	h	-	-	3,56	-	-	70,42	6,93
148H-8	4-011-03	1	L	h	-	-	3,87	-	-	70,42	6,93
148H-9	4-011-03	1	L	h	-	-	3,31	-	-	70,42	6,93
148H-10	4-011-03	1	L	h	-	-	2,78	-	-	70,42	6,93
148H-11	4-011-03	1	L	h	-	-	3,50	-	-	70,42	6,93
148H-12	4-011-03	1	L	h	-	-	3,57	-	-	70,42	6,93
148H-13	4-011-03	1	L	h	-	-	3,39	-	-	70,42	6,93
148H-14	4-011-03	1	L	h	-	-	3,75	-	-	70,42	6,93
148H-15	4-011-03	1	L	h	-	-	3,24	-	-	70,42	6,93
148H-16	4-011-03	1	L	h	-	-	2,62	-	-	70,42	6,93
149H-1	4-012-03	1	L	h	-	-	3,81	-	-	70,42	6,93
149H-2	4-012-03	1	L	h	-	-	3,52	-	-	70,42	6,93
149H-3	4-012-03	1	L	h	-	-	3,98	-	-	70,42	6,93
149H-4	4-012-03	1	L	h	-	-	3,50	-	-	70,42	6,93
149H-5	4-012-03	1	L	h	-	-	3,52	-	-	70,42	6,93
149H-6	4-012-03	1	L	h	-	-	4,06	-	-	70,42	6,93
149H-7	4-012-03	1	L	h	-	-	3,58	-	-	70,42	6,93
149H-8	4-012-03	1	L	h	-	-	3,85	-	-	70,42	6,93
149H-9	4-012-03	1	L	h	-	-	3,98	-	-	70,42	6,93
149H-10	4-012-03	1	L	h	-	-	3,39	-	-	70,42	6,93
149H-11	4-012-03	1	L	h	-	-	3,41	-	-	70,42	6,93
149H-12	4-012-03	1	L	h	-	-	3,70	-	-	70,42	6,93
149H-13	4-012-03	1	L	h	-	-	4,04	-	-	70,42	6,93
149H-14	4-012-03	1	L	h	-	-	3,71	-	-	70,42	6,93
149H-15	4-012-03	1	L	h	-	-	3,90	-	-	70,42	6,93
149H-16	4-012-03	1	L	h	-	-	3,59	-	-	70,42	6,93
150H-1	4-001-04	1	L	h	-	-	3,53	-	-	71,78	6,28
150H-2	4-001-04	1	L	h	-	-	3,30	-	-	71,78	6,28
150H-3	4-001-04	1	L	h	-	-	3,09	-	-	71,78	6,28
150H-4	4-001-04	1	L	h	-	-	3,10	-	-	71,78	6,28
150H-5	4-001-04	1	L	h	-	-	3,39	-	-	71,78	6,28
150H-6	4-001-04	1	L	h	-	-	3,62	-	-	71,78	6,28
150H-7	4-001-04	1	L	h	-	-	3,86	-	-	71,78	6,28
150H-8	4-001-04	1	L	h	-	-	3,80	-	-	71,78	6,28
150H-9	4-001-04	1	L	h	-	-	3,49	-	-	71,78	6,28
150H-10	4-001-04	1	L	h	-	-	3,52	-	-	71,78	6,28
150H-11	4-001-04	1	L	h	-	-	3,66	-	-	71,78	6,28
150H-12	4-001-04	1	L	h	-	-	3,67	-	-	71,78	6,28
150H-13	4-001-04	1	L	h	-	-	3,64	-	-	71,78	6,28
150H-14	4-001-04	1	L	h	-	-	3,57	-	-	71,78	6,28
150H-15	4-001-04	1	L	h	-	-	3,42	-	-	71,78	6,28
150H-16	4-001-04	1	L	h	-	-	3,49	-	-	71,78	6,28
151H-1	4-002-04	1	L	h	-	-	3,24	-	-	71,78	6,28
151H-2	4-002-04	1	L	h	-	-	3,35	-	-	71,78	6,28
151H-3	4-002-04	1	L	h	-	-	3,09	-	-	71,78	6,28
151H-4	4-002-04	1	L	h	-	-	3,13	-	-	71,78	6,28
151H-5	4-002-04	1	L	h	-	-	3,30	-	-	71,78	6,28

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Bezeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
151H-6	4-002-04	1	L	h	–	–	3,29	–	–	71,78	6,28
151H-7	4-002-04	1	L	h	–	–	3,36	–	–	71,78	6,28
151H-8	4-002-04	1	L	h	–	–	3,28	–	–	71,78	6,28
151H-9	4-002-04	1	L	h	–	–	3,48	–	–	71,78	6,28
151H-10	4-002-04	1	L	h	–	–	3,31	–	–	71,78	6,28
151H-11	4-002-04	1	L	h	–	–	3,35	–	–	71,78	6,28
151H-12	4-002-04	1	L	h	–	–	3,37	–	–	71,78	6,28
151H-13	4-002-04	1	L	h	–	–	2,79	–	–	71,78	6,28
151H-14	4-002-04	1	L	h	–	–	3,51	–	–	71,78	6,28
151H-15	4-002-04	1	L	h	–	–	3,12	–	–	71,78	6,28
151H-16	4-002-04	1	L	h	–	–	3,26	–	–	71,78	6,28
152H-1	4-003-04	1	L	h	–	–	4,09	–	–	75,55	5,61
152H-2	4-003-04	1	L	h	–	–	3,95	–	–	75,55	5,61
152H-3	4-003-04	1	L	h	–	–	3,67	–	–	75,55	5,61
152H-4	4-003-04	1	L	h	–	–	3,83	–	–	75,55	5,61
152H-5	4-003-04	1	L	h	–	–	3,90	–	–	75,55	5,61
152H-6	4-003-04	1	L	h	–	–	3,79	–	–	75,55	5,61
152H-7	4-003-04	1	L	h	–	–	3,92	–	–	75,55	5,61
152H-8	4-003-04	1	L	h	–	–	4,27	–	–	75,55	5,61
152H-9	4-003-04	1	L	h	–	–	3,71	–	–	75,55	5,61
152H-10	4-003-04	1	L	h	–	–	4,10	–	–	75,55	5,61
152H-11	4-003-04	1	L	h	–	–	4,12	–	–	75,55	5,61
152H-12	4-003-04	1	L	h	–	–	3,76	–	–	75,55	5,61
152H-14	4-003-04	1	L	h	–	–	4,09	–	–	75,55	5,61
152H-15	4-003-04	1	L	h	–	–	3,70	–	–	75,55	5,61
152H-16	4-003-04	1	L	h	–	–	3,57	–	–	75,55	5,61
153H-1	4-005-04	1	L	h	–	–	2,53	–	–	70,23	5,18
153H-2	4-005-04	1	L	h	–	–	3,02	–	–	70,23	5,18
153H-3	4-005-04	1	L	h	–	–	2,75	–	–	70,23	5,18
153H-4	4-005-04	1	L	h	–	–	2,98	–	–	70,23	5,18
153H-5	4-005-04	1	L	h	–	–	2,50	–	–	70,23	5,18
153H-6	4-005-04	1	L	h	–	–	2,93	–	–	70,23	5,18
153H-7	4-005-04	1	L	h	–	–	2,81	–	–	70,23	5,18
153H-8	4-005-04	1	L	h	–	–	2,82	–	–	70,23	5,18
153H-9	4-005-04	1	L	h	–	–	2,81	–	–	70,23	5,18
153H-10	4-005-04	1	L	h	–	–	2,28	–	–	70,23	5,18
153H-11	4-005-04	1	L	h	–	–	2,75	–	–	70,23	5,18
153H-12	4-005-04	1	L	h	–	–	2,78	–	–	70,23	5,18
153H-13	4-005-04	1	L	h	–	–	1,74	–	–	70,23	5,18
153H-14	4-005-04	1	L	h	–	–	1,78	–	–	70,23	5,18
153H-15	4-005-04	1	L	h	–	–	2,10	–	–	70,23	5,18
153H-16	4-005-04	1	L	h	–	–	1,99	–	–	70,23	5,18
154H-1	4-006-04	1	L	h	–	–	3,28	–	–	75,55	5,61
154H-2	4-006-04	1	L	h	–	–	3,33	–	–	75,55	5,61
154H-3	4-006-04	1	L	h	–	–	3,20	–	–	75,55	5,61
154H-4	4-006-04	1	L	h	–	–	3,82	–	–	75,55	5,61
154H-5	4-006-04	1	L	h	–	–	4,01	–	–	75,55	5,61
154H-6	4-006-04	1	L	h	–	–	3,55	–	–	75,55	5,61
154H-7	4-006-04	1	L	h	–	–	3,83	–	–	75,55	5,61
154H-8	4-006-04	1	L	h	–	–	4,03	–	–	75,55	5,61
154H-9	4-006-04	1	L	h	–	–	3,64	–	–	75,55	5,61
154H-10	4-006-04	1	L	h	–	–	3,15	–	–	75,55	5,61
154H-11	4-006-04	1	L	h	–	–	3,57	–	–	75,55	5,61
154H-12	4-006-04	1	L	h	–	–	3,73	–	–	75,55	5,61
154H-13	4-006-04	1	L	h	–	–	3,48	–	–	75,55	5,61

Versuch Nr. C1-...	Textil Bezeichnung NWM...		Lagen- anzahl	Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Art 1)	Richtung 2)		Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]	Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ³⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]		Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]		
154H-14	4-006-04	1	L	h	–	–	3,45	–	–	75,55	5,61	
154H-15	4-006-04	1	L	h	–	–	3,66	–	–	75,55	5,61	
154H-16	4-006-04	1	L	h	–	–	3,48	–	–	75,55	5,61	
155H-1	4-013-04	1	L	h	–	–	2,40	–	–	78,35	5,55	
155H-2	4-013-04	1	L	h	–	–	2,39	–	–	78,35	5,55	
155H-3	4-013-04	1	L	h	–	–	2,70	–	–	78,35	5,55	
155H-4	4-013-04	1	L	h	–	–	2,40	–	–	78,35	5,55	
155H-5	4-013-04	1	L	h	–	–	2,11	–	–	78,35	5,55	
155H-6	4-013-04	1	L	h	–	–	2,15	–	–	78,35	5,55	
155H-7	4-013-04	1	L	h	–	–	2,52	–	–	78,35	5,55	
155H-8	4-013-04	1	L	h	–	–	2,50	–	–	78,35	5,55	
155H-9	4-013-04	1	L	h	–	–	2,31	–	–	78,35	5,55	
155H-10	4-013-04	1	L	h	–	–	2,30	–	–	78,35	5,55	
155H-11	4-013-04	1	L	h	–	–	2,31	–	–	78,35	5,55	
155H-12	4-013-04	1	L	h	–	–	2,50	–	–	78,35	5,55	
155H-13	4-013-04	1	L	h	–	–	2,11	–	–	78,35	5,55	
155H-14	4-013-04	1	L	h	–	–	2,48	–	–	78,35	5,55	
155H-15	4-013-04	1	L	h	–	–	2,25	–	–	78,35	5,55	
155H-16	4-013-04	1	L	h	–	–	2,50	–	–	78,35	5,55	
156H-1	4-022-04	1	L	h	–	–	2,40	–	–	78,35	5,55	
156H-2	4-022-04	1	L	h	–	–	2,88	–	–	78,35	5,55	
156H-3	4-022-04	1	L	h	–	–	3,27	–	–	78,35	5,55	
156H-4	4-022-04	1	L	h	–	–	3,18	–	–	78,35	5,55	
156H-5	4-022-04	1	L	h	–	–	3,61	–	–	78,35	5,55	
156H-6	4-022-04	1	L	h	–	–	2,80	–	–	78,35	5,55	
156H-7	4-022-04	1	L	h	–	–	3,40	–	–	78,35	5,55	
156H-8	4-022-04	1	L	h	–	–	3,21	–	–	78,35	5,55	
156H-9	4-022-04	1	L	h	–	–	3,44	–	–	78,35	5,55	
156H-10	4-022-04	1	L	h	–	–	3,13	–	–	78,35	5,55	
156H-11	4-022-04	1	L	h	–	–	3,31	–	–	78,35	5,55	
156H-12	4-022-04	1	L	h	–	–	3,02	–	–	78,35	5,55	
156H-13	4-022-04	1	L	h	–	–	3,31	–	–	78,35	5,55	
156H-14	4-022-04	1	L	h	–	–	3,10	–	–	78,35	5,55	
156H-15	4-022-04	1	L	h	–	–	2,68	–	–	78,35	5,55	
156H-16	4-022-04	1	L	h	–	–	3,31	–	–	78,35	5,55	
158H-1	4-005-03	1	L	h	–	–	2,99	–	–	72,83	6,17	
158H-2	4-005-03	1	L	h	–	–	3,34	–	–	72,83	6,17	
158H-3	4-005-03	1	L	h	–	–	3,47	–	–	72,83	6,17	
158H-4	4-005-03	1	L	h	–	–	3,25	–	–	72,83	6,17	
158H-5	4-005-03	1	L	h	–	–	3,16	–	–	72,83	6,17	
158H-6	4-005-03	1	L	h	–	–	3,69	–	–	72,83	6,17	
158H-7	4-005-03	1	L	h	–	–	4,11	–	–	72,83	6,17	
158H-8	4-005-03	1	L	h	–	–	3,40	–	–	72,83	6,17	
158H-9	4-005-03	1	L	h	–	–	3,38	–	–	72,83	6,17	
158H-10	4-005-03	1	L	h	–	–	3,52	–	–	72,83	6,17	
158H-11	4-005-03	1	L	h	–	–	3,24	–	–	72,83	6,17	
158H-12	4-005-03	1	L	h	–	–	3,58	–	–	72,83	6,17	
158H-14	4-005-03	1	L	h	–	–	3,88	–	–	72,83	6,17	
158H-15	4-005-03	1	L	h	–	–	3,70	–	–	72,83	6,17	
158H-16	4-005-03	1	L	h	–	–	3,75	–	–	72,83	6,17	
159H-1	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	3,13	–	–	69,88	5,25	
159H-2	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	3,07	–	–	69,88	5,25	
159H-3	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	2,66	–	–	69,88	5,25	
159H-4	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	3,24	–	–	69,88	5,25	
159H-5	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	2,95	–	–	69,88	5,25	

Versuch Nr. C1-...	Textil Bezeichnung NWM...	Lagen- anzahl	Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
			Art ¹⁾	Richtung ²⁾	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
159H-6	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	3,58	–	–	69,88	5,25
159H-7	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	3,19	–	–	69,88	5,25
159H-8	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	2,82	–	–	69,88	5,25
159H-9	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	3,32	–	–	69,88	5,25
159H-10	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	2,78	–	–	69,88	5,25
159H-11	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	3,38	–	–	69,88	5,25
159H-12	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	3,00	–	–	69,88	5,25
159H-13	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	3,50	–	–	69,88	5,25
159H-14	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	2,93	–	–	69,88	5,25
159H-15	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	2,93	–	–	69,88	5,25
159H-16	3-003-04-2b	1	L	h	–	–	2,93	–	–	69,88	5,25
160H-1	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,48	–	–	69,88	5,25
160H-2	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,61	–	–	69,88	5,25
160H-3	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,49	–	–	69,88	5,25
160H-4	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,78	–	–	69,88	5,25
160H-5	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,14	–	–	69,88	5,25
160H-6	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,29	–	–	69,88	5,25
160H-7	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,06	–	–	69,88	5,25
160H-8	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,69	–	–	69,88	5,25
160H-9	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,33	–	–	69,88	5,25
160H-10	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,43	–	–	69,88	5,25
160H-11	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,23	–	–	69,88	5,25
160H-12	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,33	–	–	69,88	5,25
160H-13	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,71	–	–	69,88	5,25
160H-14	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,60	–	–	69,88	5,25
160H-15	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,61	–	–	69,88	5,25
160H-16	3-004-04-2b	1	L	h	–	–	3,47	–	–	69,88	5,25
162H-1	3-026-05	1	L	h	–	–	2,30	–	–	78,30	5,58
162H-2	3-026-05	1	L	h	–	–	2,17	–	–	78,30	5,58
162H-3	3-026-05	1	L	h	–	–	2,81	–	–	78,30	5,58
162H-4	3-026-05	1	L	h	–	–	2,72	–	–	78,30	5,58
162H-5	3-026-05	1	L	h	–	–	2,13	–	–	78,30	5,58
162H-6	3-026-05	1	L	h	–	–	2,38	–	–	78,30	5,58
162H-7	3-026-05	1	L	h	–	–	1,68	–	–	78,30	5,58
162H-8	3-026-05	1	L	h	–	–	2,17	–	–	78,30	5,58
162H-9	3-026-05	1	L	h	–	–	3,13	–	–	78,30	5,58
162H-10	3-026-05	1	L	h	–	–	2,79	–	–	78,30	5,58
162H-11	3-026-05	1	L	h	–	–	2,68	–	–	78,30	5,58
162H-12	3-026-05	1	L	h	–	–	2,68	–	–	78,30	5,58
162H-13	3-026-05	1	L	h	–	–	1,97	–	–	78,30	5,58
162H-14	3-026-05	1	L	h	–	–	2,41	–	–	78,30	5,58
162H-15	3-026-05	1	L	h	–	–	2,47	–	–	78,30	5,58
162H-16	3-026-05	1	L	h	–	–	2,99	–	–	78,30	5,58
165H-1	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	3,24	–	–	74,55	6,20
165H-2	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	3,25	–	–	74,55	6,20
165H-3	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	2,92	–	–	74,55	6,20
165H-4	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	2,99	–	–	74,55	6,20
165H-5	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	2,61	–	–	74,55	6,20
165H-6	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	3,10	–	–	74,55	6,20
165H-7	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	3,05	–	–	74,55	6,20
165H-8	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	3,42	–	–	74,55	6,20
165H-9	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	3,01	–	–	74,55	6,20
165H-10	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	3,27	–	–	74,55	6,20
165H-11	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	3,36	–	–	74,55	6,20
165H-12	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	3,31	–	–	74,55	6,20

Versuch Nr. C1-...	Textil Bezeichnung NWM...		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Lagen- anzahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]	Druck- festig- keit ³⁾⁴⁾ $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]		Druck- festig- keit ³⁾⁵⁾ $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ⁵⁾⁶⁾ f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ⁵⁾⁶⁾ $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]	
165H-13	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	3,27	–	–	74,55	6,20
165H-14	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	3,52	–	–	74,55	6,20
165H-15	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	2,74	–	–	74,55	6,20
165H-16	3-026-05-p2	1	L	h	–	–	3,52	–	–	74,55	6,20
166H-1	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	3,26	–	–	74,55	6,20
166H-2	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	3,26	–	–	74,55	6,20
166H-3	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	3,27	–	–	74,55	6,20
166H-4	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	3,36	–	–	74,55	6,20
166H-5	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	3,38	–	–	74,55	6,20
166H-6	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	3,41	–	–	74,55	6,20
166H-7	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	4,16	–	–	74,55	6,20
166H-8	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	3,97	–	–	74,55	6,20
166H-9	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	3,41	–	–	74,55	6,20
166H-10	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	3,00	–	–	74,55	6,20
166H-11	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	3,97	–	–	74,55	6,20
166H-12	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	3,37	–	–	74,55	6,20
166H-13	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	2,99	–	–	74,55	6,20
166H-14	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	3,23	–	–	74,55	6,20
166H-15	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	3,17	–	–	74,55	6,20
166H-16	3-027-05-sb	1	L	h	–	–	3,28	–	–	74,55	6,20
167H-1	3-025-05	1	L	h	–	–	0,29	–	–	78,30	5,58
167H-2	3-025-05	1	L	h	–	–	0,11	–	–	78,30	5,58
167H-3	3-025-05	1	L	h	–	–	0,69	–	–	78,30	5,58
167H-4	3-025-05	1	L	h	–	–	0,20	–	–	78,30	5,58
167H-7	3-025-05	1	L	h	–	–	0,29	–	–	78,30	5,58
167H-8	3-025-05	1	L	h	–	–	0,08	–	–	78,30	5,58
167H-9	3-025-05	1	L	h	–	–	0,22	–	–	78,30	5,58
167H-10	3-025-05	1	L	h	–	–	0,39	–	–	78,30	5,58
167H-11	3-025-05	1	L	h	–	–	0,10	–	–	78,30	5,58
167H-12	3-025-05	1	L	h	–	–	0,04	–	–	78,30	5,58
167H-15	3-025-05	1	L	h	–	–	0,03	–	–	78,30	5,58
167H-16	3-025-05	1	L	h	–	–	0,26	–	–	78,30	5,58
168H-1	3-028-05	1	L	h	–	–	2,97	–	–	74,37	5,84
168H-2	3-028-05	1	L	h	–	–	3,03	–	–	74,37	5,84
168H-3	3-028-05	1	L	h	–	–	2,85	–	–	74,37	5,84
168H-4	3-028-05	1	L	h	–	–	2,88	–	–	74,37	5,84
168H-5	3-028-05	1	L	h	–	–	3,52	–	–	74,37	5,84
168H-6	3-028-05	1	L	h	–	–	3,40	–	–	74,37	5,84
168H-7	3-028-05	1	L	h	–	–	2,80	–	–	74,37	5,84
168H-8	3-028-05	1	L	h	–	–	3,35	–	–	74,37	5,84
168H-9	3-028-05	1	L	h	–	–	3,50	–	–	74,37	5,84
168H-10	3-028-05	1	L	h	–	–	3,52	–	–	74,37	5,84
168H-11	3-028-05	1	L	h	–	–	3,24	–	–	74,37	5,84
168H-12	3-028-05	1	L	h	–	–	2,85	–	–	74,37	5,84
168H-13	3-028-05	1	L	h	–	–	3,33	–	–	74,37	5,84
168H-14	3-028-05	1	L	h	–	–	2,98	–	–	74,37	5,84
168H-15	3-028-05	1	L	h	–	–	3,28	–	–	74,37	5,84
168H-16	3-028-05	1	L	h	–	–	3,00	–	–	74,37	5,84

Tab. A 4.1.2 Ergebnisse der Haftzugversuche – Versagen im Feinbeton

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Be- zeichnung NWM...	La- gen- an- zahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brüc- ke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm, cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm, cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm, fl}$ [N/mm ²]
100H-1	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	3,08	-	-	74,41	5,76
100H-2	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	5,31	-	-	74,41	5,76
100H-3	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	4,22	-	-	74,41	5,76
100H-4	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	4,86	-	-	74,41	5,76
100H-5	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	5,66	-	-	74,41	5,76
100H-6	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	6,21	-	-	74,41	5,76
100H-7	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	5,23	-	-	74,41	5,76
100H-8	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	5,72	-	-	74,41	5,76
157H-1	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	4,10	-	-	72,83	6,17
157H-2	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	4,24	-	-	72,83	6,17
157H-3	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	4,08	-	-	72,83	6,17
157H-4	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	3,81	-	-	72,83	6,17
157H-5	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	4,33	-	-	72,83	6,17
157H-6	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	3,49	-	-	72,83	6,17
157H-7	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	3,86	-	-	72,83	6,17
157H-8	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	3,90	-	-	72,83	6,17
157H-9	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	3,34	-	-	72,83	6,17
157H-10	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	3,67	-	-	72,83	6,17
157H-11	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	4,00	-	-	72,83	6,17
157H-12	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	4,08	-	-	72,83	6,17
157H-13	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	3,50	-	-	72,83	6,17
157H-14	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	3,97	-	-	72,83	6,17
157H-15	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	3,51	-	-	72,83	6,17
157H-16	- ⁷⁾	0	L	-	-	-	3,94	-	-	72,83	6,17

¹⁾ L = Laminieren, S = Sprühen, K = Kleben

²⁾ h = horizontal, v = vertikal, üK = über Kopf

³⁾ Regelprüfung am 15er Würfel

⁴⁾ nach 28d

⁵⁾ am Prüftag der Haftzugprüfung (= 28d-Festigkeit des Feinbetons)

⁶⁾ Regelprüfung am Mörtelprisma

⁷⁾ nur Feinbetonschicht ohne textile Bewehrung

Tab. A 4.1.3 Ergebnisse der Haftzugversuche – Versagen in der Verbundfuge

Versuch Nr. C1-...	Textil Be- zeichnung NWM...		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	La- gen- an- zahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brüc- ke	Rau- tiefe [mm]	Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]		Druck- festig- keit ^{5) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]	
72H-13	3-035-00	1	L	–	–	0,50	2,47	36,03	34,80	77,15	9,61
98H-13	4-004-03-2b	1	L	–	–	0,73	2,10	32,63	33,90	69,68	7,67
94H-12	4-002-03-2b	1	L	–	–	0,78	1,97	32,63	33,77	69,98	7,10
94H-13	4-002-03-2b	1	L	–	–	0,78	2,62	32,63	33,77	69,98	7,10
18H-8	3-005-01	1	S	h	–	0,84	1,33	33,17	–	69,30	6,10
18H-15	3-005-01	1	S	h	–	0,84	1,48	33,17	–	69,30	6,10
96H-15	4-003-03-2b	1	L	–	–	0,93	2,28	32,63	33,90	69,68	7,67
96H-16	4-003-03-2b	1	L	–	–	0,93	3,10	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-7	4-004-03-10	1	L	–	–	1,03	2,43	32,63	33,90	69,68	7,67

¹⁾ L = Laminieren, S = Sprühen, K = Kleben

²⁾ h = horizontal, v = vertikal, üK = über Kopf

³⁾ Regelprüfung am 15er Würfel

⁴⁾ nach 28d

⁵⁾ am Prüftag der Haftzugprüfung (= 28d-Festigkeit des Feinbetons)

⁶⁾ Regelprüfung am Mörtelprisma

Tab. A 4.1.4 Ergebnisse der Haftzugversuche – Versagen im Altbetonuntergrund

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Be- zeichnung NWM...	La- gen- an- zahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brü- cke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
01H-1	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,27	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-2	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,28	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-3	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	1,89	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-4	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,11	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-5	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,50	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-6	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,38	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-7	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,31	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-8	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,40	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-9	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,59	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-10	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,10	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-11	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,37	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-12	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,31	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-13	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,02	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-14	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,58	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-15	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,40	27,83	27,63	70,49	5,47
01H-16	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,39	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-1	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	3,06	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-2	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	3,15	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-3	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,90	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-4	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	3,00	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-5	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	3,02	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-6	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,90	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-7	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,78	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-8	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	3,01	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-9	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,97	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-10	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,86	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-11	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,43	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-12	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,80	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-13	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	3,06	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-14	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,98	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-15	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,70	27,83	27,63	70,49	5,47
02H-16	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,94	27,83	27,63	70,49	5,47
05H-1	310tex / 4,5	1	L	h	–	1,05	2,60	33,90	31,80	68,50	7,69
05H-2	310tex / 4,5	1	L	h	–	1,05	2,73	33,90	31,80	68,50	7,69
05H-3	310tex / 4,5	1	L	h	–	1,05	2,69	33,90	31,80	68,50	7,69
05H-4	310tex / 4,5	1	L	h	–	1,05	2,45	33,90	31,80	68,50	7,69
05H-5	310tex / 4,5	1	L	h	–	1,05	3,10	33,90	31,80	68,50	7,69
05H-6	310tex / 4,5	1	L	h	–	1,05	2,10	33,90	31,80	68,50	7,69
05H-7	310tex / 4,5	1	L	h	–	1,05	2,92	33,90	31,80	68,50	7,69
05H-8	310tex / 4,5	1	L	h	–	1,05	2,71	33,90	31,80	68,50	7,69
05H-12	310tex / 4,5	1	L	h	–	1,05	2,25	33,90	31,80	68,50	7,69
05H-15	310tex / 4,5	1	L	h	–	1,05	2,71	33,90	31,80	68,50	7,69

¹⁾ L = Laminieren, S = Sprühen, K = Kleben

²⁾ h = horizontal, v = vertikal, üK = über Kopf

³⁾ Regelprüfung am 15er Würfel

⁴⁾ nach 28d

⁵⁾ am Prüftag der Haftzugprüfung (= 28d-Festigkeit des Feinbetons)

⁶⁾ Regelprüfung am Mörtelprisma

⁷⁾ nur Feinbetonschicht ohne textile Bewehrung

⁸⁾ nur Feinbetonschicht ohne textile Bewehrung

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Be- zeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]
06H-1	310tex / 6	1	L	h	–	1,10	3,20	33,90	31,80	68,50	7,69
06H-2	310tex / 6	1	L	h	–	1,10	2,71	33,90	31,80	68,50	7,69
06H-3	310tex / 6	1	L	h	–	1,10	3,10	33,90	31,80	68,50	7,69
06H-5	310tex / 6	1	L	h	–	1,10	3,39	33,90	31,80	68,50	7,69
06H-6	310tex / 6	1	L	h	–	1,10	3,00	33,90	31,80	68,50	7,69
06H-7	310tex / 6	1	L	h	–	1,10	3,25	33,90	31,80	68,50	7,69
06H-9	310tex / 6	1	L	h	–	1,10	2,71	33,90	31,80	68,50	7,69
06H-13	310tex / 6	1	L	h	–	1,10	3,22	33,90	31,80	68,50	7,69
06H-14	310tex / 6	1	L	h	–	1,10	2,80	33,90	31,80	68,50	7,69
06H-15	310tex / 6	1	L	h	–	1,10	2,40	33,90	31,80	68,50	7,69
06H-16	310tex / 6	1	L	h	–	1,10	3,05	33,90	31,80	68,50	7,69
07H-1	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,70	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-2	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,85	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-3	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,96	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-4	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	3,19	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-5	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,48	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-6	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,98	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-7	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,82	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-8	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,58	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-9	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,42	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-10	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,61	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-11	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,32	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-12	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,68	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-13	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,91	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-14	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,25	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-15	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,40	34,27	31,87	70,30	5,32
07H-16	310tex / 7,5	1	L	h	–	1,00	2,28	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-1	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,47	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-2	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,37	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-3	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,39	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-4	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,22	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-5	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,81	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-6	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,12	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-7	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,51	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-8	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,28	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-9	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,35	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-10	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,50	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-11	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	3,11	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-12	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,81	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-13	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,65	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-14	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,69	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-15	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,42	34,27	31,87	70,30	5,32
08H-16	310tex / 9	1	L	h	–	1,00	2,10	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-1	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,61	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-2	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,57	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-3	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,72	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-4	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,57	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-5	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,39	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-6	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,55	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-7	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,91	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-8	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,40	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-9	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,85	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-10	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,50	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-11	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,70	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-12	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,57	34,27	31,87	70,30	5,32

Versuch Nr. Cl-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Be- zeichnung NWM...	La- gen- an- zahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brü- cke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
09H-13	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,40	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-14	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,25	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-15	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,51	34,27	31,87	70,30	5,32
09H-16	310tex/10,5	1	L	h	–	1,00	2,68	34,27	31,87	70,30	5,32
10H-1	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,88	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-2	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,30	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-3	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,70	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-4	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	3,08	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-5	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,50	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-6	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	3,45	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-7	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,68	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-8	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	3,09	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-9	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,61	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-10	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,63	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-11	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,38	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-12	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,77	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-13	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,78	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-14	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,20	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-15	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	2,50	36,20	35,53	73,30	6,98
10H-16	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,00	3,19	36,20	35,53	73,30	6,98
11H-2	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	3,02	36,20	35,53	73,30	6,98
11H-3	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,90	36,20	35,53	73,30	6,98
11H-4	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,45	36,20	35,53	73,30	6,98
11H-6	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,79	36,20	35,53	73,30	6,98
11H-7	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,70	36,20	35,53	73,30	6,98
11H-8	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,85	36,20	35,53	73,30	6,98
11H-9	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,99	36,20	35,53	73,30	6,98
11H-10	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,92	36,20	35,53	73,30	6,98
11H-12	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,20	36,20	35,53	73,30	6,98
11H-13	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,40	36,20	35,53	73,30	6,98
11H-14	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	3,08	36,20	35,53	73,30	6,98
11H-15	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	2,70	36,20	35,53	73,30	6,98
11H-16	– ⁸⁾	0	L	h	–	1,00	3,01	36,20	35,53	73,30	6,98
14H-2	3-030-00	1	L	h	–	0,81	1,73	34,10	–	71,70	7,20
14H-6	3-030-00	1	L	h	–	0,81	1,94	34,10	–	71,70	7,20
14H-8	3-030-00	1	L	h	–	0,81	1,94	34,10	–	71,70	7,20
15H-2	3-032-00	1	L	h	–	0,79	1,79	34,10	–	71,70	7,20
16H-1	3-005-01	1	L	h	–	0,84	2,14	33,17	–	69,30	6,10
16H-2	3-005-01	1	L	h	–	0,84	1,84	33,17	–	69,30	6,10
16H-3	3-005-01	1	L	h	–	0,84	2,14	33,17	–	69,30	6,10
16H-4	3-005-01	1	L	h	–	0,84	2,04	33,17	–	69,30	6,10
16H-6	3-005-01	1	L	h	–	0,84	1,89	33,17	–	69,30	6,10
16H-8	3-005-01	1	L	h	–	0,84	1,94	33,17	–	69,30	6,10
16H-10	3-005-01	1	L	h	–	0,84	1,94	33,17	–	69,30	6,10
16H-11	3-005-01	1	L	h	–	0,84	1,94	33,17	–	69,30	6,10
16H-15	3-005-01	1	L	h	–	0,84	1,84	33,17	–	69,30	6,10
16H-16	3-005-01	1	L	h	–	0,84	1,84	33,17	–	69,30	6,10
18H-5	3-005-01	1	S	h	–	0,84	2,14	33,17	–	69,30	6,10
18H-12	3-005-01	1	S	h	–	0,84	2,14	33,17	–	69,30	6,10
20H-13	3-033-00	1	L	h	–	0,84	2,40	32,53	–	71,80	6,60
21H-1	3-035-00	1	L	h	–	0,84	2,30	32,53	–	71,80	6,60
21H-3	3-035-00	1	L	h	–	0,84	2,19	32,53	–	71,80	6,60
21H-6	3-035-00	1	L	h	–	0,84	2,55	32,53	–	71,80	6,60

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Be- zeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
21H-7	3-035-00	1	L	h	–	0,84	1,79	32,53	–	71,80	6,60
21H-8	3-035-00	1	L	h	–	0,84	1,79	32,53	–	71,80	6,60
21H-10	3-035-00	1	L	h	–	0,84	1,99	32,53	–	71,80	6,60
21H-11	3-035-00	1	L	h	–	0,84	2,24	32,53	–	71,80	6,60
21H-14	3-035-00	1	L	h	–	0,84	2,75	32,53	–	71,80	6,60
22H-2	3-037-00	1	L	h	–	0,99	1,79	36,70	–	75,85	6,30
22H-8	3-037-00	1	L	h	–	0,99	2,04	36,70	–	75,85	6,30
22H-12	3-037-00	1	L	h	–	0,99	2,24	36,70	–	75,85	6,30
22H-14	3-037-00	1	L	h	–	0,99	2,30	36,70	–	75,85	6,30
28H-1	3-013-01	1	L	h	–	0,77	2,20	–	41,75	71,25	6,55
28H-4	3-013-01	1	L	h	–	0,77	2,15	–	41,75	71,25	6,55
28H-8	3-013-01	1	L	h	–	0,77	2,18	–	41,75	71,25	6,55
29H-4	3-013-01	1	L	h	–	1,52	2,50	–	41,75	71,25	6,55
29H-7	3-013-01	1	L	h	–	1,52	2,30	–	41,75	71,25	6,55
29H-8	3-013-01	1	L	h	–	1,52	2,41	–	41,75	71,25	6,55
34H-1	3-013-01	1	L	h	Ja	1,05	2,10	35,60	40,67	80,98	5,71
34H-8	3-013-01	1	L	h	Ja	1,05	2,50	35,60	40,67	80,98	5,71
43H-2	3-033-00	1	S	h	–	1,07	1,52	28,97	32,00	74,00	5,83
45H-1	3-035-00	1	S	h	–	1,05	3,05	30,10	31,30	77,00	6,83
45H-2	3-035-00	1	S	h	–	1,05	2,29	30,10	31,30	77,00	6,83
45H-4	3-035-00	1	S	h	–	1,05	3,01	30,10	31,30	77,00	6,83
45H-5	3-035-00	1	S	h	–	1,05	2,41	30,10	31,30	77,00	6,83
45H-8	3-035-00	1	S	h	–	1,05	3,12	30,10	31,30	77,00	6,83
45H-9	3-035-00	1	S	h	–	1,05	2,60	30,10	31,30	77,00	6,83
45H-10	3-035-00	1	S	h	–	1,05	2,59	30,10	31,30	77,00	6,83
45H-12	3-035-00	1	S	h	–	1,05	2,54	30,10	31,30	77,00	6,83
45H-15	3-035-00	1	S	h	–	1,05	2,75	30,10	31,30	77,00	6,83
45H-16	3-035-00	1	S	h	–	1,05	2,72	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-1	3-013-01	1	S	h	–	1,09	1,89	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-4	3-013-01	1	S	h	–	1,09	2,16	30,10	31,30	77,00	6,83
47H-5	3-013-01	1	S	h	–	1,09	1,85	30,10	31,30	77,00	6,83
48H-2	3-031-00	1	S	v	–	1,07	1,68	28,83	29,30	77,00	6,83
49H-16	3-033-00	1	S	v	–	1,02	1,71	28,83	29,30	77,00	6,83
51H-1	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,80	30,17	33,83	88,87	6,20
51H-2	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,71	30,17	33,83	88,87	6,20
51H-3	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,45	30,17	33,83	88,87	6,20
51H-4	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,44	30,17	33,83	88,87	6,20
51H-5	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,35	30,17	33,83	88,87	6,20
51H-6	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,31	30,17	33,83	88,87	6,20
51H-7	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,68	30,17	33,83	88,87	6,20
51H-8	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,55	30,17	33,83	88,87	6,20
51H-9	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,10	30,17	33,83	88,87	6,20
51H-10	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,73	30,17	33,83	88,87	6,20
51H-11	3-035-00	1	S	v	–	0,93	1,88	30,17	33,83	88,87	6,20
51H-12	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,83	30,17	33,83	88,87	6,20
51H-13	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,53	30,17	33,83	88,87	6,20
51H-14	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,56	30,17	33,83	88,87	6,20
51H-15	3-035-00	1	S	v	–	0,93	2,33	30,17	33,83	88,87	6,20
54H-1	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	2,11	28,93	30,97	88,87	6,20
54H-2	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	2,05	28,93	30,97	88,87	6,20
54H-5	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	2,31	28,93	30,97	88,87	6,20
54H-7	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	2,34	28,93	30,97	88,87	6,20
54H-8	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	2,43	28,93	30,97	88,87	6,20
54H-9	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	2,43	28,93	30,97	88,87	6,20
54H-11	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	1,98	28,93	30,97	88,87	6,20

Versuch Nr. Cl-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Be- zeichnung NWM...	La- gen- an- zahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brü- cke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
54H-13	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	2,30	28,93	30,97	88,87	6,20
54H-16	3-031-00	1	S	üK	–	1,05	2,18	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-1	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	2,12	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-2	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	2,18	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-4	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	1,99	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-5	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	1,85	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-7	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	1,81	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-9	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	1,89	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-10	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	2,10	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-11	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	2,38	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-12	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	2,26	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-13	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	1,71	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-14	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	1,82	28,93	30,97	88,87	6,20
56H-15	3-037-00	1	S	üK	–	1,09	2,10	28,93	30,97	88,87	6,20
57H-1	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	1,71	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-2	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	1,72	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-3	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	2,13	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-4	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	1,99	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-5	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	1,87	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-6	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	1,72	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-7	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	1,80	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-8	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	1,98	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-9	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	1,88	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-10	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	2,63	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-11	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	2,21	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-12	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	2,00	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-13	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	1,97	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-14	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	2,01	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-15	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	2,21	26,27	29,83	82,78	6,69
57H-16	3-035-00	1	S	üK	–	1,02	2,01	26,27	29,83	82,78	6,69
58H-12	3-004-01	1	S	üK	–	1,09	1,11	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-1	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	1,86	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-2	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	1,71	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-3	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	1,98	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-4	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	1,29	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-7	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	1,82	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-8	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	1,49	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-10	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	1,81	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-11	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	1,63	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-12	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	1,88	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-13	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	1,72	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-14	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	2,10	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-15	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	2,17	26,27	29,83	82,78	6,69
59H-16	3-013-01	1	S	üK	–	1,07	1,70	26,27	29,83	82,78	6,69
64H-1	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	2,02	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-5	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	1,99	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-7	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	2,09	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-8	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	2,08	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-12	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	2,10	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-13	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	2,31	31,70	31,57	72,24	8,20
64H-15	3-033-00	1	L	h	Ja	0,81	1,69	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-5	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	2,45	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-6	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	2,20	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-7	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	2,31	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-8	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	2,39	31,70	31,57	72,24	8,20

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Be- zeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
65H-9	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	1,77	31,70	31,57	72,24	8,20
65H-11	3-037-00	1	L	h	Ja	1,00	2,20	31,70	31,57	72,24	8,20
66H-3	3-031-00	1	L	h	–	0,63	1,72	31,97	31,70	78,13	7,76
66H-12	3-031-00	1	L	h	–	0,63	1,51	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-1	3-033-00	1	L	h	–	0,63	2,08	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-2	3-033-00	1	L	h	–	0,63	1,99	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-4	3-033-00	1	L	h	–	0,63	1,58	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-5	3-033-00	1	L	h	–	0,63	2,21	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-6	3-033-00	1	L	h	–	0,63	2,23	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-7	3-033-00	1	L	h	–	0,63	2,08	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-11	3-033-00	1	L	h	–	0,63	1,83	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-13	3-033-00	1	L	h	–	0,63	1,41	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-14	3-033-00	1	L	h	–	0,63	1,97	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-15	3-033-00	1	L	h	–	0,63	1,78	31,97	31,70	78,13	7,76
67H-16	3-033-00	1	L	h	–	0,63	2,03	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-1	3-037-00	1	L	h	–	0,63	1,95	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-2	3-037-00	1	L	h	–	0,63	1,70	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-5	3-037-00	1	L	h	–	0,63	1,77	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-7	3-037-00	1	L	h	–	0,63	1,62	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-11	3-037-00	1	L	h	–	0,63	2,00	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-12	3-037-00	1	L	h	–	0,63	2,11	31,97	31,70	78,13	7,76
68H-13	3-037-00	1	L	h	–	0,63	1,62	31,97	31,70	78,13	7,76
69H-15	3-031-00	1	L	h	–	1,27	1,74	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-1	3-033-00	1	L	h	–	1,33	1,88	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-2	3-033-00	1	L	h	–	1,33	2,13	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-3	3-033-00	1	L	h	–	1,33	1,88	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-5	3-033-00	1	L	h	–	1,33	2,03	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-7	3-033-00	1	L	h	–	1,33	2,38	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-11	3-033-00	1	L	h	–	1,33	2,74	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-15	3-033-00	1	L	h	–	1,33	2,21	30,07	26,93	78,23	9,89
70H-16	3-033-00	1	L	h	–	1,33	1,90	30,07	26,93	78,23	9,89
72H-1	3-035-00	1	L	h	–	0,50	2,53	36,03	34,80	77,15	9,61
72H-2	3-035-00	1	L	h	–	0,50	2,78	36,03	34,80	77,15	9,61
72H-3	3-035-00	1	L	h	–	0,50	2,80	36,03	34,80	77,15	9,61
72H-4	3-035-00	1	L	h	–	0,50	2,73	36,03	34,80	77,15	9,61
72H-5	3-035-00	1	L	h	–	0,50	3,00	36,03	34,80	77,15	9,61
72H-6	3-035-00	1	L	h	–	0,50	3,23	36,03	34,80	77,15	9,61
72H-7	3-035-00	1	L	h	–	0,50	3,06	36,03	34,80	77,15	9,61
72H-8	3-035-00	1	L	h	–	0,50	2,90	36,03	34,80	77,15	9,61
72H-9	3-035-00	1	L	h	–	0,50	2,78	36,03	34,80	77,15	9,61
72H-10	3-035-00	1	L	h	–	0,50	2,76	36,03	34,80	77,15	9,61
72H-11	3-035-00	1	L	h	–	0,50	2,28	36,03	34,80	77,15	9,61
72H-12	3-035-00	1	L	h	–	0,50	2,65	36,03	34,80	77,15	9,61
72H-15	3-035-00	1	L	h	–	0,50	2,89	36,03	34,80	77,15	9,61
72H-16	3-035-00	1	L	h	–	0,50	2,79	36,03	34,80	77,15	9,61
73H-1	3-035-00	1	L	h	–	1,41	1,87	36,03	34,80	77,15	9,61
73H-4	3-035-00	1	L	h	–	1,41	2,04	36,03	34,80	77,15	9,61
73H-5	3-035-00	1	L	h	–	1,41	2,22	36,03	34,80	77,15	9,61
73H-6	3-035-00	1	L	h	–	1,41	2,49	36,03	34,80	77,15	9,61
73H-7	3-035-00	1	L	h	–	1,41	2,63	36,03	34,80	77,15	9,61
73H-10	3-035-00	1	L	h	–	1,41	2,60	36,03	34,80	77,15	9,61
73H-11	3-035-00	1	L	h	–	1,41	2,20	36,03	34,80	77,15	9,61
73H-12	3-035-00	1	L	h	–	1,41	2,57	36,03	34,80	77,15	9,61
73H-13	3-035-00	1	L	h	–	1,41	2,46	36,03	34,80	77,15	9,61
73H-16	3-035-00	1	L	h	–	1,41	2,31	36,03	34,80	77,15	9,61

Versuch Nr. Cl-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Be- zeichnung NWM...	La- gen- an- zahl	Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brü- cke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
74H-2	3-035-00	1	L	h	Ja	0,88	2,33	36,03	34,80	77,15	9,61
74H-5	3-035-00	1	L	h	Ja	0,88	2,79	36,03	34,80	77,15	9,61
74H-6	3-035-00	1	L	h	Ja	0,88	2,30	36,03	34,80	77,15	9,61
74H-7	3-035-00	1	L	h	Ja	0,88	2,82	36,03	34,80	77,15	9,61
74H-8	3-035-00	1	L	h	Ja	0,88	2,59	36,03	34,80	77,15	9,61
74H-9	3-035-00	1	L	h	Ja	0,88	2,83	36,03	34,80	77,15	9,61
74H-10	3-035-00	1	L	h	Ja	0,88	2,63	36,03	34,80	77,15	9,61
74H-11	3-035-00	1	L	h	Ja	0,88	2,50	36,03	34,80	77,15	9,61
74H-12	3-035-00	1	L	h	Ja	0,88	2,48	36,03	34,80	77,15	9,61
74H-13	3-035-00	1	L	h	Ja	0,88	2,60	36,03	34,80	77,15	9,61
74H-14	3-035-00	1	L	h	Ja	0,88	2,93	36,03	34,80	77,15	9,61
74H-15	3-035-00	1	L	h	Ja	0,88	2,52	36,03	34,80	77,15	9,61
75H-6	3-037-00	1	S	h	–	0,86	2,22	31,47	30,67	81,75	8,40
75H-11	3-037-00	1	S	h	–	0,86	2,23	31,47	30,67	81,75	8,40
75H-12	3-037-00	1	S	h	–	0,86	2,33	31,47	30,67	81,75	8,40
75H-13	3-037-00	1	S	h	–	0,86	2,02	31,47	30,67	81,75	8,40
75H-14	3-037-00	1	S	h	–	0,86	1,74	31,47	30,67	81,75	8,40
75H-15	3-037-00	1	S	h	–	0,86	1,75	31,47	30,67	81,75	8,40
75H-16	3-037-00	1	S	h	–	0,86	2,53	31,47	30,67	81,75	8,40
80H-1	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	1,82	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-2	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	1,92	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-3	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	1,75	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-4	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	2,07	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-8	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	2,01	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-10	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	1,92	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-11	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	2,16	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-12	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	1,98	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-13	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	1,99	36,30	36,23	78,13	6,95
80H-16	3-033-00	1	S	üK	–	1,02	2,08	36,30	36,23	78,13	6,95
87H-1	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	1,89	33,47	32,07	–	–
87H-2	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,71	33,47	32,07	–	–
87H-3	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,88	33,47	32,07	–	–
87H-4	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,41	33,47	32,07	–	–
87H-5	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,80	33,47	32,07	–	–
87H-6	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,99	33,47	32,07	–	–
87H-7	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,99	33,47	32,07	–	–
87H-8	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,80	33,47	32,07	–	–
87H-9	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,81	33,47	32,07	–	–
87H-10	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,97	33,47	32,07	–	–
87H-11	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,69	33,47	32,07	–	–
87H-12	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,93	33,47	32,07	–	–
87H-13	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,17	33,47	32,07	–	–
87H-14	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,27	33,47	32,07	–	–
87H-15	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,65	33,47	32,07	–	–
87H-16	– ⁷⁾	–	–	–	–	0,65	2,66	33,47	32,07	–	–
88H-1	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,05	2,73	33,47	32,07	–	–
88H-2	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,05	2,90	33,47	32,07	–	–
88H-3	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,05	2,50	33,47	32,07	–	–
88H-4	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,05	2,20	33,47	32,07	–	–
88H-5	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,05	2,91	33,47	32,07	–	–
88H-6	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,05	2,98	33,47	32,07	–	–
88H-7	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,05	3,00	33,47	32,07	–	–
88H-8	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,05	2,27	33,47	32,07	–	–
88H-9	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,05	2,88	33,47	32,07	–	–
88H-10	– ⁷⁾	–	–	–	–	1,05	3,17	33,47	32,07	–	–

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Be- zeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
88H-11	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,05	2,60	33,47	32,07	-	-
88H-12	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,05	2,82	33,47	32,07	-	-
88H-13	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,05	2,81	33,47	32,07	-	-
88H-14	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,05	2,51	33,47	32,07	-	-
88H-15	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,05	2,60	33,47	32,07	-	-
88H-16	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,05	2,87	33,47	32,07	-	-
89H-1	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	2,72	33,47	32,07	-	-
89H-2	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	2,63	33,47	32,07	-	-
89H-3	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	3,01	33,47	32,07	-	-
89H-4	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	2,89	33,47	32,07	-	-
89H-5	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	2,69	33,47	32,07	-	-
89H-6	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	3,19	33,47	32,07	-	-
89H-7	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	3,23	33,47	32,07	-	-
89H-8	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	2,76	33,47	32,07	-	-
89H-9	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	2,67	33,47	32,07	-	-
89H-10	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	3,00	33,47	32,07	-	-
89H-11	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	2,68	33,47	32,07	-	-
89H-12	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	3,25	33,47	32,07	-	-
89H-13	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	2,88	33,47	32,07	-	-
89H-14	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	2,62	33,47	32,07	-	-
89H-15	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	2,61	33,47	32,07	-	-
89H-16	- ⁷⁾	-	-	-	-	1,41	2,64	33,47	32,07	-	-
92H-1	- ⁸⁾	0	S	h	-	0,83	1,82	33,73	31,10	71,17	6,26
92H-2	- ⁸⁾	0	S	h	-	0,83	2,75	33,73	31,10	71,17	6,26
92H-3	- ⁸⁾	0	S	h	-	0,83	2,62	33,73	31,10	71,17	6,26
92H-4	- ⁸⁾	0	S	h	-	0,83	2,29	33,73	31,10	71,17	6,26
93H-1	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,59	32,63	33,77	69,98	7,10
93H-2	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,21	32,63	33,77	69,98	7,10
93H-3	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,10	32,63	33,77	69,98	7,10
93H-4	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,51	32,63	33,77	69,98	7,10
93H-5	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,62	32,63	33,77	69,98	7,10
93H-6	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,50	32,63	33,77	69,98	7,10
93H-7	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,55	32,63	33,77	69,98	7,10
93H-9	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,34	32,63	33,77	69,98	7,10
93H-10	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,37	32,63	33,77	69,98	7,10
93H-11	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,50	32,63	33,77	69,98	7,10
93H-14	4-002-03-10	1	L	h	-	0,87	2,45	32,63	33,77	69,98	7,10
94H-1	4-002-03-2b	1	L	h	-	0,78	2,29	32,63	33,77	69,98	7,10
94H-3	4-002-03-2b	1	L	h	-	0,78	2,42	32,63	33,77	69,98	7,10
94H-4	4-002-03-2b	1	L	h	-	0,78	2,68	32,63	33,77	69,98	7,10
94H-5	4-002-03-2b	1	L	h	-	0,78	2,84	32,63	33,77	69,98	7,10
94H-6	4-002-03-2b	1	L	h	-	0,78	2,08	32,63	33,77	69,98	7,10
94H-7	4-002-03-2b	1	L	h	-	0,78	2,58	32,63	33,77	69,98	7,10
94H-8	4-002-03-2b	1	L	h	-	0,78	2,72	32,63	33,77	69,98	7,10
94H-9	4-002-03-2b	1	L	h	-	0,78	2,59	32,63	33,77	69,98	7,10
94H-10	4-002-03-2b	1	L	h	-	0,78	2,72	32,63	33,77	69,98	7,10
94H-11	4-002-03-2b	1	L	h	-	0,78	2,29	32,63	33,77	69,98	7,10
94H-15	4-002-03-2b	1	L	h	-	0,78	2,45	32,63	33,77	69,98	7,10
94H-16	4-002-03-2b	1	L	h	-	0,78	2,00	32,63	33,77	69,98	7,10
95H-1	4-003-03-10	1	L	h	-	1,15	2,99	32,63	33,77	69,98	7,10
95H-2	4-003-03-10	1	L	h	-	1,15	2,40	32,63	33,77	69,98	7,10
95H-3	4-003-03-10	1	L	h	-	1,15	3,08	32,63	33,77	69,98	7,10
95H-5	4-003-03-10	1	L	h	-	1,15	2,94	32,63	33,77	69,98	7,10
95H-6	4-003-03-10	1	L	h	-	1,15	2,60	32,63	33,77	69,98	7,10
95H-7	4-003-03-10	1	L	h	-	1,15	2,61	32,63	33,77	69,98	7,10

Versuch Nr. CI-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Be- zeichnung NWM...	La- gen- an- zahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brü- cke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
95H-8	4-003-03-10	1	L	h	–	1,15	2,54	32,63	33,77	69,98	7,10
95H-9	4-003-03-10	1	L	h	–	1,15	2,97	32,63	33,77	69,98	7,10
95H-11	4-003-03-10	1	L	h	–	1,15	2,30	32,63	33,77	69,98	7,10
95H-12	4-003-03-10	1	L	h	–	1,15	2,24	32,63	33,77	69,98	7,10
95H-13	4-003-03-10	1	L	h	–	1,15	2,27	32,63	33,77	69,98	7,10
95H-14	4-003-03-10	1	L	h	–	1,15	2,59	32,63	33,77	69,98	7,10
95H-15	4-003-03-10	1	L	h	–	1,15	2,38	32,63	33,77	69,98	7,10
95H-16	4-003-03-10	1	L	h	–	1,15	1,72	32,63	33,77	69,98	7,10
96H-1	4-003-03-2b	1	L	h	–	0,93	2,36	32,63	33,90	69,68	7,67
96H-2	4-003-03-2b	1	L	h	–	0,93	2,98	32,63	33,90	69,68	7,67
96H-3	4-003-03-2b	1	L	h	–	0,93	2,54	32,63	33,90	69,68	7,67
96H-4	4-003-03-2b	1	L	h	–	0,93	2,79	32,63	33,90	69,68	7,67
96H-5	4-003-03-2b	1	L	h	–	0,93	2,52	32,63	33,90	69,68	7,67
96H-6	4-003-03-2b	1	L	h	–	0,93	2,34	32,63	33,90	69,68	7,67
96H-7	4-003-03-2b	1	L	h	–	0,93	2,81	32,63	33,90	69,68	7,67
96H-8	4-003-03-2b	1	L	h	–	0,93	2,50	32,63	33,90	69,68	7,67
96H-9	4-003-03-2b	1	L	h	–	0,93	2,47	32,63	33,90	69,68	7,67
96H-10	4-003-03-2b	1	L	h	–	0,93	2,73	32,63	33,90	69,68	7,67
96H-11	4-003-03-2b	1	L	h	–	0,93	3,10	32,63	33,90	69,68	7,67
96H-12	4-003-03-2b	1	L	h	–	0,93	2,48	32,63	33,90	69,68	7,67
96H-14	4-003-03-2b	1	L	h	–	0,93	2,58	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-1	4-004-03-10	1	L	h	–	1,03	2,42	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-2	4-004-03-10	1	L	h	–	1,03	2,50	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-3	4-004-03-10	1	L	h	–	1,03	2,50	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-4	4-004-03-10	1	L	h	–	1,03	2,38	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-5	4-004-03-10	1	L	h	–	1,03	2,65	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-6	4-004-03-10	1	L	h	–	1,03	2,79	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-8	4-004-03-10	1	L	h	–	1,03	2,54	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-9	4-004-03-10	1	L	h	–	1,03	2,43	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-10	4-004-03-10	1	L	h	–	1,03	2,68	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-11	4-004-03-10	1	L	h	–	1,03	2,83	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-12	4-004-03-10	1	L	h	–	1,03	2,40	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-13	4-004-03-10	1	L	h	–	1,03	2,40	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-15	4-004-03-10	1	L	h	–	1,03	2,32	32,63	33,90	69,68	7,67
97H-16	4-004-03-10	1	L	h	–	1,03	2,34	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-1	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	1,39	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-2	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	2,38	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-3	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	2,26	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-4	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	2,65	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-5	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	2,18	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-6	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	2,40	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-7	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	2,52	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-8	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	2,70	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-9	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	2,82	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-10	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	1,99	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-11	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	2,65	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-12	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	2,59	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-14	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	2,83	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-15	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	2,70	32,63	33,90	69,68	7,67
98H-16	4-004-03-2b	1	L	h	–	0,73	1,98	32,63	33,90	69,68	7,67
102H-1	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	2,25	29,00	29,97	68,10	5,47
102H-2	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	2,25	29,00	29,97	68,10	5,47
102H-3	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	2,58	29,00	29,97	68,10	5,47
102H-4	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	1,90	29,00	29,97	68,10	5,47
102H-5	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	2,79	29,00	29,97	68,10	5,47

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Be- zeichnung NWM...	La- gen- anzahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brücke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]
102H-6	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	2,84	29,00	29,97	68,10	5,47
102H-7	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	2,59	29,00	29,97	68,10	5,47
102H-8	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	2,25	29,00	29,97	68,10	5,47
102H-9	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	2,45	29,00	29,97	68,10	5,47
102H-10	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	2,81	29,00	29,97	68,10	5,47
102H-11	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	2,24	29,00	29,97	68,10	5,47
102H-12	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	2,66	29,00	29,97	68,10	5,47
102H-13	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	2,50	29,00	29,97	68,10	5,47
102H-14	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	1,90	29,00	29,97	68,10	5,47
102H-15	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	2,63	29,00	29,97	68,10	5,47
102H-16	4-005-03-10	1	L	h	–	0,77	2,70	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-1	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,48	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-2	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	1,91	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-3	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,03	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-4	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,27	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-5	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,41	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-6	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,03	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-7	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,75	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-8	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,07	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-9	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,18	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-10	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,24	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-11	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,17	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-12	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,80	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-13	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,38	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-14	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,28	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-15	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,40	29,00	29,97	68,10	5,47
103H-16	4-005-03-2b	1	L	h	–	0,70	2,10	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-1	4-001-01	1	L	h	–	0,73	2,50	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-2	4-001-01	1	L	h	–	0,73	1,90	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-3	4-001-01	1	L	h	–	0,73	2,39	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-4	4-001-01	1	L	h	–	0,73	2,14	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-5	4-001-01	1	L	h	–	0,73	2,21	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-6	4-001-01	1	L	h	–	0,73	2,23	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-7	4-001-01	1	L	h	–	0,73	2,34	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-8	4-001-01	1	L	h	–	0,73	2,23	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-9	4-001-01	1	L	h	–	0,73	2,58	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-10	4-001-01	1	L	h	–	0,73	2,19	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-11	4-001-01	1	L	h	–	0,73	2,25	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-12	4-001-01	1	L	h	–	0,73	2,11	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-13	4-001-01	1	L	h	–	0,73	2,00	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-14	4-001-01	1	L	h	–	0,73	1,76	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-15	4-001-01	1	L	h	–	0,73	1,69	29,00	29,97	68,10	5,47
104H-16	4-001-01	1	L	h	–	0,73	1,60	29,00	29,97	68,10	5,47
105H-2	4-005-04	1	L	h	–	0,78	2,72	34,40	39,07	70,02	6,66
105H-3	4-005-04	1	L	h	–	0,78	2,74	34,40	39,07	70,02	6,66
105H-5	4-005-04	1	L	h	–	0,78	2,80	34,40	39,07	70,02	6,66
105H-6	4-005-04	1	L	h	–	0,78	2,29	34,40	39,07	70,02	6,66
105H-7	4-005-04	1	L	h	–	0,78	2,40	34,40	39,07	70,02	6,66
105H-8	4-005-04	1	L	h	–	0,78	2,66	34,40	39,07	70,02	6,66
105H-9	4-005-04	1	L	h	–	0,78	2,66	34,40	39,07	70,02	6,66
105H-10	4-005-04	1	L	h	–	0,78	2,02	34,40	39,07	70,02	6,66
105H-11	4-005-04	1	L	h	–	0,78	2,67	34,40	39,07	70,02	6,66
105H-12	4-005-04	1	L	h	–	0,78	2,74	34,40	39,07	70,02	6,66
105H-13	4-005-04	1	L	h	–	0,78	3,52	34,40	39,07	70,02	6,66
105H-14	4-005-04	1	L	h	–	0,78	2,30	34,40	39,07	70,02	6,66

Versuch Nr. Cl-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Be- zeichnung NWM...	La- gen- an- zahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brü- cke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fcm,fl}$ [N/mm ²]
105H-15	4-005-04	1	L	h	–	0,78	2,08	34,40	39,07	70,02	6,66
105H-16	4-005-04	1	L	h	–	0,78	2,72	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-1	4-006-04	1	L	h	–	0,67	3,00	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-2	4-006-04	1	L	h	–	0,67	2,63	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-3	4-006-04	1	L	h	–	0,67	2,30	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-4	4-006-04	1	L	h	–	0,67	2,42	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-5	4-006-04	1	L	h	–	0,67	2,78	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-6	4-006-04	1	L	h	–	0,67	2,62	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-7	4-006-04	1	L	h	–	0,67	1,98	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-8	4-006-04	1	L	h	–	0,67	2,23	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-9	4-006-04	1	L	h	–	0,67	2,49	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-10	4-006-04	1	L	h	–	0,67	2,15	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-11	4-006-04	1	L	h	–	0,67	2,58	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-12	4-006-04	1	L	h	–	0,67	2,73	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-13	4-006-04	1	L	h	–	0,67	2,90	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-14	4-006-04	1	L	h	–	0,67	2,68	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-15	4-006-04	1	L	h	–	0,67	2,62	34,40	39,07	70,02	6,66
106H-16	4-006-04	1	L	h	–	0,67	2,63	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-11	4-004-04	1	L	h	–	0,63	2,48	34,40	39,07	70,02	6,66
107H-13	4-004-04	1	L	h	–	0,63	2,28	34,40	39,07	70,02	6,66
108H-1	4-001-04	1	L	h	–	0,88	2,22	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-2	4-001-04	1	L	h	–	0,88	2,63	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-3	4-001-04	1	L	h	–	0,88	3,00	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-4	4-001-04	1	L	h	–	0,88	3,10	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-5	4-001-04	1	L	h	–	0,88	2,83	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-6	4-001-04	1	L	h	–	0,88	2,49	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-7	4-001-04	1	L	h	–	0,88	2,69	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-8	4-001-04	1	L	h	–	0,88	2,81	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-9	4-001-04	1	L	h	–	0,88	2,70	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-10	4-001-04	1	L	h	–	0,88	2,77	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-11	4-001-04	1	L	h	–	0,88	2,69	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-12	4-001-04	1	L	h	–	0,88	2,50	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-13	4-001-04	1	L	h	–	0,88	2,68	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-14	4-001-04	1	L	h	–	0,88	2,65	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-15	4-001-04	1	L	h	–	0,88	2,61	34,63	35,90	68,98	5,89
108H-16	4-001-04	1	L	h	–	0,88	2,48	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-1	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,66	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-2	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,62	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-3	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,42	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-4	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,11	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-5	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,48	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-6	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,30	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-7	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,34	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-8	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,63	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-9	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,78	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-10	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,84	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-11	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,23	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-12	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,43	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-13	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,51	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-14	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,90	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-15	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,48	34,63	35,90	68,98	5,89
109H-16	4-003-04	1	L	h	–	0,67	2,84	34,63	35,90	68,98	5,89
110H-1	4-012-03	1	L	h	–	0,70	2,20	34,63	35,90	68,98	5,89
110H-2	4-012-03	1	L	h	–	0,70	2,71	34,63	35,90	68,98	5,89
110H-3	4-012-03	1	L	h	–	0,70	2,53	34,63	35,90	68,98	5,89

Versuch Nr. C1-...	Textil		Aufbringung		Fuge		Ergebnis Haftzug- festigkeit f_{at} [N/mm ²]	Altbeton		Feinbeton	
	Be- zeichnung NWM...	La- gen- an- zahl	Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brüc- ke	Rau- tiefe [mm]		Druck- festig- keit ^{3) 4)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{3) 5)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druck- festig- keit ^{5) 6)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biege- zugfestig- keit ^{5) 6)} $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]
110H-4	4-012-03	1	L	h	–	0,70	2,10	34,63	35,90	68,98	5,89
110H-5	4-012-03	1	L	h	–	0,70	2,68	34,63	35,90	68,98	5,89
110H-6	4-012-03	1	L	h	–	0,70	2,48	34,63	35,90	68,98	5,89
110H-7	4-012-03	1	L	h	–	0,70	2,45	34,63	35,90	68,98	5,89
110H-8	4-012-03	1	L	h	–	0,70	2,42	34,63	35,90	68,98	5,89
110H-9	4-012-03	1	L	h	–	0,70	2,10	34,63	35,90	68,98	5,89
110H-10	4-012-03	1	L	h	–	0,70	2,54	34,63	35,90	68,98	5,89
110H-11	4-012-03	1	L	h	–	0,70	1,98	34,63	35,90	68,98	5,89
110H-12	4-012-03	1	L	h	–	0,70	3,02	34,63	35,90	68,98	5,89
110H-13	4-012-03	1	L	h	–	0,70	2,67	34,63	35,90	68,98	5,89
110H-15	4-012-03	1	L	h	–	0,70	2,28	34,63	35,90	68,98	5,89
110H-16	4-012-03	1	L	h	–	0,70	2,02	34,63	35,90	68,98	5,89

A 4.2 Verbundversuche unter Schubbeanspruchung

In den nachfolgenden Tabellen sind die wichtigsten Daten aller durchgeführten Versuche getrennt nach Versagensarten zusammengefasst. Versuche, die durch Fehler im Versuchsaufbau zum Abbruch geführt haben, sind nicht mit aufgelistet.

Tab. A 4.2.1 Ergebnisse der Schubversuche – Versagen durch Delamination in der Textilebene

Versuch Nr.	Textil Bezeichnung	Lagenanzahl	Aufbringung		Fuge		Geometrie			Ergebnis Verbundbruchkraft [N/mm ²]
			Art ¹⁾	Richtung ²⁾	Haftbrücke	Rautiefe [mm]	Verbundlänge l_V [cm]	Laschenbreite b_L [mm]	Laschenstärke t_L [mm]	
C1-29-3	NWM3-004-01	3	L	h	–	0,86	6	100,60	9,20	10,51
C1-29-5	NWM3-004-01	3	L	h	–	1,03	6	101,70	10,80	11,82
C1-T-03-1	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,05	6	100,58	8,47	15,55
C1-T-03-2	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,05	6	99,26	9,18	14,43
C1-16-3	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,15	8	100,80	8,80	15,55
C1-16-4	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,05	8	99,30	9,60	15,81
C1-16-5	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,15	8	100,10	8,60	15,96
C1-16-6	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,15	8	99,50	8,80	15,58
C1-23-1	NWM3-004-01	4	S	h	–	1,18	8	100,85	10,60	14,64
C1-23-2	NWM3-004-01	4	S	h	–	1,09	8	100,10	9,50	13,16
C1-23-3	NWM3-004-01	4	S	h	–	1,09	8	102,00	10,70	15,67
C1-23-5	NWM3-004-01	4	S	h	–	1,03	8	100,40	8,90	9,84
C1-23-6	NWM3-004-01	4	S	h	–	1,15	8	100,58	9,89	15,69
C1-24-1	NWM3-004-01	4	S	v	–	1,15	8	100,33	10,00	13,39
C1-24-2	NWM3-004-01	4	S	v	–	1,11	8	101,94	10,60	8,32
C1-24-3	NWM3-004-01	4	S	v	–	1,09	8	101,75	11,60	4,17
C1-24-4	NWM3-004-01	4	S	v	–	1,02	8	100,52	10,42	8,69
C1-24-5	NWM3-004-01	4	S	v	–	1,00	8	102,10	10,72	8,52
C1-24-6	NWM3-004-01	4	S	v	–	1,15	8	101,35	9,19	6,94
C1-T-03-3	NWM3-004-01	5	L	h	–	1,00	8	100,36	9,00	17,49
C1-T-03-4	NWM3-004-01	5	L	h	–	1,05	8	99,59	9,02	18,70
C1-15-4	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,05	10	100,30	8,35	15,48
C1-30-2	NWM3-004-01	4	S	h	–	0,96	10	101,10	8,30	16,18
C1-30-3	NWM3-004-01	4	S	h	–	0,96	10	100,10	8,20	13,94
C1-30-4	NWM3-004-01	4	S	h	–	0,81	10	100,80	8,60	15,00
C1-30-5	NWM3-004-01	4	S	h	–	0,70	10	100,30	8,20	15,08
C1-30-6	NWM3-004-01	4	S	h	–	0,81	10	101,90	8,70	17,54
C1-31-3	NWM3-004-01	4	S	v	–	0,86	10	99,98	8,85	12,42
C1-31-4	NWM3-004-01	4	S	v	–	0,88	10	100,14	8,35	10,48
C1-31-5	NWM3-004-01	4	S	v	–	0,84	10	101,98	9,22	9,61
C1-33-1	NWM3-004-01	4	L	h	–	0,80	10	99,51	9,05	15,49
C1-33-2	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,00	10	100,18	9,76	15,70
C1-33-3	NWM3-004-01	4	L	h	–	0,96	10	99,87	9,57	15,60
C1-33-4	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,03	10	101,42	11,31	16,37
C1-33-6	NWM3-004-01	4	L	h	–	0,96	10	100,93	9,41	14,09
C1-34-1	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,18	12	101,42	9,96	16,77
C1-T-03-5	NWM3-004-01	5	L	h	–	0,96	12	100,61	8,40	21,67
C1-T-03-6	NWM3-004-01	5	L	h	–	0,96	12	99,80	8,57	19,46
C1-T-09-1	NWM3-012-01	4	S	v	–	0,49	4	100,75	8,65	8,11
C1-T-09-4	NWM3-012-01	4	S	v	–	0,50	6	99,80	9,80	8,87
C1-T-09-5	NWM3-012-01	4	S	v	–	0,47	8	99,65	10,21	10,12

¹⁾L = Laminieren, S = Sprühen

²⁾h = horizontal, v = vertikal

Versuch Nr.	Textil Bezeichnung	Lagenanzahl	Aufbringung		Fuge		Verbundlänge l_V [cm]	Geometrie		Ergebnis Verbundbruchkraft [N/mm ²]
			Art ¹⁾	Richtung ²⁾	Haftbrücke	Rautiefe [mm]		Laschenbreite b_L [mm]	Laschendicke t_L [mm]	
C1-20-1	NWM3-013-01	6	L	h	–	0,96	4	101,00	8,85	16,79
C1-20-2	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,02	4	100,00	7,70	16,29
C1-20-3	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,05	4	100,25	8,40	16,16
C1-28-5	NWM3-013-01	6	L	h	Ja	1,02	4	100,00	10,20	15,25
C1-28-6	NWM3-013-01	6	L	h	Ja	1,07	4	99,80	8,60	13,66
C1-32-5	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,09	6	100,89	10,03	17,29
C1-T-07-1	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,57	6	99,90	9,10	17,33
C1-T-07-2	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,57	6	100,70	9,40	18,14
C1-T-22-2	NWM3-013-01	8	L	h	–	1,03	6	101,37	11,75	15,46
C1-T-22-3	NWM3-013-01	8	L	h	–	1,18	8	101,54	11,54	15,60
C1-T-22-4	NWM3-013-01	8	L	h	–	1,09	8	100,44	10,76	19,07
C1-T-22-5	NWM3-013-01	8	L	h	–	1,00	10	101,12	11,55	19,13
C1-T-22-6	NWM3-013-01	8	L	h	–	1,09	10	100,08	12,00	19,56
C1-T-11-2	NWM3-023-02	2	S	v	–	0,81	4	101,27	9,59	3,42
C1-T-11-5	NWM3-023-02	4	S	v	–	0,53	10	99,73	11,78	4,79
C1-T-12-1	NWM3-031-00	8	L	h	–	0,81	4	100,00	10,82	11,67
C1-T-14-2	NWM3-031-00	8	L	h	–	0,73	4	100,72	7,85	13,44
C1-T-13-1	NWM3-031-00	8	L	h	–	0,79	6	99,70	9,09	14,89
C1-T-15-1	NWM3-031-00	8	L	h	–	0,77	6	102,18	9,51	12,40
C1-T-15-2	NWM3-031-00	8	L	h	–	0,69	6	100,94	7,27	13,98
C1-T-12-3	NWM3-037-00	8	L	h	–	0,83	4	101,00	11,32	11,92
C1-T-14-6	NWM3-037-00	8	L	h	–	0,74	4	99,78	8,20	11,86
C1-T-26-1	NWM4-013-04	8	L	h	–	1,22	8	100,64	12,48	18,89
C1-T-26-2	NWM4-013-04	8	L	h	–	1,18	8	100,98	12,11	20,78
C1-T-26-3	NWM4-013-04	8	L	h	–	1,33	10	100,85	13,90	22,63
C1-T-26-4	NWM4-013-04	8	L	h	–	1,41	10	99,83	13,13	21,47
C1-T-26-5	NWM4-013-04	8	L	h	–	1,35	12	100,08	13,44	24,12
C1-T-26-6	NWM4-013-04	8	L	h	–	1,20	12	100,74	13,17	22,36
C1-T-34-5	NWM4-013-04	10	L	h	–	0,98	12	100,34	15,05	23,92
C1-T-34-6	NWM4-013-04	10	L	h	–	0,91	12	100,84	13,04	22,19
C1-T-34-1	NWM4-013-04	8	L	h	–	0,96	14	100,60	10,81	19,22
C1-T-35-1	NWM4-013-04	10	L	h	–	1,00	14	101,76	15,44	26,46
C1-T-35-2	NWM4-013-04	10	L	h	–	0,96	14	99,98	16,08	27,05
C1-T-34-4	NWM4-013-04	8	L	h	–	0,87	16	101,83	12,18	24,23
C1-T-35-3	NWM4-013-04	10	L	h	–	1,00	16	99,82	14,51	25,89
C1-T-35-4	NWM4-013-04	10	L	h	–	0,91	16	100,16	16,05	25,78
C1-T-35-5	NWM4-013-04	10	L	h	–	1,05	18	100,54	15,27	26,27
C1-T-35-6	NWM4-013-04	10	L	h	–	0,95	18	100,78	14,57	25,54
C1-T-25-1	NWM4-022-04	8	L	h	–	1,15	8	100,65	12,25	20,08
C1-T-25-2	NWM4-022-04	8	L	h	–	1,02	8	99,60	11,50	20,84
C1-T-25-3	NWM4-022-04	8	L	h	–	1,11	10	100,40	11,60	23,48
C1-T-25-4	NWM4-022-04	8	L	h	–	1,05	10	99,65	13,90	22,75
C1-T-25-6	NWM4-022-04	8	L	h	–	1,11	12	100,15	12,30	23,84
C1-T-32-5	NWM4-022-04	10	L	h	–	0,81	12	101,30	12,22	27,21
C1-T-32-6	NWM4-022-04	10	L	h	–	0,88	12	99,76	12,95	27,01
C1-T-32-2	NWM4-022-04	8	L	h	–	1,03	14	100,69	14,55	24,29
C1-T-33-2	NWM4-022-04	10	L	h	–	1,02	14	101,66	13,82	27,98
C1-T-32-3	NWM4-022-04	8	L	h	–	0,88	16	99,78	12,70	25,08
C1-T-32-4	NWM4-022-04	8	L	h	–	0,93	16	100,40	12,98	24,80
C1-T-33-4	NWM4-022-04	10	L	h	–	1,05	16	99,88	13,97	31,21
C1-T-33-5	NWM4-022-04	10	L	h	–	1,09	18	101,06	14,72	28,57
C1-T-28-1	NWM4-004-04	4	L	h	–	1,15	4	101,69	10,33	12,33
C1-T-28-2	NWM4-004-04	4	L	h	–	1,13	4	99,66	10,86	12,48
C1-T-43-1	NWM3-029-05-p2	8	L	h	–	0,91	20	100,99	11,78	24,75

Tab. A 4.2.2 Ergebnisse der Schubversuche – Versagen im Altbetonuntergrund

Versuch Nr.	Textil Bezeichnung	Lagenanzahl	Aufbringung		Fuge		Geometrie			Ergebnis Verbundbruchkraft [N/mm ²]
			Art ¹⁾	Richtung ²⁾	Haftbrücke	Rautiefe [mm]	Verbundlänge l_V [cm]	Laschenbreite b_L [mm]	Laschenstärke t_L [mm]	
C1-29-1	NWM3-004-01	3	L	h	–	0,96	6	99,75	9,80	11,66
C1-29-4	NWM3-004-01	3	L	h	–	0,95	6	100,65	10,10	11,48
C1-T-09-1	NWM3-012-01	4	S	v	–	0,49	4	100,75	8,65	8,11
C1-T-09-2	NWM3-012-01	4	S	v	–	0,47	4	101,65	9,25	9,47
C1-T-09-3	NWM3-012-01	4	S	v	–	0,47	6	99,95	9,65	10,69
C1-20-4	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,09	4	99,40	8,70	16,75
C1-26-1	NWM3-013-01	6	S	v	–	1,05	4	100,94	8,93	12,37
C1-26-2	NWM3-013-01	6	S	v	–	0,98	4	100,60	9,00	14,05
C1-26-3	NWM3-013-01	6	S	v	–	1,09	4	99,80	10,45	12,32
C1-26-5	NWM3-013-01	6	S	v	–	1,05	4	100,23	10,02	13,30
C1-27-1	NWM3-013-01	6	L	h	–	2,26	4	100,00	10,00	14,46
C1-27-2	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,80	4	100,40	10,00	13,64
C1-27-3	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,99	4	100,30	9,70	13,65
C1-27-4	NWM3-013-01	6	L	h	–	2,39	4	101,90	9,50	15,76
C1-27-5	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,80	4	100,70	8,30	13,19
C1-27-6	NWM3-013-01	6	L	h	–	2,15	4	99,80	9,80	13,45
C1-28-1	NWM3-013-01	6	L	h	Ja	0,96	4	99,35	8,20	13,25
C1-28-2	NWM3-013-01	6	L	h	Ja	1,02	4	100,50	8,62	12,37
C1-28-3	NWM3-013-01	6	L	h	Ja	1,05	4	101,84	8,48	13,49
C1-28-4	NWM3-013-01	6	L	h	Ja	1,09	4	100,75	10,70	15,69
C1-T-08-1	NWM3-013-01	6	L	h	–	0,75	4	99,50	10,70	12,87
C1-T-08-2	NWM3-013-01	6	L	h	–	0,75	4	101,68	8,68	12,67
C1-T-29-1	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,11	4	100,89	10,03	15,98
C1-T-29-2	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,09	4	101,17	11,30	10,59
C1-T-02-3	NWM3-005-01	6	L	h	–	0,92	6	100,39	9,25	18,18
C1-32-3	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,00	6	100,81	9,89	13,63
C1-32-4	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,15	6	100,12	8,89	16,51
C1-T-12-2	NWM3-033-00	8	L	h	–	0,86	4	101,10	10,90	12,90
C1-T-14-3	NWM3-033-00	8	L	h	–	0,69	4	100,80	10,00	10,63
C1-T-14-5	NWM3-037-00	8	L	h	–	0,78	4	100,17	12,63	6,85
C1-T-14-6	NWM3-037-00	8	L	h	–	0,74	4	99,78	8,20	11,86
C1-T-18-1	NWM4-003-03-2b	6	L	h	–	1,09	4	100,84	8,66	13,83
C1-T-18-2	NWM4-003-03-2b	6	L	h	–	0,91	4	100,91	8,76	14,04
C1-T-18-3	NWM4-003-03-2b	6	L	h	–	0,96	4	99,65	8,31	12,87
C1-T-24-2	NWM4-013-04	6	L	h	–	0,88	6	99,76	12,63	16,76
C1-T-26-2	NWM4-013-04	8	L	h	–	1,18	8	100,98	12,11	20,78
C1-T-26-3	NWM4-013-04	8	L	h	–	1,33	10	100,85	13,90	22,63
C1-T-30-1	NWM4-022-04	4	L	h	–	1,15	4	100,12	8,70	14,39
C1-T-25-3	NWM4-022-04	8	L	h	–	1,11	10	100,40	11,60	23,48
C1-T-25-4	NWM4-022-04	8	L	h	–	1,05	10	99,65	13,90	22,75
C1-T-38-3	NWM3-029-05-p2	6	L	h	–	0,96	6	100,60	9,40	12,75
C1-T-38-4	NWM3-029-05-p2	6	L	h	–	0,91	10	101,82	10,00	20,00
C1-T-38-5	NWM3-029-05-p2	8	L	h	–	1,05	8	100,04	12,46	20,76
C1-T-38-6	NWM3-029-05-p2	8	L	h	–	0,96	12	101,20	12,00	21,12
C1-T-39-1	NWM3-026-05-p2	4	L	h	–	1,00	4	101,84	10,27	11,21
C1-T-39-3	NWM3-026-05-p2	6	L	h	–	0,91	6	100,31	11,18	19,34
C1-T-39-4	NWM3-026-05-p2	6	L	h	–	0,88	10	99,89	11,97	20,68
C1-T-39-5	NWM3-026-05-p2	8	L	h	–	0,96	8	100,05	14,71	22,45
C1-T-39-6	NWM3-026-05-p2	8	L	h	–	0,96	12	100,85	12,35	25,00
C1-T-40-1	NWM3-026-05-p2	4	L	h	–	0,91	4	99,70	10,38	12,11
C1-T-40-2	NWM3-026-05-p2	4	L	h	–	0,75	8	100,72	11,30	20,32
C1-T-40-3	NWM3-026-05-p2	6	L	h	–	0,81	6	101,43	16,25	18,60
C1-T-40-4	NWM3-026-05-p2	6	L	h	–	0,80	10	99,88	15,01	20,01

¹⁾ L = Laminieren, S = Sprühen²⁾ h = horizontal, v = vertikal

Versuch Nr.	Textil Bezeichnung	Lagen- anzahl	Aufbringung		Fuge		Verbund- länge l_V [cm]	Geometrie		Ergebnis Verbund- bruchkraft [N/mm ²]
			Art ¹⁾	Rich- tung ²⁾	Haft- brüc- ke	Rau- tiefe [mm]		Laschen- breite b_L [mm]	Laschen- dicke t_L [mm]	
C1-T-40-5	NWM3-026-05-p2	8	L	h	–	0,86	8	100,76	18,37	17,28
C1-T-40-6	NWM3-026-05-p2	8	L	h	–	0,84	12	100,85	17,05	24,56
C1-T-41-1	NWM3-027-05-sb	4	L	h	–	0,88	4	100,06	7,54	10,21
C1-T-41-2	NWM3-027-05-sb	4	L	h	–	0,91	8	100,79	7,63	16,65
C1-T-41-3	NWM3-027-05-sb	6	L	h	–	0,81	6	100,80	10,19	15,88
C1-T-41-4	NWM3-027-05-sb	6	L	h	–	0,79	10	100,03	12,10	23,89
C1-T-41-5	NWM3-027-05-sb	8	L	h	–	0,81	8	101,50	13,86	19,20
C1-T-41-6	NWM3-027-05-sb	8	L	h	–	0,81	12	99,32	11,58	26,85
C1-T-42-1	NWM3-029-05-p2	8	L	h	–	0,80	16	100,10	14,09	23,68
C1-T-42-3	NWM3-029-05-p2	8	L	h	–	0,88	24	100,93	13,22	26,47
C1-T-42-4	NWM3-026-05-p2	8	L	h	–	0,88	16	100,07	14,54	28,62
C1-T-42-5	NWM3-026-05-p2	8	L	h	–	0,87	20	101,67	14,93	29,17
C1-T-42-6	NWM3-026-05-p2	8	L	h	–	0,91	24	99,89	14,36	27,57

Tab. A 4.2.3 Ergebnisse der Schubversuche – Versagen durch Filamentgarnauszug

Versuch Nr.	Textil Bezeichnung	Lagenanzahl	Aufbringung		Fuge		Geometrie			Ergebnis Verbundbruchkraft [N/mm ²]
			Art ¹⁾	Richtung ²⁾	Haftbrücke	Rautiefe [mm]	Verbundlänge l_V [cm]	Laschenbreite b_L [mm]	Laschenstärke t_L [mm]	
C1-30-1	NWM3-004-01	4	S	h	–	0,96	10	99,10	8,30	15,41
C1-31-2	NWM3-004-01	4	S	v	–	0,91	10	100,94	8,34	13,94
C1-31-6	NWM3-004-01	4	S	v	–	0,88	10	100,75	9,27	12,29
C1-34-2	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,09	12	100,60	10,44	16,74
C1-34-3	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,11	12	101,85	8,95	16,13
C1-34-4	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,13	12	100,59	10,87	17,37
C1-34-5	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,11	12	99,70	10,56	17,89
C1-34-6	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,07	12	99,58	8,59	16,08
C1-T-09-6	NWM3-012-01	4	S	v	–	0,57	8	100,20	8,35	9,81
C1-22-3	NWM3-013-01	6	S	h	–	1,00	4	100,57	11,70	7,44
C1-22-4	NWM3-013-01	6	S	h	–	1,00	4	100,30	12,60	8,14
C1-22-6	NWM3-013-01	6	S	h	–	1,00	4	100,15	10,90	8,78
C1-T-10-3	NWM3-023-02	3	S	v	–	0,75	4	100,85	10,28	7,22
C1-T-10-6	NWM3-023-02	3	S	v	–	0,65	4	99,83	10,62	5,95
C1-T-10-5	NWM3-023-02	3	S	v	–	0,70	6	100,00	10,03	9,39
C1-T-17-1	NWM4-005-04	4	L	h	–	1,02	4	99,23	9,87	9,34
C1-T-17-2	NWM4-005-04	4	L	h	–	0,90	4	100,22	8,24	9,43
C1-T-17-3	NWM4-005-04	4	L	h	–	1,03	4	100,93	8,82	11,48
C1-T-17-4	NWM4-005-04	4	L	h	–	0,96	6	99,94	8,30	11,90
C1-T-17-5	NWM4-005-04	4	L	h	–	0,87	6	101,20	7,93	12,47
C1-T-17-6	NWM4-005-04	4	L	h	–	0,96	6	99,75	8,94	10,24
C1-T-16-1	NWM4-006-04	4	L	h	–	0,98	4	101,24	8,11	7,94
C1-T-16-2	NWM4-006-04	4	L	h	–	0,91	4	99,95	8,71	10,01
C1-T-16-3	NWM4-006-04	4	L	h	–	0,84	4	101,62	8,98	9,11
C1-T-16-4	NWM4-006-04	4	L	h	–	1,20	6	100,61	8,69	8,77
C1-T-16-5	NWM4-006-04	4	L	h	–	1,20	6	101,23	8,29	9,60
C1-T-16-6	NWM4-006-04	4	L	h	–	0,84	6	101,00	9,00	9,66
C1-T-27-1	NWM4-011-03	3	L	h	–	1,07	10	99,87	15,66	5,69
C1-T-27-3	NWM4-011-03	3	L	h	–	0,81	12	99,91	15,91	4,24
C1-T-27-5	NWM4-011-03	3	L	h	–	0,96	14	101,17	14,94	5,67
C1-T-19-1	NWM4-011-03	6	L	h	–	0,98	6	99,90	10,11	14,67
C1-T-19-2	NWM4-011-03	6	L	h	–	0,91	6	98,68	9,42	19,85
C1-T-19-3	NWM4-011-03	6	L	h	–	1,07	8	99,75	9,19	16,62
C1-T-19-4	NWM4-011-03	6	L	h	–	0,87	8	100,38	9,47	15,85
C1-T-19-5	NWM4-011-03	6	L	h	–	0,84	10	99,85	9,18	18,02
C1-T-19-6	NWM4-011-03	6	L	h	–	0,90	10	100,47	11,54	12,76
C1-T-27-2	NWM4-011-03	6	L	h	–	0,91	10	101,37	18,46	11,94
C1-T-27-4	NWM4-011-03	6	L	h	–	0,84	12	100,74	20,02	13,63
C1-T-27-6	NWM4-011-03	6	L	h	–	1,07	14	101,05	17,10	11,36
C1-T-21-1	NWM4-013-04	4	L	h	–	1,03	4	100,80	8,43	12,32
C1-T-21-2	NWM4-013-04	4	L	h	–	1,13	4	99,29	9,14	12,41
C1-T-31-1	NWM4-013-04	4	L	h	–	0,87	4	100,54	8,42	9,06
C1-T-31-2	NWM4-013-04	4	L	h	–	0,91	4	99,55	9,18	7,71
C1-T-21-3	NWM4-013-04	4	L	h	–	0,79	6	99,95	9,21	12,12
C1-T-21-4	NWM4-013-04	4	L	h	–	0,88	6	101,38	8,72	13,07
C1-T-31-3	NWM4-013-04	4	L	h	–	0,93	6	100,45	8,26	11,25
C1-T-31-4	NWM4-013-04	4	L	h	–	0,98	6	99,83	8,69	11,31
C1-T-24-1	NWM4-013-04	6	L	h	–	1,15	6	101,39	12,01	15,03
C1-T-21-5	NWM4-013-04	4	L	h	–	0,96	8	99,98	8,42	10,62
C1-T-21-6	NWM4-013-04	4	L	h	–	0,90	8	101,03	9,79	9,42
C1-T-31-5	NWM4-013-04	4	L	h	–	1,02	8	99,63	8,29	13,93

¹⁾ L = Laminieren, S = Sprühen²⁾ h = horizontal, v = vertikal

Versuch Nr.	Textil Bezeichnung	Lagen- anzahl	Aufbringung		Fuge		Verbund- länge l_V [cm]	Geometrie		Ergebnis Verbund- bruchkraft [N/mm ²]
			Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brüc- ke	Rau- tiefe [mm]		Laschen- breite b_L [mm]	Laschen- dicke t_L [mm]	
C1-T-31-6	NWM4-013-04	4	L	h	–	1,09	8	100,77	9,30	13,51
C1-T-24-4	NWM4-013-04	6	L	h	–	0,95	8	100,45	13,35	16,06
C1-T-26-1	NWM4-013-04	8	L	h	–	1,22	8	100,64	12,48	18,89
C1-T-24-6	NWM4-013-04	6	L	h	–	1,02	10	100,38	11,55	18,60
C1-T-20-1	NWM4-022-04	4	L	h	–	1,00	4	99,84	9,44	12,41
C1-T-20-2	NWM4-022-04	4	L	h	–	1,03	4	101,08	8,47	13,12
C1-T-20-3	NWM4-022-04	4	L	h	–	0,91	6	100,35	8,95	8,97
C1-T-30-4	NWM4-022-04	4	L	h	–	0,83	6	100,67	8,84	13,52
C1-T-23-1	NWM4-022-04	6	L	h	–	1,02	6	100,22	12,01	17,16
C1-T-23-2	NWM4-022-04	6	L	h	–	1,25	6	101,97	12,26	16,01
C1-T-20-5	NWM4-022-04	4	L	h	–	0,96	8	99,28	9,27	13,39
C1-T-30-5	NWM4-022-04	4	L	h	–	0,91	8	99,75	8,85	15,81
C1-T-30-6	NWM4-022-04	4	L	h	–	0,93	8	99,50	8,72	15,53
C1-T-23-3	NWM4-022-04	6	L	h	–	1,09	8	101,13	10,83	14,39
C1-T-23-4	NWM4-022-04	6	L	h	–	1,27	8	100,40	12,85	14,45
C1-T-23-5	NWM4-022-04	6	L	h	–	1,33	10	99,91	13,44	17,04
C1-T-23-6	NWM4-022-04	6	L	h	–	1,35	10	100,94	10,14	16,85
C1-T-25-5	NWM4-022-04	8	L	h	–	1,15	12	100,95	11,25	22,77
C1-T-28-3	NWM4-004-04	4	L	h	–	1,05	6	101,06	8,71	11,67
C1-T-28-4	NWM4-004-04	4	L	h	–	1,09	6	99,35	9,54	14,29
C1-T-28-5	NWM4-004-04	4	L	h	–	1,20	8	99,43	8,49	17,58
C1-T-28-6	NWM4-004-04	4	L	h	–	1,05	8	100,06	9,57	14,61

Tab. A 4.2.4 Ergebnisse der Schubversuche – Versagen durch Überschreiten der Zugtragfähigkeit

Versuch Nr.	Textil Bezeichnung	Lagenanzahl	Aufbringung		Fuge		Geometrie			Ergebnis Zugbruchkraft [N/mm ²]
			Art ¹⁾	Richtung ²⁾	Haftbrücke	Rautiefe [mm]	Verbundlänge l_V [cm]	Laschenbreite b_L [mm]	Laschenstärke t_L [mm]	
C1-29-2	NWM3-004-01	3	L	h	–	0,87	6	100,37	9,50	11,68
C1-29-6	NWM3-004-01	3	L	h	–	0,98	6	99,70	8,10	11,13
C1-16-1	NWM3-004-01	4	L	h	–	0,96	8	100,20	8,60	16,94
C1-16-2	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,09	8	101,30	9,30	15,24
C1-15-1	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,05	10	100,60	8,37	15,91
C1-15-2	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,02	10	100,40	8,30	16,14
C1-15-3	NWM3-004-01	4	L	h	–	0,96	10	99,50	8,60	14,68
C1-15-5	NWM3-004-01	4	L	h	–	0,96	10	100,75	8,58	16,81
C1-15-6	NWM3-004-01	4	L	h	–	1,02	10	99,80	8,69	17,28
C1-33-5	NWM3-004-01	4	L	h	–	0,96	10	100,87	9,47	15,05
C1-T-03-5	NWM3-004-01	5	L	h	–	0,96	12	100,61	8,40	21,67
C1-20-6	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,05	4	99,50	8,40	15,64
C1-26-4	NWM3-013-01	6	S	v	–	0,98	4	99,80	9,88	12,92
C1-T-02-5	NWM3-005-01	4	L	h	–	0,88	6	100,74	9,20	11,26
C1-T-02-6	NWM3-005-01	4	L	h	–	1,05	6	100,59	8,71	11,74
C1-18-1	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,05	6	100,63	8,69	19,84
C1-18-2	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,03	6	100,86	8,99	19,43
C1-18-3	NWM3-013-01	6	L	h	–	0,96	6	99,39	8,93	17,18
C1-18-4	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,05	6	99,24	8,89	16,99
C1-18-6	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,09	6	100,44	8,79	15,86
C1-19-1	NWM3-013-01	6	L	h	Ja	1,03	6	99,50	8,60	17,02
C1-19-4	NWM3-013-01	6	L	h	Ja	1,05	6	100,70	9,13	14,70
C1-19-5	NWM3-013-01	6	L	h	Ja	1,00	6	100,20	10,00	14,84
C1-21-1	NWM3-013-01	6	S	h	–	0,96	6	100,50	8,90	11,48
C1-21-2	NWM3-013-01	6	S	h	–	1,05	6	100,60	11,20	12,64
C1-21-3	NWM3-013-01	6	S	h	–	1,05	6	100,20	12,20	10,88
C1-21-4	NWM3-013-01	6	S	h	–	1,09	6	99,80	8,60	12,20
C1-21-5	NWM3-013-01	6	S	h	–	1,03	6	99,90	8,70	12,00
C1-21-6	NWM3-013-01	6	S	h	–	0,98	6	100,30	11,10	13,23
C1-25-1	NWM3-013-01	6	S	v	–	1,09	6	100,90	10,40	12,34
C1-25-2	NWM3-013-01	6	S	v	–	1,15	6	99,70	9,00	12,55
C1-25-3	NWM3-013-01	6	S	v	–	1,22	6	100,90	9,20	13,15
C1-25-5	NWM3-013-01	6	S	v	–	1,05	6	100,20	10,00	16,52
C1-25-6	NWM3-013-01	6	S	v	–	1,03	6	99,50	9,60	15,75
C1-32-1	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,09	6	100,58	10,58	16,49
C1-32-2	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,18	6	101,68	9,17	17,46
C1-32-6	NWM3-013-01	6	L	h	–	0,96	6	99,77	11,04	16,97
C1-T-04-6	NWM3-013-01	6	L	h	Ja	0,96	6	102,05	8,90	15,84
C1-T-08-3	NWM3-013-01	6	L	h	–	0,75	6	100,57	9,26	14,61
C1-T-08-4	NWM3-013-01	6	L	h	–	0,75	6	99,86	9,60	11,27
C1-T-29-3	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,11	6	100,04	9,84	13,59
C1-T-29-4	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,13	6	101,48	9,69	17,30
C1-17-1	NWM3-013-01	6	L	h	–	0,96	8	100,14	9,15	19,56
C1-17-2	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,05	8	101,72	9,09	20,02
C1-17-3	NWM3-013-01	6	L	h	–	0,96	8	99,25	9,34	19,68
C1-17-4	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,05	8	99,31	9,19	21,27
C1-17-5	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,15	8	100,72	8,80	17,40
C1-17-6	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,00	8	100,05	9,04	17,29
C1-T-04-1	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,05	8	99,90	8,30	17,19
C1-T-04-2	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,05	8	100,05	9,00	18,64
C1-T-04-3	NWM3-013-01	6	L	h	Ja	0,96	8	99,20	8,00	17,82

¹⁾ L = Laminieren, S = Sprühen²⁾ h = horizontal, v = vertikal

Versuch Nr.	Textil Bezeichnung	Lagen- anzahl	Aufbringung		Fuge		Verbund- länge l_V [cm]	Geometrie		Ergebnis Zug- bruchkraft [N/mm ²]
			Art 1)	Rich- tung 2)	Haft- brück- e	Rau- tiefe [mm]		Laschen- breite b_L [mm]	Laschen- dicke t_L [mm]	
C1-T-04-4	NWM3-013-01	6	L	h	Ja	0,96	8	99,80	9,00	18,58
C1-T-07-4	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,57	8	99,90	8,60	18,31
C1-T-08-5	NWM3-013-01	6	L	h	–	0,75	8	100,72	13,45	16,30
C1-T-08-6	NWM3-013-01	6	L	h	–	0,75	8	100,21	9,27	17,23
C1-T-29-5	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,15	8	99,96	11,58	14,95
C1-T-29-6	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,15	8	99,70	11,03	0,55
C1-T-02-1	NWM3-005-01	6	L	h	–	1,01	10	100,00	9,00	16,34
C1-T-02-2	NWM3-005-01	6	L	h	–	1,05	10	100,00	9,00	17,16
C1-T-07-5	NWM3-013-01	6	L	h	–	1,76	10	100,50	8,50	18,71
C1-T-05-1	NWM3-031-00	8	L	h	–	0,96	8	99,60	10,00	16,57
C1-T-05-2	NWM3-031-00	8	L	h	–	1,05	8	100,10	10,30	13,59
C1-T-05-3	NWM3-031-00	8	L	h	–	1,05	10	100,60	11,30	17,83
C1-T-05-4	NWM3-031-00	8	L	h	–	1,05	10	99,30	10,30	16,92
C1-T-05-5	NWM3-031-00	8	L	h	–	1,05	12	99,80	9,90	15,39
C1-T-05-6	NWM3-031-00	8	L	h	–	0,96	12	100,70	9,60	15,98
C1-T-13-3	NWM3-037-00	8	L	h	–	0,81	6	100,40	13,40	15,64
C1-T-15-5	NWM3-037-00	8	L	h	–	0,86	6	99,95	13,06	13,95
C1-T-15-6	NWM3-037-00	8	L	h	–	0,77	6	101,18	13,57	13,12
C1-T-06-1	NWM3-037-00	8	L	h	–	1,05	8	99,80	9,70	17,29
C1-T-06-2	NWM3-037-00	8	L	h	–	0,96	8	100,40	9,50	16,01
C1-T-06-3	NWM3-037-00	8	L	h	–	1,05	10	100,60	9,30	16,82
C1-T-06-4	NWM3-037-00	8	L	h	–	1,00	10	100,60	8,80	12,95
C1-T-06-5	NWM3-037-00	8	L	h	–	1,09	12	101,20	9,00	14,45
C1-T-06-6	NWM3-037-00	8	L	h	–	1,00	12	100,00	10,80	14,31
C1-T-13-2	NWM3-033-00	8	L	h	–	0,86	6	101,60	9,30	15,47
C1-T-15-3	NWM3-033-00	8	L	h	–	0,73	6	99,83	6,86	9,48
C1-T-15-4	NWM3-033-00	8	L	h	–	0,81	6	100,84	14,57	8,28
C1-T-10-1	NWM3-023-02	3	S	v	–	0,57	8	100,76	11,13	9,21
C1-T-10-4	NWM3-023-02	3	S	v	–	0,88	8	101,77	10,33	10,92
C1-T-11-6	NWM3-023-02	4	S	v	–	0,57	10	99,74	9,89	11,74
C1-T-18-4	NWM4-003-03-2b	6	L	h	–	1,09	6	100,22	10,05	18,98
C1-T-18-5	NWM4-003-03-2b	6	L	h	–	1,05	6	99,61	10,11	17,84
C1-T-18-6	NWM4-003-03-2b	6	L	h	–	1,00	6	101,49	8,74	16,26
C1-T-24-3	NWM4-013-04	6	L	h	–	1,02	8	99,80	11,54	16,96
C1-T-24-5	NWM4-013-04	6	L	h	–	1,27	10	100,39	9,32	22,33

Tab. A 4.2. 5 Regelprüfdaten zu den Schubversuchen

Serie Nr.	Altbeton		Feinbeton	
	Druckfestigkeit ^{1) 2)} $f_{cm,cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druckfestigkeit ^{1) 3)} $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]	Druckfestigkeit ^{3) 4)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biegezugfestigkeit ^{3) 4)} $f_{fctm,fl}$ [N/mm ²]
C1-15	33,17	41,80	7,84	81,43
C1-16	29,73	32,63	5,40	79,63
C1-17	30,10	31,57	6,82	72,60
C1-18	32,00	33,50	6,35	80,10
C1-19	28,97	30,87	7,63	79,48
C1-20	30,10	31,63	5,20	82,53
C1-21	28,83	33,83	6,05	78,67
C1-22	30,17	34,43	7,73	84,37
C1-23	28,93	31,93	6,30	107,73
C1-24	26,27	30,37	6,83	90,67
C1-25	30,30	32,67	7,10	104,30
C1-26	27,78	30,73	8,18	102,78
C1-27	28,47	31,83	9,75	85,27
C1-28	29,20	34,20	8,12	90,28
C1-29	30,07	27,93	9,43	78,96
C1-30	36,03	36,53	8,29	82,35
C1-31	31,47	30,07	6,86 / 8,12	87,33 / 83,53
C1-32	36,30	35,23	7,77	82,03
C1-33	33,73	31,40	7,33	66,17
C1-34	34,37	33,73	6,53	70,68
C1-T-02	35,23	42,33	98,20	7,27
C1-T-03	32,53	40,30	79,41	6,81
C1-T-04	34,10	42,03	85,53	7,77
C1-T-05	22,37	39,53	89,31	8,14
C1-T-06	35,60		77,41	7,91
C1-T-07	38,10	47,37	89,62	6,36
C1-T-08	31,70	31,27	72,24	8,20
C1-T-09	31,97	29,80	82,48	8,64
C1-T-10	33,47	31,67	68,07	7,77
C1-T-11	35,63	31,70	71,60	7,90
C1-T-12	32,63	35,07	84,82	7,70
C1-T-13	32,63	35,07	84,82	7,70
C1-T-14	29,00	32,20	73,23	7,28
C1-T-15	34,40	39,80	71,02	6,56
C1-T-16	34,63	34,27	72,43	7,58
C1-T-17	33,10	34,25	64,45	8,17
C1-T-18	30,50	30,40	67,90	7,95
C1-T-19	27,67	29,27	70,83	6,44
C1-T-20	27,43	29,43	70,13	8,03
C1-T-21	30,20	30,10	68,03	5,69
C1-T-22	30,40	30,60	65,88	6,87
C1-T-23	32,87	30,77	66,08	7,68
C1-T-24	31,37	32,33	69,27	6,61
C1-T-25	30,83	32,30	71,05	7,40
C1-T-26	30,90	31,93	69,43	7,41
C1-T-27	31,87	33,43	73,05	7,78
C1-T-28	31,27	32,70	71,67	7,12
C1-T-29	32,47	33,97	68,75 / 66,90	7,26 / 7,18
C1-T-30	29,67	33,30	75,88	7,15
C1-T-31	35,47	39,57	86,33	8,82

1) Regelprüfung am 15er Würfel

2) nach 28d

3) am Prüftag der Haftzugprüfung (= 28d-Festigkeit des Feinbetons)

4) Regelprüfung am Mörtelprisma

Serie Nr.	Altbeton		Feinbeton	
	Druckfestigkeit ^{1) 2)} $f_{cm, cube}^{28d}$ [N/mm ²]	Druckfestigkeit ^{1) 3)} $f_{cm, cube}$ [N/mm ²]	Druckfestigkeit ^{3) 4)} f_{fcm} [N/mm ²]	Biegezugfestigkeit ^{3) 4)} $f_{fcm, fl}$ [N/mm ²]
C1-T-32	33,63	37,23	75,92	7,05
C1-T-33	34,07	36,20	79,28	7,74
C1-T-34	33,93	30,70	68,60	7,87
C1-T-35	36,07	37,50	71,63	5,97
C1-T-36	34,17	35,93	73,20	7,12
C1-T-37	36,57	39,27	70,00	5,86
C1-T-38	23,62	24,85	72,34	7,17
C1-T-39	28,51	34,69	77,75	7,62
C1-T-40	35,25	41,47	70,62	7,10
C1-T-41	27,53	35,23	78,15	7,46
C1-T-42	26,39	33,09	66,99	6,61

A 4.3 Filamentgarnauszugsversuche

Tab. A 4.3.1 Ergebnisse der Auszugsversuche

Vers. Nr. C1-... ¹⁾	Textil			Geometrie		Versagensart	Ergebnis			Feinbeton		
	Bezeichnung NWM...	Prüfrichtung ²⁾	Lagenanzahl	Verbundlänge			Garnauszugslänge		Kernauszugslänge $l_{a,K}$	Bruchkraft F_{Lu} o. F_{iVu}	Biegezugfestigkeit ³⁾⁴⁾ $f_{fct,fl}$	Druckfestigkeit ³⁾⁴⁾ f_{fc}
				Rand $l_{V,R}$	Mitte $l_{V,M}$		min $l_{a,min}$	max $l_{a,max}$				
F-03-8	4-005-04	K	4	15	20	Garnauszug	15	20	–	11,37	5,94	79,07
F-04-2	4-004-04	S	4	3	8	Garnauszug	3	8	–	10,69	6,45	78,28
F-04-3	4-004-04	S	4	5	10	Garnauszug	5	10	–	10,65	6,45	78,28
F-04-6	4-004-04	S	4	11	16	Garnauszug	11	16	–	13,16	6,45	78,28
F-04-7	4-004-04	S	4	13	18	Garnauszug	13	18	–	14,70	6,45	78,28
F-04-8	4-004-04	S	4	15	20	Garnauszug	15	20	–	12,68	6,45	78,28
F-05-6	4-006-04	K	4	11	16	Garnauszug	3	16	–	10,03	6,26	68,68
F-05-8	4-006-04	K	4	15	20	Kernauszug	3	4,5	20	11,43	6,26	68,68
F-06-8	4-022-04	S	4	15	20	Kernauszug	2	3	20	11,50	6,26	68,68
F-21-4	3-023-02	D	3	7	12	Zugbruch + Kernauszug	0	1	12	7,10	6,26	68,68
F-23-4	4-011-03	K	3	15	20	Garnauszug	15	20	–	–	6,26	68,68
F-25-2	3-029-05-p2	K	4	3	8	Klebstoff	–	–	–	15,07	6,42	75,93
F-25-4	3-029-05-p2	K	4	7	12	Klebung	–	–	–	14,50	6,55	80,42
F-25-6	3-029-05-p2	K	4	11	16	Zugbruch	1	1,5	–	15,12	6,42	75,93
F-25-8	3-029-05-p2	K	4	15	20	Zugbruch	0,5	1,5	–	15,16	6,42	75,93
F-26-2	3-026-05-p2	K	4	3	8	Klebstoff	–	–	–	12,67	6,55	80,42
F-26-6	3-026-05-p2	K	4	11	16	Zugbruch	0	1	–	18,88	6,42	75,93
F-26-7	3-026-05-p2	K	4	13	18	Zugbruch	0,5	2	–	19,78	6,42	75,93
F-26-8	3-026-05-p2	K	4	15	20	Zugbruch	0,5	2	–	19,72	6,42	75,93
F-27-2	3-026-05-p2	S	4	3	8	Klebstoff	–	–	–	13,95	6,55	80,42
F-29-2	3-028-05-p2	K	4	3	8	Zugbruch + Garnauszug	3	5	–	13,24	6,42	75,93
F-29-6	3-028-05-p2	K	4	11	16	Zugbruch	0	2	–	14,64	6,42	75,93
F-29-8	3-028-05-p2	K	4	15	20	Zugbruch	0	1,5	–	16,74	6,42	75,93
F-30-7	3-028-05	K	4	11	16	Zugbruch	0	2	–	12,11	6,42	75,93
F-30-8	3-028-05	K	4	15	20	Zugbruch	0	1,5	–	12,08	6,42	75,93
F-32-5	3-028-05	K	4	9	14	Zugbruch + Kernauszug	0	1	5	13,42	6,48	78,57

¹⁾ Die Versuchsnummer (1–8) hinter der Serienbezeichnung steht für die geprüfte Auszugslänge:

1 = 1–6 cm, 2 = 3–8 cm ... 8 = 15–20 cm.

Pro Serie werden nur so viele Probekörper geprüft, bis die Auszugslänge gefunden ist.

²⁾ K = Kett-, S = Schuss-, D = Diagonalfäden

³⁾ am Prüftag der Auszugsversuche (= 28d-Festigkeit des Feinbetons)

⁴⁾ Regelprüfung am Mörtelprisma

Anhang 5 Ergebnisse der photogrammetrischen Verformungsmessung

A 5.1 Versuch C1-31-3

4 Lagen NWM3-004-01 mit 10 cm Verbundlänge, Prüfung in Kettfadenrichtung

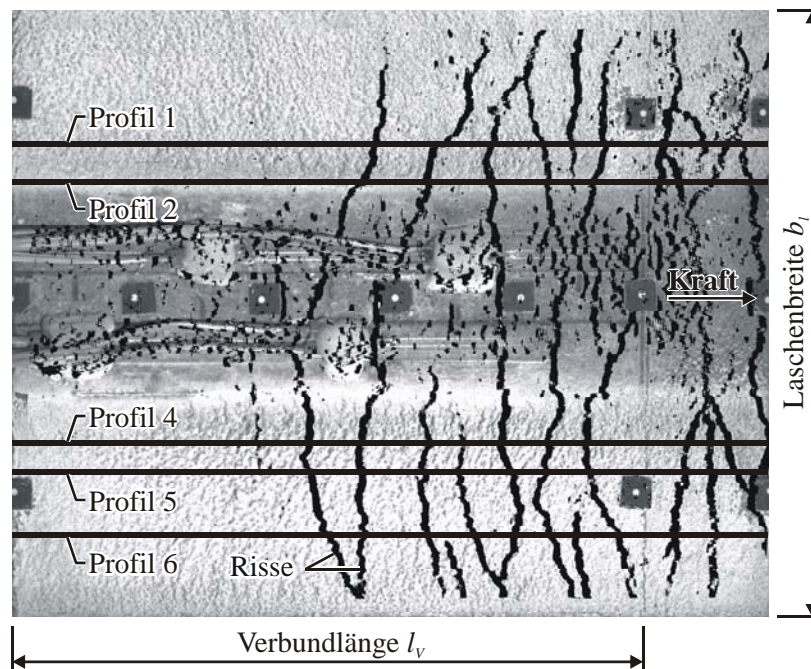


Bild A 5.1.1 Profilverfestigung am Rissbild

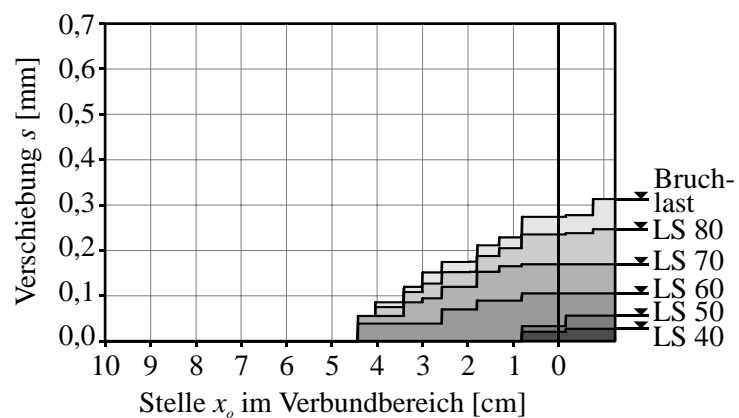


Bild A 5.1.2 Relativverschiebungen für das Profil 1 für jede zehnte Laststufe

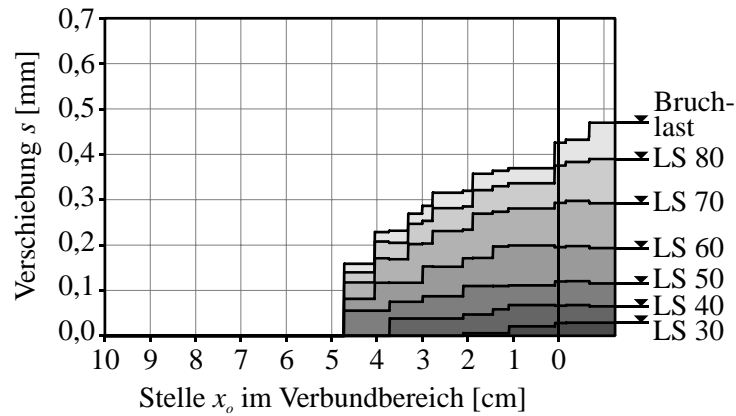


Bild A 5.1.3 Relativverschiebungen für das Profil 2 für jede zehnte Laststufe

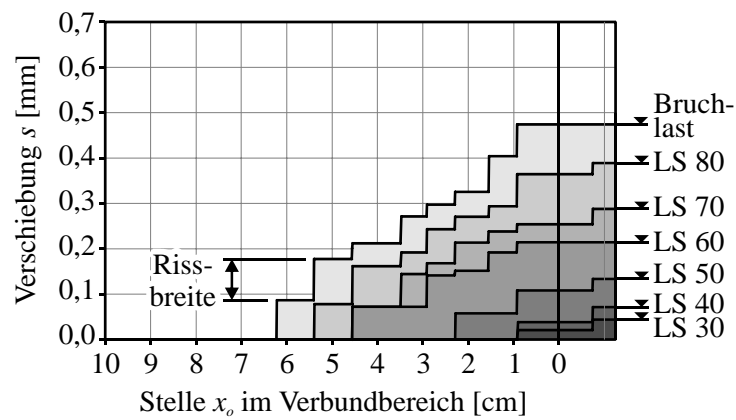


Bild A 5.1.4 Relativverschiebungen für das Profil 4 für jede zehnte Laststufe

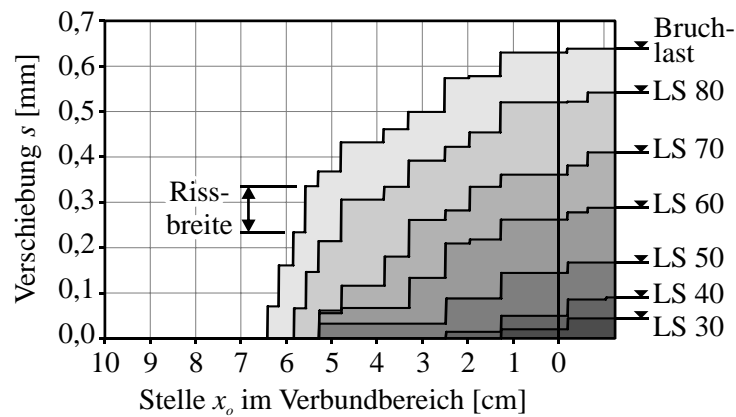


Bild A 5.1.5 Relativverschiebungen für das Profil 5 für jede zehnte Laststufe

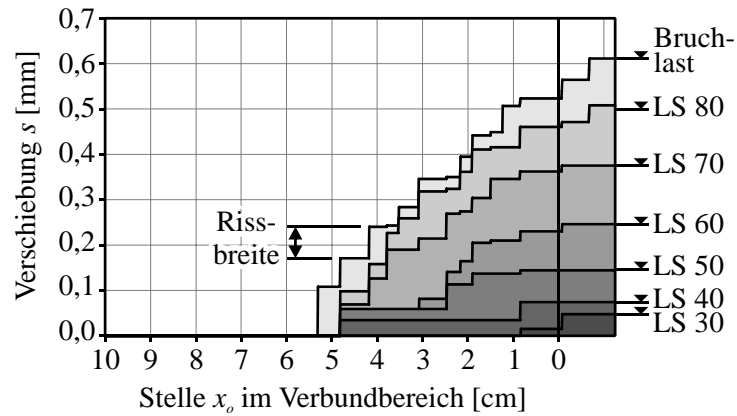


Bild A 5.1.6 Relativverschiebungen für das Profil 6 für jede zehnte Laststufe

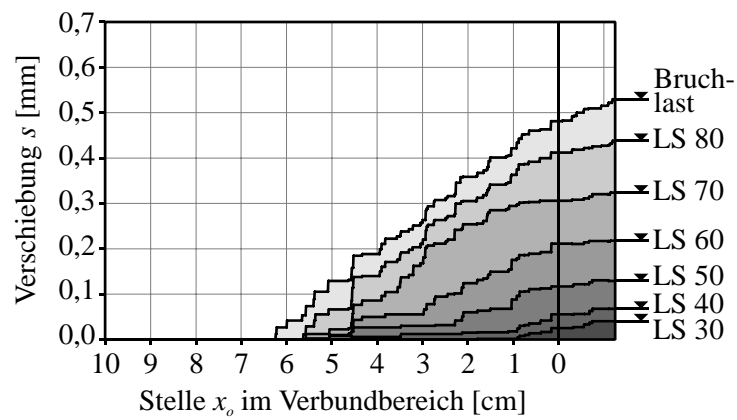


Bild A 5.1.7 Relativverschiebungen aller Profile überlagert für jede zehnte Laststufe

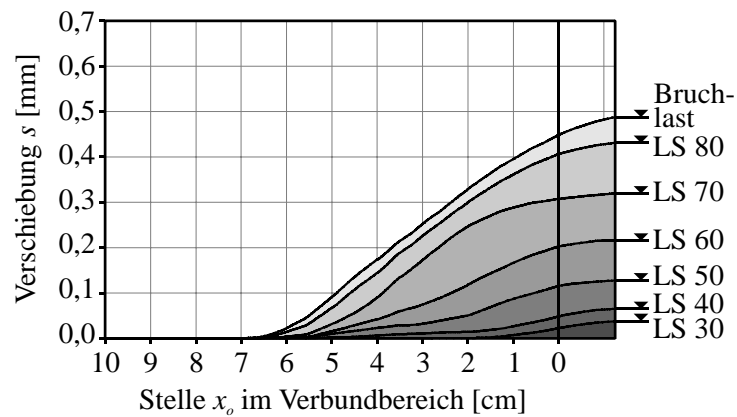


Bild A 5.1.8 Relativverschiebungen aller Profile überlagert und geglättet für jede zehnte Laststufe

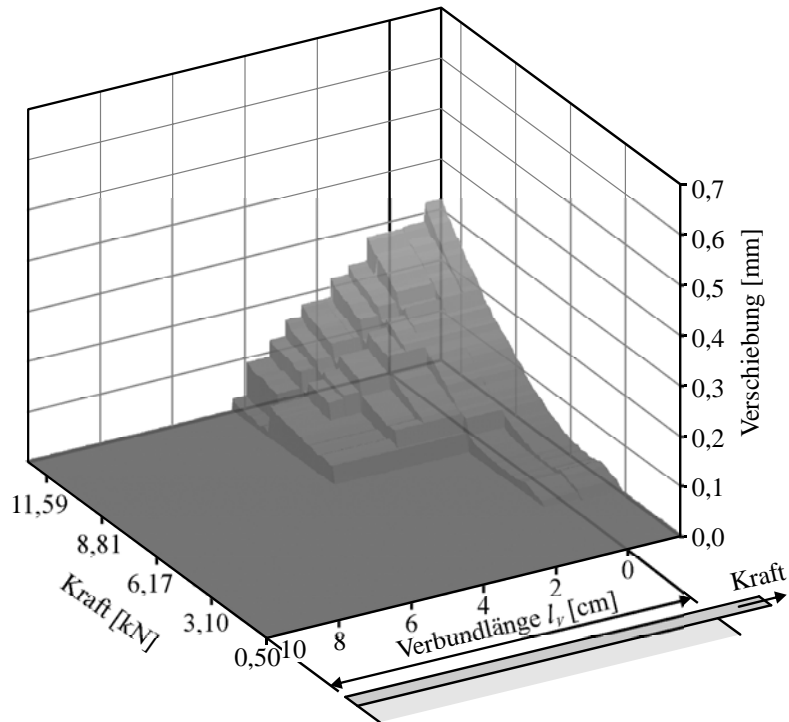


Bild A 5.1.9 Relativverschiebungen für das Profil 1 über alle Laststufen

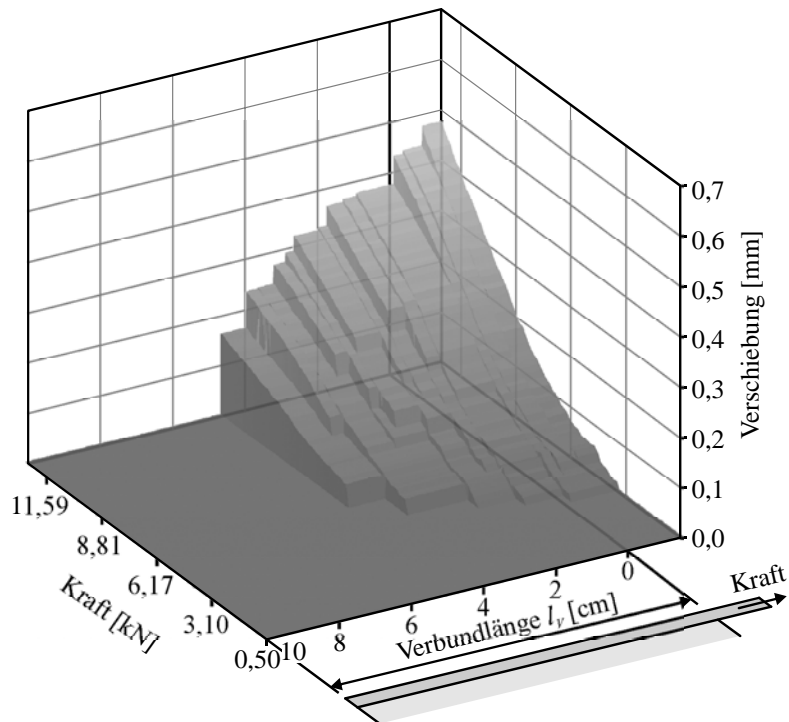


Bild A 5.1.10 Relativverschiebungen für das Profil 2 über alle Laststufen

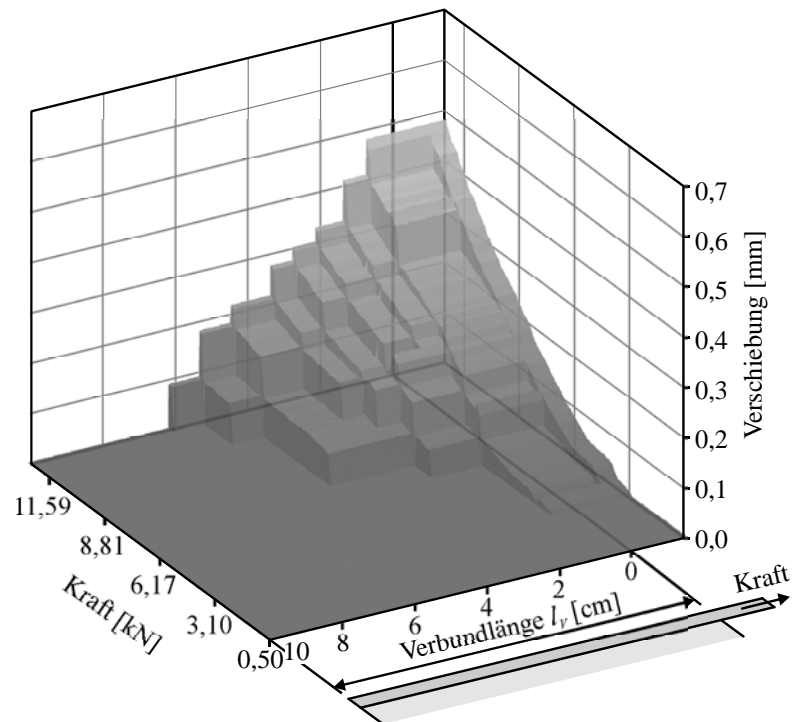


Bild A 5.1.11 Relativverschiebungen für das Profil 4 über alle Laststufen

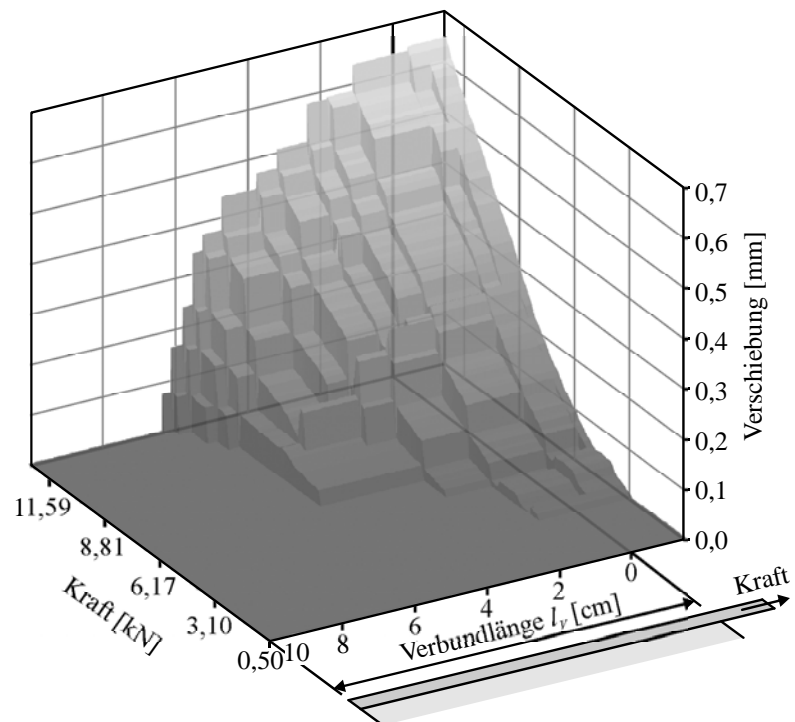


Bild A 5.1.12 Relativverschiebungen für das Profil 5 über alle Laststufen

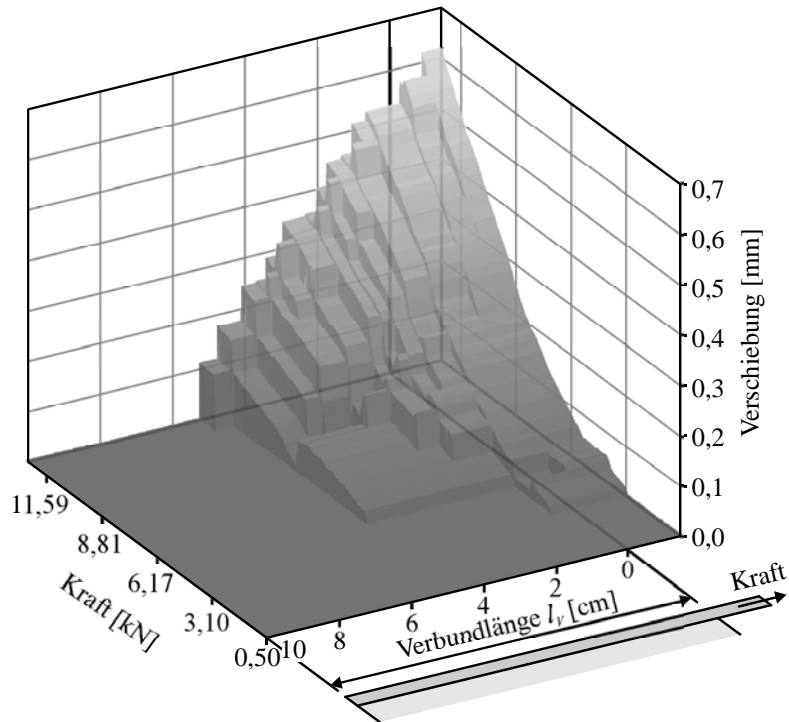


Bild A 5.1.13 Relativverschiebungen für das Profil 6 über alle Laststufen

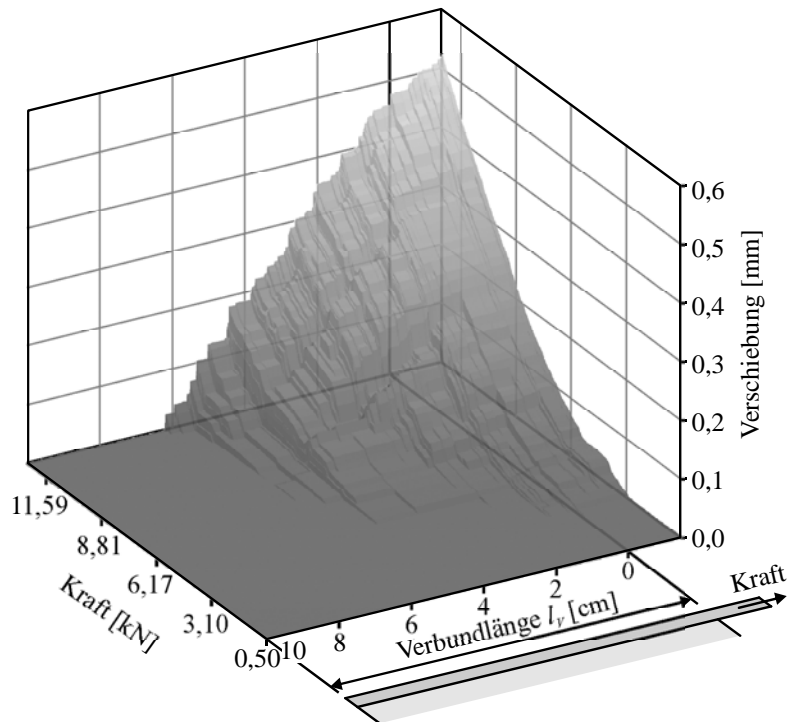


Bild A 5.1.14 Relativverschiebungen aller Profile überlagert über alle Laststufen

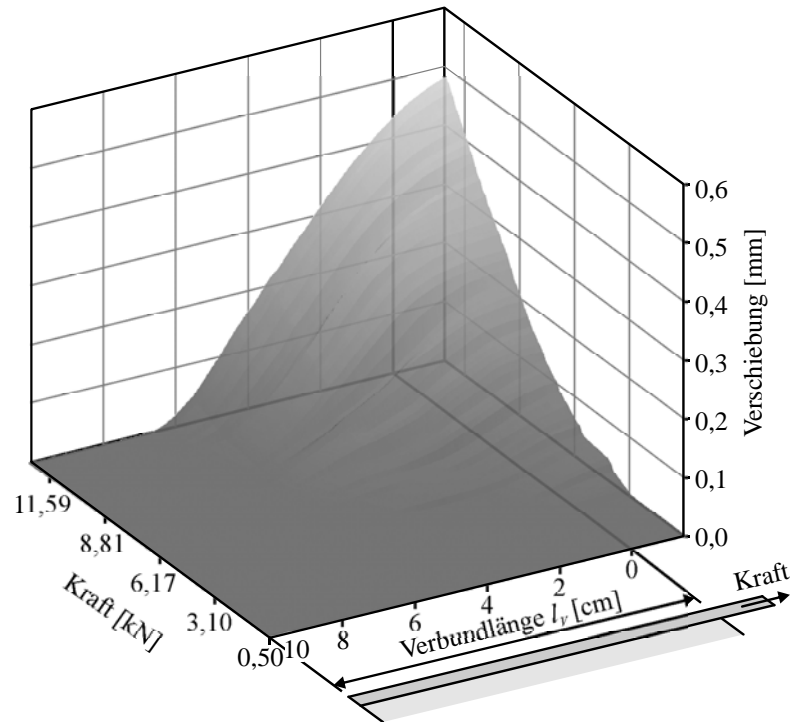


Bild A 5.1.15 Relativverschiebungen aller Profile überlagert und geglättet über alle Laststufen

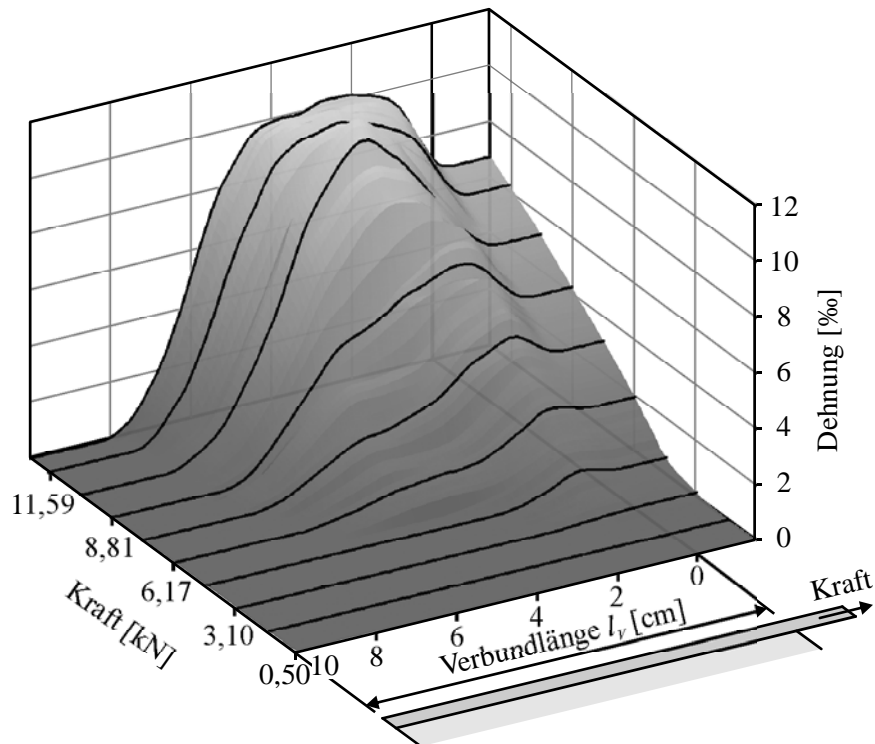


Bild A 5.1.16 Dehnungen (berechnet aus Relativverschiebungen) über alle Laststufen

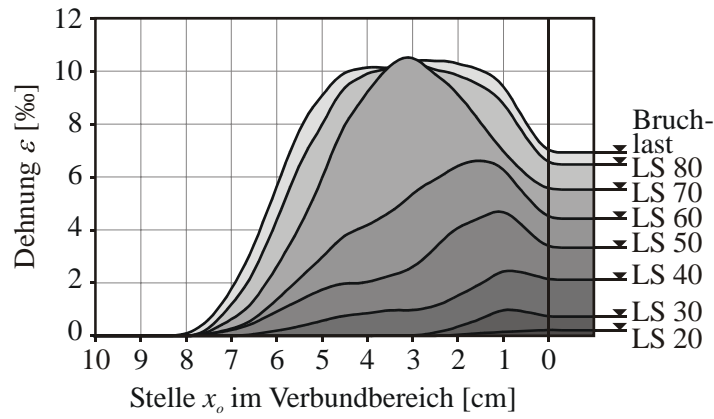


Bild A 5.1.17 Dehnungen (berechnet aus Relativverschiebungen) für jede zehnte Laststufe

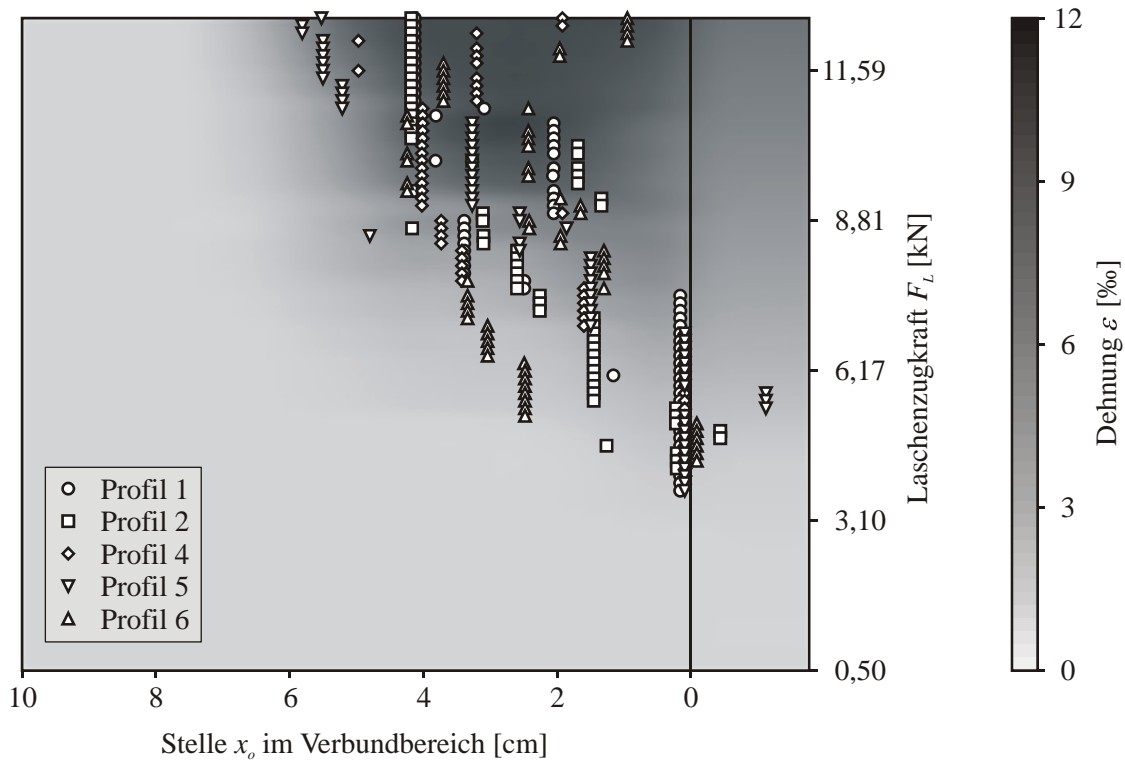


Bild A 5.1.18 Dehnungen (berechnet aus Relativverschiebungen) mit Markierung der Maxima

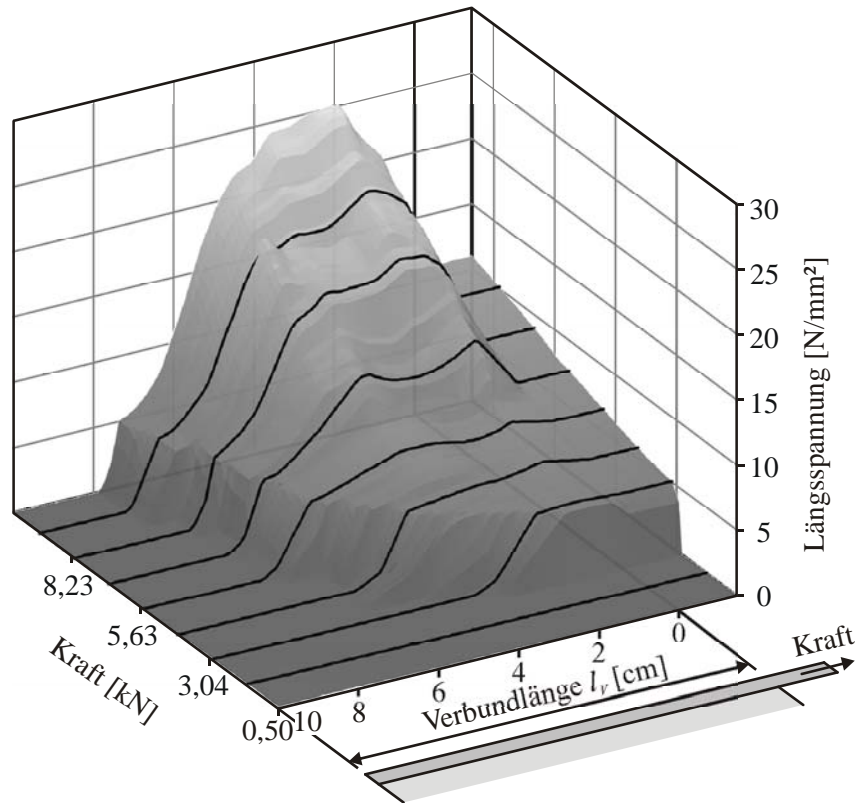


Bild A 5.1.19 Längsspannungen (berechnet aus den Dehnungen) über alle Laststufen

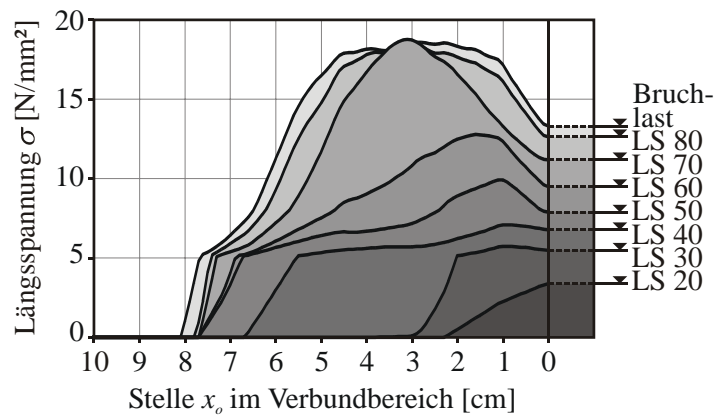


Bild A 5.1.20 Längsspannungen (berechnet aus den Dehnungen) für jede zehnte Laststufe

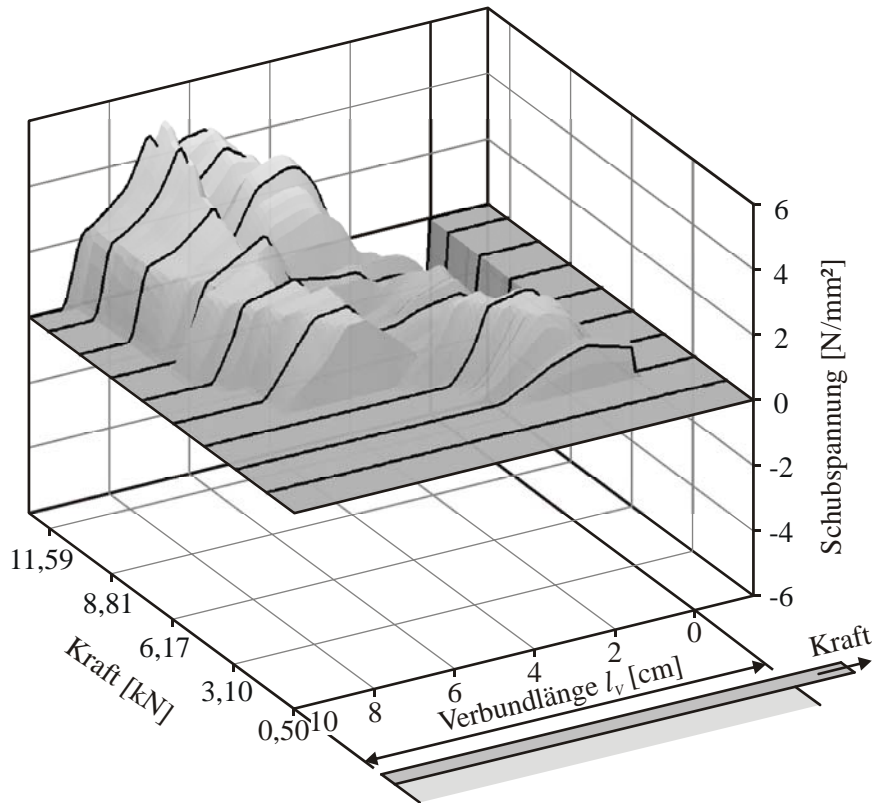


Bild A 5.1.21 Schubspannungen (berechnet aus den Längsspannungen) über alle Laststufen

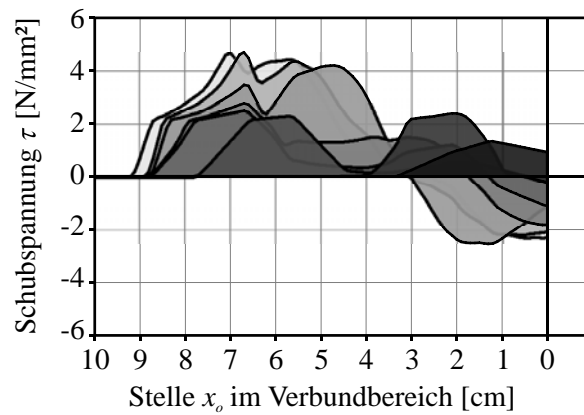


Bild A 5.1.22 Schubspannungen (berechnet aus den Längsspannungen) für jede zehnte Laststufe

A 5.2 Versuch C1-31-4

4 Lagen NWM3-004-01 mit 10 cm Verbundlänge, Prüfung in Kettfadenrichtung

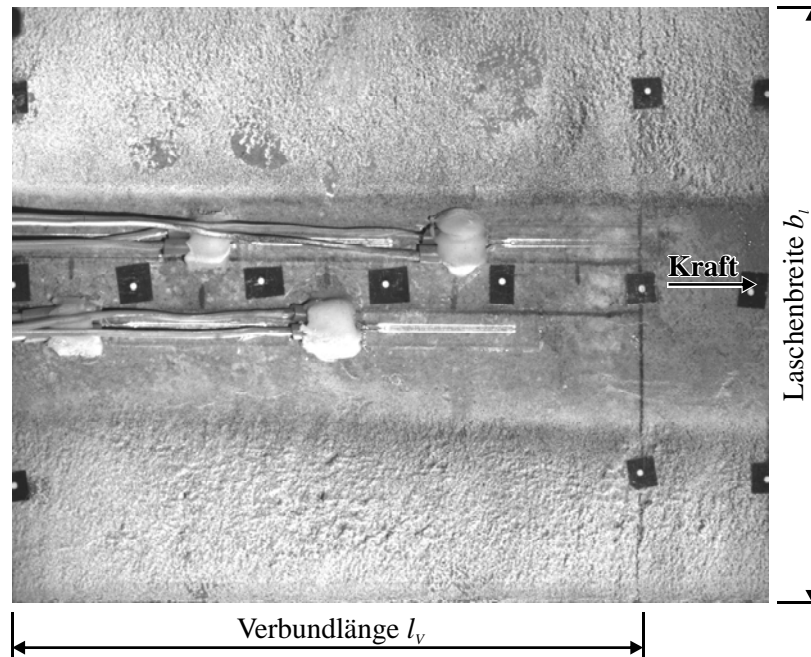


Bild A 5.2.1 Referenzbild der photogrammetrischen Aufnahme

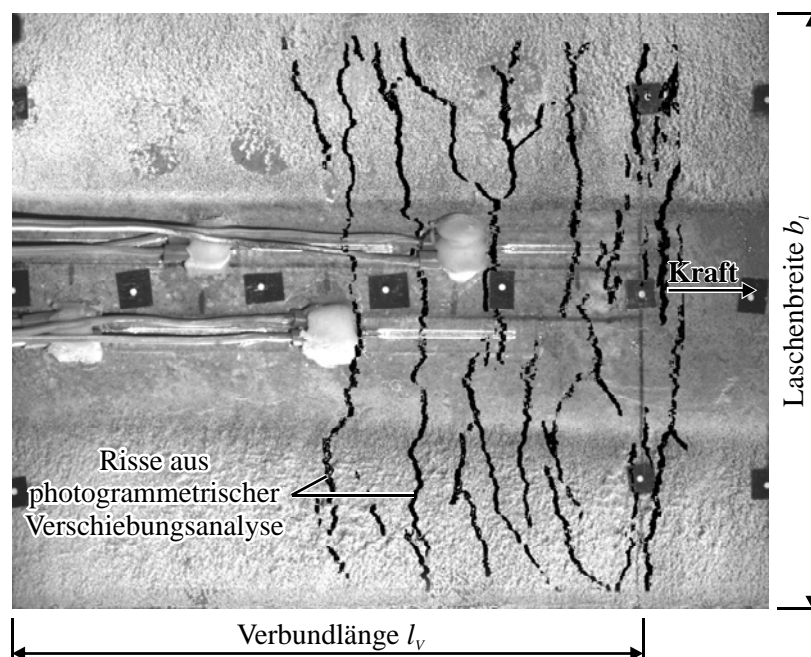


Bild A 5.2.2 Rissbild aus der photogrammetrischen Verschiebungsanalyse

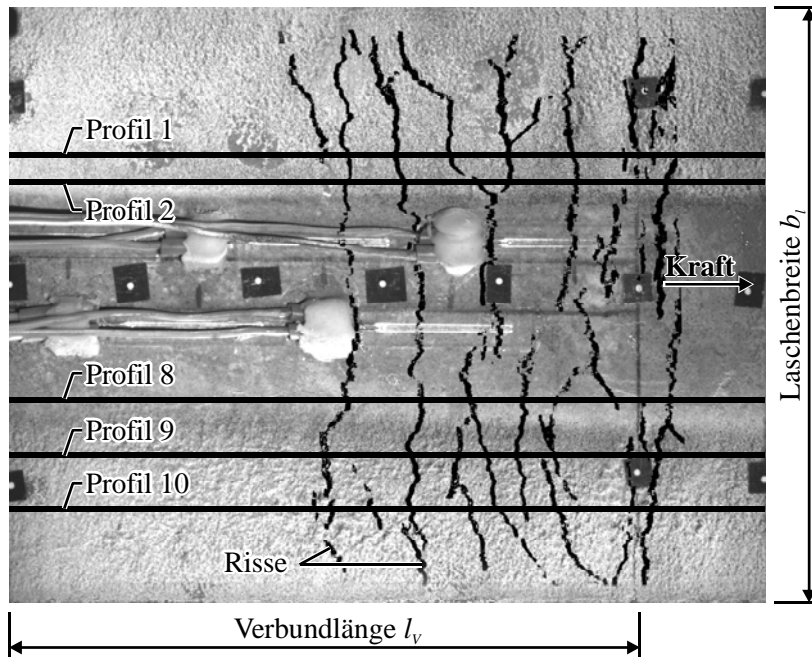


Bild A 5.2.3 Profilstellung am Rissbild

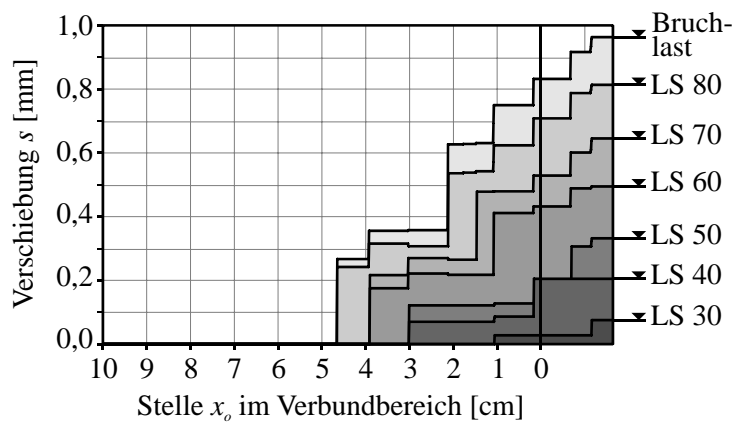


Bild A 5.2.4 Relativverschiebungen für das Profil 1 für jede zehnte Laststufe

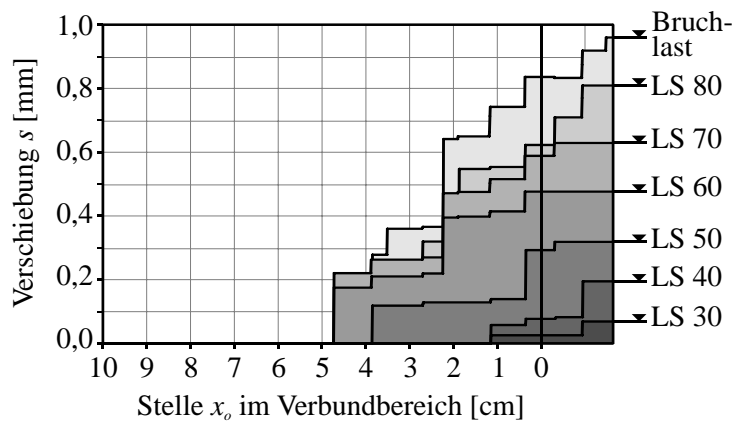


Bild A 5.2.5 Relativverschiebungen für das Profil 2 für jede zehnte Laststufe

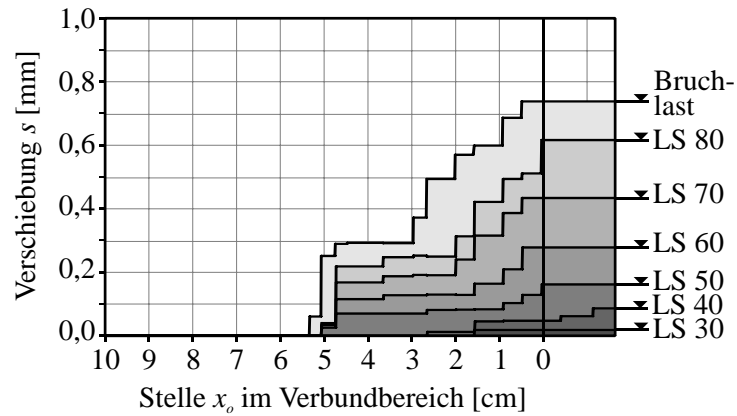


Bild A 5.2.6 Relativverschiebungen für das Profil 8 für jede zehnte Laststufe

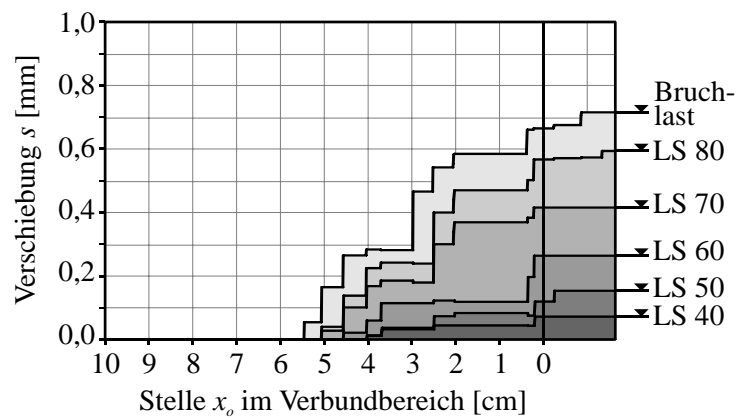


Bild A 5.2.7 Relativverschiebungen für das Profil 9 für jede zehnte Laststufe

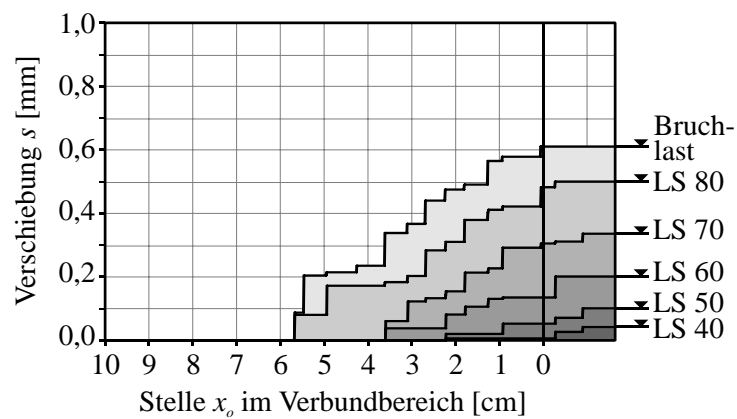


Bild A 5.2.8 Relativverschiebungen für das Profil 10 für jede zehnte Laststufe

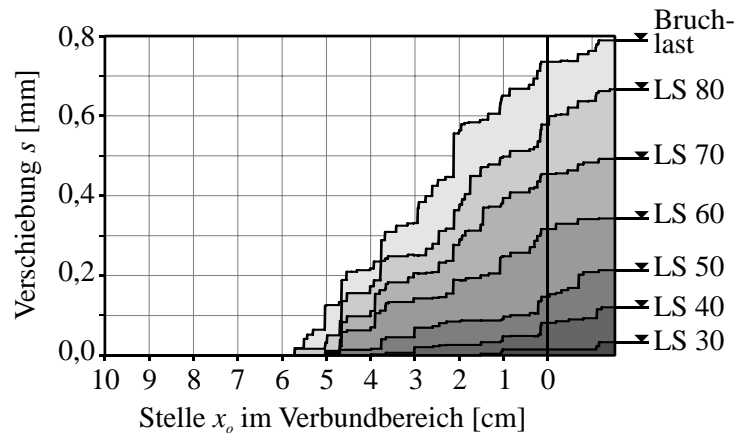


Bild A 5.2.9 Relativverschiebungen aller Profile überlagert für jede zehnte Laststufe

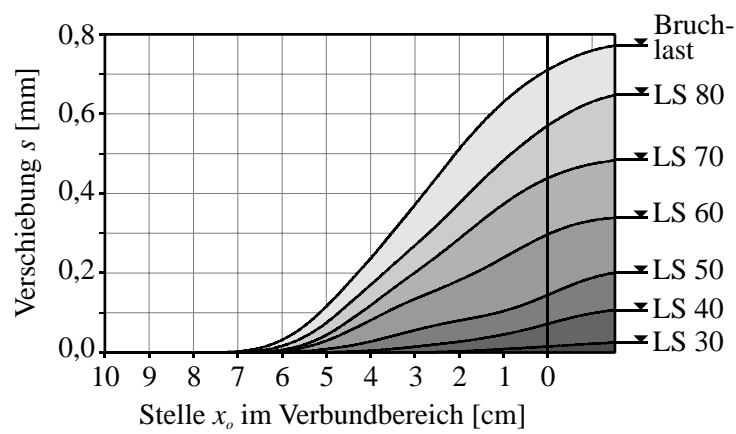


Bild A 5.2.10 Relativverschiebungen aller Profile überlagert und geglättet für jede zehnte Laststufe

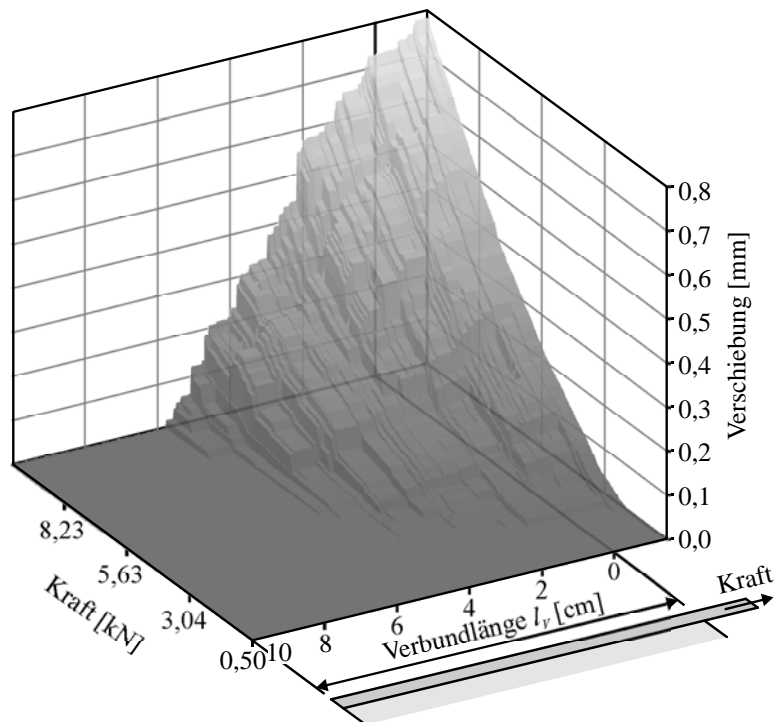


Bild A 5.2.11 Relativverschiebungen aller Profile überlagert über alle Laststufen

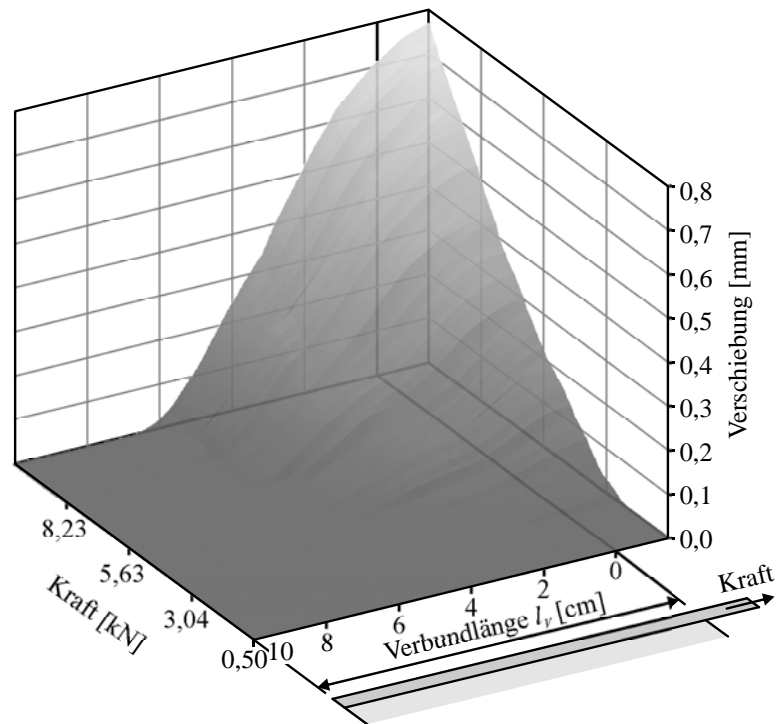


Bild A 5.2.12 Relativverschiebungen aller Profile überlagert und geglättet über alle Laststufen

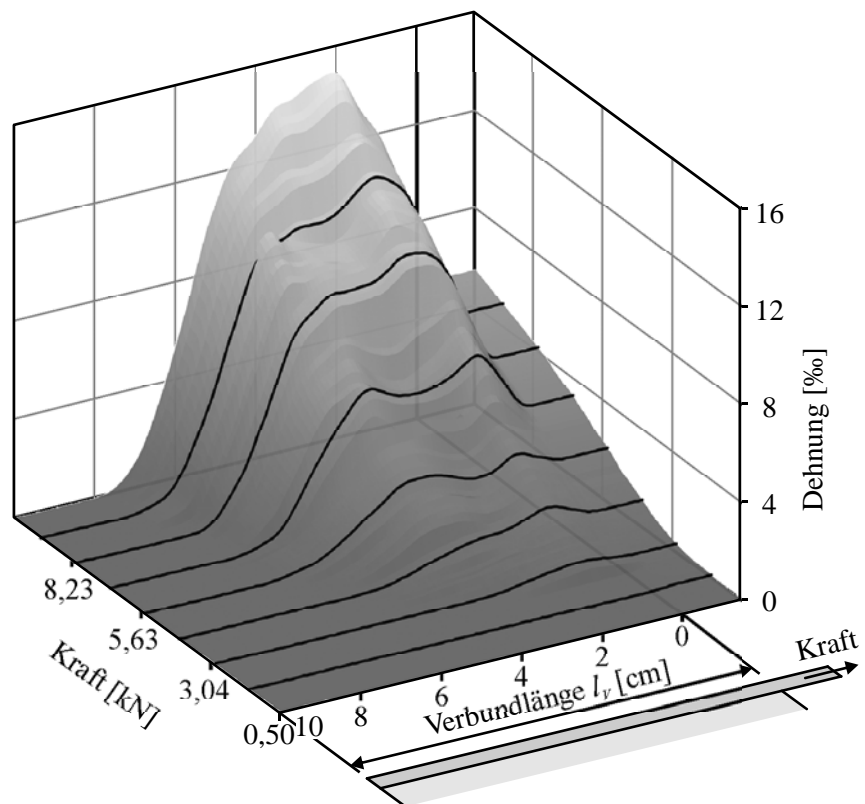


Bild A 5.2.13 Dehnungen (berechnet aus Relativverschiebungen) über alle Laststufen

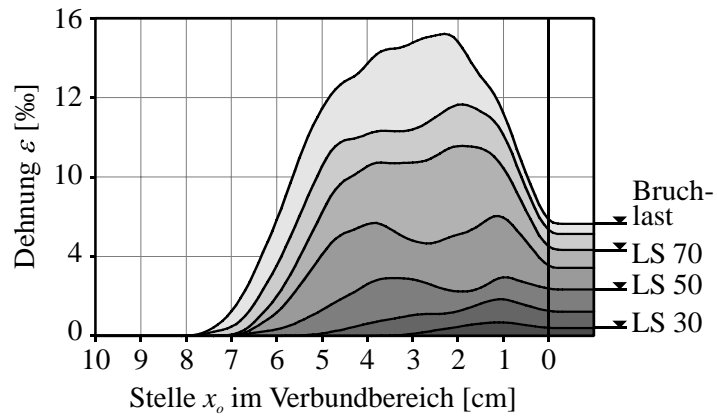


Bild A 5.2.14 Dehnungen (berechnet aus Relativverschiebungen) für jede zehnte Laststufe

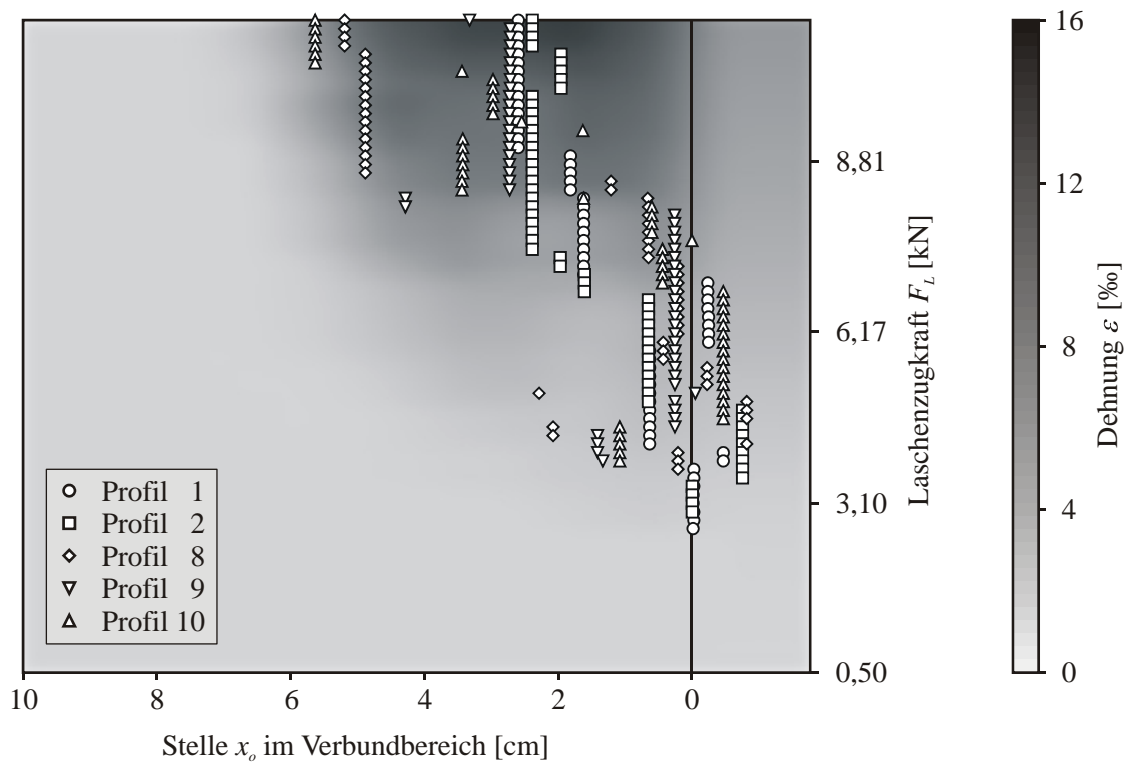


Bild A 5.2.15 Dehnungen (berechnet aus Relativverschiebungen) mit Markierung der Maxima

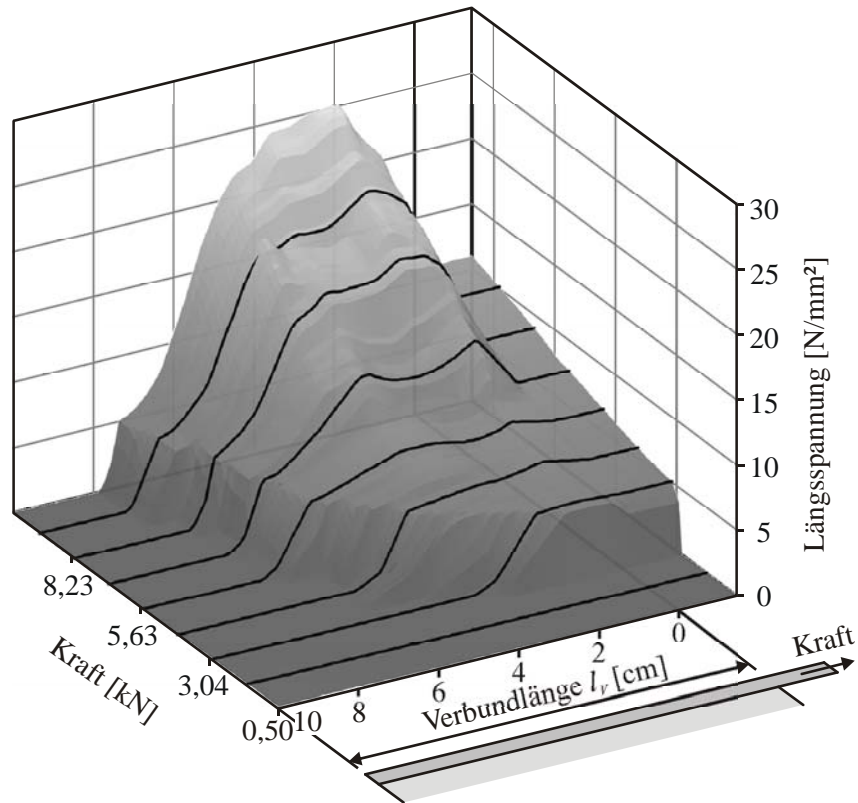


Bild A 5.2.16 Längsspannungen (berechnet aus den Dehnungen) über alle Laststufen

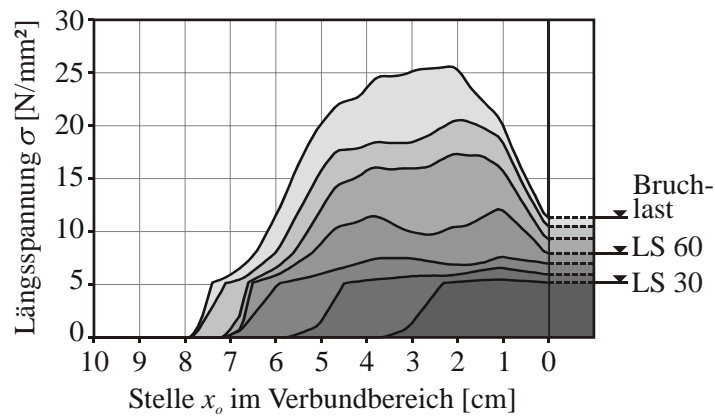


Bild A 5.2.17 Längsspannungen (berechnet aus den Dehnungen) für jede zehnte Laststufe

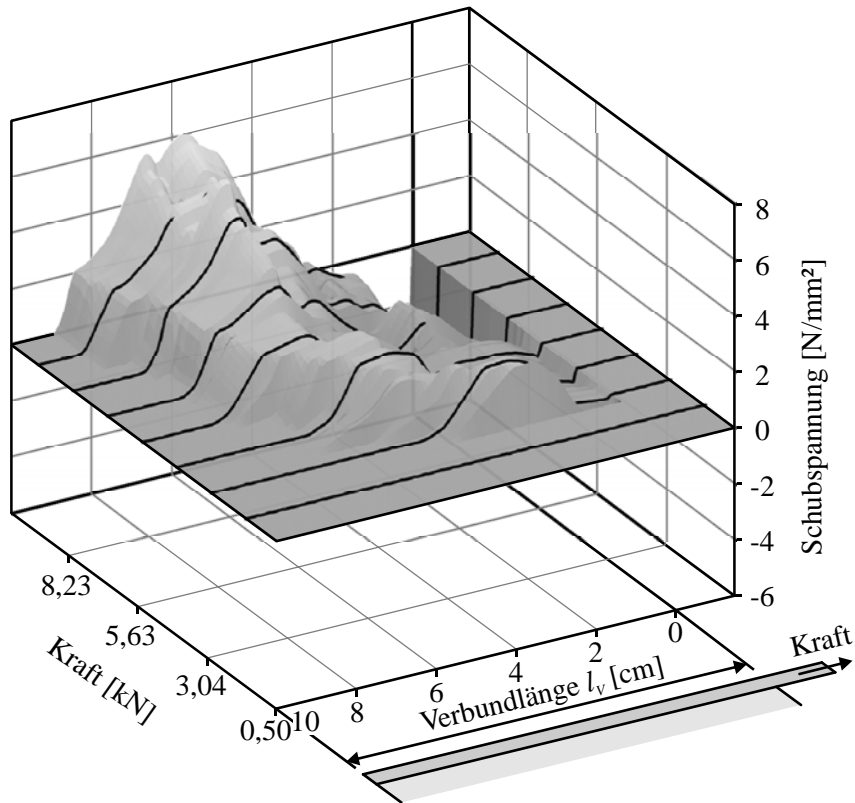


Bild A 5.2.18 Schubspannungen (berechnet aus den Längsspannungen) über alle Laststufen

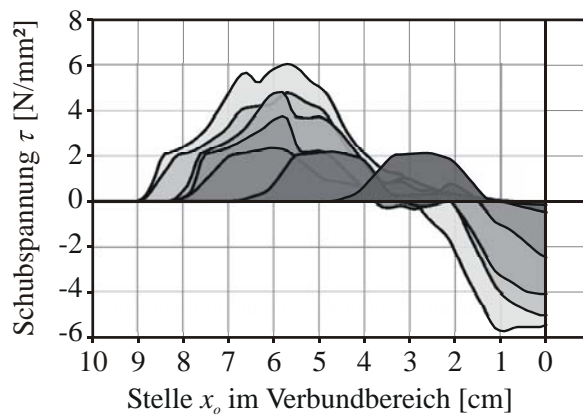


Bild A 5.2.19 Schubspannungen (berechnet aus den Längsspannungen) für jede zehnte Laststufe

A 5.3 Versuch C1-T-26-3

8 Lagen NWM4-013-04 mit 10 cm Verbundlänge, Prüfung in Schussfadenrichtung

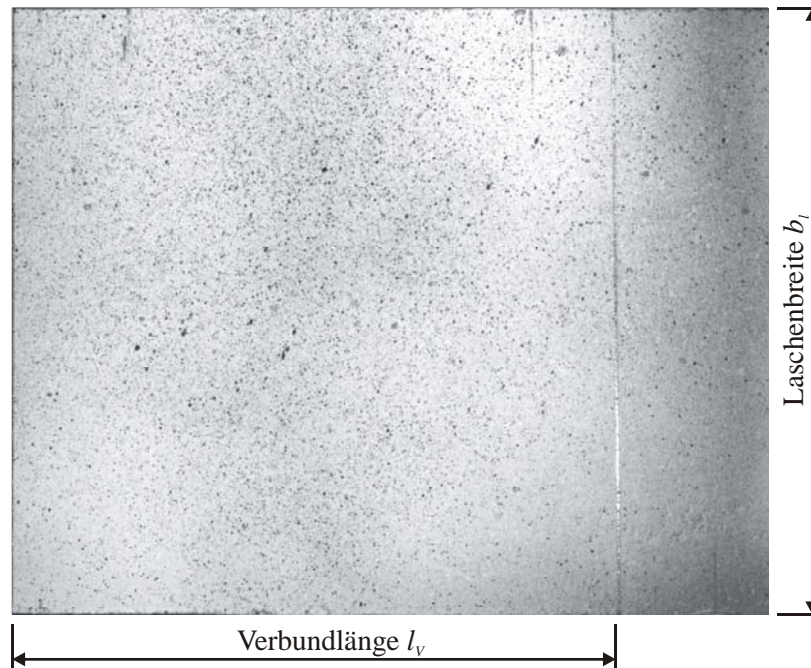


Bild A 5.3.1 Referenzbild der photogrammetrischen Aufnahme

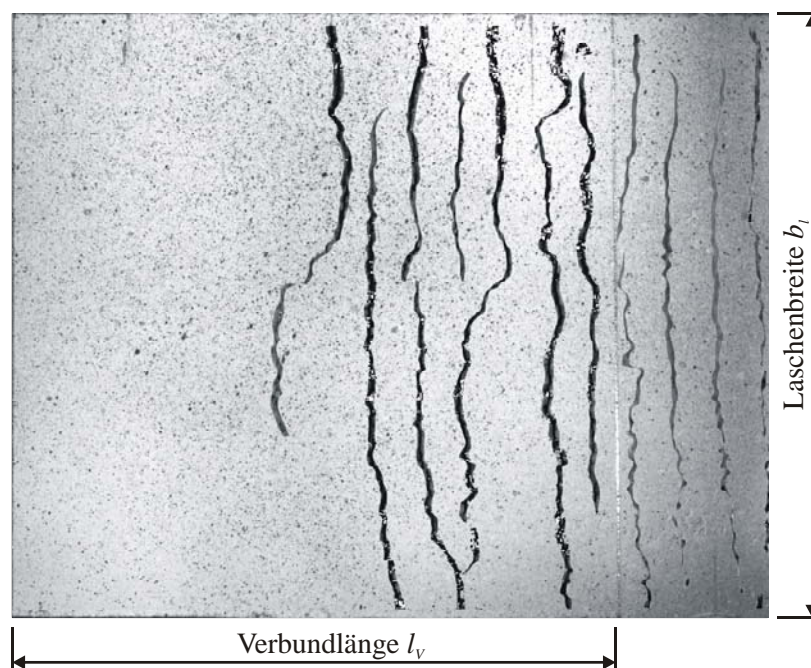


Bild A 5.3.2 Rissbild aus der photogrammetrischen Verschiebungsanalyse

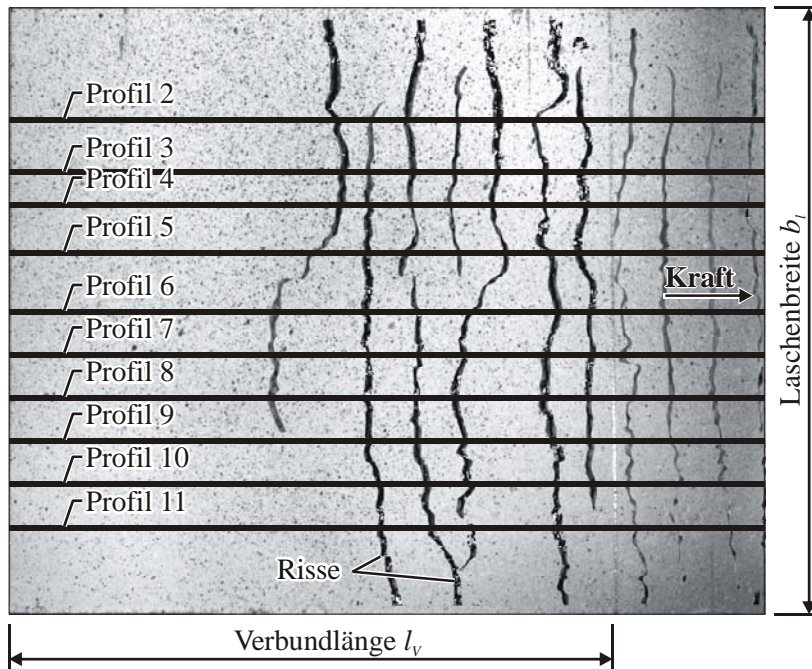


Bild A 5.3.3 Profilstellung am Rissbild

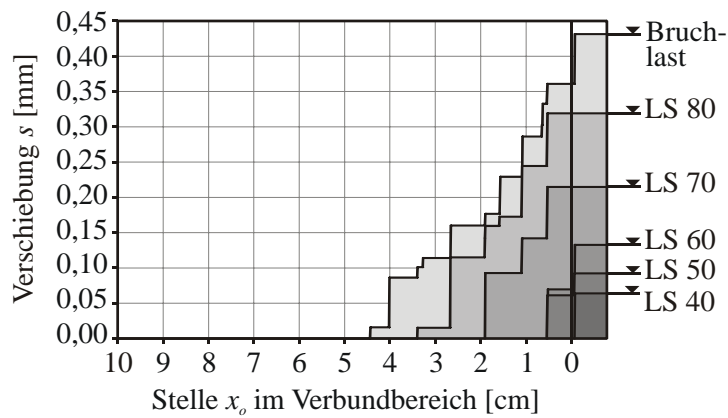


Bild A 5.3.4 Relativverschiebungen für das Profil 2 für jede zehnte Laststufe

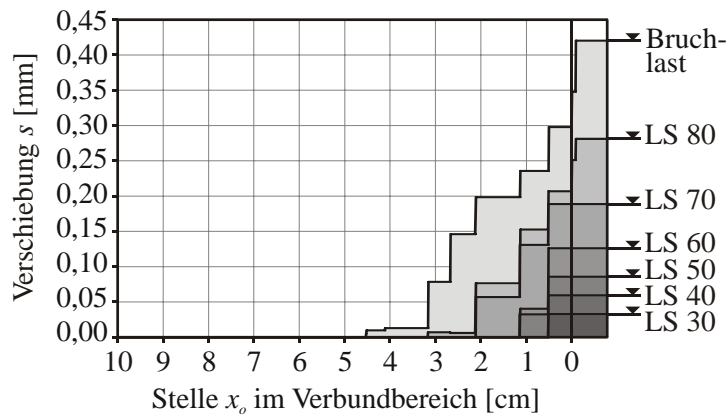


Bild A 5.3.5 Relativverschiebungen für das Profil 3 für jede zehnte Laststufe

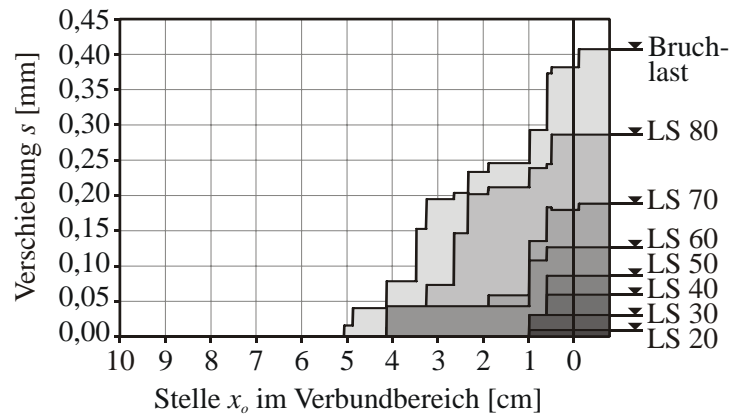


Bild A 5.3.6 Relativverschiebungen für das Profil 4 für jede zehnte Laststufe

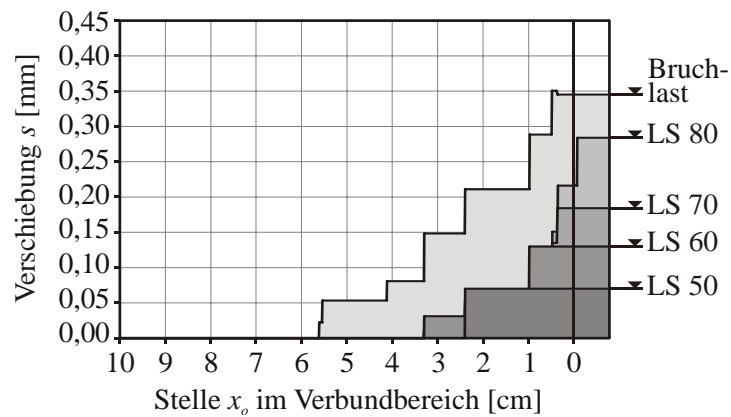


Bild A 5.3.7 Relativverschiebungen für das Profil 5 für jede zehnte Laststufe

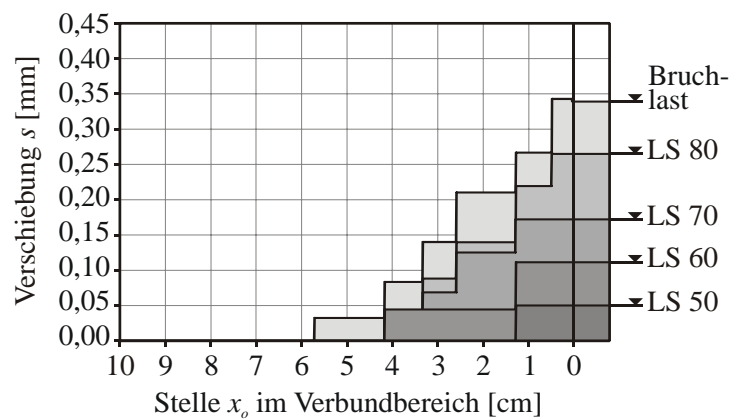


Bild A 5.3.8 Relativverschiebungen für das Profil 6 für jede zehnte Laststufe

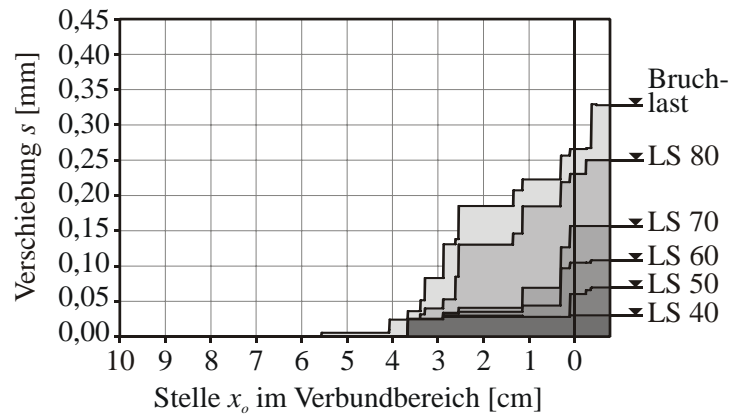


Bild A 5.3.9 Relativverschiebungen für das Profil 7 für jede zehnte Laststufe

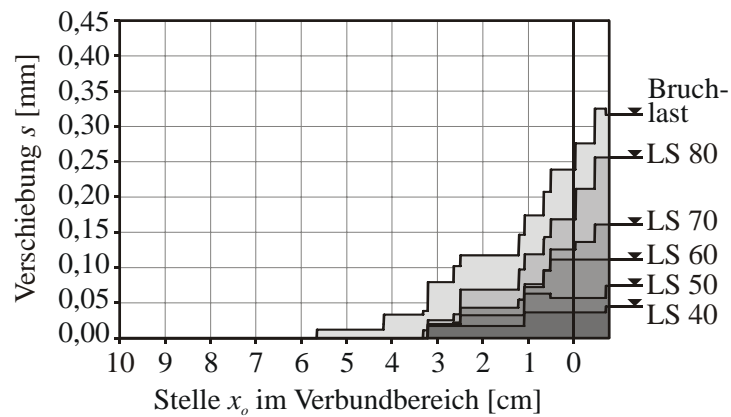


Bild A 5.3.10 Relativverschiebungen für das Profil 8 für jede zehnte Laststufe

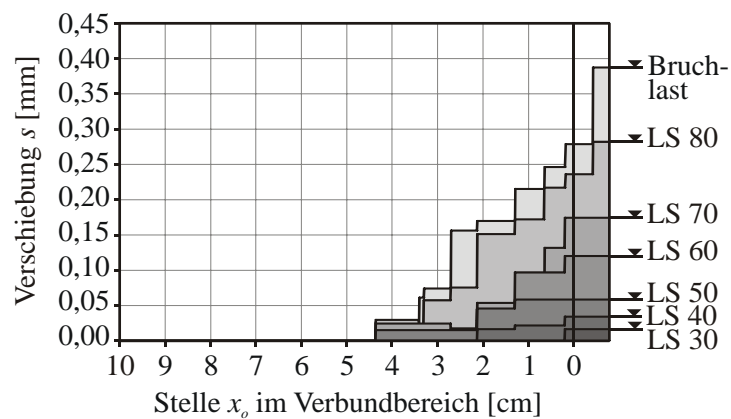


Bild A 5.3.11 Relativverschiebungen für das Profil 9 für jede zehnte Laststufe

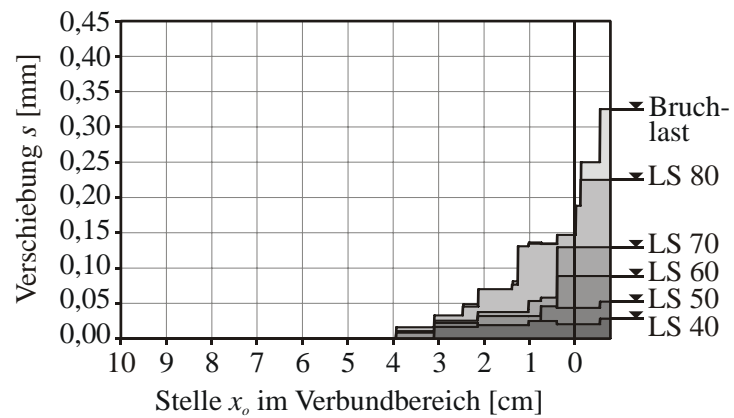


Bild A 5.3.12 Relativverschiebungen für das Profil 10 für jede zehnte Laststufe

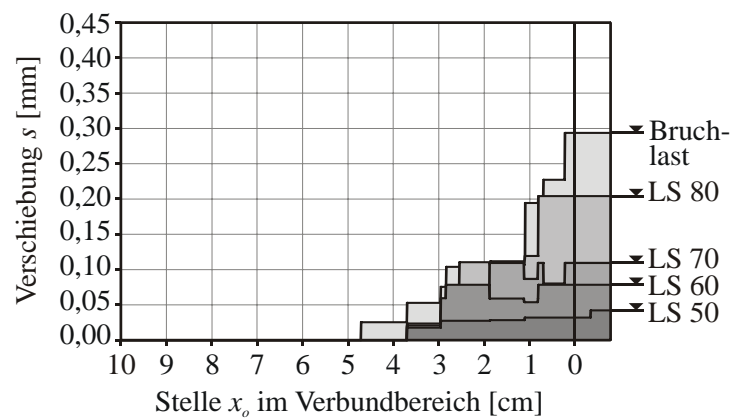


Bild A 5.3.13 Relativverschiebungen für das Profil 11 für jede zehnte Laststufe

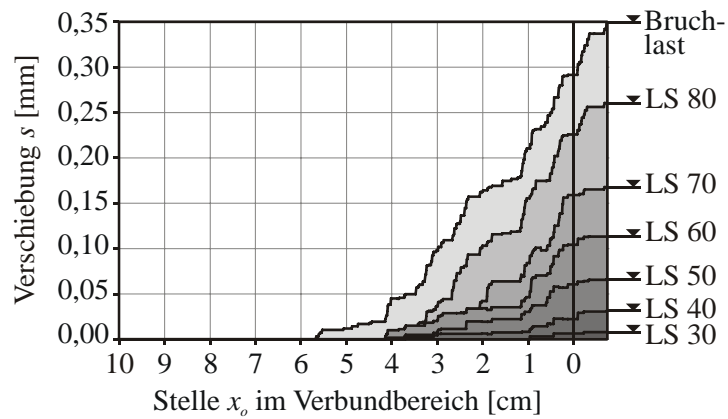


Bild A 5.3.14 Relativverschiebungen aller Profile überlagert für jede zehnte Laststufe

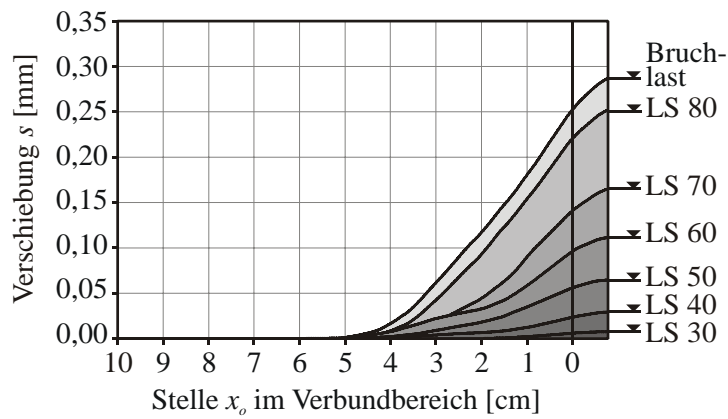


Bild A 5.3.15 Relativverschiebungen aller Profile überlagert und geglättet für jede zehnte Laststufe

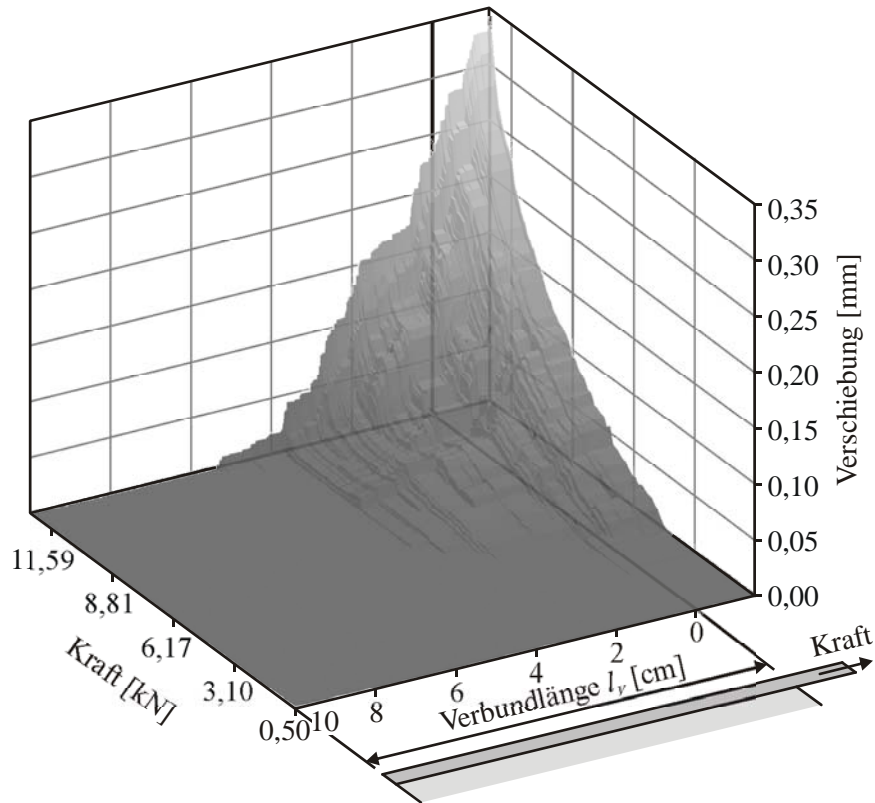


Bild A 5.3.16 Relativverschiebungen aller Profile überlagert über alle Laststufen

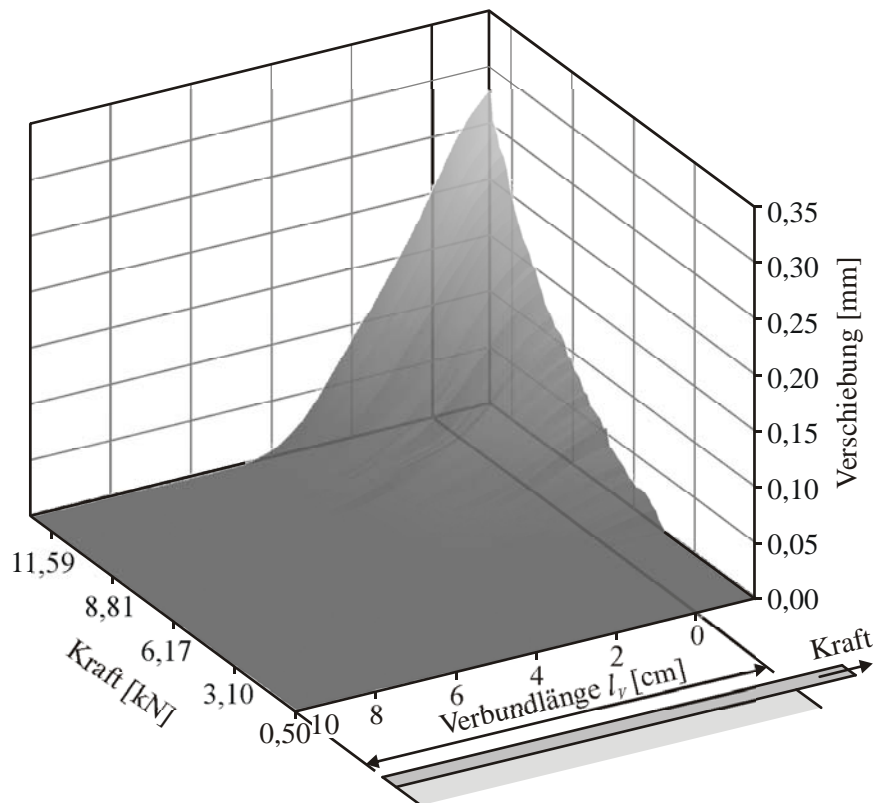


Bild A 5.3.17 Relativverschiebungen aller Profile überlagert und geglättet über alle Laststufen

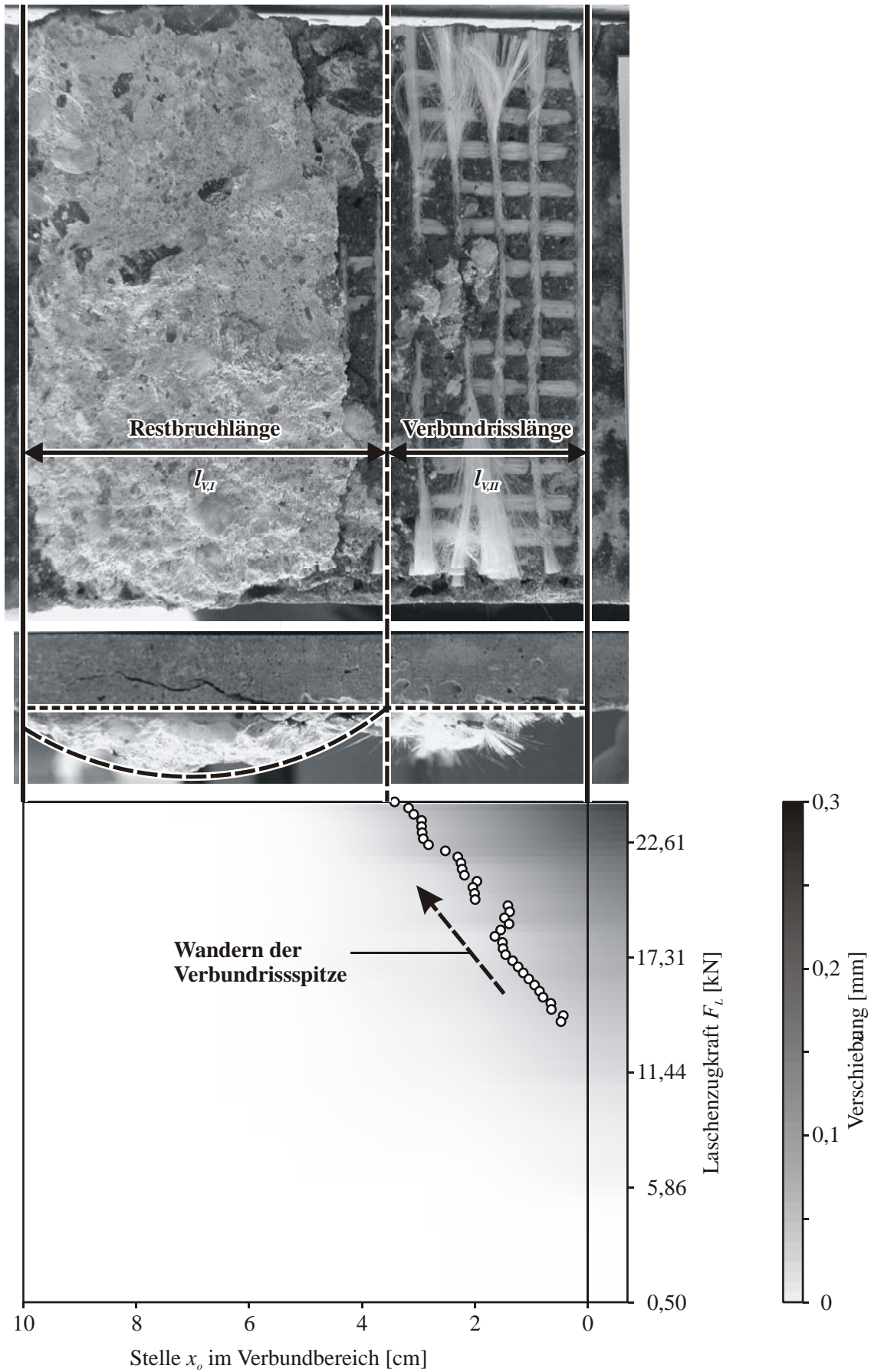


Bild A 5.3.18 Bruchbild und Relativverschiebung über alle Laststufen mit Markierung der Verbundrissspitze (unterer Schwellwert der Verformung)