

Diploma Thesis

# **Investigations on the influence of different surface textures on the bond behaviour of textile reinforced concrete**

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

---

DIPLOMARBEIT

## **Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Oberflächen- beschaffenheiten auf das Verbundverhalten von Textilbeton**

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

von

**Anja Fleischhacker, BSc**

Matr.Nr.: 1107253

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Johann Kollegger**

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Philipp Preinstorfer**

Institut für Tragkonstruktionen  
Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/212, A-1040 Wien

Wien, im April 2022

---

FÜR KATHARINA GARTNER

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johann Kollegger bedanken, dass ich meine Diplomarbeit am Institut für Tragkonstruktionen im Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau durchführen durfte.

Herzlichen Dank möchte ich Herrn Dipl. Ing. Dr. techn. Philipp Preinstorfer aussprechen, für die Möglichkeit meine Diplomarbeit in seinem Forschungsgebiet durchführen zu dürfen und für sein entgegengebrachtes Vertrauen. Für seine Unterstützung bei der Vorbereitung und der Durchführung der Versuche, sowie bei der Erstellung der Arbeit und für seine gute Betreuung über die gesamte Bearbeitungszeit dieser Diplomarbeit.

Weiters möchte ich mich bei Herrn Dipl. Ing. Dr. techn. Johannes Kirnbauer für die Unterstützung bei der Betonage der Probekörper bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich beim gesamten Team des Forschungsbereichs Stahlbeton- und Massivbau bedanken, welches mir bei den Laborarbeiten stets freundlich zur Seite stand.

Besonders möchte ich mich bei Herrn Dott.mag. Marco Palma bedanken, für die Bereitstellung des 3D-Laserscanners und für die Einschulung zur Durchführung der Laserscans.

Außerdem möchte ich mich bei meinem Arbeitgeber Dipl. Ing. Martin Haferl bedanken, der mir die maximale Flexibilität während der Bearbeitungszeit meiner Diplomarbeit ermöglicht hat.

Größten Dank möchte ich meinen Eltern aussprechen, dafür dass sie mir das Studium finanziell ermöglicht haben und für ihre Geduld, ihr Verständnis und ihre bedingungslose Unterstützung über die gesamte Ausbildungszeit.

Ebenfalls großen Dank möchte ich meiner Schwester, meinen Freunden und meinen Studienkollegen aussprechen, ohne deren Hilfsbereitschaft, Verständnis und mentale Unterstützung eine erfolgreiche Vollendung des Studiums nicht möglich gewesen wäre.

## Kurzfassung

Textilbeton ist ein innovativer Baustoff, welcher eine sinnvolle Ergänzung zum klassischen Stahlbeton darstellt. Textile Bewehrung besitzt neben ihren hervorragenden mechanischen Eigenschaften eine hohe Korrosionsbeständigkeit. Dadurch kann die erforderliche Betondeckung auf einige wenige Millimeter reduziert werden, während die Tragfähigkeit und die Dauerhaftigkeit der Bauteile garantiert bleibt. Textilbewehrte Betonbauteile können somit schlanker, leichter und ressourceneffizienter gebaut werden.

Textile Bewehrung unterscheidet sich in ihrem Verbund- und Tragverhalten wesentlich von herkömmlicher Stahlbewehrung. Dies ist unter anderem auf die geometrische Form der textilen Bewehrung zurückzuführen. Aus diesem Grund wird seit mehr als zwei Jahrzehnten intensiv zum Verbundverhalten von Textilbewehrungen geforscht. Am Institut für Tragkonstruktionen an der TU Wien wurden dazu wichtige Forschungsbeiträge geleistet.

Im Zuge dieser Arbeit werden experimentelle Untersuchungen zum Verbundverhalten von textiler Bewehrung mit unterschiedlicher Geometrie und unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten durchgeführt. Die Versuche werden in Form von Ausziehversuchen an verschiedenen Carbonbewehrungen mit steifer Tränkung durchgeführt. Anhand der eigenen Versuche werden Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen ermittelt und die Verbundeigenschaften analysiert. Der Fokus der hier durchgeführten Versuche bezieht sich darauf, den Zusammenhang zwischen den einzelnen Einflussparametern auf die Verbundeigenschaften respektive dem Rissbildungsverhalten zu erkennen. Dazu wurden in einer vorangegangenen Diplomarbeit (Yanik 2021) dieselben Textilien bereits auf ihr Rissbildungsverhalten untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bindungsart der Textilien einen erheblichen Einfluss auf deren Verbundeigenschaften hat. Weiters wirkt sich eine zusätzliche Sandbeschichtung auf den Textilien vorteilhaft auf das Verbundverhalten aus. Die gewonnenen Ergebnisse dieser Diplomarbeit stimmen gut mit den Resultaten aus der vorangegangenen Diplomarbeit von Yanik (2021) überein.

# Abstract

Textile-reinforced concrete (TRC) is an innovative composite material, that usefully supplements the application areas of normal reinforced concrete. Textile reinforcement has excellent mechanical characteristics and a high corrosion resistance. For these reasons the required concrete cover in TRC-structures just takes a few millimeters, while the durability of such components is still guaranteed, thus allowing to build very slim, hence very lightweight and more resource efficient structures.

The textile reinforcement's bond and structural behavior differs from to conventional steel reinforcement due to the specific characteristics of the textile reinforcement. As lot of research into the bond behavior of textiles has therefore been conducted for the last two decades, with important research contributions also from the Institute of Structural Engineering at the University of Technology Vienna.

In the course of this master thesis, experimental investigations on the bond behavior of epoxy impregnated textile reinforcement with different geometries and surface textures were carried out using a pull-out-test setup. The tests allowed for the derivation of bond-slip relationships of the textiles and enable a comparison of their bond properties. The main objective of the investigation was to find correlations between individual geometric parameters and their influence on the bond properties and the cracking behavior of TRC. On the latter topic, Yanik (2021) conducted a study using the same textile reinforcements as in this thesis.

It can be shown that the type of binding of the textiles has a huge impact on the bond properties. Also an additional sand coating improves the bond behavior significantly. The results of this master thesis are in good accordance with the results of Yanik (2021).

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	1
<b>2 Textilbeton – Stand der Technik.....</b>	<b>3</b>
2.1 Textilbewehrung .....	3
2.1.1 Anforderungen .....	3
2.1.2 Herstellung.....	4
2.1.2.1 Fasern und Garne.....	4
2.1.2.2 Faserarten.....	5
2.1.2.3 Textile Halbzeuge .....	6
2.1.2.4 Imprägnierung .....	9
2.1.3 Charakterisierung der textilen Bewehrung.....	9
2.2 Feinkornbeton .....	11
<b>3 Verbundverhalten von bewehrtem Beton .....</b>	<b>13</b>
3.1 Allgemeines.....	13
3.2 Verbundmechanismen.....	13
3.3 Versagensmechanismen.....	15
3.4 Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung .....	17
3.5 Ausziehversuche .....	19
3.6 Einflussparameter auf das Verbundverhalten .....	22
3.6.1 Einflussparameter im Stahlbeton .....	22
3.6.2 Einflussparameter im Textilbeton.....	23
3.7 Rissbildungsverhalten in bewehrtem Beton .....	25
3.7.1 Rissbildungsverhalten im Stahlbeton.....	25
3.7.1.1 Rissverhalten am stahlbewehrten Dehnkörper.....	25
3.7.1.2 Längsrissbildung im Stahlbeton .....	27
3.7.2 Rissbildungsverhalten im Textilbeton.....	28
3.7.2.1 Rissverhalten am textilbewehrten Dehnkörper.....	28
3.7.2.2 Spaltrissbildung im Textilbeton.....	30
3.7.2.3 Modell zur Berechnung von Spaltzugkräften.....	31
<b>4 Experimentelle Untersuchungen .....</b>	<b>32</b>
4.1 Ziel der Untersuchungen .....	32
4.2 Versuchsprogramm .....	32
4.3 Materialien.....	34
4.3.1 Textile Bewehrung.....	34
4.3.1.1 Laserscans.....	35

4.3.1.2	Geometrische Beschreibung der Textilien .....	36
4.3.2	Beton .....	38
4.4	Versuchsaufbau .....	38
4.5	Herstellung der Probekörper .....	39
4.6	Versuchsdurchführung .....	41
4.7	Versuchsauswertung .....	42
4.7.1	Berücksichtigung von Fehlerquellen .....	43
<b>5</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>45</b>
5.1	Versuchsergebnisse .....	45
5.1.1	Vorbemerkungen .....	45
5.1.2	Serie Q142 .....	45
5.1.3	Serie Q95 .....	51
5.1.4	Serie Q85 .....	53
5.2	Diskussion der Ergebnisse .....	56
5.2.1	Vorbemerkung .....	56
5.2.2	Einfluss der Wirkrichtung .....	57
5.2.3	Einfluss der Verankerungslänge .....	60
5.2.4	Einfluss der Sandbeschichtung .....	62
5.2.5	Einfluss der geometrischen Form .....	63
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>68</b>
6.1	Zielsetzung .....	68
6.2	Schlussfolgerung der Ergebnisse .....	68
6.3	Zusammenhang mit den Ergebnissen aus Yanik (2021) .....	69
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>71</b>
<b>7</b>	<b>Anhang A .....</b>	<b>73</b>
7.1	Prüfserie Q 142–UB .....	74
7.2	Prüfserie Q 142–B .....	75
7.3	Prüfserie Q 95–UB .....	76
7.4	Prüfserie Q 95–B .....	77
7.5	Prüfserie Q 85–UB .....	78
7.6	Prüfserie Q 85–B .....	79
<b>8</b>	<b>Anhang B .....</b>	<b>80</b>
8.1	Prüfserie Q 142–UB .....	81
8.2	Prüfserie Q 142–B .....	97
8.3	Prüfserie Q 95–UB .....	101
8.4	Prüfserie Q 95–B .....	109
8.5	Prüfserie Q 85–UB .....	113
8.6	Prüfserie Q 85–B .....	122

# Abkürzungsverzeichnis

## Abkürzungen und Sonderzeichen

AR-Glas	Alkaliresistentes Glas
B	Beschichtet / Besandet
CSH-Phasen	Calcium-Silikat-Hydrat-Phasen
E-Modul	Elastizitätsmodul
EP	Epoxidharz
HM	high-modulus
HPC	High Performance Concrete (Hochleistungsbeton)
HT	high-tensile
K	Kettroving
KRB	Kraft-Rissöffnungs-Beziehung
MW	Maschenweite
PAN	Polyacrylnitril
Q	Faserquerschnittsfläche pro Meter
S	Schussroving
SBR	Styrol-Butadien-Copolymer
UB	Unbeschichtet / Unbesandet
VKSB	Verbundkraft-Schlupf-Beziehung
VSB	Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung

## Kleine lateinische Buchstaben

$b$	Breite des Rovingquerschnitts
$d_s$	Stabdurchmesser
$f_t$	Zugfestigkeit des Betonstahls
$f_y$	Streckgrenze des Betonstahls
$h$	Höhe bzw. Dicke des Rovingquerschnitts
$l_E$	Einleitungslänge
$l_b$	Verbundlänge
$s_{,u}$	gemessene Schlupfweite am unteren (lastzugewandten) Schlupfende
$s_{,o}$	gemessene Schlupfweite am oberen (lastabgewandten) Schlupfende
$s_m$	gemittelte Schlupfweite
$w_{max}$	maximale Rissbreite

## Große lateinische Buchstaben

$A_c$	Betonfläche
$A_s$	Bewehrungsfläche
$E_c$	Elastizitätsmodul des Betons
$E_s$	Elastizitätsmodul der Stahlbewehrung

$F_x$	Belastungskraft
$F_{max}$	maximale Versuchslast
$U$	Umfang
$U/A$	Umfang zu Fläche Verhältnis

## Griechische Buchstaben

$\alpha$	Druckstrebenwinkel
$\sigma$	Spannung
$\sigma_{c,s}$	Betonspannung in Höhe des Stahls
$\sigma_r$	Radialspannung
$\sigma_s$	Stahlspannung
$\sigma_{sr}$	Spannung bei Erstriss
$\sigma_t$	Textilspannung
$\sigma_\varphi$	Ringzugspannung
$\varepsilon$	Dehnung
$\varepsilon_{c,s}$	Betondehnung in Höhe des Stahls
$\varepsilon_s$	Stahldehnung
$\varepsilon_t$	Dehnung im Textil
$\eta$	Ausnutzung
$\tau_b$	Verbundspannung
$\varphi$	Neigungswinkel der Betondruckstrebe in Radialrichtung
$\Theta$	Neigungswinkel der Betondruckstrebe in Axialrichtung

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Schematische Darstellung eines Geleges (links) und eines Gewebes (rechts; Molter 2005).....	7
Abb. 2-2: Doppelt Trikot-Bindung, gegenlegig (zweimal links) und Trikot-Bindung mit Nadelversatz (zweimal rechts); Vorderseite (jeweils links) und Rückseite (jeweils rechts).....	8
Abb. 2-3: Laserscans des Kettrovings von solidian-GRID_Q95-CCE-38-E5 (links) und solidian-GRID_Q142-CCE-38-E5 (rechts); Seitenansicht (oben) und Untersicht (unten); .....	8
Abb. 2-4: Qualitative Spannungs-Dehnungsverläufe von Faser, Garn und Textil mit und ohne Beschichtung (Cherif 2011).....	11
Abb. 3-1: Schematische Darstellung der lokalen Verbundkraftübertragung bei wirkendem Formverbund bei gerippter Stahlbewehrung (links; Zilch und Zehetmaier 2010) und textiler Bewehrung (rechts; in Anlehnung an Preinstorfer 2019) .....	14
Abb. 3-2: Schematische Darstellung eines Sprenggrissversagens (links) und eines Ausziehversagens (rechts) im Stahlbeton (Lettow 2006).....	16
Abb. 3-3: Spaltrissversagen an einem textilbewehrten Träger (Preinstorfer 2019) .....	16
Abb. 3-4: Verbundmodell für Stahlbeton nach Fib 2013 (links); Verbundmodell für Textilbeton nach Richter 2005 (rechts; in Anlehnung an Preinstorfer 2019) .....	18
Abb. 3-5: Qualitative Darstellung von VSB von Bewehrungsstahl und Textil (links; Preinstorfer 2019); typischer VSB-Verlauf eines Auszieh- und eines Sprenggrissversagens von Textilbeton (rechts; Preinstorfer 2019) .	19
Abb. 3-6: Versuchsaufbau nach RILEM (Zilch und Zehetmaier 2010).....	20
Abb. 3-7: Versuchsaufbau nach Lorenz (Lorenz 2014).....	21
Abb. 3-8: Versuchsaufbau nach Bielak (Bielak et al. 2018).....	21
Abb. 3-9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Stahlbeton (in Anlehnung an Zilch und Zehetmaier 2010).....	25
Abb. 3-10: Dehnungs- und Spannungsverläufe im Bereich von Trennrissen (Wommelsdorff 2002) .....	26
Abb. 3-11: Risszustand im gestörten und ungestörten Verbund (Leonhardt und Mönnig 1986).....	26
Abb. 3-12: Fachwerkmodell (links); Verlauf der Ringzugspannungen (rechts; in Anlehnung an Auer 2014).....	27
Abb. 3-13: Darstellung der Ausbildung von Schubrissen in Abhängigkeit des Rippenabstands (Auer 2014) .....	28
Abb. 3-14: Qualitativer Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie eines Dehnkörperversuchs aus Textilbeton mit steif getränkter Bewehrung (in Anlehnung an Kulas 2013) .....	29
Abb. 3-15: Detailbereich der Rissbildungsphase IIa einer Spannungs-Dehnungs-Linie eines textilbewehrten Betonzugstabs (in Anlehnung an Kulas 2013) .....	30
Abb. 3-16: Längsrissbildung in einem Dehnkörperversuch (Preinstorfer 2019) .....	30
Abb. 4-1: Bezeichnungsschema .....	33
Abb. 4-2: Laserscanner mit Messarm (links); Handstück (rechts).....	36
Abb. 4-3: Ansicht der Textilien in der Software MeshLab: digitale Punktwolke (links); digitales 3D-Modell (rechts).....	36
Abb. 4-4: Laserscan von Q142 (links) und Q95 (rechts); Kettrovings in unterer Lage .....	37
Abb. 4-5: Laserscans von Q85 unbesandet (links) und besandet (rechts); Untersicht; die Kettrovings befinden sich in der unteren Lage .....	37
Abb. 4-6: Darstellung des verwendeten Versuchsaufbaus in Anlehnung an RILEM .....	39
Abb. 4-7: Prüfkörper mit Verbundlänge einer Maschenweite (links) und zwei Maschenweiten (rechts).....	40
Abb. 4-8: Fertige Prüfkörper der Serien Q95 und Q85 .....	41
Abb. 4-9: Prüfmaschine mit gelagertem Prüfkörper (links); Prüfkörper inkl. Wegaufnehmer (rechts).....	41
Abb. 4-10: Lastzugewandter Wegaufnehmer (links); lastabgewandter Wegaufnehmer (rechts).....	42
Abb. 5-1: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q142-1MW-UB-K.....	45
Abb. 5-2: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q142-1MW-UB-S .....	47
Abb. 5-3: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q142-2MW-UB-K.....	48
Abb. 5-4: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q142-2MW-UB-S .....	49
Abb. 5-5: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q142-1MW-B-S .....	50
Abb. 5-6: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q95-1MW-UB-K.....	51
Abb. 5-7: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q95-1MW-UB-S .....	52
Abb. 5-8: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q95-1MW-B-K .....	53

Abb. 5-9: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q85-2MW-UB-K.....	54
Abb. 5-10: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q85-2MW-UB-S .....	55
Abb. 5-11: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q85-2MW-B-K .....	56
Abb. 5-12: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-1MW-UB-K und Q142-1MW-UB-S .....	57
Abb. 5-13: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-2MW-UB-K und Q142-2MW-UB-S .....	58
Abb. 5-14: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q95-1MW-UB-K und Q95-1MW-UB-S .....	58
Abb. 5-15: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q85-2MW-UB-K und Q85-2MW-UB-S .....	59
Abb. 5-16: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-1MW-UB-K und Q142-2MW-UB-K .....	60
Abb. 5-17: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-1MW-UB-S und Q142-2MW-UB-S.....	61
Abb. 5-18: Gemittelte VSB (lastzugewandt) aller beschichteten Reihen im Vergleich zu ihren unbeschichteten Konfigurationen .....	62
Abb. 5-19: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-1MW-B-S, Q95-1MW-B-K und Q85-2MW-B-K .....	63
Abb. 5-20: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-1MW-UB-K, Q95-1MW-UB-K und Q85-2MW-UB-K .....	63
Abb. 5-21: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-1MW-UB-S, Q95-1MW-UB-S und Q85-2MW-UB-S.....	64
Abb. 5-22: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-2MW-UB-K und Q85-2MW-UB-K .....	65
Abb. 5-23: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-2MW-UB-S und Q85-2MW-UB-S.....	65
Abb. 5-24: Laserscan eines Kettrovings Q85-2MW-UB-K, Seitenansicht.....	66
Abb. 5-25: Laserscan der Kettrovings Q142-1MW-UB-K (links) u. Q95-1MW-UB-K (rechts); Seitenansicht..	66
Abb. 5-26: Foto eines Kettrovings Q142-2MW-UB-K nach Versagen .....	66
Abb. 5-27: Laserscan der Schussrovings Q142-1MW-UB-S (links) und Q95-1MW-UB-S (rechts); Draufsicht (oben) und Untersicht (unten) .....	67
Abb. 7-1: Kettroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal.....	74
Abb. 7-2: Schussroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal .....	74
Abb. 7-3: Seitenansicht Kettroving (links), Schussroving (rechts) .....	74
Abb. 7-4: Draufsicht Kettroving (links), Schussroving (rechts) .....	74
Abb. 7-5: Untersicht Kettroving (links), Schussroving (rechts).....	74
Abb. 7-6: Kettroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal.....	75
Abb. 7-7: Schussroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal .....	75
Abb. 7-8: Seitenansicht Kettroving (links), Schussroving (rechts) .....	75
Abb. 7-9: Draufsicht Kettroving (links), Schussroving (rechts) .....	75
Abb. 7-10: Untersicht Kettroving (links), Schussroving (rechts).....	75
Abb. 7-11: Kettroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal.....	76
Abb. 7-12: Schussroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal .....	76
Abb. 7-13: Seitenansicht Kettroving (links), Schussroving (rechts) .....	76
Abb. 7-14: Draufsicht Kettroving (links), Schussroving (rechts) .....	76
Abb. 7-15: Untersicht Kettroving (links), Schussroving (rechts).....	76
Abb. 7-16: Kettroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal.....	77
Abb. 7-17: Schussroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal .....	77
Abb. 7-18: Seitenansicht Kettroving (links), Schussroving (rechts) .....	77
Abb. 7-19: Draufsicht Kettroving (links), Schussroving (rechts) .....	77
Abb. 7-20: Untersicht Kettroving (links), Schussroving (rechts).....	77
Abb. 7-21: Kettroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal.....	78
Abb. 7-22: Schussroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal .....	78
Abb. 7-23: Seitenansicht Kettroving (links), Schussroving (rechts) .....	78
Abb. 7-24: Draufsicht Kettroving (links), Schussroving (rechts) .....	78
Abb. 7-25: Untersicht Kettroving (links), Schussroving (rechts).....	78
Abb. 7-26: Kettroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal.....	79
Abb. 7-27: Schussroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal .....	79
Abb. 7-28: Seitenansicht Kettroving (links), Schussroving (rechts) .....	79
Abb. 7-29: Draufsicht Kettroving (links), Schussroving (rechts) .....	79
Abb. 7-30: Untersicht Kettroving (links), Schussroving (rechts).....	79
Abb. 8-1: solidian-GRID_Q142-CCE-38-E5; Vorderseite (links) und Rückseite (rechts); .....	81
Abb. 8-2: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine.....	82
Abb. 8-3: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert) .....	82
Abb. 8-4: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts) .....	82
Abb. 8-5: Abgescherter Faserstrang im geöffneten Versuchskörper .....	83
Abb. 8-6: Geöffneter Versuchskörper: abgescherter Testroving (links); abgescherter Querroving (rechts).....	83
Abb. 8-7: Abgescherter Faserstrang im geöffneten Versuchskörper .....	84
Abb. 8-8: Abgescherter Faserstrang im geöffneten Versuchskörper .....	84

Abb. 8-9: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine.....	85
Abb. 8-10: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert) .....	85
Abb. 8-11: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts) .....	86
Abb. 8-12: Spaltriss am Versuchskörper (links); geöffneter Versuchskörper (rechts).....	86
Abb. 8-13: Herausgezogener Roving (links); geöffneter Versuchskörper (rechts) .....	87
Abb. 8-14: Gespaltener Faserstrang (rechts); herausschauendes Faserstrangende nach Versagen (mittig); zerstörter Faserstrang im Verbundbereich (rechts).....	87
Abb. 8-15: Verbundbereich und Bruchstelle des Rovings im geöffneten Versuchskörper .....	88
Abb. 8-16: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine.....	89
Abb. 8-17: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert) .....	89
Abb. 8-18: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts) .....	90
Abb. 8-19: Versagter Versuchskörper (links); verankertes Rovingstück nach Versagen (rechts) .....	90
Abb. 8-20: Schlupf im Einspannrohr; Abscherung des geschlüoften Faserstrangs; Verbundbereich im geöffneten Betonkörper: Längsroving und Querrovings (von links nach rechts).....	91
Abb. 8-21: Schlupf am herausschauenden Rovingende (links); Schlupf im Einspannrohr (mittig); abgescherter Längsroving (rechts) .....	91
Abb. 8-22: Versagter Prüfkörper (links); Verbundbereich (mittig); Schulpf im Einspannrohr (rechts) .....	92
Abb. 8-23: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine.....	93
Abb. 8-24: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert) .....	93
Abb. 8-25: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts) .....	94
Abb. 8-26: Spaltriss am Probekörper (links); abgescherter Prüfroving in Endlage (rechts) .....	94
Abb. 8-27: Versagensbild des Prüfkörpers (links); gespaltener Roving (mittig); rekonstruierter Roving (rechts) .....	95
Abb. 8-28: Spaltriss am Probekörper (links); Abgescherter Roving (rechts).....	95
Abb. 8-29: zerstörter Faserstrang (links); Bruchstelle (rechts) .....	96
Abb. 8-30: solidian-ANTICRACK_Q142-CCE-38-E5; Vorderseite (links) und Rückseite (rechts); .....	97
Abb. 8-31: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine.....	98
Abb. 8-32: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert) .....	98
Abb. 8-33: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts) .....	98
Abb. 8-34: Spaltriss am Probekörper (links); abgescherter Prüfroving (rechts) .....	99
Abb. 8-35: Spaltriss am Probekörper (links); abgescherter Prüfroving (rechts) .....	99
Abb. 8-36: Spaltriss am Probekörper .....	100
Abb. 8-37: Spaltriss am Probekörper (links); abgescherter Prüfroving (rechts) .....	100
Abb. 8-38: solidian-GRID_Q95-CCE-38-E5; Vorderseite (links) und Rückseite (rechts); .....	101
Abb. 8-39: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine.....	102
Abb. 8-40: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert) .....	102
Abb. 8-41: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts) ...	102
Abb. 8-42: Übersicht der Versagensursachen der Versuchskörper .....	103
Abb. 8-43: Abscherung im Verbundbereich (links); Bruchstelle beim Einspannrohr (rechts) .....	103
Abb. 8-44: Zerstörter Roving im Verbundbereich: Vorderseite (links) und Rückseite (rechts) .....	104
Abb. 8-45: Spaltriss am Probekörper (links); abgescherter Roving (rechts).....	104
Abb. 8-46: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine.....	105
Abb. 8-47: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert) .....	105
Abb. 8-48: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts) ...	106
Abb. 8-49: Übersicht der Versagensursachen der Versuchskörper .....	106
Abb. 8-50: Bruchstelle an der Einspannstelle (links); abgescherter Rückseite (mittig) und Vorderseite (rechts) des Prüfrovings.....	107
Abb. 8-51: Gespaltener Faserstrang (links); Faserstrangbruchstücke aus dem Verbundbereich (mittig und rechts) .....	107
Abb. 8-52: Spaltriss am Probekörper (links); Bruchstelle an der Einspannstelle (mittig); abgescherter Roving im Verbundbereich (rechts).....	108
Abb. 8-53: solidian-GRID_Q95-CCE-38-E5; Vorderseite (links) und Rückseite (rechts); .....	109
Abb. 8-54: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine.....	110
Abb. 8-55: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert) .....	110
Abb. 8-56: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts) ...	110
Abb. 8-57: Übersicht der Versagensursachen der Versuchskörper .....	111
Abb. 8-58: Abgescherter Längs-und Querroving im geöffneten Versuchskörper.....	111
Abb. 8-59: Abgescherter Längs-und Querroving im geöffneten Versuchskörper.....	112
Abb. 8-60: Abgescherter Prüfroving (links); abgescherter Sand-Harz-Beschichtung (rechts).....	112
Abb. 8-61: solidian-GRID_Q95-CCE-38-E5; Vorderseite (links) und Rückseite (rechts); .....	113
Abb. 8-62: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine.....	114
Abb. 8-63: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert) .....	114

Abb. 8-64: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts) ...	114
Abb. 8-65: Übersicht der Versagensursachen der Versuchskörper .....	115
Abb. 8-66: Zerstörter Testroving: Oberseite (links) und Unterseite (rechts) .....	115
Abb. 8-67: erster Bruch des Prüfrovings (links); zweiter Bruch des Prüfrovings (mittig); Vorder- und Rückseite des Prüfrovings (rechts).....	116
Abb. 8-68: Verbundbereich im geöffneten Versuchskörper (links) .....	117
Abb. 8-69: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine.....	118
Abb. 8-70: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert) .....	118
Abb. 8-71: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts) ...	119
Abb. 8-72: Übersicht der Versagensursachen der Versuchskörper .....	119
Abb. 8-73: Bruchstelle des Faserstrangs (links); Vorderseite (mittig) und Rückseite (rechts) des Textils im Verbundbereich .....	120
Abb. 8-74: Bruchstelle des Faserstrangs (links); Vorderseite (mittig) und Rückseite (rechts) des Textils im Verbundbereich .....	120
Abb. 8-75: Bruchstelle des Faserstrangs (links); Vorderseite (mittig) und Rückseite (rechts) des Textils im Verbundbereich .....	121
Abb. 8-76: solidian-GRID_Q95-CCE-38-E5; Vorderseite (links) und Rückseite (rechts); .....	122
Ab;b. 8-77: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine .....	123
Abb. 8-78: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert) .....	123
Abb. 8-79: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts) ...	123
Abb. 8-80: Übersicht der Versagensursachen der Versuchskörper .....	124
Abb. 8-81: Bruchstelle am Einspannrohr (links); Abgescherter Querroving (rechts) .....	124
Abb. 8-82: Bruchstelle an der Einspannstelle (links); Bruchstelle im Hohlrohr (mittig); Abgescherter Querroving (rechts).....	125
Abb. 8-83: Bruchstelle an der Einspannstelle (links); Bruchstelle im Verbundbereich (mittig); Abgescherter Querroving (rechts) .....	125

# Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Mechanische Eigenschaften verschiedener Materialien (auf Basis von Burtscher 2013, Burtscher 2019, Kolleger 2014).....	6
Tab. 4-1: Übersicht der durchgeführten Versuche .....	33
Tab. 4-2: geometrische Kenngrößen (solidian 2018).....	34
Tab. 4-3: mechanische Kenngrößen (solidian 2018).....	35
Tab. 4-4: Aus den Laserscans ermittelte geometrische Kenngrößen der Textiltypen .....	35
Tab. 4-5: Betonzusammensetzung .....	38
Tab. 4-6: Betonfestigkeiten der Betonchargen.....	40
Tab. 4-7: Gegenüberstellung der E-Modul-Werte aus den Herstellerangaben <i>solidian</i> (2018) und den Messwerten aus Yanik (2021) .....	44
Tab. 5-1: Gegenüberstellung der mittleren Bruchspannung aus den Versuchen der Reihe Q85-2MW-B-K mit den Herstellerangaben Q85-CCE-21-E5 (solidian 2018) .....	56
Tab. 7-1: Geometrische Größen aus den Scans ermittelt .....	74
Tab. 7-2: Geometrische Größen aus den Scans ermittelt .....	75
Tab. 7-3: Geometrische Größen aus den Scans ermittelt .....	76
Tab. 7-4: Geometrische Größen aus den Scans ermittelt .....	77
Tab. 7-5: Geometrische Größen aus den Scans ermittelt .....	78
Tab. 7-6: Geometrische Größen aus den Scans ermittelt .....	79
Tab. 8-1: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q142-1MW-UB-K.....	81
Tab. 8-2: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q142-1MW-UB-S .....	85
Tab. 8-3: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q142-2MW-UB-K.....	89
Tab. 8-4: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q142-2MW-UB-S .....	93
Tab. 8-5: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q142-1MW-B-S .....	97
Tab. 8-6: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q95-1MW-UB-K.....	101
Tab. 8-7: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q95-1MW-UB-S .....	105
Tab. 8-8: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q95-1MW-B-K .....	109
Tab. 8-9: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q85-2MW-UB-K.....	113
Tab. 8-10: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q85-2MW-UB-S .....	118
Tab. 8-11: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q85-2MW-B-K .....	122

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Motivation

Textilbeton ist eine innovative Weiterentwicklung des herkömmlichen Stahlbetons und soll zukünftig eine Alternative zu Stahlbeton bieten, beziehungsweise den Stahlbetonbau sinnvoll ergänzen. Wie der konventionelle Baustoff Stahlbeton ist auch Textilbeton ein Verbundwerkstoff aus Beton und Bewehrung. Dabei bestehen textile Bewehrungen aus Faserbündeln geeigneten Materials, die nach Verarbeitung als Bewehrungsglieder im Beton eingesetzt werden können. Die Eigenschaften von textiler Bewehrung sind den Eigenschaften von konventioneller Stahlbewehrung in vielen Aspekten überlegen, sodass Textilbewehrung die Bezeichnung Hochleistungsbewehrung verdient. Aufgrund der hervorragenden mechanischen Eigenschaften von textiler Bewehrung, kann der Bewehrungsquerschnitt im Vergleich zu Betonstahlbewehrung um ein Vielfaches reduziert werden. Die große Besonderheit von textiler Bewehrung ist jedoch, dass die Faserbewehrung chemisch inert ist, was eine hohe Korrosionsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit der Textilien garantiert. Somit kann auf eine hohe Betondeckung verzichtet werden, was einen Wechsel zu einer schlanken, leichten und ressourcenschonenden Betonbauweise ermöglicht. Das derzeitige Einsatzgebiet von Textilbeton betrifft vor allem Sanierungs- und Verstärkungsmaßnahmen, sowie Verkleidungen, Fassaden oder leichte Bauwerke wie beispielsweise Fußgängerbrücken. Um den Textilbetonbau ein breiteres Einsatzgebiet in der Bauindustrie zu verschaffen, wird nun seit mehr als zwei letzten Jahrzehnten intensiv auf diesem Gebiet geforscht. Dabei steht unter anderem die Verbundwirkung von Beton und Textil im Fokus der Forschung. Aufgrund der speziellen Geometrie von Textilbewehrung, weist Textilbeton ein abweichendes Verbund- und Tragverhalten und folglich andersartige Versagensmuster auf als Stahlbeton (Preinstorfer 2019).

### 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, neue Erkenntnisse über das Verbundverhalten von textiler Bewehrung zu gewinnen, wobei im Speziellen die Geometrie einer neuen Generation an Textilbewehrungen und die Oberflächenbeschaffenheit im Fokus liegen. Im ersten Schritt wird dazu ein Überblick über Textilbewehrungen und deren technische und geometrische Eigenschaften mitsamt dem Hintergrund der Herstellungsprozesse geschaffen (Kapitel 2). Im zweiten Schritt werden die theoretischen Grundlagen der generellen Verbund- und Versagensmechanismen von Bewehrung und Beton erläutert und Einflussparameter auf das Verbundverhalten diskutiert. Zum besseren Verständnis des Verbundverhaltens von Bewehrung und Beton wird anschließend detailliert auf das Rissbildungsverhalten im Stahlbeton und im Textilbeton eingegangen (Kapitel 3). Den Hauptteil der Diplomarbeit bilden die experimentellen Untersuchungen zum Verbundverhalten von textiler Bewehrung (Kapitel 4). Die Untersuchungen beschränken sich dabei auf textile Carbonfaserbewehrungen mit einer steifen Tränkung aus Epoxidharz unter einaxialer Zugbeanspruchung. Es werden verschiedene Versuchsreihen in Form von Ausziehversuchen durchgeführt, wobei die untersuchten Textilien in der Faserquerschnittsfläche, der Verbundlänge und der Wirkrichtung

variieren. Darüber hinaus wird der Einfluss einer zusätzlichen Sandbeschichtung betrachtet. Im Vorfeld werden die zu untersuchenden Textilien mit einem Laserscanner vermessen und deren exakte geometrische Daten erhoben. Aus den Versuchen werden wiederum Verbundspannung-Schlupf-Beziehungen (VSB) ermittelt, welche anschließend für die Ergebnisinterpretation herangezogen werden (Kapitel 5). Dabei sollen Zusammenhänge zwischen den geometrischen Eigenschaften der textilen Faserstränge und ihren Verbundeigenschaften im Beton gefunden werden. Zu guter Letzt werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und darüber hinaus mit den Ergebnissen der vorangegangenen Diplomarbeit von Yanik (2021) zum Thema des Rissbildungsverhalten von Carbonbewehrung verglichen (Kapitel 6).

# Kapitel 2

## Textilbeton – Stand der Technik

Textilbeton ist wie Stahlbeton ein Verbundwerkstoff aus Beton und Bewehrung. Der Beton ist für die Lastaufnahme der Druckkräfte zuständig, während die Bewehrung für die Lastaufnahme der Zugkräfte verantwortlich ist. Diese wird bei einer einsetzenden Rissbildung nach dem Überschreiten der Betonzugfestigkeit des Betons aktiviert. Damit die Bewehrung die Kräfte aus dem Beton aufnehmen kann, muss ein einwandfreies Zusammenwirken von Beton und Bewehrung gewährleistet sein. Ein optimales Verbundverhalten der beiden Werkstoffe ist Voraussetzung dafür. Um die Wirkungsweise des Verbundes zwischen Beton und textiler Bewehrung besser verstehen zu können, werden im folgenden Kapitel die notwendigen Kenntnisse über die Ausgangsstoffe, den Herstellungsprozess, die Charakteristik von Textilbewehrung, sowie gebräuchliche Begriffsbestimmungen vermittelt.

### 2.1 Textilbewehrung

#### 2.1.1 Anforderungen

Unter Textilbewehrung versteht man Bewehrungselemente, die als Ausgangsprodukt Fasern aus geeigneten Materialien aufweisen und nach der Verarbeitung in unterschiedlichen Ausführungen als Zugelemente im Beton eingesetzt werden können. Die Ausgangsmaterialien und die daraus produzierten Endprodukte müssen dementsprechend die Anforderungen eines Bewehrungsmaterials erfüllen. Dafür kommen nur Werkstoffe mit geeigneten mechanischen Eigenschaften in Frage. Vorausgesetzt werden eine hohe Zugfestigkeit, hohe Dehnsteifigkeit, hohe Bruchdehnung, aber auch gute Verbundeigenschaften. Für den Betonbau sind weiters Alkalibeständigkeit, Korrosionsbeständigkeit sowie generell die Dauerhaftigkeit relevant. Zusätzlich sollen die Materialien eine hohe Temperaturbeständigkeit und Altersbeständigkeit aufweisen und möglichst wenig relaxieren (Curbach und Jesse 2009).

Da Textilbewehrung eine Alternative zu Stahlbewehrung darstellt, sind ökonomische und ökologische Aspekte von großer Bedeutung. Dabei ist zu beachten, dass Textilbewehrungen teuer und energieintensiv in der Herstellung sind, weshalb die hervorragenden Eigenschaften der Hochleistungsbewehrung maximal ausgenutzt werden sollten. Unter diesem Aspekt muss der gesamte Herstellungsprozess, der effiziente Einsatz in der Bauindustrie in Kombination mit den Vorteilen von schlanker, leichter und ressourcensparender Bauweise, die Dauerhaftigkeit, bis hin zu dessen Recyclierbarkeit in Betracht gezogen werden. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Tatsache, dass Textilbewehrung korrosionsbeständig ist und die Betondeckung folglich auf wenige Millimeter reduziert werden kann. Somit kann tonnenweise Beton und gleichzeitig überflüssiges Eigengewicht eingespart werden. Derzeit verfügbare Textilbewehrungen besitzen eine in etwa 6-mal so hohe Zugfestigkeit wie Stahl, sodass die Bewehrungsmenge in Bauteilen theoretisch auf ca. ein Sechstel reduziert werden kann. Praktisch werden in derzeit gültigen Regelwerken aufgrund der geringen Erfahrung sehr hohe Sicherheiten aufgeschlagen. Ganzheitlich betrachtet können mit

dieser Bewehrung viel Energie und Ressourcen gespart werden, was Chancen in Punkto Nachhaltigkeit bietet (Reichenbach et al. 2021).

Weitere Vorteile von textiler Bewehrung, sind aufgrund ihrer kleinen Bewehrungsquerschnittsflächen und ihrer geringen Dichte (etwa ein Viertel der Stahldichte), die damit verbundenen baupraktischen Vorteile, wie die einfache Handhabung auf der Baustelle und ein verringerter Transportaufwand, insbesondere bei Textilbeton-Fertigteilen (Kulas 2013).

Als Faserstoffe, welche weitgehendst die hohen Anforderungen an das innovative Bewehrungsmaterial erfüllen, sind Carbonfasern, Glasfasern, Aramidfasern und Basaltfasern erwähnenswert. Aramid- und Basaltfasern sind in Beton jedoch weniger dauerhaft, weswegen sich insbesondere Carbon- und alkaliresistente Glasfasern etabliert haben. Textilbewehrungen aus Carbon und AR-Glas stehen aktuell in internationalen Forschungsprojekten für Textilbewehrung im Fokus (z.B. Hegger, Kulas et al. 2011; Kulas 2013; Lorenz 2014; Preinstorfer 2019), um ihr zukünftig ein breites Anwendungsgebiet im Bauwesen zu verschaffen (Lorenz 2014; Preinstorfer 2019).

## 2.1.2 Herstellung

Textile Bewehrungsprodukte sowie auch ihre Ausgangsstoffe werden industriell und typengerecht hergestellt. Die Diversität von Textilprodukten sowie deren Herstellungsverfahren sind sehr vielfältig und auch die Bandbreite an Ausgangsstoffen und deren Verarbeitungsmöglichkeiten ist äußerst umfangreich. Aus diesem Grund bietet das nachfolgende Kapitel nur einen allgemeinen Einblick in die Herstellung von Textilbewehrung und fokussiert sich vorrangig auf die Endprodukte in Form von Carbon- und Glasfaserbewehrung.

### 2.1.2.1 Fasern und Garne

Grundsätzlich werden zuallererst in einem Primärspinnprozess Endlosfasern, sogenannte Filamente, aus den Rohstoffen gewonnen (siehe dazu Kapitel 2.1.2.2 Faserarten). Gleich im Anschluss wird den Filamenten eine Schlichte aufgetragen, welche die Fasern bei den folgenden Weiterverarbeitungsprozessen vor Filamentschädigungen schützen soll, und zugleich die Filamenteigenschaften positiv beeinflusst. Zudem soll sich die Schlichte positiv auf die Verbundwirkung der einzelnen Filamente auswirken (Krüger 2004).

Im nächsten Schritt werden aus den Filamenten Garne gebildet, indem die Endlosfasern zu Faserbündeln gebündelt werden. Während die Garne früher in einem weiteren Spinnverfahren mittels Verdrehens formschlüssig verbunden wurden, wurde dieses Verfahren vor einiger Zeit durch eine effektivere Verbindungstechnik ersetzt, da es durch das Verdrehen der Garne häufig zu unerwünschten Faserbrüchen und Faserschädigungen kam. Stand der Technik ist derzeit, dass der Faserverbund durch eine stoffschlüssige Fasertränkung sichergestellt wird (siehe dazu Kapitel 2.1.2.3. Imprägnierung).

Die früher als Bewehrung verwendeten ungetränkten, jedoch verdrehten Garne, zeigten ein ungünstiges Verbundverhalten im Beton auf. Während die äußeren Filamente unmittelbar im Beton eingebunden waren, lagen die inneren Filamente weitgehend in ungetränkter Form vor, da auch der feinste Zement nicht in die mikroskopisch kleinen Hohlräume zwischen den einzelnen Fasern eindringen kann. Die inneren Filamente wurden folglich nur auf Reibung beansprucht und es kam häufig zu vorzeitigem Versagen durch Faserauszug (Lorenz 2014).

Dem gegenüber stehen die heute verwendeten, effizienteren, voll getränkten Verbundgarne. Mit Augenmerk auf eine maximale Ausnutzung der hervorragenden mechanischen Eigenschaften der Fasern wird eine möglichst gestreckte Lage der Filamente bevorzugt (Krüger 2004). Aus diesem Grund werden die Filamente gestreckt und in weiterer Folge in einer Tränkungsmatrix auf

Kunststoffbasis eingebettet. Die getränkten Rovings weisen eine signifikant höhere Leistungsfähigkeit im Trag- und Verbundverhalten auf. Durch die Tränkungsmatrix werden beinahe alle Filamente gleichermaßen am Lastabtrag beteiligt und die textilen Endprodukte weisen nahezu dieselben mechanischen Eigenschaften wie die Faserelemente ihrer Ausgangsmaterialien auf (Preinstorfer 2019). Das gute Zusammenwirken der Fasern mit der Tränkungsmatrix bewirkt ebenso ein verbessertes Trag- und Verbundverhalten im Beton. Das frühzeitige Versagen durch Faserauszug kann damit weitestgehend ausgeschlossen werden. Für derartige Faserstränge hat sich im Bauwesen der Begriff *Roving* eingebürgert.

An dieser Stelle sei noch hinzuzufügen, dass die ungetränkten Garne erst nach der textilen Weiterverarbeitung in Kunststoff getränkt werden (siehe dazu Kapitel 2.1.2.3. Imprägnierung).

### 2.1.2.2 Faserarten

Das Angebot an textilen Fasern reicht von Natur- und Chemiefasern, bis zu Metall- und Keramikfasern. Neben den hohen Ansprüchen an Hochleistungsbewehrungen stellen die Rohstoff- und Herstellungskosten einen weiteren Entscheidungsfaktor zur Materialwahl dar. Für die Anwendung im Bauwesen haben sich vor allem Fasern aus Kohlenstoff (Carbon), Glas, Aramid und Basalt bewiesen. Aramid und Basalt sind im Beton jedoch weniger dauerhaft als Carbon und Glas, weshalb für das Bauwesen hauptsächlich Carbonfasern und Glasfasern relevant sind (Preinstorfer 2019).

#### Glasfasern

Glasfasern werden aus anorganischen Rohstoffen gewonnen. Die Zusammensetzung der Rohstoffe zielt auf die gewünschten Eigenschaften der Fasern ab. Das gängigste Herstellungsverfahren von Glasfasern entspricht dem Düsenziehverfahren. Dabei wird eine Mischung aus Quarzsand, Kalkstein und weiteren Oxiden in einem Ofen verschmolzen und die Schmelze über Düsen zu dünnen Filamenten abgezogen. Die Filamente werden rasch abgekühlt und gleich darauf mit einer Schlichte überzogen (Cherif 2011). Die Glasfasern weisen isotrope Materialeigenschaften auf und zeichnen sich durch eine hohe Festigkeit, Steifigkeit und Dauerhaftigkeit aus. Die Glasfasern sind allerdings gegen das alkalische Milieu im Beton unbeständig. Um diesen Nachteil zu kompensieren, wird das Glas mit Zirkonium angereichert. Durch diese Modifikation wird die Beständigkeit im Beton signifikant verbessert. Das daraus resultierende Glas wird als alkaliresistentes Glas (AR-Glas) bezeichnet. Durch die veränderte Glaszusammensetzung wird jedoch eine Verringerung der mechanischen Kennwerte in Kauf genommen (Preinstorfer 2019).

#### Carbonfasern

Carbon wird vorrangig aus Polyacrylnitril (PAN) gewonnen, kann aber auch aus Pech, Viskose oder Cellulose erzeugt werden. Die Ausgangsstoffe werden zu einem Precursor erspannen und durchlaufen anschließend eine Reihe chemischer Prozesse (Streckung, Stabilisierung, Carbonisierung, Graphitisierung). Bei der Herstellung kann man mittels Temperatur die erwünschten Eigenschaften der Kohlenstofffasern beeinflussen. Aus diesem Grund können Carbonfasern bezüglich ihrer Eigenschaften in mehrere Untergruppen sortiert werden. Die wichtigsten Gruppen stellen hochfeste HT-Fasern (high tensile) und hochsteife HM-Fasern (high modulus) dar. Durch den chemischen Aufbau der Kohlenstoffatome weisen die Fasern ein stark anisotropes Materialverhalten auf. In Längsrichtung besitzen die Fasern eine hohe Festigkeit und Steifigkeit. In Querrichtung reagieren die Fasern jedoch sehr empfindlich auf Biegung und Querdruck. Neben der hohen Festigkeit bei sehr geringer Dichte zeichnen sich Carbonfasern durch ihre Dauerhaftigkeit und Beständigkeit gegenüber Korrosion, chemischen Angriffen und hohen Temperaturen aus (Preinstorfer 2019).

In Tabelle 2-1 sind die Eigenschaften einiger nennenswerter Faserstoffe im Vergleich zu herkömmlichem Baustahl aufgelistet.

Tab. 2-1: Mechanische Eigenschaften verschiedener Materialien (auf Basis von Burtscher 2013, Burtscher 2019, Kolleger 2014)

Material	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Bruchdehnung [%]
Carbon HT	1,78	240.000	3.600	1,5
Carbon HM	1,76-1,96	300.000-500.000	1.750-3.200	0,35-1,0
AR-Glas	2,7	70.000-80.000	1.500-4.000	2-3,5
Aramid	1,45	130.000	2.900	2,1
Basalt	2,7	160.000	3.000	2,3
B550	7,86	200.000	550	3,15
HPC Beton	2,4	40.000-45.000	5	0,3

### 2.1.2.3 Textile Halbzeuge

Im Zuge der nächsten Verarbeitungsschritte werden die losen Faserbündel zu flächigen Strukturen weiterverarbeitet. Man spricht von textilen Halbzeugen. Wie einführend erwähnt, existiert eine Vielfalt an Varianten von diversen Strukturen und verschiedenen Herstellungsmöglichkeiten aus der Textilindustrie. Für das Bauwesen sind jedoch nicht alle von Interesse. Neben den bekanntesten Techniken in der Textilherstellung wie das Weben, Stricken, Flechten und Sticken, ist für den Einsatzbereich als Bewehrung hauptsächlich die Flächenbildung mittels Gewirken und Geweben relevant. Diese Techniken erfüllen eine Reihe an Anforderungen, die an die Hochleistungsbelegungen gestellt werden. In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit und den Erhalt der leistungsstarken Eigenschaften der Hochleistungsfasern muss bei der Herstellung der textilen Flächengebilde auf eine äußerst faserschonende und schädigungsarme Fertigung Rücksicht genommen werden. Weiters müssen für den Erhalt der hohen Zugfestigkeiten der Bewehrungselemente, die Faserscharen in möglichst gestreckter Form verarbeitet werden. Außerdem sollte die Flächenstruktur ausreichend offenmaschig sein, damit der Beton die textilen Bewehrungselemente später gut durchdringen kann (Preinstorfer 2019).

Es gilt zu bedenken, dass die Art der Herstellung auf geometrischer und mechanischer Basis Einfluss auf das spätere Verbundverhalten der Bewehrungsprodukte im Beton hat. In dieser Hinsicht liefern textile Gewirke bessere Ergebnisse als textile Gewebe. Prinzipiell teilen Gewirke und Gewebe einige Gemeinsamkeiten. Ihr Aufbau besteht aus parallel verlaufenden Fadenscharen, welche sich im Falle von Geweben immer und im Falle von Gewirken häufig, jedoch nicht zwangsläufig orthogonal kreuzen (Cherif 2004). Der für ihr Eignungsgebiet als Bewehrungsmaterial bedeutende Unterschied besteht aber darin, dass das Gewebe durch die Art des Webens viele Umlenkstellen in den Fasersträngen hervorruft. Die Rovings liegen somit in einer leicht gewellten Form vor, was sich negativ auf die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften als auch auf das Verbundverhalten auswirkt (Molter 2005; siehe Kapitel 3.6.2 – Einflussparameter im Textilbeton). Abbildung 2-1 stellt diesen Effekt anschaulich dar. Aus diesem Grund wird in weiterer Folge nur noch über gewirkte Halbzeuge gesprochen.

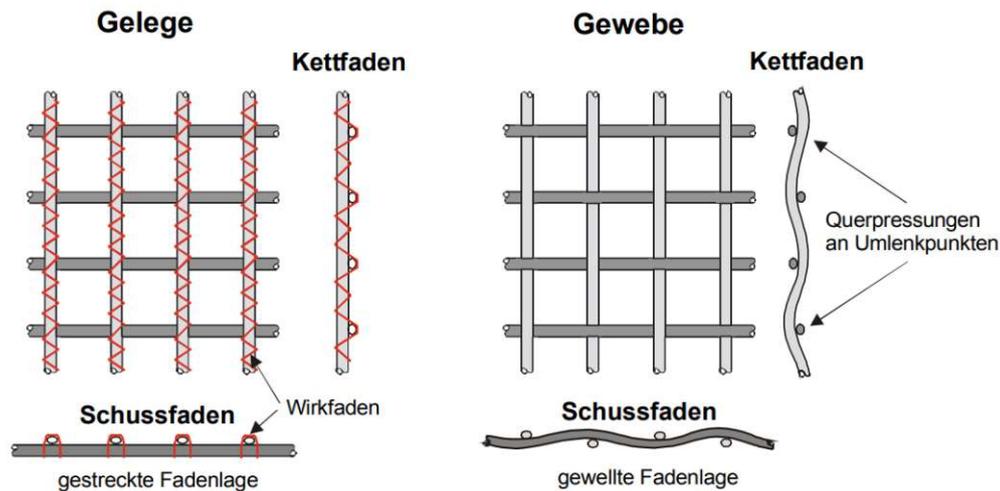


Abb. 2-1: Schematische Darstellung eines Geleges<sup>1</sup> (links) und eines Gewebes (rechts; Molter 2005)

Die Produktionsweise von gewirkten Halbzeugen bringt für deren Einsatz als Bewehrung wesentliche Vorteile mit sich. Zum Ersten lassen sich die Fadenscharen in unterschiedlichen Fadedichten und in beliebigen Winkeln zueinander verlegen und vernähen. Somit können stärkere und schwächere Rovings effizient in deren Beanspruchungsrichtung orientiert angeordnet werden. Zum Zweiten können die Verstärkungsfasern in gestreckter Form verarbeitet werden und so die Materialeigenschaften maximal ausgenutzt werden. Zum Dritten kann aufgrund ihrer vorteilhaften Konstruktion und dem Einsatz von konstruktionsgerechten Textilmaschinen die Faserschädigung geringgehalten werden (Krüger 2004).

Bei der Flächenbildung wird unter einaxialen, biaxialen und multiaxialen Gelegen unterschieden. Multiaxiale Gelege können sowohl als zweidimensionale als auch dreidimensionale Struktur hergestellt werden. Die prinzipielle Herstellungsmethode von textiler Bewehrung soll hier am Beispiel der für die Textilbewehrung bedeutendsten Form, dem biaxialen Gelege mit orthogonal zueinander verlaufenden Verstärkungsfasern, erklärt werden und kann sinngemäß auf ähnliche Formen übertragen werden. Die Produktion erfolgt für gewöhnlich industriell mittels sogenannter Kettenwirkmaschinen. Dabei werden Rovingscharen auf einer Verlegestation verlegt und maschinell durch einen Wirkfaden miteinander vernäht. Die in Produktionsrichtung verlaufenden Rovings werden als Kettrovings, und die quer verlaufenden Rovings als Schussrovings bezeichnet. Die Kettrovings werden mittels der Wirkfäden versteift und an den Kreuzungspunkten mit den Schussrovings verbunden. Im Zuge dessen kann durch gewisse Einstellungsparameter auf die späteren geometrischen und mechanischen Eigenschaften der Textilien und folglich auf die Verbundwirkung zwischen Textil und Beton Einfluss genommen werden. Zum Beispiel kann durch die Variation der Faserspannungen der Kett- und Schussrovings, als auch der Fadenspannung des Wirkfadens die Geometrie der zu fertigenden Textilien effektiv gestaltet werden (Krüger 2004).

Einen weiteren Effekt auf das Verbundverhalten hat die Bindungsart. Die zwei gängigsten Bindungsarten für Textilbewehrung sind die konventionelle Bindung Doppelt-Trikot, gegenlegig, nach konventionellem Nähwirkverfahren und die Bindung Trikot-Nadelbarrenversatz, gleichgerichtet, nach erweitertem Nähwirkverfahren mit versetzbarer Nadelbarre (Cherif et al. 2011). Die unterschiedlichen Bindungsarten sind in der Abbildung 2-2 auf Fotos der später in dieser Arbeit verwendeten Textilkonfigurationen *solidian GRID Q95-CCE-38-E5* (Doppelt-Trikot-Bindung, gegenlegig) und *solidian GRID Q142-CCE-38-E5* (Trikot-Bindung mit Nadelversatz) ersichtlich. In

<sup>1</sup> Der Ausdruck Gelege wird hier als Synonym für Gewirke verwendet. Ein Gewirke entspricht einem gewirkten Gelege und ist sozusagen eine Unterkategorie der Gelegearten.

Abbildung 2-3 sind zusätzlich Darstellungen der Laserscans (siehe Kapitel 4.3.1.1 – Laserscans) des Kettrovings der beiden Textilkonfigurationen abgebildet. Bei genauer Betrachtung erkennt man, dass die Textilien mit Bindung Doppelt-Trikot global betrachtet eine welligere Form aufweisen. Die Wirkfäden verursachen auf der Rückseite<sup>1</sup> der Kettrovings eine bauchige Form. Des Weiteren können sich die Kettrovings in Dicken- und Breitenrichtung im Feld aufweiten. Die Kettrovings der Textilien mit der Bindung Trikot-Nadelversatz weisen hingegen aufgrund der besseren Wirkfaden-Umwicklung der Kettrovings global betrachtet deutlich gleichmäßigere Faserstränge auf. Betrachtet man die Bindung Trikot-Nadelversatz lokal, das heißt z.B. eine Maschenweite, kann man erkennen, dass die vielfache Wirkfaden-Umwicklung des Kettrovings eine leichte Rippung innerhalb der Maschenweite verursacht. Das Thema der Rovinggeometrien wird später in der Arbeit nochmals aufgegriffen (siehe Kapitel 4.3.1.2 - Geometrische Beschreibung der Textilien). Im Anhang A befinden sich weitere Daten zur Geometrie der verwendeten Textilien.

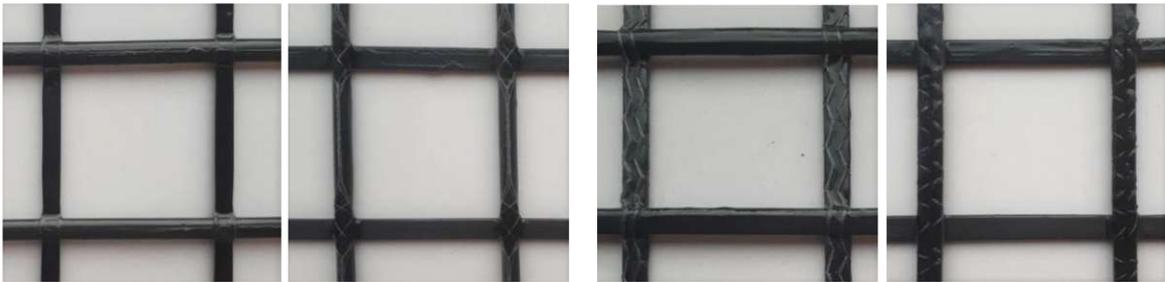


Abb. 2-2: Doppelt Trikot-Bindung, gegenlegig (zweimal links) und Trikot-Bindung mit Nadelversatz (zweimal rechts); Vorderseite (jeweils links) und Rückseite (jeweils rechts)

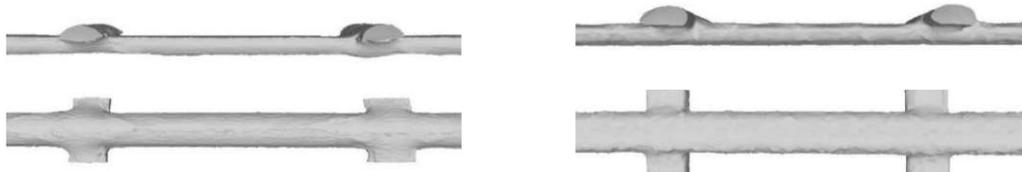


Abb. 2-3: Laserscans des Kettrovings von solidian-GRID\_Q95-CCE-38-E5 (links) und solidian-GRID\_Q142-CCE-38-E5 (rechts); Seitenansicht (oben) und Untersicht (unten);

### Definition der Oberseiten der Textilbewehrung

Da in der vorliegenden Arbeit die Geometrie der textilen Bewehrung eine wichtige Rolle spielt, wird später in der Arbeit noch häufig von geometrischen Merkmalen die Rede sein. Dazu ist die Einführung einer einheitlichen Definition sinnvoll. In Abbildung 2-1 sind die Schussrovings in der unteren Lage und die Kettrovings in der oberen Lage zu sehen. Dies entspricht der Lage während des Nähprozesses. Im nächsten Schritt, dem Tränkungsprozess, werden die textilen Matten in die umgekehrte Lage gewendet und dort ausgetrocknet, das heißt, nun befinden sich die Kettrovings in der unteren Lage und die Schussrovings in der oberen Lage. Anhand von tropfenförmigen Harzrückständen, die in dieser Phase durch die Schwerkraft entstehen, stellt sich eine Definition laut Endprodukt als sinnvoll heraus. Somit werden in der vorliegenden Arbeit die Schussrovings in oberer Lage, als Oberseite bzw. Vorderseite bezeichnet. Die Seite der Kettrovings wird infolgedessen als Unterseite bzw. Rückseite definiert.

<sup>1</sup> Die Vorderseite und Rückseite der Textilmatten wird in der vorliegenden Arbeit entsprechend der Definition der Autorin in Kapitel 2.1.2.3 - Textile Halbzeuge bezeichnet.

#### 2.1.2.4 Imprägnierung

Im Anschluss an die textile Flächenverarbeitung werden die textilen Halbzeuge in der bereits erwähnten Kunststofftränkung getränkt. Daraus ergibt sich ein neuer Verbundwerkstoff aus Fasern und Kunststoff, der die Vorteile der beiden Stoffe vereint. Die hohen Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften der Fasern werden durch den Kunststoff unterstützt, indem er die Hohlräume zwischen den Fasern ausfüllt und die Fasern untereinander kraftschlüssig verbindet, sie in ihrer gesteckten Lage stabilisiert und ihnen gleichzeitig Schutz und Dauerhaftigkeit bietet. Die Tränkung verleiht den Rovings eine wesentlich höhere transversale Steifigkeit, was sich auch vorteilhaft auf deren Biegesteifigkeit auswirkt und das Verbundverhalten positiv beeinflusst (Preinstorfer 2019).

Damit die Tränkungsmatrix die eben genannten Aufgaben erfüllen kann, werden an das Tränkungsmaterial einige Anforderungen gestellt. Um eine optimale Durchtränkung der Fasern zu garantieren, muss das Imprägnierungsmittel im flüssigen Zustand eine niedrige Viskosität aufweisen und äußerst gut in die Hohlräume zwischen den Fasern eindringen können. Außerdem soll das Matrixmaterial im erhärteten Zustand eine höhere Bruchdehnung als das Fasermaterial aufweisen (Preinstorfer 2019). Als Tränkungsmittel kommen üblicherweise Polymere zum Einsatz. Unter den Tränkungsmitteln lässt sich zwischen weichen und steifen Tränkungen differenzieren, welche sich in ihren Eigenschaften und ihren Anwendungsgebieten wesentlich unterscheiden. Im Folgenden wird je ein Vertreter eines weichen und eines steifen Tränkungsmittels vorgestellt, um die Unterschiede darzulegen.

Epoxidharz (EP) stellt das gängigste Imprägnierungsmittel für Textilbewehrung dar. Es zählt im erhärteten Zustand zu den Duroplasten und zeichnet sich durch eine sehr hohe Zugfestigkeit und Steifigkeit, hohe Zähigkeit, gute Haftung an diversen Faserarten, gute Wärmeformbeständigkeit und eine gute chemische Resistenz aus. Epoxidharz verleiht den Textilien eine sehr hohe Formstabilität was deren Verarbeitung auf der Baustelle erleichtert (Preinstorfer 2019).

Styrol-Butadien-Copolymer (SBR) repräsentiert eines der am weitest verbreiteten weichen Tränkungsmittel und zählt zu den Elastomeren. Es ist im ausgehärteten Zustand viel weniger steif als Epoxidharz. Die Textilien bleiben somit biegsam und formbar, was diesen getränkten Textilien andere Anwendungsgebiete als z.B. epoxidharzgetränkte Textilien beschafft. Es bietet sich an, die Bewehrungstextilien als Rollenware zu lagern (Preinstorfer 2019).

Die Textiltränkung erfolgt vorrangig mittels Imprägnierverfahren über einen Tauch-Quetschvorgang. Dabei werden die Textilien zuerst in das Imprägniermittel getaucht und anschließend durch ein Walzenpaar geleitet, welches das Imprägniermittel gleichmäßig in die Fasern quetscht und überschüssiges Tränkungsmaterial entfernt. Im Anschluss erhärtet das Imprägnierungsmaterial durch thermische Behandlung oder durch Lagerung bei Raumtemperatur (Cherif 2011).

Für bessere Verbundfähigkeiten wurden epoxidharzgetränkte Textilien mit einer zusätzlichen Quarzsandbeschichtung entwickelt. Dazu wird feiner Quarzsand in das noch nicht getrocknete Epoxidharz gestreut. Dies kann direkt nach dem Imprägnierprozess oder bei bereits ausgehärteten Textilien nach Aufbringen einer weiteren Epoxidharzschicht geschehen. Im ausgehärteten Zustand weisen die besandeten Textilien eine sehr raue Oberflächenbeschaffenheit und infolgedessen wesentlich bessere Verbundeigenschaften auf.

#### 2.1.3 Charakterisierung der textilen Bewehrung

Textile Bewehrung unterscheidet sich in ihrem Charakter maßgeblich von konventioneller Stahlbewehrung. Die technischen Eigenschaften der beiden Bewehrungsarten ähneln zwar einander, haben aber grundlegend verschiedene Hintergründe. Im Gegensatz zu Stahlbewehrung handelt es

sich bei Textilbewehrung um einen Zwei-Komponenten-Werkstoff aus Fasern und Kunststoff. Diese Tatsache macht die Bestimmung der Kennwerte komplizierter verglichen zu Stahl.

Bei der Ermittlung der geometrischen und mechanischen Kenngrößen muss zwischen Faseranteil und Kunststoffanteil differenziert werden. Während die Festigkeitseigenschaften vorrangig von der Fasermenge abhängen und die Kunststoffmatrix dazu keinen Beitrag leistet, hängen die Verbundeigenschaften hingegen ausschließlich vom Umfang des Gesamtproduktes ab. Aus diesem Grund wird eine separate Betrachtungsweise in Form eines Brutto- und Nettoquerschnitts herangezogen. Der Nettoquerschnitt umfasst ausschließlich die Querschnittsfläche der Fasern, während der Bruttoquerschnitt den Gesamtquerschnitt bestehend aus Faseranteil zuzüglich Kunststoffmatrix bezeichnet. Zur Ermittlung des Nettoquerschnitts wird der in der Textilherstellung übliche Kennwert der *Garnfeinheit* verwendet. Die *Feinheit* definiert die Masse des losen, ungetränkten Filamentgarns bezogen auf dessen Länge und wird in der Maßeinheit tex [1tex = 1g/1000m] angegeben. Somit ist die Größe der Feinheit physikalisch erfassbar (Cherif 2011).

$$\frac{\text{Masse [g]}}{\text{Länge [km]}} = \text{Feinheit [tex]}$$

Die Faserquerschnittsfläche bzw. Nettoquerschnittsfläche erhält man, indem man die Garnfeinheit auf die Faserdichte bezieht.

$$\frac{\text{Feinheit [tex]} * 10^3}{\text{Dichte [g/cm}^3]} = \text{Faserquerschnittsfläche [mm}^2]$$

Der Garnumfang, welcher am Bruttoquerschnitt ermittelt wird, hat auf die Verbundwirkung zwischen Textil und Beton einen wichtigen Einfluss. Da die Rovingquerschnitte aufgrund des Tränkens und Quetschens bei der Textilherstellung elliptische Formen aufweisen, sind die geometrischen Kenngrößen mathematisch nur schwer zu erfassen. In der Literatur lassen sich allerdings Näherungsformeln dafür finden (z.B. in Hausding 2010; Preinstorfer 2019).

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden die geometrischen Größen der untersuchten Textilien digital ermittelt. Dazu wurden die Textilien mit einem 3D-Laserscanner gescannt und anschließend digital ausgewertet, (siehe Kapitel 4.3.1.1 – Laserscans). Die mechanischen Größen der Zugfestigkeit und Steifigkeit werden mittels Zugversuchen an Garnen ermittelt. Die maximale Zugfestigkeit bzw. Bruchfestigkeit erhält man, indem man die maximal aufnehmbare Kraft (Bruchkraft) durch die Faserquerschnittsfläche (Nettoquerschnittsfläche) teilt (Preinstorfer 2019).

$$\frac{\text{Bruchkraft [N]}}{\text{Faserquerschnittsfläche [mm}^2]} = \text{Zugfestigkeit [MPa]}$$

Da das Spannungs-Dehnungs-Verhältnis linear verläuft, kann der E-Modul wie üblich über das Hooke'sche Gesetz - Textilspannung dividiert durch Textildehnung - berechnet werden (Preinstorfer 2019). In Abbildung 2-4 sind die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Textilbewehrungen in den unterschiedlichen Prozessschritten dargestellt. Dabei lässt sich erkennen, dass die einzelne Faser die höchste Bruchspannung aufweist, während ein gebündeltes, ungetränktes Garn und in weiterer Folge ein ungetränktes Textil noch weiter an Festigkeit verliert. Somit lässt sich ein Zusammenhang zwischen Festigkeitsverminderung zum Grad der Textilverarbeitung feststellen. Wie im Rahmen der Anforderungen für optimale Festigkeitseffizienz schon erwähnt, sind diese Festigkeitsverluste auf Faserschädigungen und auf nicht ideal parallel gestreckt liegende Filamente und daraus ungleiche Filamentdehnungen zurückzuführen. Zusätzlich zeigt das

Diagramm den überaus positiven Effekt der Tränkung. Die Kurven der getränkten Garne erreichen fast die Faserfestigkeit (Cherif 2011).

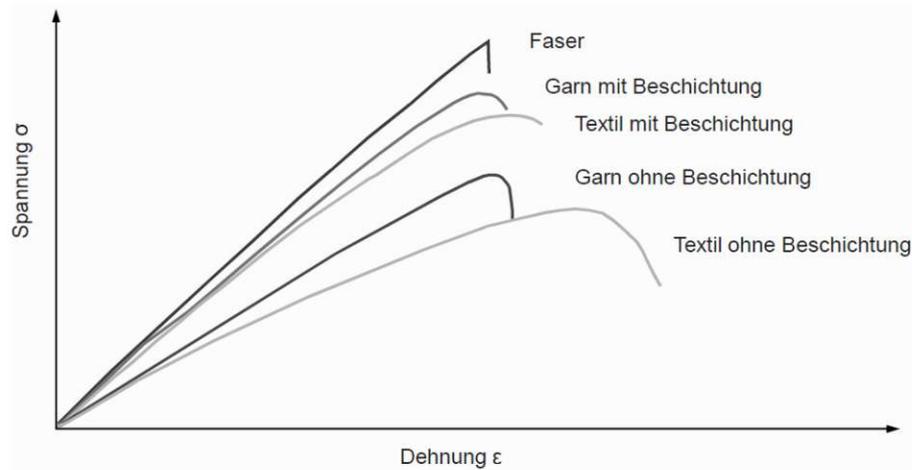


Abb. 2-4: Qualitative Spannungs-Dehnungsverläufe von Faser, Garn und Textil mit und ohne Beschichtung (Cherif 2011)

Textilbewehrungsmatten werden anhand ihrer Faserquerschnittsfläche pro Meter [ $\text{mm}^2/\text{m}$ ] kategorisiert. Obwohl die Eigenschaften der Fasermaterialien an und für sich einheitlich sind, lässt sich, im Gegensatz zur Stahlbewehrung, die Tragfähigkeit einer textilen Bewehrung nicht einfach über den Bewehrungsquerschnitt berechnen, da bei Textilbewehrungen die Festig- und Steifigkeiten in Abhängigkeit der Art, Menge und Verarbeitung der Fasern, sowie in Abhängigkeit des Herstellers und des Herstellverfahrens und in diesem Zusammenhang mit dem verwendeten Tränkungsmaterial variieren. Somit sind pro verwendetem Textil die zugehörigen mechanischen Kennwerte aus den Datenblättern der Hersteller zu entnehmen. Da die Hersteller auch keine konkreten Daten z.B. über die Menge und die Zusammensetzung des Tränkungsmaterials preisgeben, ist ein direkte Vergleichbarkeit grundsätzlich ähnlicher Textilien ebenfalls nicht gegeben (Preinstorfer 2019).

## 2.2 Feinkornbeton

Da sich textile Bewehrung in ihren chemischen, physikalischen und geometrischen Eigenschaften deutlich von konventioneller Stahlbewehrung unterscheidet, und sich die mit Textilbewehrung gefertigten schlanken Betonbauteile offensichtlich von herkömmlichen massiven Stahlbetonbauteilen unterscheiden, wird für Textilbeton in der Regel eine spezielle Betonrezeptur erforderlich. Die Ansprüche an die Textilbetonmatrix sind dabei nicht geringer als die hohen Ansprüche an textile Hochleistungsbewehrung selbst. Die Anforderungen an eine geeignete Betonmatrix beziehen sich auf hohe Druck- und Zugfestigkeiten des Betons, optimale Verbundeigenschaften mit der Bewehrung, Faserverträglichkeit, Dauerhaftigkeit sowie verbesserte Verarbeitungseigenschaften für schlanke Bauteilgeometrien und enge Bewehrungsführung. Aus diesem Grund wird in der Regel Hochleistungsbeton (HPC) verwendet. Die Rezepturen müssen an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden, das heißt, dass die Betonmischungen in Abhängigkeit vom eingesetzten Fasermaterial, einer vorhandenen oder nicht vorhandenen Fasertränkung, sowie von mechanischen und expositionsbedingten Anforderungen bis hin zu verarbeitungstechnischen Anforderungen variieren (Liebolt 2015).

Im Allgemeinen liegt bei textiler Bewehrung eine enge Bewehrungsführung vor. Die Maschenweiten von textiler Bewehrung, die Abstände der einzelnen Lagen und die Höhe der Betondeckung liegen oft im Millimeterbereich. Aus diesem Grund wird der Größtkorndurchmesser in der Regel auf unter 4mm beschränkt. In der Praxis unterschreiten die verwendeten Gesteinsmischungen oftmals sogar einen Größtkorndurchmesser von 2mm. Dieses charakteristische Merkmal verleiht dem im Textilbetonbau eingesetzten Beton die Bezeichnung Feinbeton oder Feinkornbeton (Preinstorfer 2019).

Ein weiteres Merkmal der Feinbetonmatrix stellt ihre hervorragende Festigkeit und Dauerhaftigkeit dar. Diese kann durch eine optimierte Packungsdichte der Zuschlagskörnung erreicht werden. Mit einer angepassten Gesteinskorngrößenverteilung wird ein besonders dichtes Betongefüge angestrebt. Die Betonzusammensetzungen zeichnen sich deswegen durch einen hohen Bindemittelgehalt aus. Verglichen mit einer herkömmlichen Betonmischung, wo der Bindemittelanteil ein Sechstel der Gesteinskörnung ausmacht, beträgt das Verhältnis von Bindemittelanteil und Gesteinskornanteil bei Feinbeton 1:1 bis 1:2. In einer Regelmischung (beispielsweise Lieboldt 2015) setzt sich der Bindemittelanteil ungefähr aus zwei Massenanteilen Zement und einem Teil Puzzolan zusammen, wobei der Puzzolananteil aus etwa neun Teilen Flugasche und einem Teil Mikrosilika besteht. Dieses Mischungsverhältnis schafft hervorragende Verbundeigenschaften zwischen Beton und Bewehrung. Es eignet sich darüber hinaus ausgezeichnet für ungetränkte Faserbewehrung, da die Puzzolane durch eine verstärkte CSH-Phasen-Bildung besonders gut in die mikroskopisch kleinen Zwischenräume der Filamentgarne hineinwachsen können. Ein erhöhter Anteil an puzzolanischen Zusatzstoffen wirkt sich zudem positiv auf den Einsatz von textiler Glasfaserbewehrung aus. Da Glasfasern im alkalischen Milieu des Betons nicht beständig sind, greift man auf Betonmischungen mit hohen Puzzolanzuschlägen zurück, welche die Alkalität im Beton reduzieren können (Krüger 2004, Lieboldt 2015, Preinstorfer 2019).

Ein weiteres Kriterium für maximale Betonfestigkeit und Dauerhaftigkeit stellt ein geringstmöglicher Wasserbindemittelwert dar. Die Wassermenge wird deshalb reduziert auf die für die Hydratation erforderliche Menge und liegt bei Feinkornbetonen zwischen 0,3 und 0,4. Der stark reduzierte Wassergehalt im Beton geht mit Einbußen der Verarbeitbarkeit einher. Um die Fließfähigkeit und Verarbeitbarkeit des Betons zu erhöhen, wird der Feinbetonrezeptur eine überdurchschnittlich hohe Menge an Fließmittel beigemischt. Als Fließmittel werden meistens Hochleistungsfließmittel auf Basis von Polycarboxylat eingesetzt. Dies verschafft dem Frischbeton letztendlich eine geringe Viskosität und gegebenenfalls selbstverdichtende Eigenschaften (Krüger 2004, Lieboldt 2015).

# Kapitel 3

## Verbundverhalten von bewehrtem Beton

### 3.1 Allgemeines

Verbundwerkstoffe wie Textilbeton und Stahlbeton, vereinen die Vorteile aus Beton mit seiner hohen Druckfestigkeit und Bewehrung mit ihrer hohen Zugfestigkeit. Damit die gewünschte Zusammenwirkung der beiden Komponenten in Kraft treten kann, muss ein optimaler Verbund der Werkstoffe sichergestellt sein. Die Verbundwirkung kann dabei über verschiedene Mechanismen erfolgen: den *Haftverbund*, den *Reibverbund* und den *Form- bzw. Scherverbund*. Die Mechanismen sind bei Textil- als auch bei Stahlbeton prinzipiell die gleichen, haben aber werkstoffbedingt verschiedene Ausprägungen, da die auftretenden Verbundmechanismen und deren Ausmaß stark von den geometrischen und mechanischen Eigenschaften der Bewehrung abhängig sind. Während der Haftverbund ab dem Zeitpunkt der Herstellung wirksam ist, werden die Mechanismen der Reibung und Scherung erst dann aktiviert, sobald eine Relativverschiebung zwischen Beton und Bewehrung, der sogenannte Schlupf, auftritt.

Um das Verbundverhalten beschreiben zu können, schafft man einen Zusammenhang des Schlupfes zur wirkenden Verbundspannung, als eine Art Pseudo-Stoffgesetz. Dieser Zusammenhang lässt sich über Ausziehversuche (Pull-out-Versuche) messen und wird als Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung (VSB) bezeichnet. In weiter Folge lassen sich auf Basis der Ausziehversuche und der so erhaltenen VSB Verbundmodelle herleiten (Zilch und Zehetmaier 2010).

Vor allem bei Textilbeton können die Verbundmechanismen aufgrund von wechselnden oder gleichzeitig wirkenden Mechanismen nur schwer separiert werden, was dazu führt, dass das Verbundverhalten ganzheitlicher betrachtet werden muss. Das Verbundverhalten hängt dabei stark von der Imprägnierung und der geometrischen Form der Faserstränge ab. Es lässt sich grob in Kategorien von weich getränkten, steif getränkten und ungetränkten Textilien unterteilen. Für ungetränkte Faserstränge wird auf *Kapitel 2.1.2.1 – Fasern und Garne* verwiesen. Da diese in der Baupraxis von getränkten Textilien abgelöst wurden und an Bedeutung verloren haben, werden diese nicht mehr ausführlicher behandelt. Die im Zuge dieses Kapitels behandelten Themen beziehen sich in weiterer Folge hauptsächlich auf Carbonbewehrung mit einer steifen Tränkung aus Epoxidharz, da diese Gegenstand der weiterführenden Versuche in dieser Arbeit sind.

### 3.2 Verbundmechanismen

#### Haftverbund

Die Verbundwirkung über Haftung wirkt ab dem Zeitpunkt der Herstellung. Der *Haftverbund* wird über den physikalisch-chemischen Zusammenschluss der Werkstoffe durch deren Kapillar- und Adhäsionskräfte erzeugt und ist eher gering. Tritt eine Relativverschiebung zwischen Beton und Bewehrung auf, versagt der Haftverbund und die anderen Verbundmechanismen beginnen zu wirken (Lorenz 2014). In Abhängigkeit der verwendeten Bewehrung, kommt anschließend der *Formverbund* oder der *Reibverbund* zum Tragen.

### Reibverbund

Der *Reibverbund* beginnt zu wirken, sobald eine Relativverschiebung zwischen Beton und Bewehrung vorliegt. Der Reibverbund wird maßgebend bei Bewehrung mit ebener Oberfläche und über die Länge konstantem Querschnitt. Dies war bei früher verwendetem glatten Bewehrungsstahl der Fall. Bei textiler Bewehrung mit weicher Tränkung erfolgt die Verbundkraftübertragung ebenfalls hauptsächlich über den Reibverbund. Auch bei steifgetränkten Textilien, die eine glatte, gleichmäßige Oberfläche besitzen, kann der Reibverbund den primären Verbundmechanismus darstellen. Hier werden die Kräfte über die Mantelfläche der Bewehrung über eine Art Mikroverzahnung in den Beton übertragen. Auf diese Weise sind eher geringere Kräfte übertragbar und es ist eine längere Verankerungslänge in den Beton vorzusehen. Die Reibung ist stark von der Oberflächenbeschaffenheit der Bewehrung abhängig. Vorhandene Querpressungen können die Aktivierung des Reibverbunds begünstigen (Lettow 2006; Preinstorfer 2019).

### Formverbund bzw. Scherverbund

Weist die Bewehrung eine ausgeprägte geometrische Formänderung in Längsrichtung auf, kann sich zwischen Beton und Bewehrung ein mechanischer Verbund durch Verzahnung ergeben. Man nennt diese mechanische Verzahnung den *Formverbund* oder *Scherverbund*. Bei Belastung verzahnt sich die Bewehrung formschlüssig mit dem umgebenden Beton und überträgt die Kräfte über mechanisches Zusammenwirken. Über diese Art des Verbunds können die höchsten Verbundspannungen erzielt werden und größere Relativverschiebungen überwunden werden.

Im Falle von konventioneller Stahlbewehrung wird der Formverbund durch die Rippen des Bewehrungsstahls hergestellt. Bei Belastung des Bewehrungsstabes stützen sich dessen Rippen auf den Beton ab und übertragen die Kräfte in den Beton (Zilch und Zehetmaier 2010). Im Falle von Textilbewehrung hängt das Verbundverhalten stark von der Art der Tränkung und der Form der textilen Faserstränge ab. Textilien mit steifer Tränkung und einer ausgeprägten Querschnittsaufweitung, das heißt, dass sich ihr Querschnitt in den Knotenpunkten in Dicken- als auch in Breitenrichtung verengt und in den Feldmitten aufweitet, können ebenfalls einen Formverbund erzielen. Die Aufweitung kann als langgestreckte Rippe interpretiert werden und das Verbundverhalten kann mit dem des konventionellen Stahlbetons verglichen werden. Die Verbundspannungen werden in jenem Bereich übertragen, wo der größere Rovingquerschnitt durch den engeren Betonkanal gezogen wird (Preinstorfer et al. 2019). In Abbildung 3-1-links ist die Wirkungsweise des Formverbunds des klassischen Stahlbetons dargestellt. Abbildung 3-1-rechts veranschaulicht die Art der Kraftübertragung im Textilbeton.

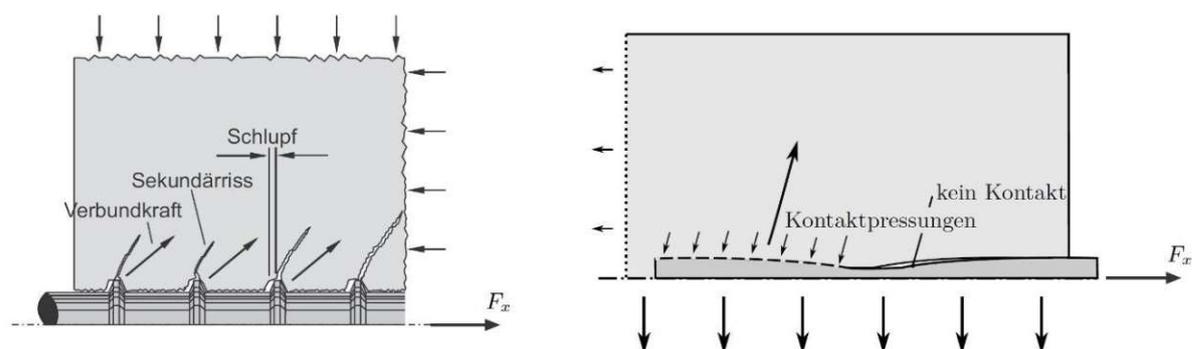


Abb. 3-1: Schematische Darstellung der lokalen Verbundkraftübertragung bei wirkendem Formverbund bei gerippter Stahlbewehrung (links; Zilch und Zehetmaier 2010) und textiler Bewehrung (rechts; in Anlehnung an Preinstorfer 2019)

Die Verbundwirkung von textiler Bewehrung kann mittels einer Quarzsandbeschichtung maßgeblich verbessert werden. Die besandet imprägnierten Rovings weisen eine sehr hohe Rauigkeit

auf, erhöhen somit den Reibverbund und verkürzen folglich die Verbundstrecke (Lorenz 2014). Die Besandung kann zusätzlich sogar einen Formverbund aktivieren. Der Verbund von sandbeschichteter Textilbewehrung setzt sich demnach aus einer Kombination aus Reib- und Formverbund zusammen.

### 3.3 Versagensmechanismen

Bei Überschreitung der maximal aufnehmbaren Verbundspannungen versagt der Verbundwerkstoff in Abhängigkeit seiner individuellen Schwachstelle auf verschiedene Art und Weise. Wiederum teilen sich Textil- und Stahlbeton generell die gleichen Versagensmechanismen, bilden das Versagen aber auf unterschiedliche Arten aus. Das Versagen lässt sich grob in drei Versagensmuster einteilen. Das Versagen kann in der Bewehrung, im Beton oder in der Verbundfläche zwischen Bewehrung und Beton stattfinden. Zudem besteht die Möglichkeit, dass eine Kombination an Versagensmechanismen eintritt.

#### Versagen der Bewehrung

In Bezug auf Textilbeton ist die wünschenswerte Versagensweise das Versagen der Bewehrung. Das bedeutet, dass die Textilien voll verankert sind und demnach effizient bis zu ihrer Garnzugfestigkeit ausgenutzt werden können. Bei Überschreitung der Garnzugfestigkeit kommt es letztendlich zu einem spröden Bruch (Preinstorfer et al. 2019). Im Falle von Stahlbeton kann diese Art von Versagen so nicht auftreten. Stahlbewehrung beginnt nach Überschreiten der Streckgrenze zu fließen. Dies geht mit einer Verminderung der Verbundsteifigkeit einher.

#### Versagen des Betons

Wenn das Versagen im Beton geschieht, liegt in der Regel ein Formverbund vor, da dieser extrem hohe Spannungen auslösen kann. Schoene et al. (2011) konnten jedoch an Untersuchungen an Textilbeton zeigen, dass auch ein vorherrschender Haft- oder Reibverbund einen derartigen Spannungszustand auslösen kann. Das Versagen des Betons kann in Form eines Druck- oder eines Zugversagens eintreten. Das Prinzip der zwei unterschiedlichen Versagenstypen wird zum besseren Verständnis am Beispiel von Stahlbeton anschaulich erklärt und kann auf ähnliche Weise auf Textilbeton übertragen werden. Nähere Beschreibungen des Versagens für Textilbeton werden im *Kapitel 3.7.2.2 - Spaltrissbildung im Textilbeton* gegeben. Bei Belastung und auftretender Relativverschiebung stützen sich die Stahlrippen des Bewehrungsstabes gegen den Beton. Dabei entstehen im Beton Druckspannungen, die sich kreisförmig vom Bewehrungsstab weg ausbreiten. Gleichzeitig entstehen hinter den Rippen Zugspannungen, welche zu inneren Verbundrissen (Sekundärrissen) führen. Zwischen den Rissen bilden sich Druckspannungskegel aus, die die Verbundkräfte vom Bewehrungsstab in den umgebenden Beton leiten. Um den Druckspannungskegel auszugleichen, stellt sich am Ende des Kegels ein Zugspannungsring ein. Bei weiterer Laststeigerung können zwei mögliche Versagensszenarien (Zug- und Druckversagen) auftreten:

- **Zugversagen**

Bei kleiner Betondeckung ist der umgebende Beton nicht in der Lage die Zugspannungen des Zugspannungsringes aufzunehmen und der Beton versagt zufolge unzureichender Betonzugfestigkeit mit einer Längsrissbildung entlang der Bewehrung. Dieser Vorgang geht mit einem schlagartigen Verlust der Verbundspannung einher und wird als *Sprengriss-* oder *Spaltbruchversagen* bezeichnet (Abb. 3-2 links). Um Sprengrissversagen entgegenzuwirken, wird im Allgemeinen eine ausreichend hohe Betondeckung gefordert, um die Spannungen rund um die Bewehrung problemlos aufnehmen zu können. Alternativ hilft die Zulage einer Querbewehrung die Ringzugkräfte aufzunehmen.

### ▪ Druckversagen

Ist eine ausreichende Betondeckung oder eine zusätzliche Querbewehrung vorhanden, bildet sich das Versagen in Form eines Druckversagens aus. Mit Erhöhung der Beanspruchung schreitet vorerst die innere Rissbildung und die Verbundzerstörung fort, wobei die Verbundspannung noch gesteigert werden kann, bis die Betonkonsolen zwischen den Rippen zerstört werden. Nach Erreichen der maximalen Verbundtragfähigkeit scheren die Betonkonsolen letztendlich ab. Dies geschieht entweder durch fortschreitendes Zerbröseln des Betons oder es bilden sich Schubriss entlang der Oberkanten der Stahlrippen aus und der Bewehrungsstab wird samt zerstörten Betonkonsolen aus dem Beton herausgezogen. Dabei können weiterhin Verbundspannungen über Reibung in der Scherfläche zwischen geschädigten und umgebenden Beton übertragen werden. Die Verbundspannung nimmt kontinuierlich ab. Diese Art von Versagen wird als *Auszieh-* oder *Scherbruchversagen* bezeichnet (Abb. 3-2 rechts).

Welcher Versagensfall schlussendlich eintritt hängt maßgeblich von der Größe der Betondeckung und der Profilform des Bewehrungsstabes ab (Petersen 2003; Lindorf 2011).

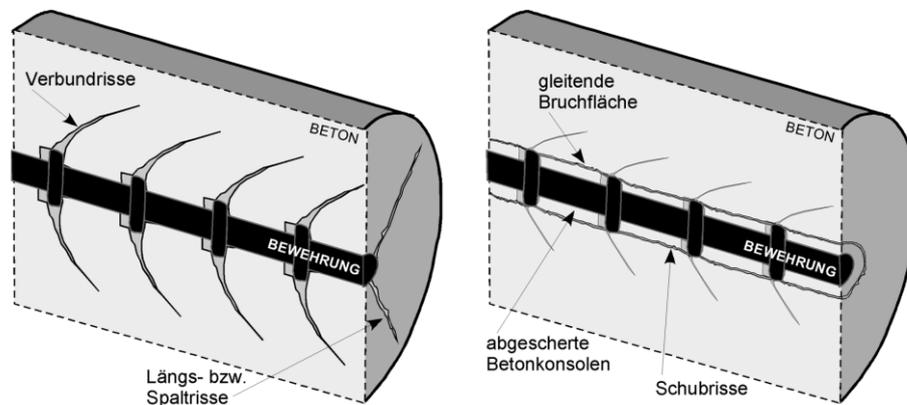


Abb. 3-2: Schematische Darstellung eines Sprenggrissversagens (links) und eines Ausziehversagens (rechts) im Stahlbeton (Lettow 2006)

Das Phänomen der Sprenggrissbildung wurde auch bei textiler Bewehrung, vorrangig bei Rovings mit großer Querschnittsfläche und steifer Tränkung, beobachtet. Das Versagen durch Sprengrisse findet hier in der Bewehrungsebene statt und wird als *Spaltrissversagen* bezeichnet. Die Spaltrissbildung in der Bewehrungsebene kann eine komplette Bauteilzerstörung aufgrund



Abb. 3-3: Spaltrissversagen an einem textilbewehrten Träger (Preinstorfer 2019)

großflächiger Abplatzungen des Betons zu Folge haben (Abb. 3-3). Die Ursachen der Spaltrissbildung bei Textilbeton sind noch nicht eindeutig erforscht und können vielfältig sein (Preinstorfer 2019). Diese werden im *Kapitel 3.6.2.2 - Spaltrissbildung im Textilbeton* näher diskutiert.

Ein *Ausziehversagen* bei textiler Bewehrung erfolgt hingegen in der Regel nicht infolge Abscheitens des Betons wie bei Rippenstahl (siehe nächster Abschnitt).

### **Versagen in der Kontaktfläche zwischen Bewehrung und Beton**

Wenn das Versagen in der Kontaktfläche von Bewehrung und Beton vorliegt, kommt es zu einem Bewehrungsauszug aus der Betonmatrix. Die Ursache hierfür ist eine zu geringe Verbundfestigkeit. Eine ausreichende Verbundfestigkeit ist gegeben, wenn die Kräfte von der Bewehrung über eine ausreichende Verbundlänge sicher in den Beton übertragen werden können. Die Verbundlänge hängt dabei stark von der Oberflächenbeschaffenheit und der Größe der Mantelfläche der Bewehrung ab. Kann ein Verbund über Formschluss aktiviert werden, reicht meist eine kurze Einbindelänge in den Beton. Wird der Verbund allerdings ausschließlich über Haftung oder Reibung hergestellt, muss die Verankerungslänge dementsprechend länger sein. Bei näherer Betrachtung liegt das „Versagen der Verbundfläche“ ebenfalls entweder im Beton oder an der Bewehrung. Ein Ausziehversagen der gerippten Stahlbewehrung aus dem Beton entspricht dem vorhin beschriebenen Scherbruchversagen der Betonkonsolen. Diesem Versagen kann mit einer ausreichend langen Verankerungslänge entgegengewirkt werden.

Im Falle von Textilbeton scheren im Zuge des Bewehrungsauszugs anstelle des Betons, die Imprägnierung der Faserstränge und die vorhin erwähnten langgestreckten „Faserstrangrippen“ ab (Preinstorfer et al. 2020). In der Regel bleibt beim Ausziehversagen ein ausgeprägter Reibverbund aber weiterhin vorhanden. Liegt eine zusätzliche Sandbeschichtung der textilen Bewehrung vor, schert bei einem Ausziehversagen die Imprägnierung inklusive Sandkörner ab. Bei ausreichender Verankerungslänge hingegen wurde aufgrund der effektiv verbundsteigernden Quarzsandbeschichtung auch schon ein Sprengrissversagen beobachtet. Ob dies im Rahmen eines vorherrschenden Formverbunds oder eines Reibverbunds hervorgerufen wurde, ist an dieser Stelle unklar.

## **3.4 Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung**

Aufgrund der komplexen Verbundwirkungs- und Verbundversagensmechanismen lassen sich keine allgemeingültigen Aussagen über das Verbundverhalten von Verbundwerkstoffen machen. Um trotzdem ein Modell zur Beschreibung des Verbundverhaltens heranziehen zu können, wurde ein Pseudo-Stoffgesetz auf Basis von Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen (VBS) entwickelt. Darunter versteht man den Zusammenhang der Summe der aus den diversen Verbundmechanismen resultierenden Verbundspannung und der Relativverschiebung der Werkstoffkomponenten, dem Schlupf. Mit Hilfe solcher Verbundgesetze sollen Verbundthemen wie zum Beispiel Verankerungslängen oder Rissbreiten mathematisch beschreibbar und berechenbar gemacht werden. Die Informationen über VSB werden experimentell aus Ausziehversuchen gewonnen (Zilch und Zehetmaier 2010).

Die Entwicklung geeigneter Verbundgesetze ist mit Schwierigkeiten verbunden. Aus verschiedenen Versuchen werden unterschiedliche VSB gewonnen. Dies liegt daran, dass die Verbundspannung nicht nur von der Relativverschiebung abhängt, sondern von mehreren Parametern beeinflusst wird. Unmittelbaren Einfluss auf die Versuchsergebnisse haben der verwendete Beton und die eingesetzte Bewehrung, sowie die Art der verwendeten Versuchskörper als auch dessen Herstellung, beispielsweise die Betonierrichtung und die Nachbehandlung. Außerdem ist das angewandte Versuchsverfahren selbst zu berücksichtigen. VSB müssen also unter Berücksichtigung mehrerer Einflussfaktoren und an definierte Randbedingungen gekoppelt, gewertet werden (Auer 2014).

Bestehende Verbundgesetze entstanden in empirischer Abhängigkeit auf Basis von experimentellen Versuchen und deren Ergebnisse in jahrelanger Forschung. Ein Beispiel dafür ist das heute

im fib Model Code verwendete Verbundmodell für Stahlbeton (Abb. 3-4 links). Durch das Modell lässt sich das Verbundverhalten von Stahlbeton realistisch mathematisch beschreiben.

Insbesondere für Textilbeton ist die Entwicklung eines zuverlässigen Verbundgesetzes schwierig. Aufgrund der vielfältigen Variationen von textiler Bewehrung fallen die VSB von Textilbeton entsprechend unterschiedlich aus. Die VSB sind abhängig vom Fasermaterial, Tränkungsmaterial, der geometrischen Form der Garne, und in weiterer Folge von dem sich einstellenden Verbundmechanismus, als auch vom verwendeten Prüfkörper und der Versuchsdurchführung. Ein allgemein gültiges Verbundmodell für Textilbeton gibt es derzeit noch nicht und es ist auch fraglich, ob sich ein solches überhaupt formulieren lässt. Das derweilen der Realität am nächsten kommende Modell für ein Verbundgesetz für textilbewehrte Bauteile ist der von Richter (Richter 2005) weiterentwickelte multilineare Ansatz mit vier linearen Bereichen (Abb. 3-4 rechts). Es gibt eine allgemeine Beschreibung des Verbundverhaltens von textiler Bewehrung wieder und muss je Bewehrungstyp und den individuellen Gegebenheiten entsprechend angepasst werden (Kulas 2013; Preinstorfer 2019).

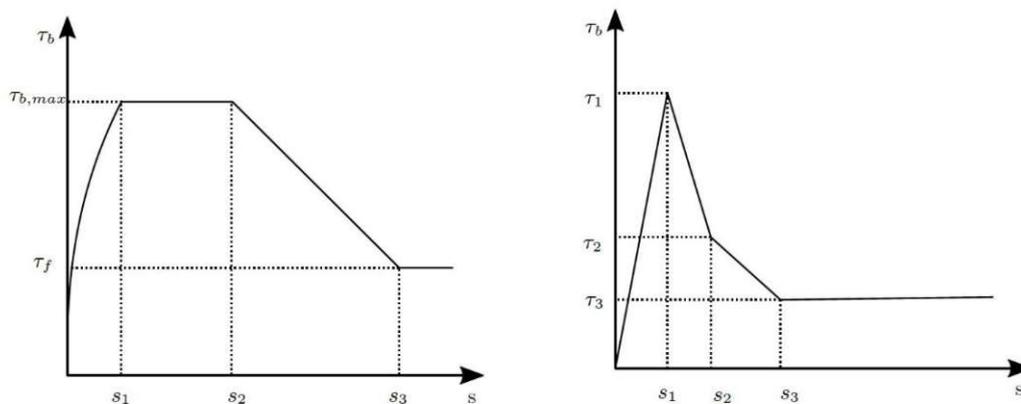


Abb. 3-4: Verbundmodell für Stahlbeton nach Fib 2013 (links); Verbundmodell für Textilbeton nach Richter 2005 (rechts; in Anlehnung an Preinstorfer 2019)

Betrachtet man die Kurve im Modell für Bewehrungsstahl (Abb. 3-4 links), kann man die Verbundwirkung anhand des Linienverlaufs abschnittsweise beschreiben. Der steile Anstieg zu Beginn der Kurve gibt den anfänglichen Haftverbund zwischen Beton und Bewehrungsstahl wieder. Im weiteren ansteigenden Verlauf beginnt der Formverbund zunehmend zu wirken. Die Verbundkraft wird gesteigert, der Schlupf bleibt weiterhin klein. Die Abflachung der Kurve lässt auf die Entstehung von Sekundärrissen im Beton schließen. Trotzdem kann die Verbundspannung bis an ihr Maximum gesteigert werden. An dem Punkt, an dem das Maximum erreicht ist, beginnt der Formverbund zu versagen und geht in den Reibverbund über. Der horizontale Verlauf der Linie bildet den wirkenden Reibverbund der versagten Betonkonsolen ab. Der Schlupf wächst, während die Verbundfestigkeit konstant bleibt. Nach einer gewissen Größe des Schlupfes, sind die Reibflächen zwischen versagtem und umgebendem Beton zunehmend geglättet und die übertragbaren Reibverbundspannungen nehmen kontinuierlich ab (fallender Bereich der Kurve) bis nur noch geringe Verbundspannungen aus einer Restreibung übrigbleiben (Zilch und Zehetmaier 2010).

Über den Verlauf der VSB-Kurven von Textilbewehrung lässt sich allgemein sagen, dass die getränkten, steiferen Textilien weitaus höhere Verbundspannungen bei einem kleineren Schlupf übertragen können als ungetränkte Textilien (Abb. 3-5 links). Bei Betrachtung von steif getränkter Textilbewehrung, sind die wirkenden Verbundmechanismen anhand eines VSB-Diagramms nicht allgemeingültig bestimmbar. Die Linien sind als Summe mehrerer möglicher wirksamer Mechanismen zu deuten. Trotzdem sind die VSB qualitativ gültig. In gesondert betrachteten Fällen kann man ausgehend von den eingesetzten Textilien auf den primär wirkenden Verbundmechanismus

schließen. Außerdem lassen sich aufgrund der VSB Aussagen über den dahinterliegenden Versagensmechanismus machen.

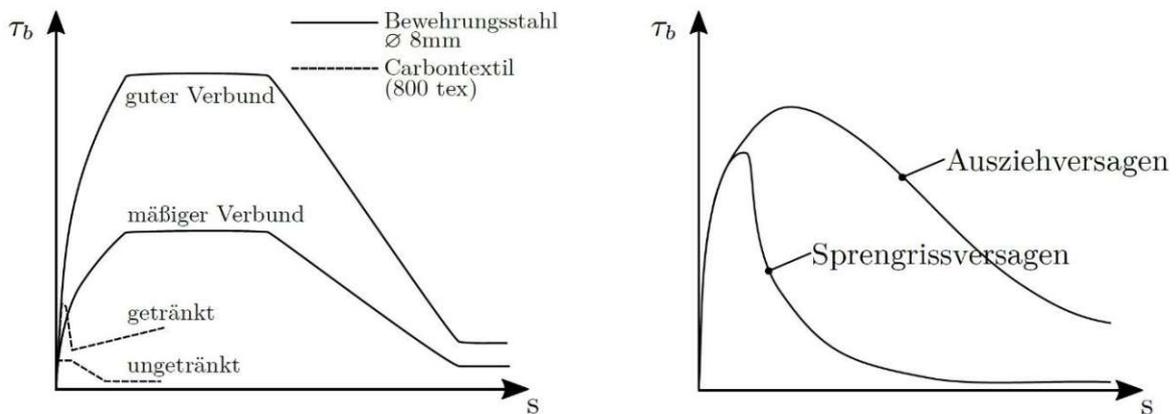


Abb. 3-5: Qualitative Darstellung von VSB von Bewehrungsstahl und Textil (links; Preinstorfer 2019); typischer VSB-Verlauf eines Auszieh- und eines Sprenggrissversagens von Textilbeton (rechts; Preinstorfer 2019)

In Abbildung 3-5-rechts sind die Verläufe eines Ausziehversagens und eines Sprenggrissversagens qualitativ abgebildet. Im ersten sehr steil ansteigenden Teil beider Linien wirkt der Haftverbund. Dieser geht mit dem Auftreten der kleinsten Verschiebung, in Abhängigkeit der geometrischen Form und der Oberflächenbeschaffenheit des Textils, in einen wirkenden Form- oder Reibverbund über. Aufgrund der eingesetzten Bewehrungsart können hohe Verbundspannungen übertragen werden. Dabei ist es unbedeutend, ob diese von einem vorherrschendem Formverbund oder Reibverbund hervorgerufen werden. Mit Abflachen der Kurve beginnt die Schädigung des Betongefüges zufolge Mikrorissbildung im Beton. Im weiteren Verlauf sind zwei Versagensszenarien möglich. Im Fall eines Sprenggrissversagens kann der umgebende Beton die hohen Spaltzugbeanspruchungen, die aus dem Verbund resultieren nicht mehr aufnehmen und versagt zufolge einer Sprenggrissbildung. Die Kurve fällt schlagartig ab und der Verbund wird dabei endgültig zerstört. Im Fall eines Ausziehversagens wird der Verbund langsam zerstört. Die Kurve flacht schon während der Laststeigerung bei zunehmender Relativverschiebung ab. Nach Erreichen der maximalen Verbundspannung verliert der Verbund an Steifigkeit. Es können immer weniger Verbundspannungen übertragen werden. Die Kurve flacht in weiterer Folge mit fortschreitender Verbundzerstörung infolge Bewehrungsauszug ab, bis eine geringe Verbundspannung aufgrund der Restreibung bestehen bleibt. Der Faserstrang wird dabei unter Delamination des Tränkungsmaterials von den Fasern aus dem Beton gezogen (Kulas 2013, Lorenz 2014).

### 3.5 Ausziehversuche

Zur Entwicklung von Verbundmodellen sind experimentelle Untersuchungen erforderlich. Wie eben schon erwähnt, werden die VSB in der Regel anhand von Ausziehversuchen (Pull-Out-Versuchen) gewonnen. Um möglichst zuverlässige Ergebnisse aus den Versuchen zu erhalten, benötigt man ein bauteilgerechtes Prüfverfahren.

#### Versuchsaufbau nach RILEM:

Im Stahlbetonbau erfolgen die Ausziehversuche am sogenannten *RILEM-Versuch* (RILEM 1994; Abb. 3-6). Dazu wird ein Bewehrungsstab in einen Würfel einbetoniert. Die Abmessungen der Kantenlängen sind über den Bewehrungsstabdurchmesser  $d_s$  definiert und entsprechen ca.  $10d_s$ .

Daraus resultiert eine ausreichende Betondeckung, um einer unerwünschten Sprenggrissbildung vorzubeugen. Der Stab wird über eine Verbundlänge von  $5d_s$  in den Betonwürfel eingebunden. Auf der restlichen Länge wird der Stab vom Beton isoliert, um einen Verbund zu unterbinden. Auf dieser Seite des Stabes wird eine Zugkraft in den Stab eingeleitet und gemessen. Die Aussparung auf der lasteinleitenden Seite soll störende Einflüsse der Auflagerfläche (Querdehnungsbehinderung) auf den Verbundbereich vermeiden. Gleichzeitig wird auf der gegenüberliegenden Seite am herausragenden Ende des Stabes, der Schlupf gemessen. Die VSB kann aus den gemessenen Größen der Kraft und des Schlupfes ermittelt werden. Aufgrund der hohen Steifigkeit des Bewehrungsstabes und der kurzen Einbindelänge, kann die Verbundspannung entlang der Verbundstrecke näherungsweise konstant angenommen werden (Zilch und Zehetmaier 2010; Preinstorfer 2019).

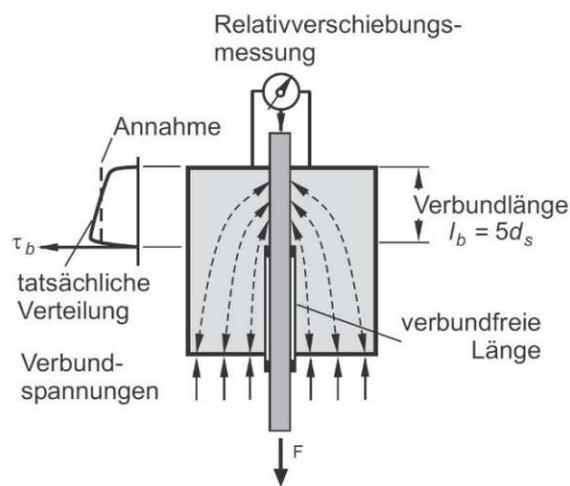


Abb. 3-6: Versuchsaufbau nach RILEM (Zilch und Zehetmaier 2010)

Der Versuchsaufbau nach RILEM kann ein wenig adaptiert auch für Verbundversuche von textiler Bewehrung herangezogen werden (siehe z.B. Preinstorfer et al. 2020). Hier wird der Versuchsaufbau bewusst gewählt, um eine vorzeitige Sprenggrissbildung auszuschließen. Der Versuchsaufbau ist an sich ident zum Versuchsaufbau nach RILEM. Den einzigen Unterschied stellen die Abmessungen des Versuchskörpers dar. Diese werden anhand einer Abschätzung der auftretenden Spaltzugspannungen nach der Formel nach Preinstorfer (2019; siehe Kapitel 3.7.2.3 – Modell zur Berechnung von Spaltzugkräften) festgelegt (Preinstorfer et al. 2020). Die Einbindelänge wird je nach Textiltyp und Untersuchungsziel mit ein oder zwei Maschenweiten festgelegt. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurde ebendieser Versuchsaufbau gewählt (siehe Kapitel 4.4 – Versuchsaufbau).

Weitere Versuchsaufbauten für die Ermittlung der VSB für Textilbeton erfolgen meist nach einem ähnlichen Prinzip, werden jedoch an den Baustoff Textilbeton angepasst. Da die Bauteile aus Textilbeton in der Regel eher schmalen Bauteilen mit sehr geringer Betondeckung entsprechen, wird der Versuchsaufbau dementsprechend konfiguriert. Bis jetzt gibt es aber keinen einheitlichen Versuchsaufbau. Für Textilbewehrung wurden unter anderem zweiseitige Pull-Out-Versuche entwickelt, bei denen die Textilien vollständig in eine Betonscheibe eingebettet sind (Krüger 2004). Dieser Versuchsaufbau wurde im Laufe der Zeit immer weiterentwickelt. Aktuell übliche Versuchsaufbauten für Pull-Out-Versuche textilbewehrter Bauteile sind der Versuchsaufbau nach Lorenz (Abb. 3-7) und der Versuchsaufbau nach Bielak (Abb. 3-8), die einem asymmetrischen einseitigen Pull-Out Versuch entsprechen.

### Versuchsaufbau nach Lorenz:

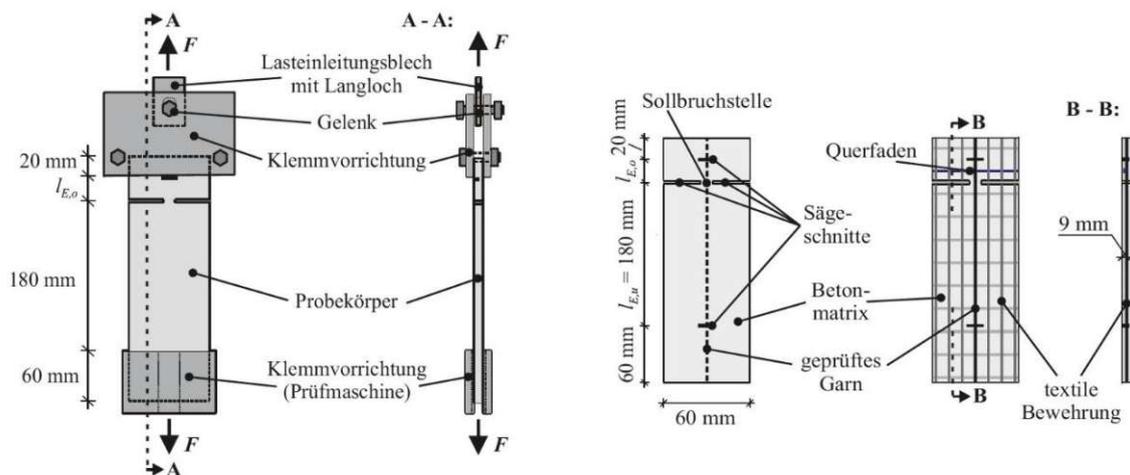


Abb. 3-7: Versuchsaufbau nach Lorenz (Lorenz 2014)

Beim asymmetrischen Textilauszugversuch nach Lorenz (Lorenz 2014; Abb. 3-7) wird die textile Bewehrung in eine Scheibe einbetoniert. Die Einbindelänge der zu testenden Faserstränge wird im Allgemeinen mit einer Maschenweite festgelegt. Demzufolge wird der zu testende Faserstrang nach einer Maschenweite durchtrennt. Dies erfolgt in der Regel nach der Herstellung des Versuchskörpers durch eine Bohrung oder einen Sägeschnitt. Damit die benachbarten Faserstränge keinen Einfluss auf den Test haben, werden diese entlang der Sollbruchstelle mitsamt dem Betonkörper durchgeschnitten. Die Einbindelänge muss auf einer Seite ausreichend lange gewählt werden, damit die kürzere Seite für den Textilauszug eindeutig bestimmt ist. Der Prüfkörper wird in der Prüfmaschine gelenkig eingespannt. Die Lasteinleitung erfolgt an beiden Seiten in die Betonscheibe. Die Lasteinleitung in unmittelbarer Nähe des Untersuchungs Bereichs stellt eine Schwachstelle dieses Versuchsaufbaus dar. Dadurch könnten Querdruckspannungen entstehen und die Versuchsergebnisse beeinflusst werden. Bei dieser Form der Ausziehversuche kann der Schlupf nicht direkt gemessen werden. Stattdessen wird die Rissöffnung an der Sollbruchstelle gemessen und eine Kraft-Rissöffnungs-Beziehung (KRB) erhalten. Anschließend kann die KRB auf eine Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung (VSB) zurückgerechnet werden (Preinstorfer 2019).

### Versuchsaufbau nach Bielak:

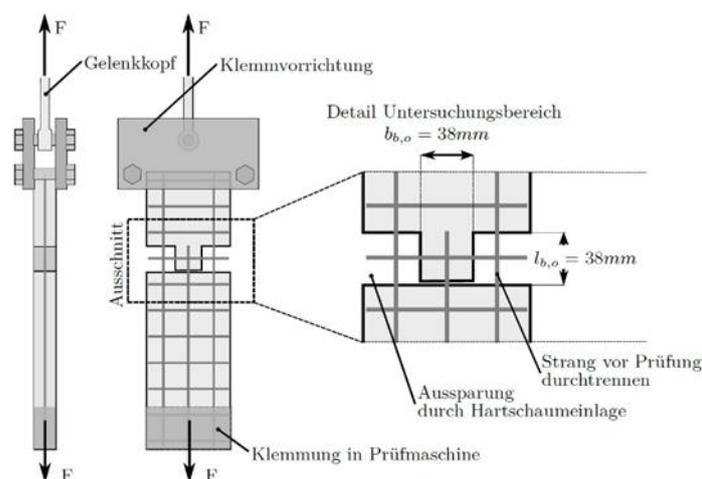


Abb. 3-8: Versuchsaufbau nach Bielak (Bielak et al. 2018)

Der Versuchsaufbau nach Bielak et al. (Bielak et al. 2018; Abb. 3-8) ist eine Weiterentwicklung des Versuchsaufbaus nach Lorenz und behebt den Nachteil des Querdruckproblems, indem sich der Untersuchungsbereich von der Lasteinleitungsstelle weiter entfernt befindet. Außerdem wird dem zu testenden Faserstrang nur eine Betonfläche mit den Abmessungen einer Maschenweite zugeordnet, um ein Spaltrissversagen beurteilen zu können. Die Sollrissstelle wird durch Einlegen einer PE-Folie vor dem Betonieren sichergestellt. Wiederrum werden die Kraft und die Rissöffnung gemessen und daraus die gesuchte VSB berechnet (Preinstorfer 2019).

## 3.6 Einflussparameter auf das Verbundverhalten

Während das Verbundverhalten im Stahlbeton gut abbildbar ist, wirft das Verbundverhalten im Textilbeton noch viele Fragen auf. Die komplexen Zusammenhänge hängen von vielerlei wechselwirkenden Einflüssen ab, welche nur schwer zu separieren sind. Um einen Überblick über die umfangreiche Thematik zu schaffen, werden im Folgenden die einzelnen Einflussfaktoren diskutiert. Vorerst werden dazu die Einflussparameter auf den Stahlbeton-Verbund in Erinnerung gerufen, um im Anschluss die Analogien und Unterschiede zum Textilbeton zu verdeutlichen.

### 3.6.1 Einflussparameter im Stahlbeton

Die nachstehenden Eigenschaften haben Einfluss auf die Qualität der Verbundwirkung des herkömmlichen Bewehrungsstahls:

**Oberflächenrauigkeit:** Die Rauigkeit des Bewehrungsstahls entspricht dem heutigen Profilierungsgrad. Die Bewehrungsprofilierung beeinflusst die Größe der übertragbaren Verbundspannungen und die Tendenz zur Sprenggrissbildung.

**Stabdurchmesser:** Mit einer Vergrößerung des Stabdurchmessers vergrößert sich die Querschnittsfläche als auch die Mantelfläche. Ein größerer Stabdurchmesser erhöht zwar immens die Größe der aufnehmbaren Zugkräfte, jedoch nicht die Größe der aufnehmbaren Verbundspannungen.

**Betonfestigkeit:** Einen wesentlichen Einfluss auf den Verbundwiderstand stellt die Betonfestigkeit dar. Da die Betonkonsolen zwischen den Stahlrippen die Verbundkräfte aufnehmen müssen, steht die Betonfestigkeit direkt in Relation mit der Verbundfestigkeit.

**Lage der Bewehrungsstäbe:** Die Lage der Bewehrungsstäbe wirkt sich direkt auf das Verbundverhalten aus. In der Regel liegen für horizontale Bewehrungsstäbe in der unteren Lage gute Verbundbedingungen vor, während für horizontale Stäbe in der oberen Lage bzw. vertikale Stäbe im Allgemeinen ein mäßiger Verbund vorhanden ist. Dies ist der Fall, da beim Vorgang des Verdichtens des Frischbetons Luftblasen aufsteigen und sich unter der oberen Bewehrung ansammeln können und in weiterer Folge die Verbundfestigkeit reduzieren.

**Betondeckung:** Die Betondeckung hat besonders bei sprenggrissgefährdeten Bauteilbereichen große Bedeutung. Eine größere Betondeckung gewährleistet, dass der Beton die Spannungen aufnehmen kann. Dadurch kann Sprenggrissversagen verhindert werden.

**Querbewehrung:** Wenn die Gefahr von Sprenggrissbildung besteht, kann diese durch Anordnen von Querbewehrung vermieden werden.

**Vorherrschende Spannungszustände:** Die Verbundeigenschaften sind von den vorherrschenden Spannungszuständen im betrachteten Bereich abhängig. Während Querdruckspannungen die Verbundbedingungen begünstigen, wirken sich Querspannungen negativ auf das Verbund- und Rissbildungsverhalten aus (Lorenz 2014).

### 3.6.2 Einflussparameter im Textilbeton

Die Einflussparameter auf den Verbund zwischen Textilbewehrung und Betonmatrix sind durchaus komplexer als bei Stahlbeton. Die Einflussfaktoren selbst beeinflussen sich gegenseitig, was eine separate Betrachtungsweise problematisch macht (Preinstorfer 2019). Die nachfolgende Auflistung bezieht sich auf Textilbewehrung mit steifer Tränkung und ist prinzipiell (Preinstorfer 2019) entnommen. Darüber hinaus wurden weitere Punkte ergänzt.

**Querschnittsform:** Die Querschnittsform hat direkten Einfluss auf die Verbundfläche. In der Regel weisen die Faserstränge herstellungsbedingt eine gedrungene, elliptische Querschnittsform auf, was sich positiv auf das Verhältnis der Oberfläche zur Fläche auswirkt. Hinsichtlich der Spaltrissbildung hat die elliptische Querschnittsform einen nachteiligen Einfluss.

**Garnumfang:** Ein größerer Garnumfang entspricht einer größeren Mantelfläche bzw. Verbundfläche. Umso größer die Verbundfläche ist, umso mehr Kräfte können übertragen werden. Im Gegensatz zur Stahlbewehrung bedeutet ein größerer Umfang der Rovings nicht zwingendermaßen eine größere Querschnittsfläche und eine höhere Beanspruchbarkeit.

**Geometrische Formänderung innerhalb einer Maschenweite:** Die Faserstränge einer textilen Bewehrung weisen nach deren Verarbeitung herstellungsbedingt spezielle Geometrien auf. In den Kreuzungspunkten liegen die Garnquerschnitte in kompakter Form vor, während sie im Feldbereich Aufweitungen in Dicken- und/oder Breitenrichtung aufweisen. Diese Unregelmäßigkeiten haben einen positiven Einfluss auf das Verbundverhalten. Durch sie kann der Reibverbund wesentlich gesteigert oder bei starker Ausprägung sogar ein Formschluss aktiviert werden. Laut Preinstorfer (2019) kann sich die Dicken- und Breitenaufweitung allerdings negativ auf die Spaltrissbildung auswirken.

**Garnwelligkeit:** Einen weiteren Parameter für das Verbundverhalten stellt die Garnwelligkeit dar, welche ebenfalls herstellungsbedingt verursacht wird. Liegen die Rovings bei der Imprägnierung nicht in 100%ig gespannter, ebener Lage vor, können die gefertigten Rovings eine leichte Welligkeit in Längsrichtung aufweisen. Dies bewirkt einerseits einen verbundsteigernden Faktor, da sich die Reibung erhöht. Andererseits kommt es durch die Welligkeit zu Umlenkkräften in den Wendepunkten, was Betonabplatzungen begünstigen kann. Entsprechend werden gerade Rovings bevorzugt.

**Imprägnierung:** Eine Imprägnierung der Rovings verbessert die Verbundfestigkeit aus mehreren Gründen. Zum einen konserviert sie die Garnform, was bedeutet, dass die herstellungsbedingten Querschnittsaufweitungen gefestigt werden. Zum anderen erhöht eine Tränkung den Querschnittsumfang, was den Fasersträngen eine größere Verbundoberfläche verschafft. Außerdem erhöht eine steife Tränkung die Transversalsteifigkeit der Faserstränge.

**Knotenwiderstand:** Durch eine steife Tränkung der Textilien weisen die Querrovings in den Kreuzungspunkten eine gewisse Verschiebesteifigkeit auf. In der Literatur wird die Frage, ob die erzeugte Knotensteifigkeit einen Einfluss auf das Verbundverhalten hat, unterschiedlich

beantwortet. Ortlepp (2007) meint, dass der Knotenwiderstand das Verbundverhalten positiv beeinflusst, während Bielak et al. (2018) von gar keinem Widerstand ausgehen.

**Wirkfaden:** Bei der Textilherstellung hat die Wirkfadenspannung einen wesentlichen Einfluss auf die geometrische Form der Rovings und demzufolge einen Einfluss auf das Verbundverhalten. Dies kann sich in Bezug auf die Faserstranggeometrie je nach Fadenspannung und Bindungsart vorteilig oder nachteilig auf das Verbundverhalten auswirken. Außerdem wird der Wirkfaden nach der Imprägnierung verhärtet. Je nach Bindungsart kann der Faden eine Art rippenähnliche Profilierung an der Rovingoberfläche bewirken. Laut Preinstorfer (2019) kann dies das Verbundverhalten geringfügig begünstigen.

Im Unterschied dazu leistet aus Sicht der Autorin dieser Arbeit der Wirkfaden aus mehreren Gründen einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Verbundwirkung, welche die Wirkung des Reibverbunds als auch des Formverbunds verbessert (siehe Kapitel 5.2.5 – Einfluss der geometrischen Form und Kapitel 6 – Schlussfolgerung).

**Wirkrichtung:** Die Kettrovings und Schussrovings besitzen aufgrund der textilen Verarbeitung typische geometrische Merkmale. Da der Kettroving vom Wirkfaden voll umwickelt wird, weist er eine kompakte und gleichmäßige Form auf. Der Schussroving hingegen wird nur in den Kreuzungspunkten gebunden und nimmt demzufolge üblicherweise eine viel flachere und in der Regel eine unregelmäßigere Form an. Dies hat große Effekte auf das Verbundverhalten (Kulas 2013).

**Betonherstellung:** Der Beton hat bei ungetränkten Fasern direkten Einfluss auf das Verbundverhalten. Bei getränkten Textilien ist im Allgemeinen auf eine geeignete Betonzusammensetzung zu achten (siehe Kapitel 2.2 – Feinbeton), ansonsten stellt der Beton keinen bedeutenden Einflussfaktor dar. Da generell HPC-Beton verwendet wird, kann man von einer sehr hohen Betondruckfestigkeit, als auch einer verhältnismäßig hohen Betonzugfestigkeit ausgehen. Da Feinbetone in der Regel sehr fließfähig oder selbstverdichtend sind, ist die Lage der Bewehrung weitestgehend ohne Einfluss zu betrachten (Preinstorfer 2019).

**Querbeanspruchung:** Da selbst Faserstränge mit sehr steifer Trängung in Querrichtung ein relativ weiches Verhalten haben, beeinträchtigt eine allfällige Querdruckbeanspruchung das Verbundverhalten von Textilbeton unter Querbeanspruchung wenig, da sich die Bewehrung bei Querdruckspannungen der Beanspruchung entzieht. Querkzugbeanspruchungen hingegen beeinflussen die Verbundwirkung negativ und begünstigen analog zum Stahlbetonbau die Entstehung von Sprenggrissen. Die textilen Faserstränge stellen außerdem Fehlstellen im Beton dar, die folglich den Betonquerschnitt und den Bauteilwiderstand weiter reduzieren (Lorenz 2014).

**Betondeckung:** In Preinstorfer (2019) wird angenommen, dass die Betondeckung prinzipiell einen positiven Einfluss auf die Verbundwirkung hat, wobei mit zunehmender Betondeckung die Gefahr der Sprenggrissbildung steigt. Im Rahmen einer vorangegangenen Diplomarbeit (Yanik 2021), wo der Einfluss der Betondeckung auf das Rissbildungsverhalten von Textilbeton untersucht wurde, konnte dies begünstigt werden. Eine kleinere Betondeckung erzielte ein fein verteiltes Rissbild, während mit dickerer Betondeckung die Rissabstände und die Rissbreiten zunahmen. Eine dickere Betondeckung begünstigte außerdem die Entstehung einer Spaltrissbildung (Yanik 2021).

Die entscheidenden Faktoren auf das Verbundverhalten und das Rissbildungsverhalten stellen aber vor allem die geometrischen Eigenschaften, welche überwiegend aus dem Herstellungsprozess resultieren, und die Oberflächenbeschaffenheit dar. Aufgrund der unterschiedlichen Produktionsprozesse und der verschiedenartigen Ausgangsmaterialien sind die Textiltypen in ihren

Formen sehr vielfältig. Folglich kann auch ihr Verbund- und Rissbildungsverhalten sehr vielfältig ausfallen. Ein einheitliches Verbundmodell gibt es noch nicht (Preinstorfer 2019).

### 3.7 Rissbildungsverhalten in bewehrtem Beton

Das Rissbildungsverhalten von bewehrtem Beton hängt eng mit dem Verbundverhalten zusammen. Die Aktivierung des Verbunds setzt eine Rissbildung voraus. Um das Kapitel der Verbundproblematik zu vertiefen, wird im Folgenden näher auf das Rissbildungsverhalten in bewehrtem Beton eingegangen. Die anschließenden Erläuterungen beziehen sich hauptsächlich auf zugbeanspruchte Betonbauteile, da in dieser Arbeit ausschließlich das Verbundverhalten unter reiner Zugbeanspruchung untersucht wird.

#### 3.7.1 Rissbildungsverhalten im Stahlbeton

##### 3.7.1.1 Rissverhalten am stahlbewehrten Dehnkörper

Für die Untersuchung des Rissverhaltens werden Spannungs-Dehnungs-Diagramme aus Dehnkörperversuchen gewonnen. Ausgehend von einem ungerissenen konventionell bewehrtem Stahlbetonstab wird in Abbildung 3-9 die Rissentstehung infolge einaxialer Zugbeanspruchung in vier abschnittsweise linearen Bereichen erklärt.

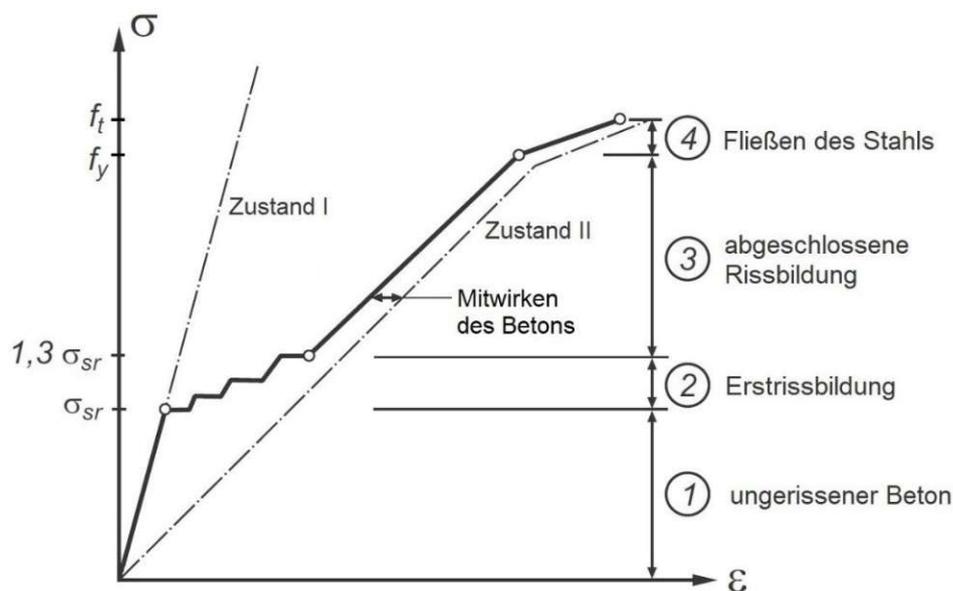


Abb. 3-9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Stahlbeton (in Anlehnung an Zilch und Zehetmaier 2010)

**Bereich 1:** Zu Beginn liegt ein ungerissener Stahlbetonstab vor. Am kompletten Stab herrscht idealer Verbund und Beton und Bewehrungsstahl weisen dieselben Dehnungen auf. An dieser Stelle treten noch keine Verbundspannungen auf. Für ungerissenen Beton wird synonym der Ausdruck Beton im *Zustand I* verwendet.

**Bereich 2:** Sobald bei Laststeigerung die Betonzugfestigkeit erreicht wird, bildet sich in diesem Bereich der erste Trennriss aus und der Stahlbetonstab wechselt im gerissenen Bereich in den *Zustand II*. Im Bereich des Risses übernimmt der Stahl die gesamte Zugkraft. Die Dehnungen im Stahl steigen an und die Dehnungen im Beton sinken auf null. Die Dehnungsänderungen rufen

Relativverschiebungen der beiden Komponenten hervor. Das heißt, es entstehen Verbundspannungen, welche die Zugkräfte wieder in den Beton leiten. Die Verbundspannungen sind am Rissufer am größten und bauen sich mit Entfernung davon ab, bis wieder ungestörter Verbund besteht. Im ungestörten Bereich herrscht wiederum Zustand I und Stahl und Beton haben identische Dehnungen. Die Länge, die benötigt wird, um die Zugspannungen vom Stahl in den Beton zu übertragen, entspricht der Einleitungslänge  $l_E$ . Im Zuge fortschreitender Laststeigerung bilden sich weitere Trennrisse aus, sobald die Betonzugfestigkeit überschritten wird. Dieser Vorgang wiederholt sich so oft, bis an keiner Stelle des Stabes mehr die Betonzugfestigkeit erreicht werden kann. Das bedeutet, dass der maximale Abstand zwischen zwei Trennrissen maximal die doppelte Einleitungslänge betragen kann. Abbildung 3-10 zeigt die eben beschriebenen Dehnungs- und Spannungszustände. Die Verbundzustände im Inneren des Betons zwischen den Rissen sind in Abbildung 3-11 im Detail abgebildet.

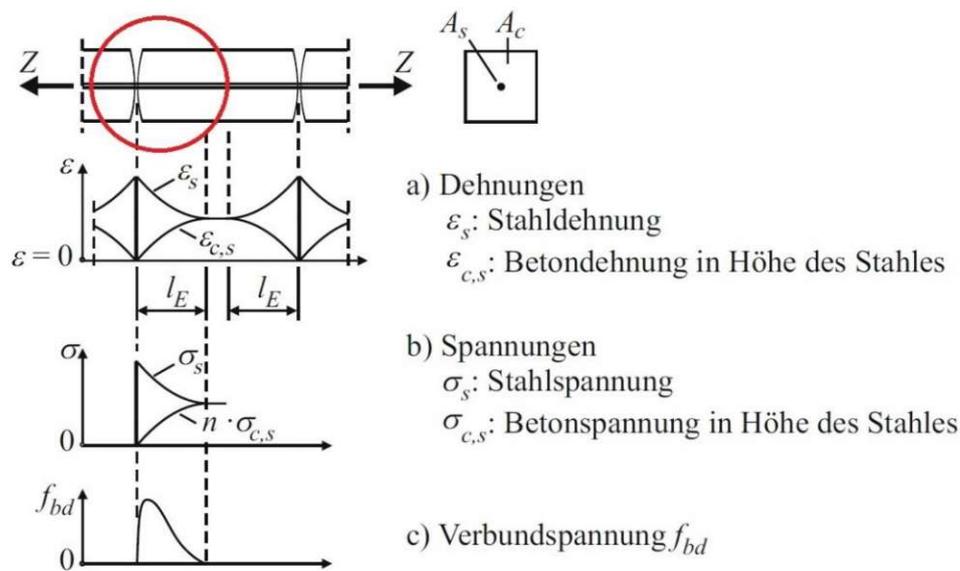


Abb. 3-10: Dehnungs- und Spannungsverläufe im Bereich von Trennrissen (Wommelsdorff 2002)

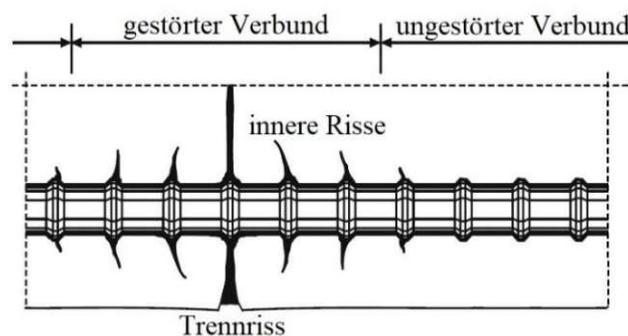


Abb. 3-11: Risszustand im gestörten und ungestörten Verbund (Leonhardt und Mönning 1986)

**Bereich 3:** Kann sich kein weiterer Riss mehr ausbilden, ist das abgeschlossene Rissbild erreicht. Nun herrschen an jeder Stelle des Stabes Verbundspannungen zwischen Bewehrung und Beton. Bei fortlaufender Lasterhöhung nehmen nur noch die Dehnungen im Stahl zu. Die Dehnungsdifferenz, erkenntlich am Horizontalabstand zwischen der Linie des reinen Zustands II (reiner Stahl) und der tatsächlichen Spannungs-Dehnungs-Linie des Stahlbetonzugstabs in Abbildung 3-9, entspricht der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen und wird als *tension stiffening* bezeichnet.

**Bereich 4:** Erreichen die Spannungen im Stahl die Streckgrenze, beginnt der Stahl zu fließen und die Verformungen im Stahl nehmen deutlich zu. In unmittelbarer Nähe der Risse treten plastische Stahldehnungen auf. Durch die großen Stahlverformungen wird der Verbund zerstört. Die Tragfähigkeit ist erschöpft, sobald die Zugfestigkeit des Stahls erreicht wird (Zilch und Zehetmaier 2010).

### 3.7.1.2 Längsrissbildung im Stahlbeton

Im vorigen Kapitel wurde vorrangig das globale Tragverhalten infolge Rissentstehung an einem Zugstab demonstriert. Der Fokus lag dabei auf der Kräfteverteilung zwischen Beton und Bewehrung bei der Entstehung von Primärrissen, auch als Trennrisse bezeichnet. Im Folgenden soll die Rissbildung lokal betrachtet werden und die Spannungszustände im Inneren des Betons beschrieben werden.

Bei konventionellem Stahlbeton findet die Verbundkraftübertragung über die Verzahnung der Stahlrippen mit den dazwischenliegenden Betonkonsolen statt. Dabei kommt es an den Stahlrippen zu einer konzentrierten Lasteinleitung. Hierbei bilden sich schon bei geringer Belastung Längszugspannungen, welche schnell die Betonzugfestigkeit überschreiten und zu frühzeitigen Querrissen führen. Diese Querrisse wurden von Goto (1979) nachgewiesen und werden häufig als Verbundrisse nach Goto bezeichnet. Die Querrisse bilden sich ringförmig aus. Sie beginnen an den Rippen und neigen sich etwa im Winkel von  $60\text{-}70^\circ$  gegen die Bewehrungsstabachse und messen eine Länge von ca.  $0,5d_s - 1,0d_s$ .

Gleichzeitig bilden sich mit der Relativverschiebung zwischen Stahl und Beton vor den Rippen Druckspannungen im Beton. Mit fortschreitender Belastung beginnt der Beton vor den Rippen zu zerbröseln und es entstehen Keile aus Betonmehl (Abb. 3-13 links). Diese keilförmig abgescherten Betonkonsolen schieben sich bei weiterer Belastung unter den umgebenden Beton und rufen radiale Druckspannungen hervor. Es bildet sich ein rotationssymmetrischer Druckspannungskegel aus. In einem Fachwerksmodell wird die Kegelschale als Druckstrebe unter dem Druckstrebenwinkel  $\alpha$  dargestellt (Abb. 3-12 links). Zum Ausgleich des Druckspannungskegels stellt sich am Ende des Kegels ein Zugspannungsring ein. In Abhängigkeit vom Druckstrebenwinkel  $\alpha$  können

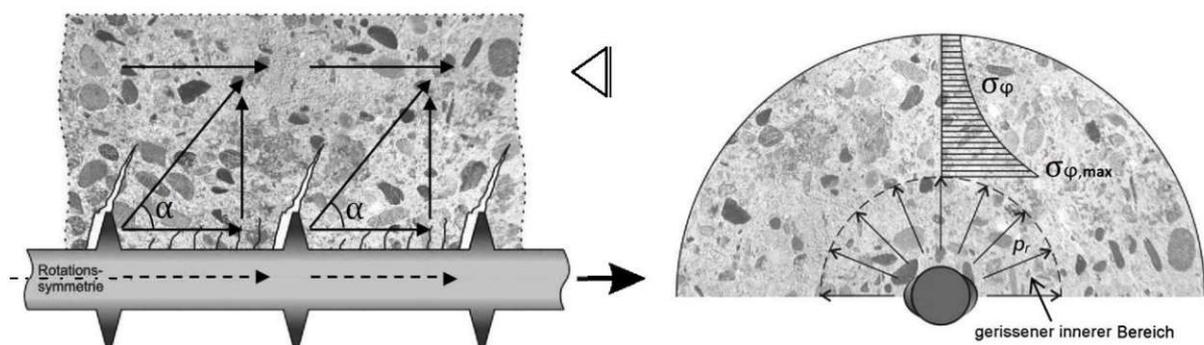


Abb. 3-12: Fachwerkmodell (links); Verlauf der Ringzugspannungen (rechts; in Anlehnung an Auer 2014)

sehr hohe Radialspannungen  $\sigma_r$  entstehen. Die Radialspannungen werden in Ringzugspannungen  $\sigma_\phi$  umgelenkt und müssen vom Zugring aufgenommen werden. Die Ringzugspannungen sind nahe der Bewehrungsstaboberfläche am größten und nehmen nach außen hin ab (Abb. 3-12 rechts; Petersen 2003; Auer 2014). In Abbildung 3-12-links sind die eben beschriebenen Kräfte in einem Fachwerkmodell anschaulich abgebildet. Die Diagonale unter dem Winkel  $\alpha$  stellt die Druckstrebe dar. Die Vertikalkraft bildet die Radialkraft ab. Die Ringzugkraft ist mit der Radialkraft kurzgeschlossen.

Aufgrund der Profilform des vorliegenden Bewehrungsstahls und der vorhandenen Betondeckung kann es zu unterschiedlichen Rissbildungen und Zerstörungen des Betons kommen. Wenn man die Versagensarten anhand der Betondeckung differenziert, gilt allgemein, dass bei geringer Betondeckung der Zugring des Betons die Ringzugspannungen nicht aufnehmen kann und der Beton infolge einer Sprenggriss- bzw. Längsrisssbildung längs der Bewehrung versagt. Diese Risse werden als Sprengrisse nach Tepfers bezeichnet, der 1973 das Ringzugspannungsmodell begründete und die Sprengrisssbildung infolge der Ringzugspannungen bestimmte (Tepfers 1973). Die Verbundkraftübertragung wird dabei völlig zerstört. Eine ausreichende Betondeckung oder eine zusätzliche Bewehrung in Querrichtung können ein Sprenggrissversagen verhindern.

Bei hoher Betondeckung tritt das Versagen üblicherweise in Form von Abscheren der Betonkonsolen auf. Hierbei entstehen Schubrisse an den Oberkanten der Rippen und die Betonkonsolen zwischen den Rippen scheren auf gesamter Länge ab (Abb. 3-13 rechts). Anschließend wird der Bewehrungsstab samt abgescherten Betonkonsolen aus dem Beton herausgezogen (Lindorf 2011; Auer 2014).

Differenziert man die Rissentstehung in Abhängigkeit der Rippenabstände des Bewehrungsstabes, lässt sich feststellen, dass enge Rippenabstände Schubrisse entlang der Oberkanten der Rippen begünstigen und ein Ausziehversagen hervorrufen, wohingegen große Abstände der Rippen die Ausbildung von keilförmig abgescherten Betonkonsolen erzeugen und die Radialspannungen und demzufolge die Ringzugspannungen im Beton erhöhen. Infolgedessen steigt die Gefahr einer Sprengrisssbildung. Die beiden Arten der inneren Schubrisse sind in Abbildung 3-13 abgebildet.

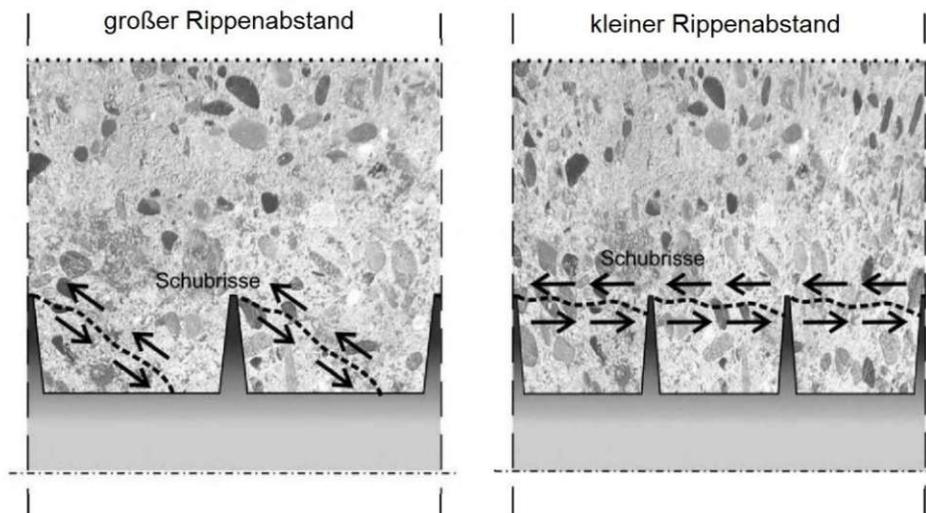


Abb. 3-13: Darstellung der Ausbildung von Schubrisse in Abhängigkeit des Rippenabstands (Auer 2014)

Der in der Baupraxis übliche Bewehrungsstahl hat ein definiertes Rippenhöhe-zu-Rippenabstand-Verhältnis, sodass sich bei Einhaltung der erforderlichen Betondeckung vor einer Sprenggrissbildung eher ein Abscheren der Betonkonsolen einstellt (Auer 2014).

### 3.7.2 Rissbildungsverhalten im Textilbeton

#### 3.7.2.1 Rissverhalten am textilbewehrten Dehnkörper

Das Rissbildungsverhalten von textilbewehrtem Beton wird ebenfalls an Dehnkörperversuchen untersucht. Dabei wird die Rissbildung aufgezeichnet und parallel die Spannungs-Dehnungs-Beziehung gemessen. Der Kurvenverlauf besteht im Gegensatz zu stahlbewehrtem Beton aus nur drei linearen Bereichen. Da Textilbewehrung kein plastisches Materialverhalten aufweist, entfällt

die letzte Phase, wo Fließen der Bewehrung auftreten würde und die Bewehrung versagt infolge eines Zugbruchversagens. Nachfolgend werden die drei Bereiche der Rissbildung von Beton mit epoxidharzgetränkter Textilbewehrung analog zum vorigen Kapitel mit Bezugnahme auf Abbildung 3-14 beschrieben.

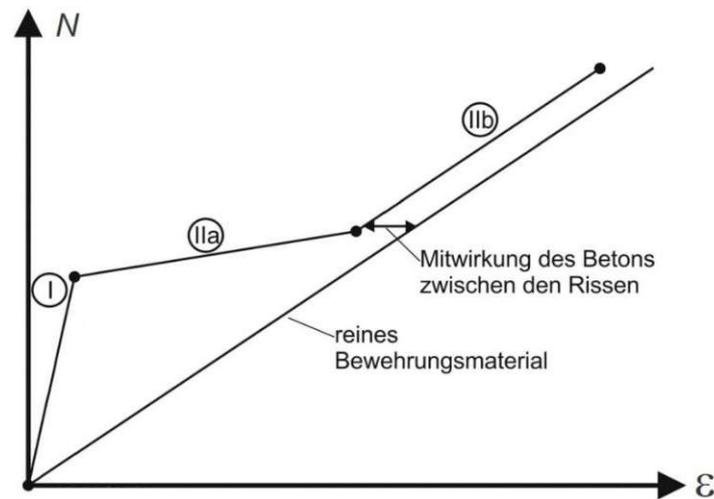


Abb. 3-14: Qualitativer Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie eines Dehnkörperversuchs aus Textilbeton mit steif getränkter Bewehrung (in Anlehnung an Kulas 2013)

**Bereich 1:** Der Betonzugstab befindet sich im ungerissenen Zustand, sprich im *Zustand I*. Es liegt ungestörter Verbund vor und die Faserstränge und die Betonmatrix weisen dieselben Dehnungen auf. Die beiden Komponenten beteiligen sich in Relation ihrer Dehnsteifigkeiten am Lastabtrag. Der lineare Anstieg der Linie entspricht dem Elastizitätsmodul des Verbundwerkstoffes (Lorenz 2014).

**Bereich 2a:** Dieser Bereich der Rissbildung wird bei textilbewehrtem Beton als *Zustand IIa* bezeichnet. Der Übertritt in diesen Zustand findet statt, sobald der erste Riss bei Erreichen der Betonzugfestigkeit entsteht. Es folgt eine schrittweise Rissbildung, wobei die Rissabstände nach und nach geringer werden. Kann sich in keinem Bereich des Betons eine höhere Zugspannung als die Betonzugfestigkeit ausbilden, ist die Rissbildung abgeschlossen. Der linearisierte Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Linie im Rissbildungsbereich ist in der Regel sehr flach. Schaut man sich den Bereich der Rissbildungsphase im Detail an, wird die Entstehung der einzelnen Risse ersichtlich (Abb. 3-15). Vergleicht man die erreichbaren Steifigkeiten nach den einzelnen Rissen, kann man einen kontinuierlichen Steifigkeitsabfall beobachten. Die Linearisierung dieses Abschnittes ergibt die Linie IIa (Kulas 2013; Lorenz 2014).

**Bereich 2b:** Können sich keine weiteren Risse mehr ausbilden, befindet sich der Textilbetonstab im *Zustand IIb*. Die Rissbildung ist abgeschlossen. Bei weiterer Laststeigerung werden die Kräfte von der textilen Bewehrung aufgenommen. Die Steifigkeit entspricht etwa der Dehnsteifigkeit der Faserstränge. Dies wird durch die Parallelität der beiden Diagramm-Linien des Verbundwerkstoffes und des reinen Bewehrungsmaterials verdeutlicht. Die Differenz der Linien zeigt wiederum die Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen. Gleichzeitig werden die Rissweiten der Trennrisse größer (Kulas 2013; Lorenz 2014). Wird bei weiterer Laststeigerung die maximale Bruchspannung der Fasern erreicht, tritt Versagen infolge Zugbruch der Bewehrung ein. Im Vergleich zu epoxidharzbeschichteter Textilbewehrung mit glatter Oberfläche weist textile Bewehrung mit einer zusätzlichen Sandbestreuung ein feineres Rissbild auf. Durch die raue Oberflächenbeschaffenheit werden die Rissbreiten und die Rissabstände deutlich verringert (Yanik 2021).

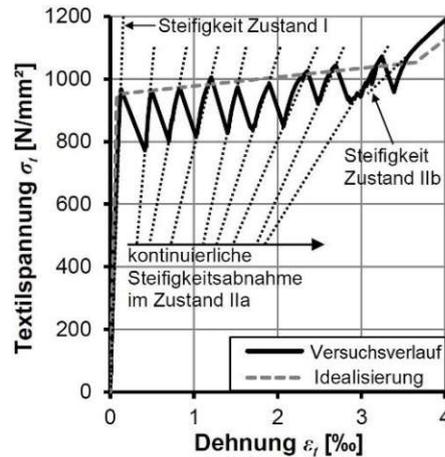


Abb. 3-15: Detailbereich der Rissbildungsphase IIa einer Spannungs-Dehnungs-Linie eines textilbewehrten Betonzugstabs (in Anlehnung an Kulas 2013)

### 3.7.2.2 Spaltrissbildung im Textilbeton

Die Beschreibung des Rissbildungsverhaltens von Textilbeton unter einaxialer Zugbeanspruchung wurde im vorherigen Abschnitt am Fall eines Zugbruchversagens demonstriert. Das Versagen durch Zugbruch der Faserstränge repräsentiert das Ergebnis mit der idealen Ausnutzung der Materialeigenschaften. Bei Dehnkörperversuchen an textilbewehrten Proben konnte jedoch häufig eine Längsrissbildung – auch als Spaltrissbildung bezeichnet – beobachtet werden (Abb. 3-16).

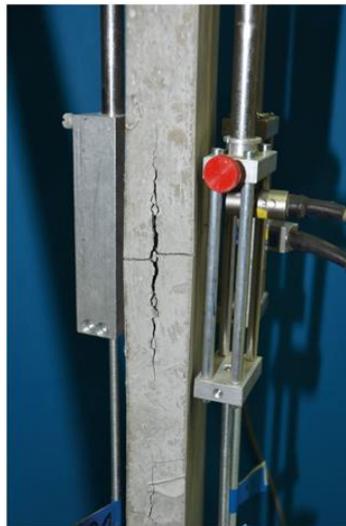


Abb. 3-16: Längsrissbildung in einem Dehnkörperversuch (Preinstorfer 2019)

Das Phänomen der Spaltrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung ist Gegenstand der Forschung. Das Problem wird vorrangig bei steif getränkten Rovings mit großer Querschnittsfläche beobachtet.

Preinstorfer et al. (2020) fassen in ihrer Publikation über Spaltrissbildung in textilbewehrtem Beton zusammen, dass die Spaltrissbildung maßgeblich von der Querschnittsgeometrie und der axialen Formänderung der Faserstränge abhängt. Grundsätzlich wirken sich eine sehr flache Querschnittsform der Rovings und eine ausgeprägte Dicken- und Breitenaufweitung negativ auf die Bildung von Spaltrissen aus und beeinflussen sich darüber hinaus gegenseitig. Wenn beide Effekte gleichzeitig auftreten, steigert sich die ungünstige Wirkung überproportional, wohingegen

mit einer runden Querschnittsform der textilen Bewehrung die Spaltzugkräfte orthogonal zur Bewehrungsebene eingeschränkt werden können und infolgedessen einer Spaltrissbildung vorgebeugt werden kann (Preinstorfer 2019).

### 3.7.2.3 Modell zur Berechnung von Spaltzugkräften

Preinstorfer (2019) entwickelt im Zuge seiner Arbeit ein Modell zur Berechnung von Spaltzugkräften. Die Berechnung beruht auf geometrischen Kenngrößen der textilen Bewehrung, welche im Wesentlichen die Größe der auftretenden Spaltzugkräfte bestimmen. Preinstorfer lässt dabei drei wesentliche geometrische Aspekte eingehen:

1.) **Einfluss der Rovingform:**

Die Rovingform stellt ein Maß für die Kompaktheit dar und beschreibt, ob die Querschnittsform eher der Form eines Kreises oder der Form einer Ellipse gleicht.

2.) **Einfluss der Ausprägung der Aufweitung:**

Die Ausprägung der Aufweitung definiert, ob sich die Querschnittsform eher in Dickenrichtung oder in Breitenrichtung längs des Faserstrangs verändert. Die vorhandene Aufweitung beeinflusst den Neigungswinkel  $\phi$  der Betondruckstrebe quer zur Längsrichtung des Faserstrangs.

3.) **Einfluss der Größe der Aufweitung:**

Die Größe der Aufweitung beeinflusst den Neigungswinkel  $\theta$  der Betondruckstrebe zur Längsachse.

Anhand der Gegenüberstellung der berechneten Spaltzugkräfte mit dem Betonwiderstand kann die Gefahr einer möglichen Spaltrissbildung beurteilt werden (Preinstorfer 2019). Die Berechnungsformeln sowie deren Herleitung befinden sich in Preinstorfer (2019). Der Betonwiderstand wurde auf Basis der Versuchsergebnisse kalibriert. In Beßling (2022) wurde weiterführend dazu der Einfluss der Maschenweite auf den Betonwiderstand untersucht.

# Kapitel 4

## Experimentelle Untersuchungen

### 4.1 Ziel der Untersuchungen

An der TU Wien wurden bereits viele Arbeiten geleistet, um das Verbundverhalten von textiler Bewehrung beschreiben und berechnen zu können. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist vor allem die Geometrie und die Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Faserstränge von großer Bedeutung. Aus diesem Grund wurden zuerst Laserscans der verwendeten Textilien gemacht, um die geometrischen Daten genau erheben zu können. Anschließend wurden Ausziehversuche durchgeführt, um daraus Daten für Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen (VSB) zu erhalten.

Das Ziel der Untersuchungen besteht darin, anhand der erhobenen Daten der Auszugversuche und der Daten der VSB, Zusammenhänge zwischen einzelnen Einflussparametern zu erkennen. In weiterer Folge sollen Ergebnisse aus vorangegangenen Forschungen, z.B. Preinstorfer (2019) und Yanik (2021), in die Analyse miteinbezogen werden. Während Preinstorfer (2019) den Zusammenhang zwischen Faserstranggeometrie und Eintreten einer Spaltrissbildung an textilbewehrten Versuchskörpern analysierte, führte Yanik (2021) Untersuchungen an Dehnkörperversuchen aus textilbewehrtem Beton über den Einfluss der Betondeckung und das Rissverhalten durch. Da bei den Versuchen der vorliegenden Arbeit der Fokus auf die geometrischen Merkmale und Oberflächenbeschaffenheit gerichtet ist, können die Themen Spaltrissbildung und Betondeckung vorerst separiert werden. Da Yanik (2021) bei seinen Versuchen dieselben Textilkonfigurationen untersucht hat, kann später aber auf seine Ergebnisse zurückgegriffen und wieder ein Konnex geschaffen werden.

### 4.2 Versuchsprogramm

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Prüfserien mit textilbewehrten Ausziehversuchen durchgeführt. Die untersuchten Textilien bestanden allesamt aus Carbonfasern mit steifer Tränkung aus Epoxidharz, wobei die Parameter Faserquerschnittsfläche, Verbundlänge, zusätzliche Sandbeschichtung und Wirkrichtung variierten.

Die Serien werden nach dem verwendeten Textiltyp benannt. Pro Versuchsserie wurden in der Regel drei Versuchsreihen<sup>1</sup> untersucht, welche sich in Beschichtungsart und Wirkrichtung unterschieden (siehe Tabelle 4-1). Die unbeschichteten Konfigurationen wurden in Schussrichtung und Kettrichtung analysiert, während die beschichteten Konfigurationen nur in eine der beiden Richtungen untersucht wurden, da bei den sandbeschichteten Textilien die Wirkrichtung erfahrungsgemäß keine großen Unterschiede bewirkt. Für die Prüfserie Q142 wurden zusätzliche größere

---

<sup>1</sup> Zum deutlicheren Verständnis wird die Bezeichnung *Serie* als überkategorisierte Bezeichnung für die drei Hauptserien herangezogen und die Bezeichnung *Versuchsreihe* als Unterkategorie pro Serie verwendet.

Versuchskörper mit doppelter Einbindelänge hergestellt, um den zusätzlichen Parameter der Verbundlänge untersuchen zu können.

Pro Versuchsreihe wurden drei Versuchskörper hergestellt und geprüft. Für die Prüfsreihe Q142 wurde pro Versuchsreihe je ein vierter Probekörper hergestellt, in dem ein Messsystem aus Glasfasern eingebaut wurde, um zu prüfen, ob ein solches Messsystem bei Textilbewehrung funktioniert. Die Auswertung der Faseroptik selbst ist nicht Teil dieser Arbeit. Die prinzipielle Auswertung der VSB ist aber möglich, weshalb diese Ergebnisse bei der Evaluierung berücksichtigt werden. Das verwendete Bezeichnungsschema ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Tabelle 4-1 bietet einen Überblick über die durchgeführten Serien und Reihen mit der Anzahl ihrer Versuchskörper.

Die verwendeten Kürzel stehen für folgende Eigenschaften:

- QXXX** bezeichnet den Bewehrungstyp. Die Zahl bezeichnet die Faserquerschnittsfläche pro Meter [mm<sup>2</sup>/m].
- MW** bezeichnet die Verbundlänge. Es werden Verbundlängen von einer oder zwei Maschenweiten verwendet. Die Größe einer Maschenweite beträgt für die Typen Q142 und Q95 je 38mm und für Typ Q85 21mm.
- UB/B** bezeichnet die Beschichtung. UB (unbeschichtet/unbesandet) steht dabei für Textilien mit Epoxidharzbeschichtung ohne zusätzliche Sandbeschichtung. B (besandet) bezeichnet jene Textilien mit Epoxidharzbeschichtung und zusätzlicher Sandbeschichtung aus Quarzsand.
- K/S** bezeichnet die Wirkrichtung. K steht für die Prüfung des Kettrovings und S steht für die Prüfung des Schussrovings.
- VX** steht für die Versuchsnummer. Die Versuchsnummern reichen bei Serie Q142 von V1-V4 und bei den Serien Q95 und Q85 je von V1-V3.

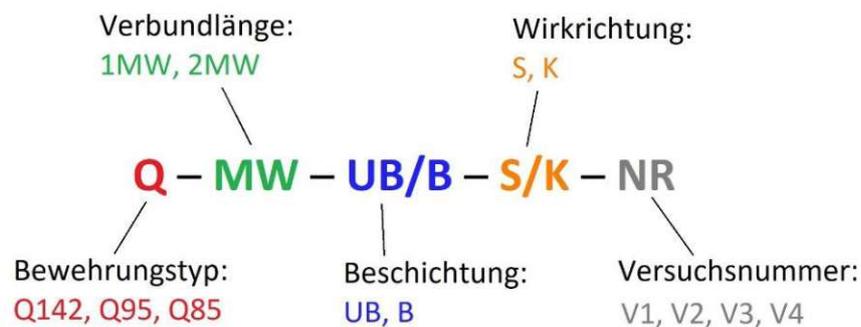


Abb. 4-1: Bezeichnungsschema

Tab. 4-1: Übersicht der durchgeführten Versuche

	Serie Q 142	Serie Q 95	Serie Q 85
<b>Q-MW-UB-K</b>	Q142-1MW-UB-K (4) Q142-2MW-UB-K (4)	Q95-1MW-UB-K (3)	Q85-2MW-UB-K (3)
<b>Q-MW-UB-S</b>	Q142-1MW-UB-S (4) Q142-2MW-UB-S (4)	Q95-1MW-UB-S (3)	Q85-2MW-UB-S (3)
<b>Q-MW-B-S/K</b>	Q142-1MW-UB-S (4)	Q95-1MW-B-K (3)	Q85-2MW-B-K (3)

## 4.3 Materialien

### 4.3.1 Textile Bewehrung

Um eine bessere Vergleichbarkeit für die durchgeführten Untersuchungen zu ermöglichen, werden wurden dieselben Textilien verwendet, welche bereits in vergangenen Versuchen an der TU Wien verwendet wurden (z.B. Yanik 2021). Diese Textilien sind jene des Herstellers *solidian* (solidian 2018).

Bei den verwendeten Textilien handelt es sich um folgende Typen aus dem Jahre 2018:

- solidian GRID Q142-CCE-38-E5
- solidian ANTICRACK Q142-CCE-38-E5
- solidian GRID Q95-CCE-38-E5
- solidian ANTICRACK Q95-CCE-38-E5
- solidian GRID Q85-CCE-21-E5
- solidian ANTICRACK Q85-CCE-21-E5

Bei den verwendeten Bewehrungskonfigurationen handelt es sich bei allen Typen um textile Mattenbewehrung mit quadratischen Maschen. Die Faserstränge verlaufen bei allen Typen rechtwinkelig zueinander und weisen in Kett- und Schussrichtung je dieselben Faserquerschnittsflächen und dieselben Achsabstände auf. Alle Textiltypen bestehen aus Carbonfasern mit einer vollständigen Tränkung aus Epoxidharz. Die Typen GRID weisen eine glatte Oberfläche auf. Die Typen ANTICRACK haben in deren Epoxidharzbeschichtung zusätzlich Quarzsandkörner eingestreut und besitzen deshalb eine sehr raue Oberfläche.

Die geometrischen und mechanischen Kennwerte wurden den technischen Datenblättern des Herstellers entnommen und sind in den Tabellen 4-2 und 4-3 zusammengefasst. Die Kenndaten gelten je Bewehrungstyp sowohl für die Typen GRID als auch für die Typen ANTICRACK. Die Typen unterscheiden sich lediglich durch die Besandung.

Tab. 4-2: geometrische Kenngrößen (solidian 2018)

	Bewehrungsquerschnittsfläche [mm <sup>2</sup> /m]	Faserquerschnittsfläche Einzelstrang [mm <sup>2</sup> ]	Achsabstand Einzelstrang [mm]
Q142-CCE-38-E5	Kett: 142	Kett: 5,42	Kett: 38
	Schuss: 142	Schuss: 5,42	Schuss: 38
Q95-CCE-38-E5	Kett: 95	Kett: 3,62	Kett: 38
	Schuss: 95	Schuss: 3,62	Schuss: 38
Q85-CCE-21-E5	Kett: 85	Kett: 1,81	Kett: 21
	Schuss: 85	Schuss: 1,81	Schuss: 21

Tab. 4-3: mechanische Kenngrößen (solidian 2018)

	Garnzugfestigkeit	mittlere Bruchspannung	E-Modul	aufnehmbare Kraft pro Strang <sup>1</sup>
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N]
Q142-CCE-38-E5	Kett: >4.000	Kett: >2.500	Kett: >180.000	Kett: 13.550
	Schuss: >4.000	Schuss: >2.800	Schuss: >180.000	Schuss: 15.176
Q95-CCE-38-E5	Kett: >4.000	Kett: >3.200	Kett: >220.000	Kett: 11.584
	Schuss: >4.000	Schuss: >3.300	Schuss: >205.000	Schuss: 11.946
Q85-CCE-21-E5	Kett: >4.000	Kett: >3.600	Kett: >230.000	Kett: 6.516
	Schuss: >4.000	Schuss: >3.600	Schuss: >230.000	Schuss: 6.516

#### 4.3.1.1 Laserscans

Zur Erfassung und Analyse der genauen Oberflächengeometrie der untersuchten Textilien wurden 3D-Laserscans gemacht. Dazu wurden mit einem Nikon/Metris MCA3600-Messarm (Abb. 4-3 links) und einem aufgebrauchten Metris MMD50-Laserscanner in der Metrology-Grade-Ausführung (Abb. 4-3 rechts) die Oberflächen der einzelnen Textilien vermessen. Im Vorfeld wurden der Koordinatenmessarm und das Handstück im Raum kalibriert und anschließend wurden mit einem Laserstrahl die Oberflächen der Textilien mit hoher Messgenauigkeit abgetastet. Infolgedessen wurden dreidimensionale digitale Punktwolken (Abb. 4-4 links) erhalten, welche mittels geeigneter Software zu dreidimensionalen digitalen Objekten (Abb. 4-4 rechts) umgewandelt werden konnten. Die digitale Bearbeitung der Laserscans erfolgte mit der Software MeshLab. In der Nachbearbeitung konnten die gewünschten Abmessungen genau erhoben werden (Preinstorfer 2019).

Da die gescannten Textilien in Axialrichtung keinen konstanten Querschnitt aufweisen, wurde für die Ermittlung des Umfangs und der Fläche die Mantelfläche bzw. das Volumen eines Faserstrangabschnitts innerhalb einer Maschenweite gemessen und durch die Länge der Maschenweite dividiert. Somit entsprechen die Umfangs- und die Flächenangaben dem gemittelten Umfang und der gemittelten Querschnittsfläche.

In Tabelle 4-4 sind einige geometrischen Kenngrößen der einzelnen Textilien aufgelistet. Eine Übersicht aller erhobenen geometrischen Daten befindet sich im Anhang A.

Tab. 4-4: Aus den Laserscans ermittelte geometrische Kenngrößen der Textiltypen

GRID	A	U	U/A	ANTICRACK	A	U	U/A
	[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[-]		[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[-]
<b>Q142-38-K</b>	13,91	14,84	1,07	<b>Q142-38-K</b>	12,27	14,42	1,18
<b>Q142-38-S</b>	13,80	14,86	1,08	<b>Q142-38-S</b>	13,97	16,94	1,21
<b>Q95-38-K</b>	8,43	11,13	1,32	<b>Q95-38-K</b>	11,55	13,19	1,14
<b>Q95-38-S</b>	8,66	12,74	1,47	<b>Q95-38-S</b>	13,54	14,59	1,08
<b>Q85-21-K</b>	4,12	7,94	1,93	<b>Q85-21-K</b>	6,64	10,40	1,57
<b>Q85-21-S</b>	4,03	8,68	2,15	<b>Q85-21-S</b>	6,94	11,44	1,65

<sup>1</sup> Die maximal aufnehmbare Kraft pro Strang wurde aus der vom Hersteller angegebenen mittleren Bruchspannung und der angegebenen Faserquerschnittsfläche pro Strang berechnet.



Abb. 4-2: Laserscanner mit Messarm (links); Handstück (rechts)

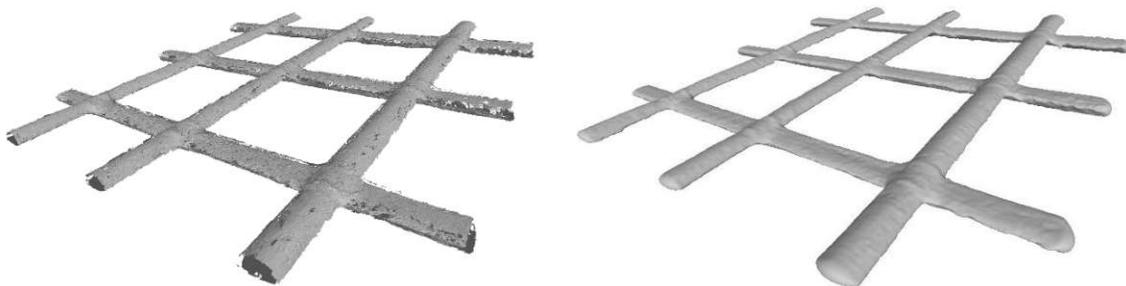


Abb. 4-3: Ansicht der Textilien in der Software MeshLab: digitale Punktwolke (links); digitales 3D-Modell (rechts)

#### 4.3.1.2 Geometrische Beschreibung der Textilien

Wie eingangs im Kapitel der Textilherstellung schon erwähnt, weisen die Textilien aufgrund ihrer Verarbeitung typische geometrische Besonderheiten auf. Aufgrund der Tränkung und Quetschung besitzen die Textilquerschnitte generell eher flache ellipsenähnliche Formen. Einen großen Einfluss auf die Geometrie haben darüber hinaus die Wirkrichtung und die Art der Bindung.

Die Textilkonfiguration Q142 ist mittels Trikot-Bindung mit Nadelversatz gebunden. Der Kettroving ist außerdem in zwei Hälften geteilt und zweimal vernäht. Dies verschafft ihm eine flache und in Längsrichtung konstante Form. Eine Dicken- bzw. Breitenaufweitung ist nicht ersichtlich. Der umwickelte Wirkfaden verschafft der Oberfläche des Kettrovings leichte Rippen. Der dazugehörige Schussroving weist ebenfalls eine sehr flache elliptische Form auf. Für den Schussroving ist es typisch, dass er, da er nur an den Kreuzungsstellen mit dem Wirkfaden vernäht ist, in den Kreuzungspunkten eine engere Querschnittsform aufweist und sich in der Feldmitte üblicherweise aufweitet. Dies ist auch beim Schussroving der Konfiguration Q142 zu sehen, der sowohl eine leichte Dicken- als auch eine leichte Breitenaufweitung besitzt. Der Scan von Q142 ist in Abbildung 4-4 links zu sehen. Die Kettrovings befinden sich im Bild in der unteren Lage.

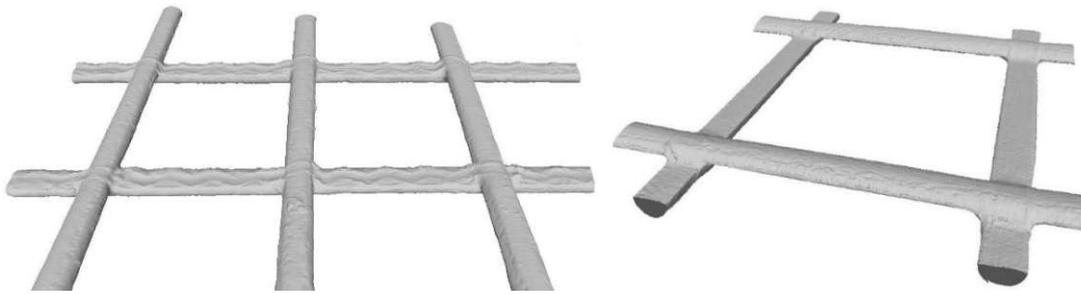


Abb. 4-4: Laserscan von Q142 (links) und Q95 (rechts); Ketrovings in unterer Lage

Die Textilkonfiguration Q95 ist mittels konventioneller Doppelt-Trikot-Bindung, gegenlegig, gebunden. Diese Bindung wirkt sich wesentlich auf die geometrische Form des Ketrovings aus. Der Ketroving besitzt eine sehr ebene Oberseite<sup>1</sup> und hat auf der Unterseite einen Bauch (Abb. 4-5 rechts). Die Querschnittsform ist allgemein kompakter. Die Knotenpunkte sind flach gepresst, während sich der Ketroving innerhalb der Maschenweiten hauptsächlich in Dickenrichtung nach unten aufweitet. Dies liegt daran, dass der Ketroving in diesem Bereich nicht vom Wirkfaden umwirkt wird, sondern der Wirkfaden nur unten „am Bauch“ verläuft. Der zusätzliche Faden am Bauch verstärkt den Effekt der Dickenaufweitung. Darüber hinaus können am Bauch eventuelle Harzüberschüsse haften bleiben und in dieser Form erhärten. Dies steigert den bauchigen Effekt ein weiteres Mal. Der Schussroving zeichnet sich wiederum durch die übliche Schussrovinggeometrie aus. Er hat einen flachen, ellipsenförmigen, im Knotenpunkt engeren und im Feldbereich einen in Dicken- und Breitenrichtung leicht aufgeweiteten Querschnitt. Der Scan von Q95 ist in Abbildungen 4-4 rechts dargestellt.

Die Textilkonfiguration Q85 ist ebenfalls mit Doppelt-Trikot, gegenlegig, gebunden und stellt das Kleinformat von Q95 dar. Während das kleinere Format dem Schussroving eine gleichmäßigere Form verschafft, da er sich innerhalb der Maschenweiten weniger aufweiten kann, bewirkt es beim Ketroving das Gegenteil. Die Bindungsart auf kurzer Strecke vergrößert den Einfluss des Wirkfadens zwischen Knotenbereich und Feldbereich. Der Ketroving weist in Relation eine größere Ausbauchung auf. Die beschriebenen Merkmale sind in Abbildung 4-5 links zu sehen.

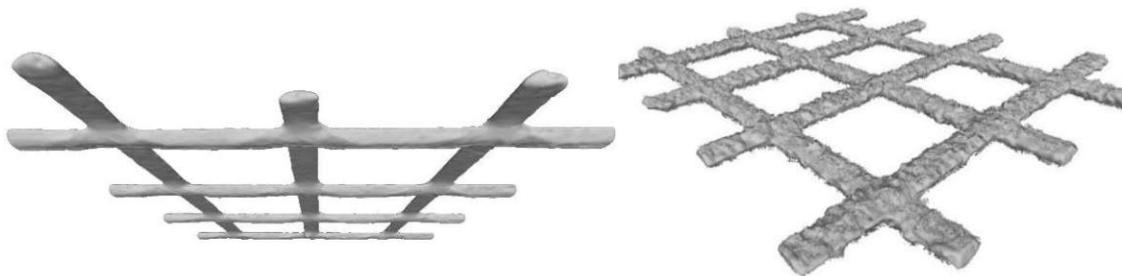


Abb. 4-5: Laserscans von Q85 unbesandet (links) und besandet (rechts); Untersicht; die Ketrovings befinden sich in der unteren Lage

Die besandeten Versionen besitzen die ursprüngliche Geometrie der unbesandten Serie, weisen aber eine größere Oberfläche durch die zusätzlichen Sandkörner auf. Die raue Oberflächenbeschaffenheit stellt den maßgeblichen Faktor für das Verbundverhalten dar. Der genaue geometrische Verlauf der Rovings in Längsrichtung ist von untergeordneter Bedeutung. Die flache Querschnittsform bleibt aber weiterhin erhalten und spielt eine wichtige Rolle. In Abbildung 4-5 rechts

<sup>1</sup> Die eingeführte Definition der Oberseite und Unterseite der Textilien wird im *Kapitel 2.1.2.3-Textilie Halbzeuge* erläutert.

ist vertretend für die besandeten Textilien, der Laserscan der Textilkonfiguration Q85-besandet abgebildet.

Genauere Ansichten und Schnitte der einzelnen Rovings, ergänzend zu den obigen Beschreibungen, sind dem Anhang A beigelegt.

### 4.3.2 Beton

Für die Versuchskörper wurde ein den Anforderungen der Textilbewehrung entsprechend angepasster hochfester Beton (englisch High Performance Concrete – HPC) verwendet, der auch schon für vorangegangene Untersuchungen mit Textilbeton an der TU Wien verwendet wurde. Dies ermöglicht eine Vergleichbarkeit zu bereits durchgeführten Arbeiten und verringert den Einfluss der Betonzusammensetzung auf die Ergebnisse. Die Betonrezeptur ist in Tabelle 4-5 aufgelistet.

Tab. 4-5: Betonzusammensetzung

Bestandteil	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]
Sand 0/1	1419,08
Zement Cem I	569,16
Kalksteinmehl	113,83
Mikrosilika	62,61
Fließmittel	22,77
Konsistenzhalter	11,38
Schwindreduktionsmittel	6,36
Entlüfter	1,00
Beschleuniger	6,36
Wasser	187,26

## 4.4 Versuchsaufbau

Für Verbundversuche von Textilbeton gibt es noch keine normativen Regelungen. In *Kapitel 3.5 – Ausziehversuche* wurden einige gängige Versuchsaufbauten vorgestellt. Um die ideale VSB der untersuchten Textilien zu erhalten, bei dem ein Versagen infolge Spaltrissbildung verhindert werden soll, wurde eine Versuchskonfiguration in Anlehnung an den RILEM-Prüfkörper gewählt, welcher für gewöhnlich für Verbundversuche im Stahlbeton verwendet wird.

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhalten, wurde die Verbundlänge mit einer Maschenweite festgelegt. Der zu untersuchende Faserstrang wurde mittig in den Betonwürfel einbetoniert. Die Kantenlängen des Betonwürfels betragen je 100mm. Durch die daraus resultierende hohe Betondeckung wurde eine Spaltrissgefahr weitgehend ausgeschlossen. Der Testroving wurde so im Betonkörper platziert, dass sich der Knotenbereich in der Mitte der Verbundstrecke befand. Auf der lastabgewandten Seite des Prüfkörpers schaute das Ende des Testrovings heraus, um daran den Schlupf messen zu können. Der Querroving im Verbundbereich wurde nicht vom Testroving entfernt, um eventuelle Einflüsse des Querrovings realitätsnah abbilden zu können. Auf der restlichen Länge des Betonkörpers wurde der Roving durch ein Stahlrohr vom Betonkörper isoliert. Das war einerseits notwendig, um die genaue Verbundlänge von einer Maschenweite zu erhalten und andererseits, um auf der lasteinleitenden Seite störende Einflüsse der Auflagerung (Querdehnungsbehinderung) zu minimieren.

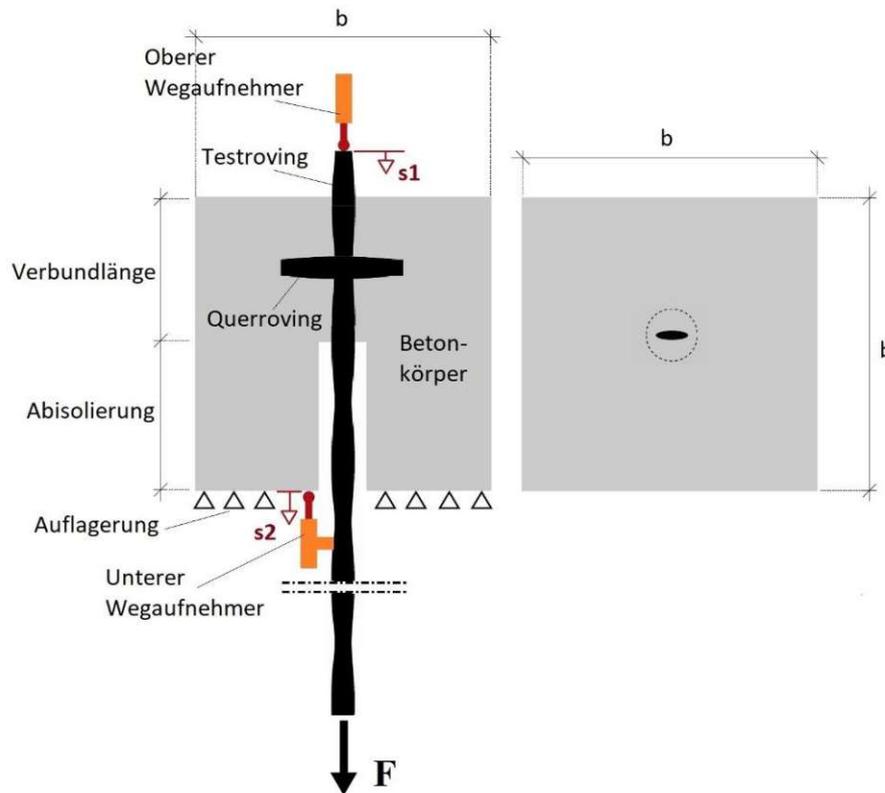


Abb. 4-6: Darstellung des verwendeten Versuchsaufbaus in Anlehnung an RILEM

Bei der Versuchsdurchführung wurde am unteren Ende des Teststrangs eine Kraft aufgebracht und der Teststrang kontinuierlich aus dem Betonkörper gezogen. Währenddessen wurde die Relativverschiebung auf der lastabgewandten Seite sowie auf der lastzugewandten Seite zwischen Betonkörper und Testroving gemessen. In Abbildung 4-8 ist der verwendete Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Bei den zusätzlichen Versuchskonfigurationen der Serie Q142 mit der vergrößerten Verbundlänge, wurde der Betonkörper mit einer Kantenlänge von 150mm hergestellt, um die erforderliche Aussparungslänge auf Auflagerseite einzuhalten und einen höheren Spaltzugwiderstand für die höheren Spaltzugkräfte zu gewährleisten.

## 4.5 Herstellung der Probekörper

Die Probekörper wurden im Labor des Instituts für Baustofflehre der TU Wien hergestellt. Zuerst wurden entsprechende Holzschalungen mit den Abmessungen 100x100x100mm und 150x150x150mm gebaut. In eine Seite der Schalung wurde ein Loch mit einem Durchmesser von ca. 12mm gebohrt. Über dieses Loch wurde an der Innenseite der Schalung ein Stück eines Edelstahlrohrs mittels Heißklebepistole angebracht. Die Rohre wurden vorab auf eine Länge zugeschnitten, welche der Differenzlänge der Kantenlänge des jeweiligen Schalkörpers abzüglich der Einbindelänge des jeweiligen Textils entspricht. Auf der gegenüberliegenden Seite wurde ebenfalls ein Loch mit einem Durchmesser von ca. 10mm gebohrt. Dieses Loch war für das herausschauende Ende des Testrovings gedacht. Für die Testrovings wurde je ein Strang aus der Bewehrungsmatte herausgeschnitten. Fast alle Querrovings wurden ganz knapp am Testroving abgetrennt, damit man diesen in den Schalungskörper bzw. in das Isolierungsrohr einfädeln konnte. Lediglich ein bzw. zwei Querrovings (je nach Einbindelänge) die für den Verbundbereich bestimmt waren, wurden am Testroving drangelassen. Nachdem der Testroving in der Schalung korrekt platziert wurde, konnten das Loch in der Schalung für das herausschauende

Faserstrangende und das obere Loch des Stahlrohrs mittels Isolierbandes abgedichtet werden, um ein Auslaufen des Betons zu verhindern und um die Lage des Faserstrangs zu sichern. Die für die Betonage vorbereiteten Versuchskörper sind in Abbildung 4-9 dargestellt.



Abb. 4-7: Prüfkörper mit Verbundlänge einer Maschenweite (links) und zwei Maschenweiten (rechts)

Die Versuchskörper wurden in zwei Abschnitten zu je einer Betoncharge betoniert. Im ersten Teil wurde die Serie Q142 mit der ersten Charge betoniert. Im zweiten Teil wurden die Serien Q95 und Q85 mit der zweiten Charge betoniert. Die Betonherstellung erfolgte in einem Intensivmischer. Im Zuge des Betoniervorgangs wurden pro Charge jeweils drei Probekörper für Festigkeitsprüfungen, unter anderem zur Bestimmung der Druckfestigkeit und zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit, mitbetoniert. Im Anschluss an die Betonage wurden die Probekörper im Zuge der Nachbehandlung mit einer Plane abgedeckt. Die Ausschalung erfolgte zwei Tage nach dem Betonieren. Anschließend wurden die Probekörper bis zur Versuchsdurchführung für mind. 28 Tage in einer Klimakammer gelagert. Die Raumtemperatur hierin betrug konstant 20°C bei einer relativen Raumfeuchte von 60%. Die gemittelten Festigkeitswerte der Festigkeitsprüfungen pro Charge sind in Tabelle 4-6 zusammengefasst.

Tab. 4-6: Betonfestigkeiten der Betonchargen

	Charge 1	Charge 2
Würfeldruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	114,8	113,2
Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	11,3	12,8

Zuletzt wurden etwa 2-3 Tage vor der eigentlichen Versuchsdurchführung die lastzugewandten Enden der Testrovings in Stahlrohre einbetoniert, um bei der Versuchsdurchführung eine sichere Lasteinleitung zu garantieren und ein frühzeitiges Versagen zufolge hoher Querdruckbeanspruchung an der Lasteinleitungsstelle zu vermeiden. Dazu wurden ca. 80mm lange Edelstahlrohre verwendet, deren Länge mit der Klemmlänge der Prüfmaschine einherging. In die Rohre wurden auf einer Seite, auf welcher später der Faserstrang aus dem Rohr ragt, ein Gewinde eingeschnitten, um die Rauigkeit zu erhöhen und infolgedessen den Verbund zu verbessern. Außerdem wurde diese Seite leicht gequetscht, um im Zuge des Versuchs den Auszug des Betons aus dem Rohr zu vermeiden. Die fertigen Prüfkörper sind in Abbildung 4-10 abgebildet.

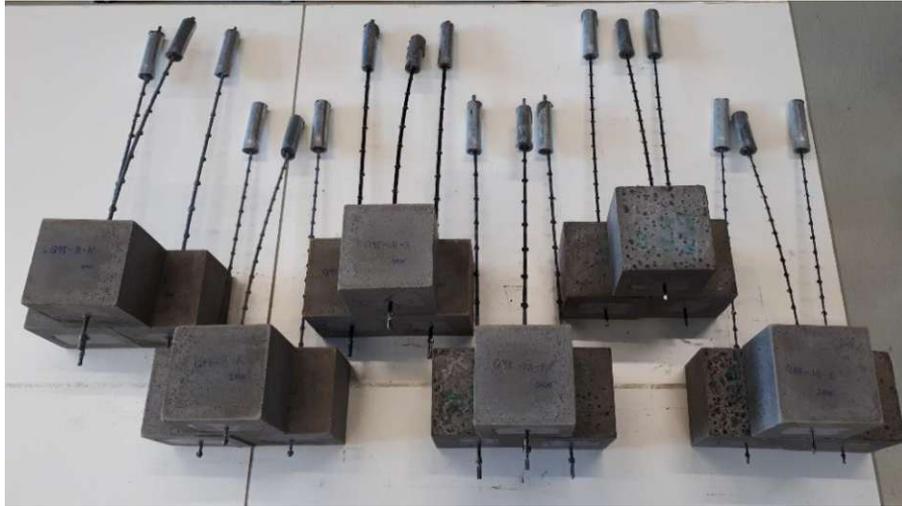


Abb. 4-8: Fertige Prüfkörper der Serien Q95 und Q85

## 4.6 Versuchsdurchführung

Für die Versuchsdurchführung wurde eine Spindelprüfmaschine Typ Zwick verwendet. Um die Prüfkörper in der Maschine platzieren zu können, wurde eine Stahlplatte über vier Gewindestangen am oberen Teil der Prüfmaschine abgehängt. Die Stahlplatte hatte in der Mitte ein Loch, wodurch der Faserstrang geführt werden konnte. Auf dieser Stahlplatte wurde der Versuchskörper gelagert. Am unteren Teil der Prüfmaschine wurde das Rohr für die Einspannung, in welches das untere Ende des Faserstrangs betoniert wurde, mittig mit Klemmbacken eingeklemmt. In Abbildung 4-11 links ist die Prüfmaschine mit eingebautem Prüfkörper abgebildet. Abbildung 4-11-rechts zeigt ein Foto des für die Prüfung fertig vorbereiteten Prüfkörpers inklusive der angebrachten Wegaufnehmer.

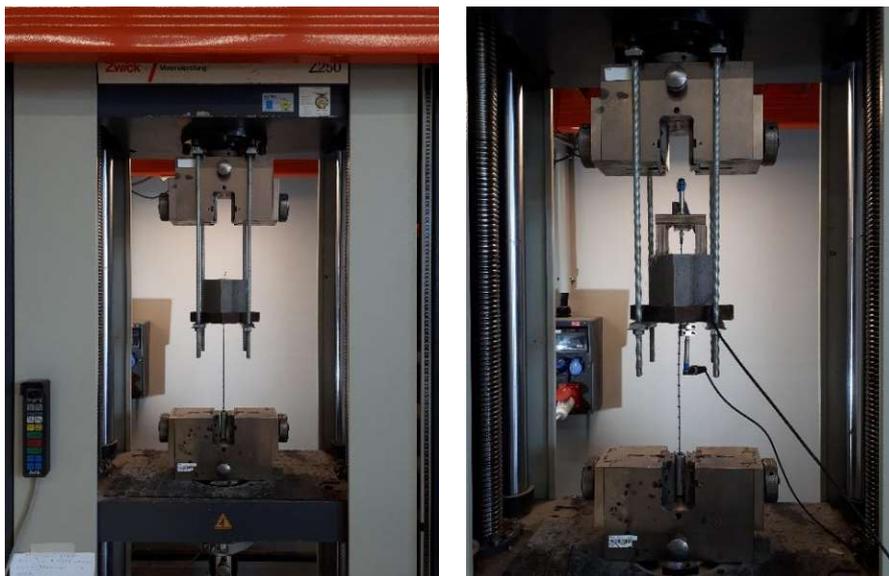


Abb. 4-9: Prüfmaschine mit gelagertem Prüfkörper (links); Prüfkörper inkl. Wegaufnehmer (rechts)

Nach erfolgter Positionierung und Fixierung des Prüfkörpers, wurden die Wegaufnehmer mittels Heißklebepistole am Faserstrang platziert. Ein Wegaufnehmer wurde an der lastzugewandten Seite des Testroving, direkt unter der Lagerplatte angebracht (Abb. 4-12 links), während der

zweite Wegaufnehmer an der lastabgewandten Seite, am oben herausschauenden Ende des Rovings mit Hilfe einer Holzkonstruktion angebracht wurde (Abb. 4-12 rechts).

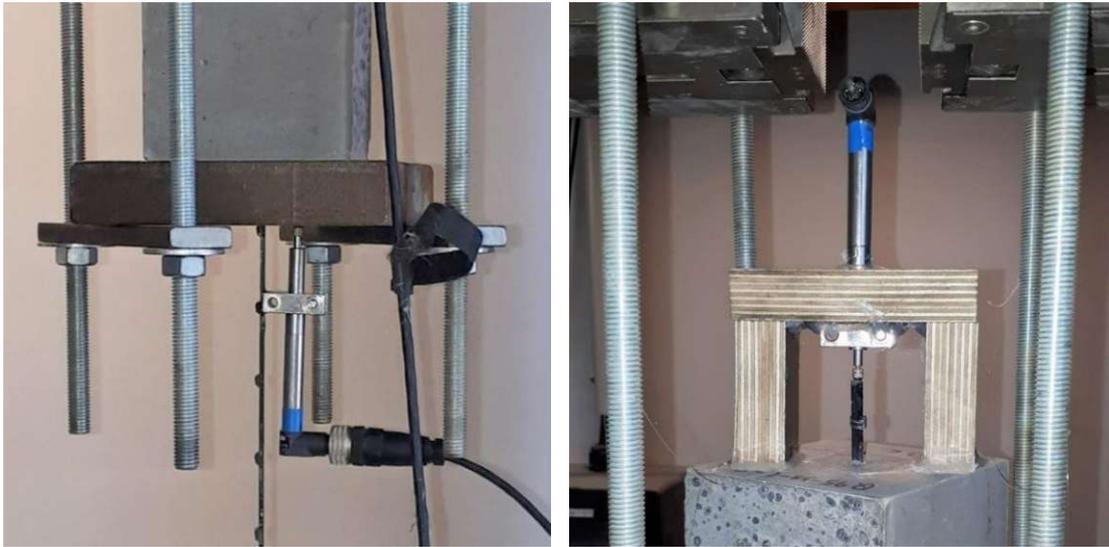


Abb. 4-10: Lastzugewandter Wegaufnehmer (links); lastabgewandter Wegaufnehmer (rechts)

Die Prüfung erfolgte weggesteuert mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1mm/min. Die Kraft wurde über eine in der Prüfmaschine integrierte Zugkraftmessdose aufgezeichnet. Parallel wurde der Schlupf am lastzugewandten sowie am lastabgewandten Ende des Faserstrangs aufgezeichnet. Die Versuche wurden nach Versagen oder falls dieses bei kontinuierlichem Auszug nicht eintrat, nach ca. 20 Minuten (bzw. 20mm) beendet.

Nach Beendigung eines Versuches, wurde der jeweilige Versuchskörper in der Bewehrungsebene gespalten, um den Roving auf Schädigungen zu untersuchen. Außerdem wurde die tatsächliche Verbundlänge gemessen, um herstellungsbedingte Ungenauigkeiten in der Auswertung berücksichtigen zu können. Von jedem geöffneten Prüfkörper wurden Fotos gemacht. Die Protokolle zu den einzelnen Versuchen sind im Anhang B beigefügt.

## 4.7 Versuchsauswertung

Für die Auswertung der Versuche wird die Software Matlab herangezogen. Pro Versuchsreihe werden die Daten der Zugmaschine, in Form von aufgebrachter Kraft in Abhängigkeit vom Maschinenweg bzw. der Zeit, und die Daten des unteren und oberen Wegaufnehmers, in Form der Verschiebung in Abhängigkeit von der Zeit, von jedem einzelnen Versuch dieser Reihe in das Programm eingelesen, synchronisiert und in der gewünschten Form wieder ausgegeben. Es werden nur die Messdaten bis zur maximalen Belastung berücksichtigt. Ein allfälliges Post-peak behavior wird nicht näher untersucht. Für die Versuchsauswertung sind dabei vorerst die Verbundkraft-Schlupf-Beziehungen (VKSB) der einzelnen Versuche relevant. Die entsprechenden Diagramme werden im *Kapitel 5.1 – Versuchsergebnisse* analysiert. Dabei werden die lastzugewandten und die lastabgewandten Schlupfe separat dargestellt und untersucht. Die Messdaten der Zugmaschine und die Fotos der geöffneten Versuchskörper sind dem Anhang B beigefügt.

Um die Ergebnisse der einzelnen Reihen und Serien untereinander vergleichen zu können, müssen die VKSB in die Form von Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen (VSB) gebracht werden, welche für das *Kapitel 5.2 – Diskussion der Ergebnisse* relevant sind. Für die Umrechnung der VKSB auf VSB werden die Verbundkräfte durch den Rovingumfang und die Länge der Verbundstrecke dividiert. Dazu werden jeweils die aus den Laserscans ermittelten Rovingumfänge und die jeweils gemessenen tatsächlichen Verbundlängen pro Versuch in die Auswertung miteinbezogen. Pro

Versuchsreihe werden außerdem Mittelwert-Funktionen mit dazugehöriger Standardabweichung der einzelnen VKSB bzw. VSB berechnet. Dies wird jeweils pro lastzugewandtem und lastabgewandtem Schlupf durchgeführt, je nachdem, welches Schlupfende betrachtet werden soll. Die gemittelten Funktionen repräsentieren die Ergebnisse der einzelnen Reihen. Die Standardabweichung stellt überdies den Streubereich der durchgeführten Versuche innerhalb der Reihe dar.

#### 4.7.1 Berücksichtigung von Fehlerquellen

Im Zuge der Auswertung wurde festgestellt, dass bei einigen Versuchskörpern zu Beginn der Laststeigerung eine negative Verschiebung am lastzugewandten Wegaufnehmer vorlag. Dies wird auf die Tatsache zurückgeführt, dass der lastzugewandte Wegaufnehmer direkt am Teststrang angeklebt ist und sich der Roving im Zuge der Erstbelastung streckt und teilweise verdreht. Der Wegaufnehmer zeichnet in weiterer Folge eine leichte Verdrehung auf. Dasselbe kann auch in die entgegengesetzte Richtung passieren. Ab dem Zeitpunkt, ab dem der Strang festgezogen ist, zeichnet der Wegaufnehmer die Verschiebungen des lastzugewandten Schlupfes korrekt auf. Anfangsverdrehungen wurden in weiterer Folge demnach herausgerechnet und sind in den Analysediagrammen nicht mehr enthalten.

Da der lastzugewandte Wegaufnehmer direkt am Teststrang angeordnet ist, muss eine weitere Korrektur der Ergebnisse vorgenommen werden, da der lastzugewandte Wegaufnehmer eine allfällige Dehnung des Faserstrangs zwischen dem Klebepunkt des Wegaufnehmers und der Einbindung in den Betonkörper misst. Die Rausrechnung dieser mitgemessenen Dehnung wird in Abhängigkeit der Länge der jeweiligen freiliegenden Strecke und des Elastizitätsmoduls des jeweiligen Testrovings abhängig von der aufbrachten Last in der Auswertung berücksichtigt.

#### Unvermeidbare Fehlerquellen

Im Laufe der Ergebnisinterpretation ist es in einigen wenigen Fällen zu Widersprüchen in den Messdaten gekommen. Diese können aus kleinen Ungenauigkeiten resultieren und stellen unvermeidbaren Fehlerquellen dar. Solche Fehlerquellen wären im Folgenden etwa Herstellungsungenauigkeiten der selbst gebauten Versuchskörper aber auch herstellungsbedingte Ungenauigkeiten der textilen Bewehrungsstränge. Eben angesprochene Widersprüche betreffen im Folgenden Q142-1MW-UB-S und Q95-1MW-UB-S. Bei den Diagrammen kommt es zu Überschneidungen der Kurven des lastzugewandten und lastabgewandten Schlupfes was praktisch betrachtet nicht plausibel erscheint. Aus diesem Grund werden diese Versuchskörper nicht in die Auswertung miteingezogen.

Die größte Unsicherheit stellen aber die jeweiligen Elastizitätsmodule der verschiedenen Faserstrangtypen dar. In Anlehnung an die Diplomarbeit von Yanik (2021) können die Elastizitätsmodule der Faserstränge in großem Maße von den Herstellerangaben abweichen. Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden keine eigenen Elastizitätsmodul-Messungen durchgeführt. Da es sich bei den in dieser Arbeit verwendeten Textilien um dieselben Textilien handelt, die Yanik in seiner Arbeit verwendet hat (selbe Charge), werden in weiterer Folge die Elastizitätsmodulen aus seiner Arbeit herangezogen. Die verwendeten E-Modul-Werte aus Yanik (2021) sind den E-Modul-Werten des Herstellers in Tabelle 4-7 gegenübergestellt.

Tab. 4-7: Gegenüberstellung der E-Modul-Werte aus den Herstellerangaben *solidian* (2018) und den Messwerten aus Yanik (2021)

	E-Modul Hersteller für UB und B [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul Yanik für UB [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul Yanik für B [N/mm <sup>2</sup> ]
Q142-CCE-38-E5	Kett: >180.000 Schuss: >180.000	Kett: 237.700 Schuss: 229.100	Kett: 242.900 Schuss: 254,200
Q95-CCE-38-E5	Kett: >220.000 Schuss: >205.000	Kett: 250.000 Schuss: 221.200	Kett: 265.900 Schuss: 257.900
Q85-CCE-21-E5	Kett: >230.000 Schuss: >230.000	Kett: 250.000* Schuss: 241.600	Kett: 250.000* Schuss: 277.300

\* Die E-Modulen dieser Textilkonfigurationen wurden von Yanik nicht gemessen. Die Werte sind Annahmen der Autorin. Die Annahmen beruhen auf Schätzungen unter Betrachtung der vorhandenen Messwerte in Relation zu den Herstellerangaben.

# Kapitel 5

## Ergebnisse

### 5.1 Versuchsergebnisse

#### 5.1.1 Vorbemerkungen

Im folgenden Kapitel werden die Verbundeigenschaften anhand von VKSB erläutert. In den Diagrammen bilden die punktierten Linien stets den Schlupfverlauf auf der lastzugewandten Seite des Rovings ab. Die durchgezogenen Linien hingegen stellen den gemessenen Schlupf auf der lastabgewandten Seite dar. In den anschließenden Beschreibungen wird die lastabgewandte Seite als obere Seite und die lastzugewandte Seite als untere Seite bezeichnet. Die obere und untere Seite werden auf Basis der Versuchsdurchführung definiert, da die Last auf der unteren Seite eingeleitet wurde (siehe Abb. 4-8).

In der folgenden Auswertung werden die einzelnen Reihen zusammengefasst vorgestellt. Die genauen Werte der Maximallasten und der zugehörige Schlupf sind im Anhang B aufgelistet. Für die nachfolgende Ergebnisanalyse werden außerdem die Versagensbilder der Versuchskörper herangezogen. Die Fotos sind mit Anmerkungen ebenfalls dem Anhang B beigelegt.

#### 5.1.2 Serie Q142

##### Versuchsreihe Q142-1MW-UB-K

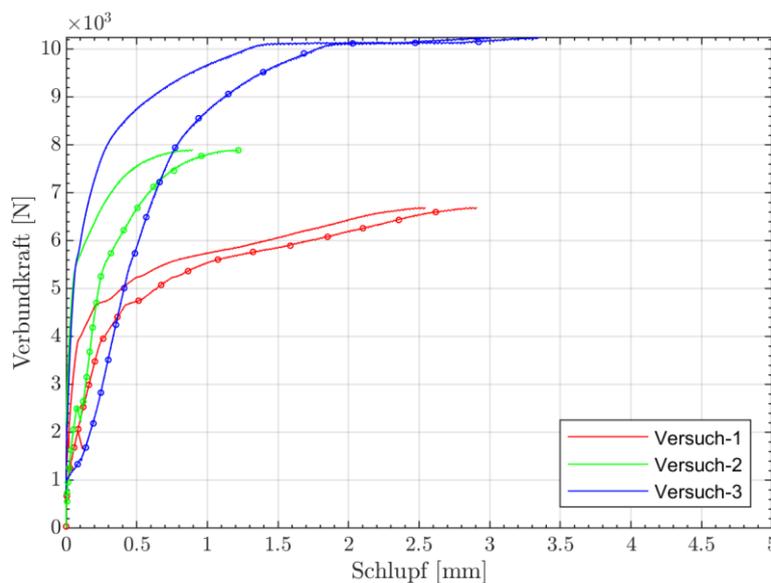


Abb. 5-1: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q142-1MW-UB-K

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden vier Versuche durchgeführt. Alle vier Versuchskörper versagten durch ein Ausziehversagen. Da bei der Auswertung der VKSB für den Versuch V4

unplausible Ergebnisse aufkamen (der Schlupf auf der lastabgewandten Seite übertraf den auf der lastzugewandten Seite), wird Versuch V4 nicht in die Auswertung miteinbezogen. Der generelle Versuchsverlauf, die erreichte Maximalbelastung und die Versagensbilder scheinen dennoch stimmig. Alle plausiblen erhobenen Informationen zu diesem Versuch sind dem Anhang B beige-fügt. Nachfolgend wird auf die generellen Beobachtungen, die für diese Reihe gemacht wurden, eingegangen.

Zu Beginn der Laststeigerung liegt ein Haftverbund vor. Dieser beginnt sich auf der lastzuge-wandten Seite bei einer aufgebracht Belastung im Bereich von 1000N zu lösen und wird dann kontinuierlich herausgezogen. Die darauffolgende hohe Verbundsteifigkeit lässt auf einen anfangs vorliegenden Formverbund schließen. Während auf der lastzugewandten Seite die erstmaligen Verschiebungen mit dem Lösen des Haftverbunds korrelieren, stehen erste Verschiebungen am lastabgewandten Ende nicht mit dem Lösen des Haftverbunds im Zusammenhang. Das lastabge-wandte Rovingende weist erst bei Lasten von ca. 4000-6000N wahrnehmbare Verformungen auf und synchronisiert sich im weiteren Verlauf mit dem lastzugewandten Schlupfverlauf. Das heißt, dass der Roving schließlich mit gleichmäßigem Widerstand entlang der Verbundfläche herausge-zogen wird.

Die VKSB aller Versuche weisen eine große Streuung auf. Die maximal erreichten Lasten streuen im Bereich von ca. 6700-10250N bei einem mittleren Schlupf im Bereich von 1,0-3,0mm. Versuch V1 erreicht die geringste Maximalkraft von etwa 6700N. Die Kurve flacht schon bei einer Last von etwa 4000N deutlich ab und kann dann nur noch gering gesteigert werden, bei ver-gleichsweise großem Schlupf. Die starke Abflachung lässt auf einen Wechsel vom Formverbund in den Reibverbund schließen. Die Versuche V2 und V3 entwickeln höhere Verbundfestigkeiten. Versuch V2 erreicht seine maximal aufnehmbare Last bei etwa 7900N und einem mittleren Schlupf von 1,0mm. Sein VKSB-Verlauf ist der steilste bei geringstem Schlupf. Versuch V3 kann eine relativ hohe Last von etwa 10000N aufnehmen, bei anfänglich kleinem mittlerem Schlupf von etwa 1,5mm. Ab einer Belastung von 10000N kann die Last bei abrupt abfallender Steifigkeit und stark zunehmenden Schlupf noch auf eine Maximallast von 10250N gesteigert werden.

In den VKSB sind lediglich die Schlupfverläufe bis zum Erreichen der Maximalkraft abgebildet. Es ist hinzuzufügen, dass entsprechend dem Maschinenkraft-Verschiebungsdiagramm (siehe An-hang B) bei allen Versuchen nach Erreichen der Maximalkraft, weiterhin Verbundspannungen zu-folge Reibung übertragen werden können. Diese nehmen aber kontinuierlich ab.

Beim Öffnen der Versuchskörper weisen alle Testrovings dasselbe Erscheinungsbild auf. Die Querrovings sind von den Längsrovings abgesichert, zudem sind die Harzbeschichtung und die Wirkfäden innerhalb der Verbundstrecke abgesichert worden. Die Testrovings weisen sonst keine Beschädigungen auf.

### **Versuchsreihe Q142-1MW-UB-S**

Die Versuchskörper dieser Reihe versagten unterschiedlich. Während Versuch V1 infolge eines Spaltrissversagens und Versuch V2 durch ein Ausziehversagen versagte, wurde bei den Testro-vings der Versuchskörper V3 und V4 ein Faserbruch festgestellt.

Der zu Beginn vorliegende Haftverbund löst sich am lastzugewandten Rovingende bei einer Be-lastung von ca. 600-1200N. Am lastabgewandten Rovingende treten bei ca. 2000-3000N erstmalig Verschiebungen auf. Anschließend stellt sich entsprechend der steil ansteigenden VKSB vermut-lich ein Formverbund ein. Mit Abflachen der Kurven geht dieser in einen Reibverbund über. Auf-fällig ist hier das schlagartige Abflachen aller Kurven und die nachfolgende geringe Laststeigerung bei großem Verbundsteifigkeitsverlust.

Versuch V1 weist bis zu einer Last von etwa. 7100N die besten Verbundeigenschaften dieser Versuchsreihe auf und wird nach Erreichen dieser Last abrupt herausgezogen. Die Kurven des unteren und oberen Schlupfes verlaufen synchron. Die Last kann bei niedriger Verbundsteifigkeit

und wachsendem Schlupf noch auf etwa 9800N gesteigert werden, was auf ein Durchziehen der Bewehrung bei vorliegendem Reibverbund hindeutet. Der Versuchskörper versagt anschließend mit einem Spaltriss. Die Ursache des Spaltrisses könnte ein Abscheren und Ansammeln von Harzmaterial sein (*jamming*), das einen hohen Spannungszustand im Betonkörper auslöst. Beim Öffnen des Körpers sind die Harzimpregnierung und teilweise auch Fasern des Testrovings auf ganzer Verbundlänge abgeschert. Der Testroving sieht ziemlich beschädigt aus.

Versuch V2 weist zwar einen ähnlichen Verlauf wie Versuch V1 auf, aber nur die halbe Belastung. Versuch V2 kann seine hohe Anfangssteifigkeit nur bis etwa 4000N halten und verliert dann schlagartig an Steifigkeit. Die Last kann bei vorliegendem Reibverbund und stark zunehmenden Schlupf im Zuge Bewehrungsauszugs auf maximal 6700N gesteigert werden. Am herausgezogenen Roving kann man die Abscherung der Harzimpregnierung erkennen. Der Roving weist sonst keine Schädigungen auf.

Die VKSB-Kurve von Versuch V3 beginnt bei einer geringen Belastung von ca. 3400N, als erste der Kurven abzuflachen. Ab diesem Zeitpunkt nimmt die Verbundsteifigkeit langsam und kontinuierlich ab. Die Last kann dann auf die höchste Maximalbelastung dieser Versuchsreihe auf etwa 10600N gesteigert werden. Es bildet sich vermutlich ein guter Reibverbund aus. Der Faserstrang versagt letztendlich zufolge Faserbruch, was auf eine maximale Ausnutzung des Faserstrangs hindeutet. Der Testroving bricht im Verbundbereich und der Roving spaltet sich auf ganzer Länge. Das Harz ist im Verbundbereich abgeschert.

Versuch V4 erreicht eine ähnlich hohe Maximalkraft von 9200N bei gleichem Versagensbild wie Versuch V3. Versuch V4 behält jedoch seine Anfangssteifigkeit relativ lange, bis sie von einem Reibverbund und einem einhergehendem Steifigkeitsverlust abgelöst wird.

Der Schlupf aller Rovings dieser Versuchsreihe liegt bei erreichter Maximalkraft bei einer Größe von über 5mm. Dieses Ergebnis repräsentiert eine sehr geringe Verbundsteifigkeit dieser Versuchsreihe.

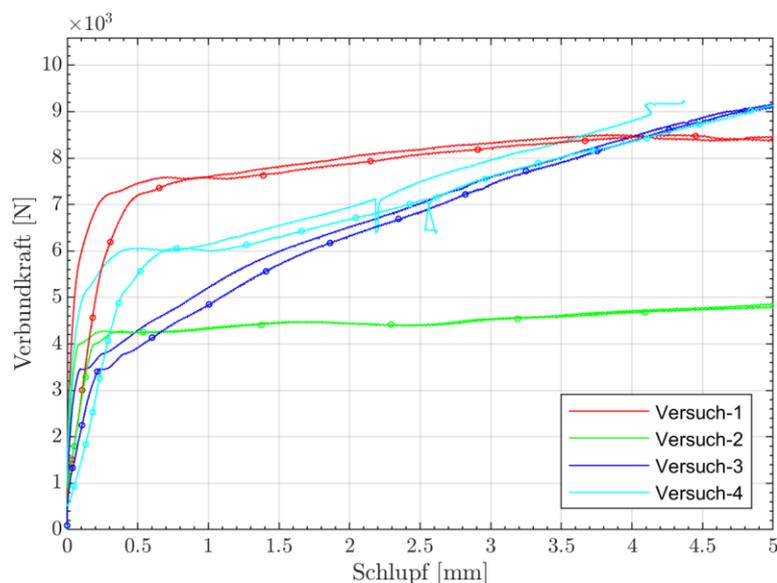


Abb. 5-2: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q142-1MW-UB-S

### Versuchsreihe Q142-2MW-UB-K

Die Faserstränge dieser Versuchsreihe sind auf einer Verbundlänge von zwei Maschenweiten, das entspricht in diesem Fall einer Verbundstrecke von 76mm, in den Betonkörper eingebunden. Die Verbundsteifigkeit am lastabgewandten Ende ist dementsprechend höher. Die Versuche dieser Reihe zeigen untereinander ähnliche Verläufe ihrer VKSB. Die Versuchskörper V1 und V3 versagen mit einem Spaltrissversagen, während V2 und V4 mit einem Faserbruchversagen enden.

Zu Beginn liegt Haftverbund vor. Während sich der Haftverbund am lastzugewandten Schlupfende bei einer aufgetragenen Kraft von etwa 2000-3000N zu lösen beginnt, sind am lastabgewandten Ende bis zu 10000-11000N keine Verschiebungen messbar. Dem Anschein nach, kann sich ein steifer Formverbund erschließen, was aufgrund der längeren Einbindelänge plausibel erscheint. Die Analyse der Versagensbilder, der inneren Verbundflächen der Versuchskörper und die Versagensursachen durch Spaltrissbildung bzw. Faserstrangbruch lassen eine vollständige Verankerung der Prüfstränge dieser Prüfreihe feststellen.

Alle Versuchskörper weisen demnach sehr gute Verbundeigenschaften auf. Die Versuche können bei geringem Schlupf sehr hohen Belastungen widerstehen. Die erreichten Maximalkräfte liegen im Bereich von 16800N-17800N, bei einem zugehörigen Schlupf am lastzugewandtem Ende im Bereich von 0,45-0,65mm und lastabgewandtem Ende im Bereich von 0,80-1,30mm. Das entspricht einem mittleren Schlupf in einer Größe von 0,70-1,00mm.

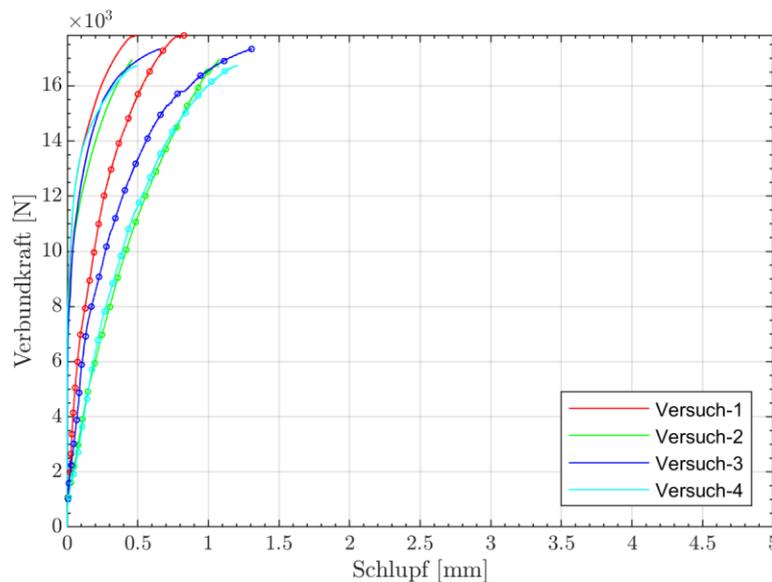


Abb. 5-3: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q142-2MW-UB-K

Versuch V1 erreicht die höchste Maximallast dieser Versuchsreihe in der Höhe von 17800N, bei gleichzeitig geringstem Schlupf. Er weist folglich die höchste Verbundsteifigkeit auf. Bei Erreichen der Maximallast versagt der Prüfrovings infolge Faserbruch an der lastzugewandten Einbindestelle in den Betonkörper. Bei der Öffnung des Versuchskörpers wird festgestellt, dass der Roving im Verbundbereich unversehrt ist. Beide Querrovings haften noch am Teststrang. Lediglich der Wirkfaden weist Abscherspuren auf. Der Testrovings in Versuch V1 war demnach voll verankert.

Versuch V2 versagt durch ein Ausziehversagen. Allerdings kommt es zu einem teilweisen Verankerungsversagen an der Einklemmung in die Prüfmaschine, was die Aussagekraft der Ergebnisse in Frage stellt. Die Verankerungsstrecke im Versuchskörper misst eine Länge von etwa 76mm. Die Verbundlänge im ausbetonierten Rohr, das in die Prüfmaschine geklemmt wurde, hat nur eine geringfügig größere Verbundstrecke von etwa 80 mm. Da das Einspannrohr erst zwei Tage vor der Versuchsdurchführung betoniert wurde, könnte eine unzureichende Betonfestigkeit im Einspannrohr zum teilweisen Verankerungsversagen geführt haben. Bei der Öffnung des Betonkörpers ist der getestete Faserstrang augenscheinlich unbeschädigt. Die Querrovings sind aber vom Längsrovings abgetrennt. Beim aus dem Einspannrohr herausgezogenen Ende konnten Harzabscherungen identifiziert werden, was vermutlich auf weitere Bereiche innerhalb der Verbundstrecke zutrifft. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Maximalkraft von rund 17000N nicht die tatsächliche Verbundfestigkeit im eigentlichen Verbundbereich dieses Prüfkörpers darstellt. Da die Maximalkraft aber sehr ähnlich zu den anderen dieser Reihe ist, ist die Ausnutzung schon sehr hoch.

Bei Versuch V3 wird der Testroving nach Erreichen der Maximalkraft von ca. 17350N aus dem Betonkörper herausgezogen. Die Harzbeschichtung ist dabei auf kompletter Verbundfläche abgesichert worden. Beide Querrovings sind ebenfalls abgesichert worden.

Versuch V4 versagt infolge Faserstrangspaltung in viele Strähnen bei einer aufgetragenen Kraft von ca. 16800N beginnend von der Einbindestelle in den Betonkörper bis zur Einspannstelle. Auch hier kommt es zu einem teilweisen Verankerungsversagen im Einspannrohr, was die Ausgaskraft der VKSB etwas abmindert. Beim Öffnen des Betonkörpers sind beide Querrovings abgetrennt, ansonsten weist der geprüfte Faserstrang kaum Schädigungen auf.

### Versuchsreihe Q142-2MW-UB-S

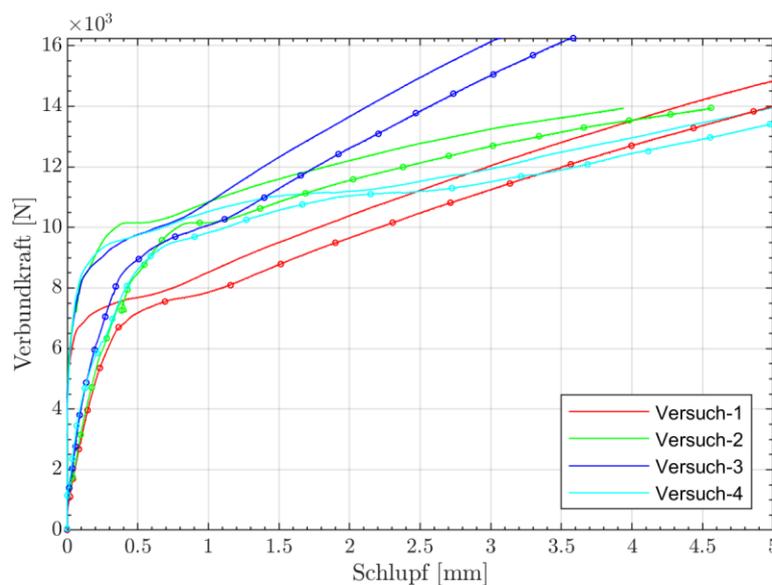


Abb. 5-4: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q142-2MW-UB-S

Die Schussrovings sind über eine Länge von zwei Maschenweiten bzw. rund 76mm in den Beton eingebunden. Die VKSB verlaufen grundsätzlich einheitlich. Der Haftverbund löst sich am lastzugewandten Rovingende bei etwa 2000-2500N. Am lastabgewandten Rovingende treten bei etwa 6000N-7000N erste Verschiebungen auf. Im Bereich von 0-8500N (V2,V3,V4) bzw. 0-6500N (V1) weisen die Versuchskörper eine hohe Verbundsteifigkeit auf. Danach reduziert sich die Steifigkeit bei allen Versuchen deutlich. Die Verbundlasten können bei kontinuierlich größer werdendem Schlupf und reduzierter Verbundsteifigkeit auf ca. das Doppelte gesteigert werden. Die maximalen Lasten liegen im Bereich von 14000N-16250N, bei einem zugehörigen Schlupf von 3,35-5,70mm. Aufgrund der großen Schlupfweiten und der flachen Kurvenverläufe liegt bei allen Versuchen in diesem Bereich augenscheinlich ein Reibverbund vor.

Die Versuchskörper mit den höchsten Maximalkräften V1 (rund 15200N) und V3 (rund 16300N) versagen zufolge Spaltrissversagen. Diese beiden Versuche weisen einen steileren VKSB-Verlauf auf, was mit besseren Verbundeigenschaften einhergeht. Beim Öffnen der Betonkörper kann festgestellt werden, dass alle Querrovings abgetrennt sind. An beiden Längsrovings ist zudem ersichtlich, dass die Harzbeschichtung pro Maschenweite eher im unteren Bereich pro Feldweite abgesichert ist, was dem Bereich entspricht, wo der dickere Rovingquerschnitt durch den engeren Betonkanal gezogen wird.

Die Versuchskörper V2 und V4 versagen bei etwas geringeren Lasten bei je rund 14000N durch einen Faserbruch. Bei Versuch V2 bricht der Testroving länglich im Verbundbereich. Dies lässt auf eine ungleiche Belastung innerhalb des Rovingquerschnittes schließen. Es wird vermutet, dass eine Rovingseite einen besseren Verbund als die andere aufwies und es dadurch zu einer

unterschiedlichen Belastung kam. Dies zeigt sich auch an der Harzbeschichtung, welche auf der augenscheinlich höher belasteten Rovinghälfte abgeschert und auf der weniger belasteten Seite noch vorhanden ist.

Bei Versuchskörper V4 wird der freiliegende Faserstrang auf ganzer Länge in viele Strähnen gespalten. Der Anfang der Aufspaltung liegt knapp oberhalb der lastzugewandten Einbindestelle in den Betonkörper. Der Roving in der restlichen Verbundfläche schaut wenig beschädigt aus.

### Versuchsreihe Q142-1MW-B-S

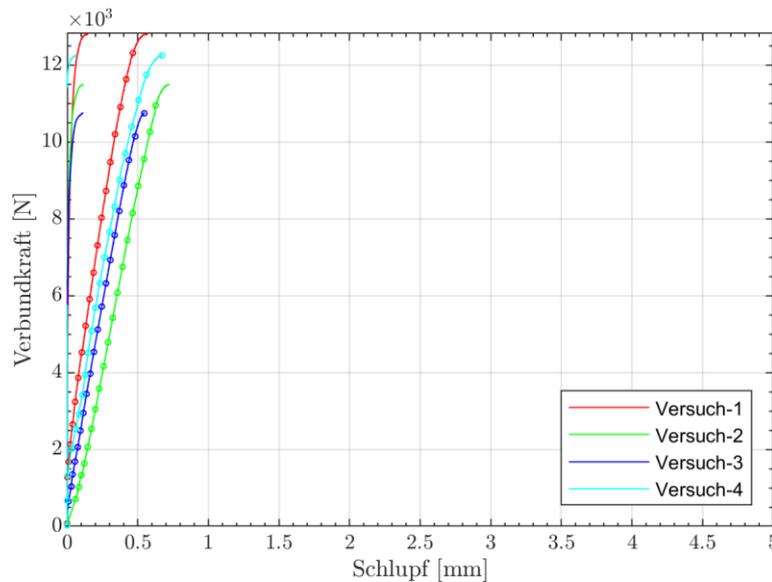


Abb. 5-5: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q142-1MW-B-S

Die Versuche der sandbeschichteten Faserstränge weisen einheitliche Versuchsverläufe und VKSB auf. Alle vier Versuchskörper versagen mittels Spaltrissbildung im Betonkörper bei ähnlich hohen Maximallasten im Bereich von 10800–12800N. Bei Versagen liegen die zugehörigen Schlupfwerte in der Größenordnung von 0,33-0,40mm, während die oberen Schlupfaufzeichnungen maximal 0,15mm erreichen. Die sandbeschichteten Faserstränge sind bei einer Einbindelänge von nur 38mm demnach sehr gut verankert.

Der Haftverbund an der lastzugewandten Einbindestelle beginnt sich bei einer aufgetragenen Kraft von 1000-3000N zu lösen. Am oberen Rovingende werden Verschiebungen erst kurz vor Versagen aufgezeichnet. Die Verbundsteifigkeit ist generell bis zuletzt sehr hoch. Das heißt, die anfangs sehr hohe Verbundsteifigkeit kann bis zuletzt gehalten werden, was einen wesentlichen Unterschied zu den Reihen (mit 1MW) dieser Serie ohne Sandbeschichtung darstellt. Die Sandbeschichtung verleiht den Rovings demnach eine hervorragende Verbundoberfläche. Die guten Verbundeigenschaften resultieren aus einem mutmaßlichem Formverbund der rauen Körner mit dem umgebenden Beton.

Die geöffneten Körper weisen alle ähnliche Versagensbilder auf. Die Querrovings sind jeweils abgeschert. Von den Längsrovings ist entlang der gesamten Verbundfläche die Sand-Harz-Beschichtung fast vollständig abgeschert. Die Längsrovings weisen sonst keine Schädigungen auf. Da die Rovings während der Versuchsabläufe kaum herausgezogen werden, liegt die Annahme nahe, dass die Ablösung der Sand-Harz-Beschichtung im Zuge der Spaltrissbildung geschieht oder initial für diese verantwortlich ist. Die Ursache für die Spaltrissbildung könnte ausgehend von einem beginnenden Abscheren der Sandbeschichtung ausgelösten Spannungskonzentration liegen, oder generell auf hohe lokale Spaltzugbeanspruchung zufolge der hohen Verbundsteifigkeiten

zurückzuführen sein. Prinzipiell bedeuten die Ergebnisse, dass die Sand-Harz-Beschichtung besser im Beton haftet als auf den Fasersträngen.

### 5.1.3 Serie Q95

#### Versuchsreihe Q95-1MW-UB-K

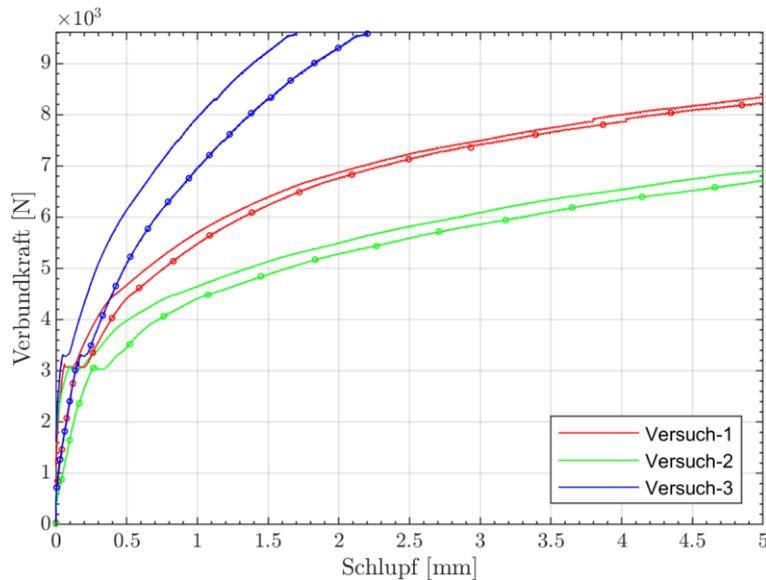


Abb. 5-6: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q95-1MW-UB-K

Die VSB-Verläufe dieser Reihe weisen generell eine große Streuung auf. Der Haftverbund verläuft noch relativ synchron. Er beginnt sich bei allen Versuchen auf der lastzugewandten Seite bei einer Last zwischen ca. 1000-1500N zu lösen und erste Verschiebungen treten auf der lastabgewandten Seite bei etwa 2500-3000N auf. Im Diagramm ist an dieser Stelle „ein Ruck“ zu erkennen. Der Ruck könnte das Loslösen der Querrovings darstellen.

Versuch V3 erreicht die höchste Verbundsteifigkeit und die höchste Maximallast bei gleichzeitig geringstem Schlupf. Die Maximallast beträgt ca. 9600N bei einem mittleren Schlupf von 1,95mm. Anhand der VKSB liegt wahrscheinlich ein Reibverbund oder eine Kombination aus Reib- und Formverbund vor. Der Versuch versagt zufolge Spaltrissbildung.

Die Versuche V1 und V2 verlaufen ähnlich. Die VKSB flachen nach Überschreitung des Haftverbunds zunehmend ab, was den Übergang in den Reibverbund bedeutet. Versuch V2 flacht schon etwas früher ab, verläuft dann aber parallel zu Versuch V1. Versuch V1 erreicht eine Maximallast von rund 8500N und Versuch V2 eine Maximallast von rund 7200N. Der zugehörige Schlupf der beiden Versuche überschreitet jeweils 5,00mm. Bei beiden Versuchen tritt ein Faserbruchversagen ein. Bei Versuch V1 tritt zusätzlich ein Spaltriss auf.

Die Versagensbilder der geöffneten Versuchskörper sehen sehr ähnlich aus. Die Querrovings sind vom Längsroving abgetrennt, haften jedoch dank Wirkfaden noch am Längsroving. Die Harzbeschichtung ist im Verbundbereich vom Testroving abgeschert. Der Roving von Versuch V2 ist an der Einbindestelle in den Betonkörper gebrochen. Der Roving von Versuch V1 ist nicht im Versuchskörper, sondern knapp oberhalb der Einspannstelle in die Prüfmaschine gebrochen. Der Spaltriss könnte im Zuge der schlagartigen Entlastung entstanden sein. Die Testrovings sehen ansonsten unzerstört aus.

### Versuchsreihe Q95-1MW-UB-S

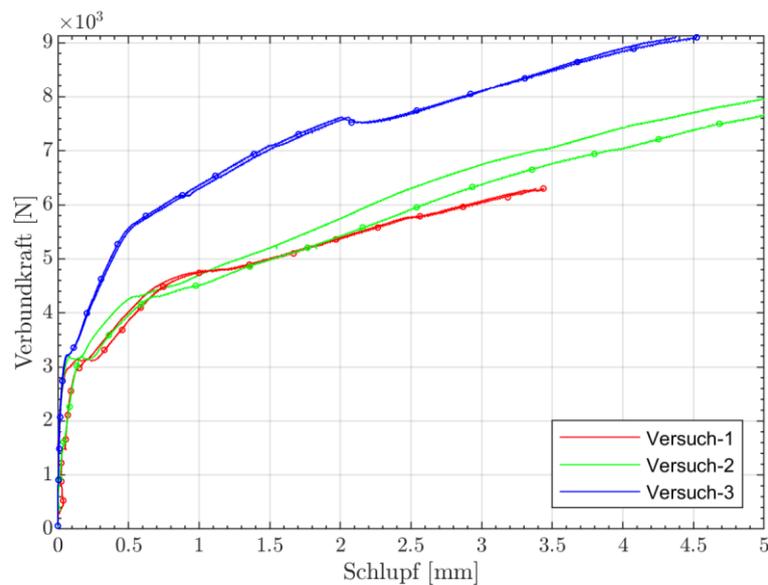


Abb. 5-7: VSKB der einzelnen Versuche in der Reihe Q95-1MW-UB-S

Die VKSB dieser Versuche bilden grundsätzlich einen regelmäßigen Verlauf ab. Versuch V3 hält jedoch deutlich höheren Belastungen stand. Der Haftverbund löst sich am lastzugewandten Ende bei 1000-1500N. Erste Verschiebungen am lastabgewandten Ende treten im Bereich von 2000-3000N auf.

Bei rund 3100N ist bei allen Versuchen „ein Ruck“ in den Kurvenverläufen zu registrieren. Dies wird wieder als Trennung der Querrovings von den Testrovings interpretiert. Ab dieser Stelle wird die Verbundsteifigkeit geringer und der zugehörige Schlupf nimmt deutlich zu. Die Belastung kann bei der geringen Verbundsteifigkeit aber weiterhin gesteigert werden. Die VKSB-Verläufe dieser Versuchsreihe zeigen, dass ein während des Auszugs relativ konstanter Reibverbund vorherrscht, da die VKSB Kurven nicht abflachen und recht hohe Lasten erreicht werden können.

Versuch V1 versagte bei einer Belastung von 6300N und einem mittleren Schlupf von 3,40mm durch einen Faserbruch direkt an der Einbindestelle in das Rohr an der Einspannstelle. Da die Versagensursache der Bruch an der Einspannstelle ist, konnte die Maximalkraft im Versuchskörper vermeintlich nicht erreicht werden und der Versuch V1 liefert demnach kein eindeutiges Ergebnis über den Verbund im Betonkörper. Es ist naheliegend, dass das Faserbruchversagen an der Einspannstelle aufgrund von dort auftretenden Querdruckspannungen auf den Faserstrang ausgelöst wurde.

Versuch V2 erreicht eine maximale Last von 8300N bei einem mittleren Schlupf von 4,95mm und versagt durch einen Faserbruch. Der Teststrang bricht einmal im Verbundbereich an der Stelle des Querrovings und ein weiteres Mal an der Übergangsstelle in das Einspannrohr. Der Faserstrang spaltet sich auf ganzer Länge.

Versuch V3 kann eine maximale Last von 9100N bei einem mittleren Schlupf von 4,45mm übertragen und versagt anschließend mit einem Faserbruch an der Einbindestelle in das Einspannrohr und einer zusätzlichen Spaltrissbildung. Hier lässt sich nicht sagen, ob im Zuge der Spaltrissbildung der Faserstrang an der Einspannstelle bricht, oder ob zuerst der Faserstrang bricht und im Zuge der schlagartigen Entlastung den Spaltriss im Betonkörper hervorruft. Aufgrund der sehr hohen Belastung im Vergleich mit den anderen Versuchen dieser Reihe, ist hier aber von einer hohen Ausnutzung auszugehen.

Beim Öffnen der Betonkörper liegen alle drei Querrovings vom Längsroving abgetrennt vor. Die Harztränkung der Längsrovings ist im Verbundbereich abgesichert. Die Teststränge sehen darüber hinaus, abgesehen vom Testroving V2, welcher im Verbundbereich gebrochen ist, unversehrt aus.

### Versuchsreihe Q95-1MW-B-K

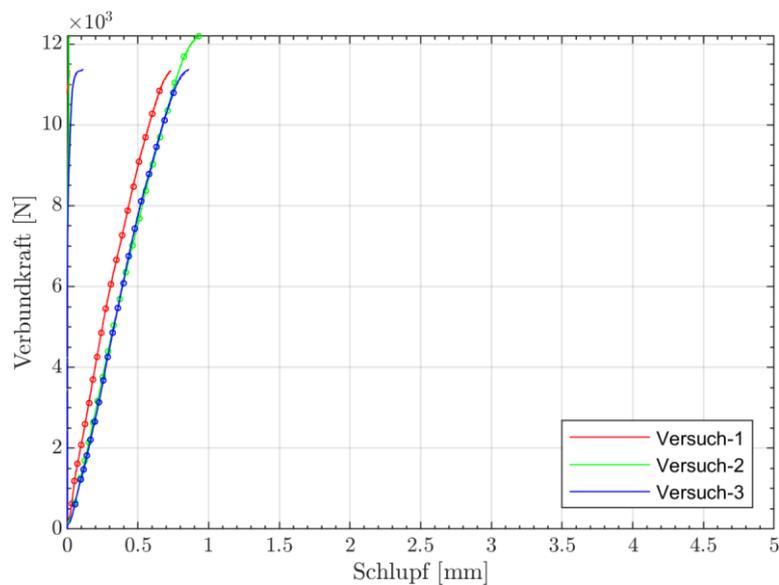


Abb. 5-8: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q95-1MW-B-K

Die Versuchsreihe der sandbeschichteten Faserstränge dieser Serie zeigen ein einheitliches Verhalten. Die Rovings sind fest verankert, sodass an den oberen Rovingenden keine Verschiebungen festzustellen sind. Den Daten des unteren Wegaufnehmers ist eine Lösung des Haftverbunds bei Lasten von 500-1000N zu entnehmen. Anschließend steigen die VKSB-Linien kontinuierlich steil bis zum Erreichen der Maximallasten im Bereich von 11350-12200N. Die lastzugewandten Schlupfmessungen liegen im Bereich unter 1mm. Alle drei Versuche versagen durch ein Spaltrissversagen. Aufgrund der Sandbeschichtung wird ein steifer Formverbund mit dem Beton erschlossen. Durch den festen Verbund entstehen hohe lokale Spannungen, welche letztendlich die Spaltrissbildung verursachen.

Bei der Analyse der geöffneten Versuchskörper lässt sich ein gleichartiges Versagensbild feststellen. Die Querrovings sind jeweils vom Längsroving abgesichert und die Sand-Harz-Beschichtung ist im Verbundbereich jeweils vom Längsroving abgesichert. Da die Prüfrovings sehr gut verankert sind, wird schlussgefolgert, dass die Sand-Harz-Beschichtung in diesem Fall nicht im Zuge des Herausziehens abgesichert ist, sondern im Zuge der Spaltrissbildung von den Rovings abgelöst wurde. Das heißt, dass die Sand-Harz-Beschichtung besser am Beton als am Faserstrang haftet.

#### 5.1.4 Serie Q85

##### Versuchsreihe Q85-2MW-UB-K

Aufgrund der kurzen Maschenweite der Serie Q85 wurde eine Verbundstrecke von zwei Maschenweiten, das entspricht einer Verbundstrecke von 42mm, gewählt. Die Versuche verlaufen sehr einheitlich mit geringer Streuung. Der Haftverbund am unteren Rovingende beginnt sich bei ca. 1000-2000N zu lösen. Erste Verschiebungen am oberen Rovingende waren bei allen dreien Versuchen bei ca. 3000N messbar. An derselben Stelle ist einheitlich „ein Ruck“ zu verzeichnen. Der Ruck wird auf eine Abtrennung der Querrovings zurückgeführt.

Alle VKSB-Kurven weisen nach Lösung des Haftverbunds einen weiterhin relativ steilen Verlauf auf, welcher mit Zunahme der Belastung etwas abflacht. Die maximal erreichten Lasten liegen zwischen etwa 6000-6700N. An jeweils beiden Rovingenden sind dabei deutliche Verschiebungen zu vermerken. Die Schlupfverläufe verlaufen synchron zueinander und liegen im Bereich von 2,00-3,25mm.

Der Kurvenverlauf von Versuch V1 verzeichnet gegen Ende eine stärkere Abflachung als die anderen beiden Kurven. Er erreicht die geringste Last dieser Versuchsreihe mit rund 6000N bei gleichzeitig dem größten zugehörigen Schlupf von 3,25mm. Die Maximalbelastung der Versuche V2 und V3 liegen etwas darüber bei niedrigerem zugehörigem Schlupf von 2,00 und 2,35mm.

Die Versuche V1 und V2 versagen durch ein Faserstrangversagen. Die Faserstränge brechen je einmal im Verbundbereich und ein weiteres Mal nahe der Einspannstelle. Außerdem reißen die Faserstränge im freiliegenden Bereich in viele Strähnen. Versuchskörper V3 versagt mit einer Spaltrissbildung, wobei der Faserstrang zusätzlich an der Stelle knapp oberhalb des Einspannrohres bricht. Beim Öffnen der Betonkörper weisen alle Versuchskörper ein einheitliches Versagensbild auf. Die Querrovings haften noch am Längsroving, was durch die noch stabilen Wirkfäden möglich ist. Die Querrovings sind aber vom Längsroving abgeschert und in ihrer Lage verschoben. Dem Wirkfaden kann deshalb eine sehr hohe Festigkeit und Robustheit unterstellt werden. Da diese Verschiebung etwa 10-13mm beträgt, wobei die gemessenen Schlupfe etwa 2-3mm betragen, muss die Verschiebung der Querrovings im Zuge des Faserbruchs und der schlagartigen Entlastung geschehen sein. Die Längsrovings sehen grundsätzlich in Ordnung aus, wobei viele Harzabscherungen zu erkennen sind.

Anhand der VKSB-Verläufe, der Versagensbilder, als auch der eigenen Laserscans wird davon ausgegangen, dass die Faserstränge dieser Reihe in einem Reibverbund vorliegen. Der Spaltriss in Versuchskörper V3 dürfte schließlich zufolge eines vom Reibverbund hervorgerufenen hohen Spannungszustands ausgelöst worden sein.

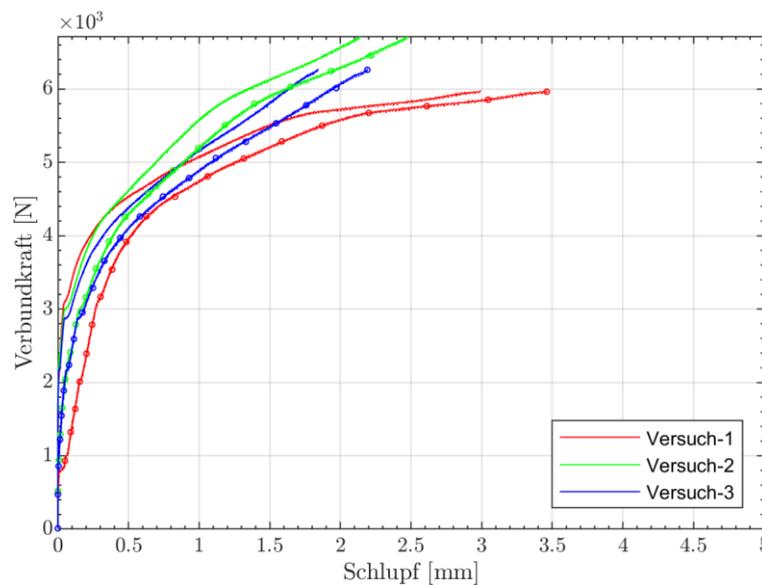


Abb. 5-9: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q85-2MW-UB-K

### Versuchsreihe Q85-2MW-UB-S

Die Faserstränge liegen auf einer Verbundlänge über zwei Maschenweiten bzw. rund 42mm im Verbund. Die Versuche und die erhaltenen VKSB verlaufen generell ähnlich. Lediglich Versuch V2 weicht etwas ab. Der Haftverbund beginnt sich an der lastzugewandten Einbindestelle bei allen Versuchen im Bereich von ca. 1000-1500N zu lösen, während erste Verschiebungen auf der lastabgewandten Seite bei ca. 3000N auftreten. Bei etwa 3000N ist wiederum eine kleine Unebenheit im Kurvenverlauf zu vermerken. Dies wird auch hier auf die Abtrennung der Querrovings im Inneren der Verbundstrecke zurückgeführt.

Bis etwa 4000N verlaufen alle VKSB-Kurven relativ steil. Anschließend nimmt die Verbundsteifigkeit bei den Versuchskörpern V1 und V3 kontinuierlich ab. Versuch V2 schlupft an dieser Stelle schlagartig, wobei nach ca. 1mm die Verbundsteifigkeit wieder ansteigt.

Versuch V3 erreicht die höchste Last dieser Versuchsreihe von ca. 6700N bei dem geringsten zugehörigen Schlupf dieser Reihe von 2,78mm. Versuch V2 erreicht die geringste Belastung von etwa 5800N bei einem maximalen zugehörigen Schlupf von 4,25mm. Versuch V1 liegt dazwischen.

Alle drei Versuche versagen zufolge Faserbruch im Verbundbereich an der lastzugewandten Einbindestelle in den Beton. Die Versagensbilder beim Öffnen der Körper entsprechen einem einheitlichen Bild. Die Querrovings befinden sich dank des Wirkfadens noch am Längsroving und sind in ihrer Lage je um den gemessenen Schlupf nach oben verschoben. Durch das Durchziehen des Längsrovings unter den Querrovings ist die Harzimpregnierung, vor allem in den Knotenbereichen, abgeschert. Ansonsten befinden sich die Testrovings in gutem Zustand. Die Versagensbilder bekräftigen die Vermutung des Vorliegens eines Reibverbunds bei dieser Versuchsreihe.

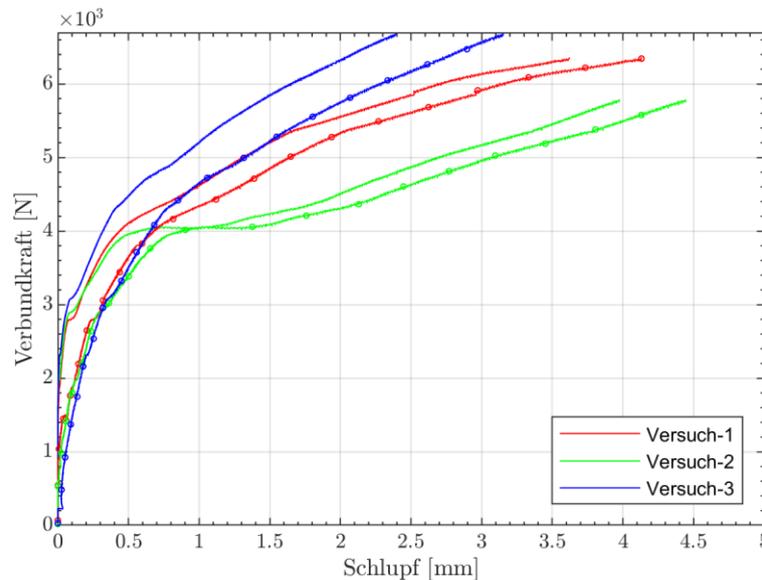


Abb. 5-10: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q85-2MW-UB-S

### Versuchsreihe Q85-2MW-B-K

Die sandbeschichteten Testrovings sind über eine Länge von zwei Maschenweiten bzw. 42mm in den Beton eingebunden. Am lastabgewandten Rovingende ist bis zur Maximalbelastung kaum eine Verschiebung zu erkennen. Unter genauer Betrachtung kann lediglich eine minimale Verschiebung kurz vor Versagenseintritt identifiziert werden. Im Bereich von 500-1500N ist eine Lösung des Haftverbunds an der unteren Schlupfmessung zu vermerken.

Alle Versuche weisen eine durchgehend gute Verbundfestigkeit auf. Aufgrund der Sand-Harzbeschichtung kann sich zudem ein steifer Formverbund einstellen. Die erreichten Maximallasten liegen bei den Versuchen V1 und V3 bei 7750-7950N bei einem zugehörigen Schlupf von je rund 0,50mm. Versuch V2 erreicht zwar eine höhere Verbundsteifigkeit als die anderen Versuche, versagt allerdings frühzeitig bei einer Kraft von 6950N. Der mittlere Schlupf misst 0,23mm.

Die Versuche versagten einheitlich durch ein Zugbruchversagen der Textilien. Alle drei Testrovings brachen jeweils in 3-5 Teile. Die Bruchstellen befinden sich jeweils an den Einbindestellen in die Betonwürfel, an den Einbindestellen in die Einspannröhre und zwei bis drei weitere Bruchstellen befinden sich jeweils entlang der freiliegenden Faserstränge. Das frühzeitige Versagen von Versuch V2 wird genauer analysiert, da hier die Vermutung eines frühzeitigen Versagens infolge eines Bruches an der Einbindestelle in das Einspannröhre aufgrund Querdruckspannungen besteht, was bedeutet, dass die Belastung noch weiter gesteigert hätte werden können. Vergleicht man die mittlere Bruchspannung von Versuch V2 mit den Herstellerangaben, wird diese Vermutung bestätigt (siehe Tab. 5-1), wobei festzuhalten ist, dass die Ausnutzung bereits sehr hoch war.

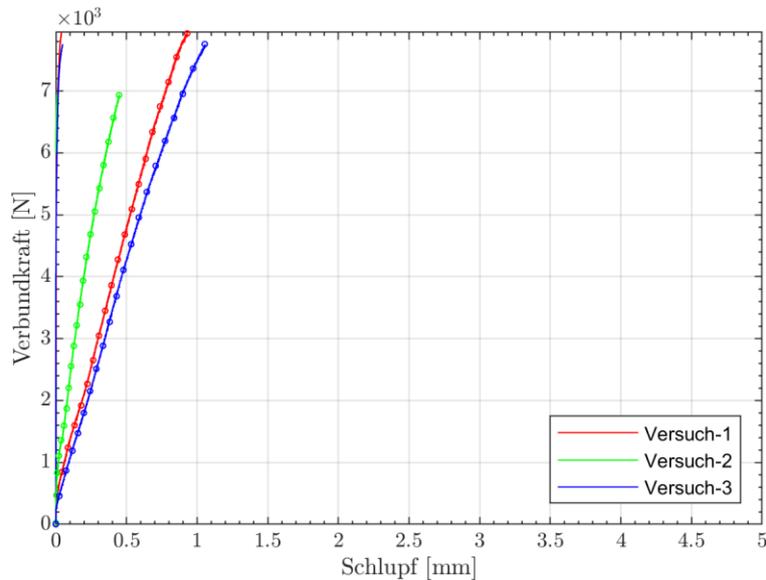


Abb. 5-11: VKSB der einzelnen Versuche in der Reihe Q85-2MW-B-K

Tab. 5-1: Gegenüberstellung der mittleren Bruchspannung aus den Versuchen der Reihe Q85-2MW-B-K mit den Herstellerangaben Q85-CCE-21-E5 (solidian 2018)

	maximale Kraft [N]	Faserquerschnitts- fläche [mm <sup>2</sup> ]	mittlere Bruchspannung des Versuchs [N/mm <sup>2</sup> ]	mittlere Bruchspannung lt. Hersteller [N/mm <sup>2</sup> ]
Versuch V1	7947,9	1,81	4391,1	4.000
Versuch V2	6947,2	1,81	3838,2	4.000
Versuch V3	7757,5	1,81	4285,9	4.000

Bei der Untersuchung der geöffneten Probekörper zeigt sich ein identes Versagensbild. Auffallend ist, dass bei allen drei Testrovingen je die unteren Querrovings noch am Längsroving haften, während alle drei oberen Querrovings abgetrennt sind. Die Harz-Sandbeschichtung wurde nicht abgeschert. Die Rovings sehen, abgesehen von den abgelösten oberen Querrovings, völlig unbeschädigt aus. Die abgetrennten Querrovings müssen sinngemäß im Zuge des Öffnens des Betonkörpers abgetrennt worden sein. Die Versagensbilder deuten darauf hin, dass die Rovings vollständig verankert waren.

## 5.2 Diskussion der Ergebnisse

### 5.2.1 Vorbemerkung

Um die Ergebnisse der einzelnen Reihen und Serien untereinander vergleichen zu können, werden in diesem Kapitel die Ergebnisse in Form von Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen (VSB) betrachtet. Die VSB werden pro Versuchsreihe mit einer gemittelten Ergebniskurve der einzelnen Versuche dargestellt. Diese Kurve wird sowohl für den lastzugewandten Schlupf als auch für den lastabgewandten Schlupf ermittelt. Da für den Zweck der Interpretation der lastzugewandte Schlupf von größerer Bedeutung ist, beziehen sich die folgenden Diagramme jeweils auf diesen Schlupf. Um die Streuung der Ergebnisse mitzuberechnen, werden die gemittelten VSB-Kurven inklusive ihrer Standardabweichung dargestellt. Der transparent schraffierte Bereich in den Diagrammen stellt die Standardabweichung dar.

## 5.2.2 Einfluss der Wirkrichtung

### Vergleich Q142-1MW-UB-K mit Q142-1MW-UB-S

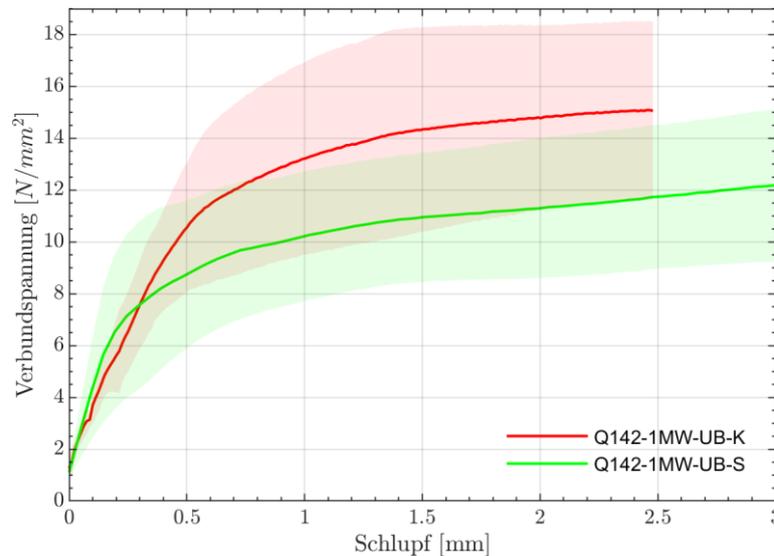


Abb. 5-12: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-1MW-UB-K und Q142-1MW-UB-S

Beim Vergleich der Ergebnisse der VSB des Kett- und des Schussrovings mit einer Verankerungslänge von einer Maschenweite (38mm), weist der Kettroving grundsätzlich bessere Verbundeigenschaften auf. Er kann insgesamt höhere Verbundspannungen übertragen und weist zudem eine höhere Verbundsteifigkeit auf. Betrachtet man die Mittelwerte der maximalen Verbundspannungen, erreicht die Reihe der Kettrovings eine durchschnittliche Spannung von ca.  $15\text{N/mm}^2$  und die Reihe der Schussrovings eine Spannung von etwa  $12\text{N/mm}^2$ . Im Anfangsbereich ist zu erkennen, dass die Schussrovings und die Kettrovings ähnliche Verbundeigenschaften aufweisen. Ab einer Spannung von  $8\text{N/mm}^2$  fällt die Verbundsteifigkeit der Schussrovings jedoch ab. Im Gegensatz dazu, kann die Verbundsteifigkeit der Kettrovings noch bis etwa  $12\text{N/mm}^2$  gehalten werden, ehe auch diese abflacht. Bezieht man die Streuung der Versuchsreihen mit ein, kommt es zu einer Überschneidung der Standardabweichung des Schussrovings oberhalb des Mittelwerts mit der Standardabweichung des Kettrovings unterhalb des Mittelwerts.

### Vergleich Q142-2MW-UB-K mit Q142-2MW-UB-S

Beim Vergleich beider Wirkrichtungen mit der doppelten Verbundstrecke (76mm), lassen sich die vorhin beschriebenen Unterschiede viel deutlicher erkennen. Darüber hinaus ist die Streuung wesentlich geringer. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Kettrovings einen signifikant besseren Verbund aufweisen. Dies betrifft sowohl die Verbundfestigkeit als auch die Verbundsteifigkeit. Die Schussrovings hingegen weisen eine niedrigere Verbundsteifigkeit bereits im Anfangsbereich auf und verlieren bald darauf weiter wesentlich an Verbundsteifigkeit. Sie können höhere Verbundspannungen nur sehr langsam bei verhältnismäßig großem Schlupf erreichen. Die Kettrovings erreichen eine durchschnittliche maximale Verbundspannung von  $15\text{N/mm}^2$  bei einem Schlupf von 1,1mm, während die Schussrovings an dieser Stelle eine durchschnittliche Spannung von  $8,5\text{N/mm}^2$  aufweisen.

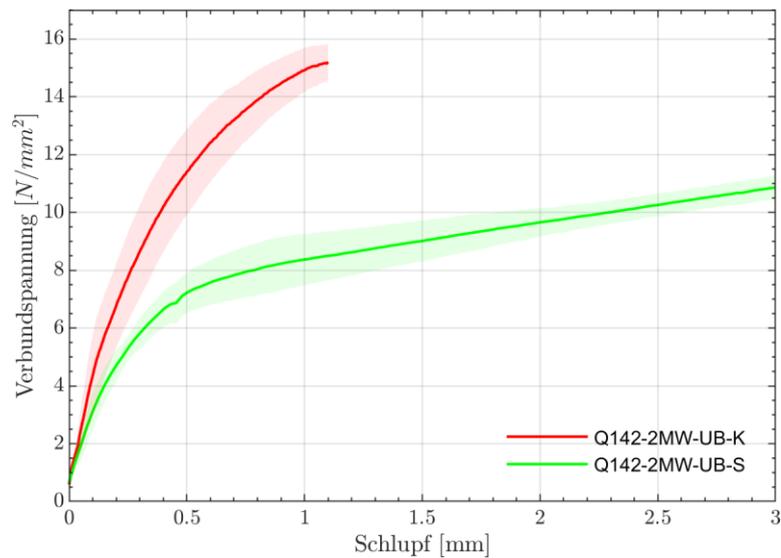


Abb. 5-13: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-2MW-UB-K und Q142-2MW-UB-S

### Vergleich Q95-1MW-UB-K mit Q95-1MW-UB-S

Die Ergebniskurven der Kettrovings und Schussrovings dieser Versuchsreihe ähneln einander stark. Sie verlaufen bis zu einer Verbundspannung von etwa  $9\text{N/mm}^2$  beinahe ident. An dieser Stelle flachen beide Mittelwertkurven ab, wobei die Kurve der Schussrovings etwas deutlicher abflacht. Die Verbundspannungen können aber in beiden Wirkrichtungen weiterhin erhöht werden. Die Schussrovings erreichen eine maximale Verbundspannung von  $15,5\text{N/mm}^2$  bei einem Schlupf von  $4,8\text{mm}$ . Die Kettrovings können zu diesem Zeitpunkt Verbundspannungen in der Höhe von  $18\text{N/mm}^2$  aufweisen. Der Streubereich der Schussrovings reicht allerdings ebenfalls bis zu Spannungen von  $18\text{N/mm}^2$ .

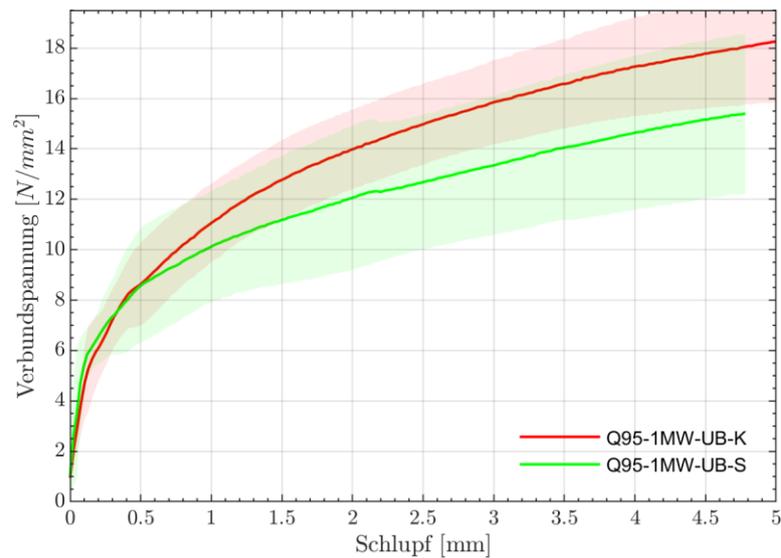


Abb. 5-14: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q95-1MW-UB-K und Q95-1MW-UB-S

### Vergleich Q85-2MW-UB-K mit Q85-2MW-UB-S

Die Kettrovings und die Schussrovings der Versuchsserie Q85 weisen eindeutige Unterschiede in den Ergebnissen auf. Die VSB der Kettrovings übertreffen die VSB der Schussrovings an jeder Stelle. Die Kettrovings weisen dabei bis zu einer Verbundspannung von etwa  $12\text{N/mm}^2$  eine sehr hohe Verbundsteifigkeit auf. Anschließend können die Verbundspannungen weiterhin bis auf eine

Maximalspannung von fast  $20\text{N/mm}^2$ , bei leicht geringerer Verbundsteifigkeit, gesteigert werden. Die Schussrovings weisen im Vergleich eine etwas reduzierte Verbundsteifigkeit und Verbundfestigkeit auf. Im Vergleich konnten die Kettrovings bei einem Schlupf von beispielsweise  $2,5\text{mm}$  eine Verbundspannung von  $15\text{N/mm}^2$  aufbauen, während die Schussrovings erst eine Verbundspannung von  $11,5\text{N/mm}^2$  aufwiesen. Die Streuung der Ergebnisse ist in beiden Fällen gering.

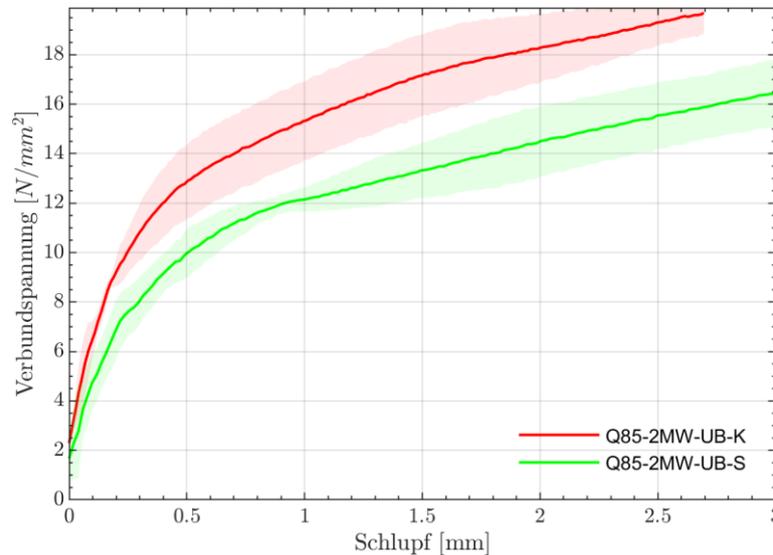


Abb. 5-15: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q85-2MW-UB-K und Q85-2MW-UB-S

### Einfluss der Wirkrichtung - Fazit

Bei den Vergleichen der verschiedenen Wirkrichtungen der drei untersuchten Bewehrungstypen liefern jeweils die Kettrovings bessere Ergebnisse als die Schussrovings. Dies lässt den Schluss ziehen, dass der Wirkfaden, der maßgeblich den Kettroving beeinflusst, einen positiven Einfluss auf das Verbundverhalten hat. Zum Ersten kann der Wirkfaden eine positive Wirkung auf den Reibverbund darstellen. Anhand der Analyse der Versagensbilder der einzelnen Versuche konnte festgestellt werden, dass die Wirkfäden, wenn sie imprägniert sind, sehr robust sind, was einen wesentlichen Einfluss auf den Reibbeiwert darstellen kann. Zum Zweiten beeinflusst der Wirkfaden die Geometrie der Kettrovings. Hier muss man jedoch zwischen den verschiedenen Bindungsarten und der Größe der Textilien unterscheiden, um genauere Behauptungen tätigen zu können.

Grundsätzlich verschafft der Wirkfaden den Kettfäden positive Veränderungen der Geometrie, während die Schussfäden hieran kaum beteiligt werden und eine sehr ebene, konstante Geometrie aufweisen. Am Vergleichsdiagramm von Q142-2MW-UB-K und Q142-2MW-UB-S (Abb. 5-13) kann der Einfluss des Wirkfadens über den Unterschied der VSB folgendermaßen interpretiert werden: Die Serie Q142 ist mit der Bindungsart Trikot-Bindung mit Nadelversatz verwirkt, was große Unterschiede in den geometrischen Merkmalen der Kett- und Schussrovings bewirkt. Der Wirkfaden ist mehrmals um den Kettroving gewickelt, wodurch einerseits eine große Abdeckfläche mit dem Wirkfaden entsteht, welche einen Beitrag für bessere Reibbeiwerte leistet. Andererseits entsteht durch die Vernähung eine leichte verbundfördernde Rippung, wodurch ein deutlich steiferer Reibverbund, und vermutlich auch ein gewisser Formverbund, entsteht. Der Schussroving hingegen weist geometrisch betrachtet keine auffallenden Merkmale auf. Er hat eine sehr glatte und konstante Form.

Ein weiteres aussagekräftiges Diagramm ist das Vergleichsdiagramm der Wirkrichtungen der Serie Q85 (Abb. 5-15). Das bessere Verbundverhältnis der Kettrovings lässt sich hier auf die in Kapitel 4.3.1.2 – Geometrische Beschreibung der Textilien beschriebenen geometrischen Merkmale zurückführen. Die Serie Q85 ist mit der Bindungsart Doppelt-Trikot, gegenlegig, gebunden,

welche die Kettrovings in den Knotenpunkten zusammenpresst und ihnen in Feldmitte eine Ausbauchung verpasst. Neben dem vorteilhaften Einfluss der geometrischen Form ist auch hier von einem günstigen Einfluss der Wirkfadengarne auszugehen. Die Versagensbilder der Versuchskörper Q85-2MW-UB-K und Q85-2MW-UB-S (siehe Anhang B) unterstreichen die Behauptung des Einflusses der Wirkfadengarne auf ein besseres Reibverhältnis. Auf den Bildern ist zu erkennen, dass die getesteten Kettrovings wesentlich beanspruchter aussehen als die Schussrovings. Der Wirkfaden der Kettrovings, sowie die Harzbeschichtung weisen große Abscherungen auf, was augenscheinlich auf einen besseren Reibverbund zurückzuführen ist, während die Schussrovings diese Merkmale nicht aufweisen.

Der eben beschriebene Effekt trifft ebenso auf die Serie Q95 zu, welche ebenfalls mit einer Doppelt-Trikot, gegenlegig, gebunden ist. Der Effekt ist in den Ergebnissen (Abb. 5-14) jedoch weniger deutlich ausgeprägt als beim kleineren Format des Typs Q85, da sich in diesem Fall der Maßstabeffekt auf die Konfiguration mit den kleineren Maschenweiten günstiger auswirkt. Hier ist zu berücksichtigen, dass die Rovings der Versuchsserie Q85 jeweils über eine Länge von zwei Maschenweiten im Verbund liegen und infolgedessen vom Einfluss von je zwei Knotenpunkte, zwei Querrovings und zwei Feldweiten profitieren.

### 5.2.3 Einfluss der Verankerungslänge

#### Vergleich Q142-1MW-UB-K mit Q142-2MW-UB-K

Das nachstehende Diagramm zeigt die Ergebnisse der VSB der Kettrovings der Serie Q142 mit einer Maschenweite und mit zwei Maschenweiten Verbundlänge im Vergleich. Die Mittelwertkurve der Kettrovings mit der doppelten Einbindelänge übertrifft die Kurve der Kettrovings mit nur einer Maschenweite im Verbund. Der Unterschied fällt aber eher unbedeutend aus. Beide Versuchsreihen können maximale Verbundspannungen von je  $15 \text{ N/mm}^2$  aufbauen. Die dazugehörigen lastzugewandten Schlupfweiten liegen bei einer Maschenweite Verankerungslänge bei 2,5mm und mit zwei Maschenweiten im Verbund bei 1,1mm.

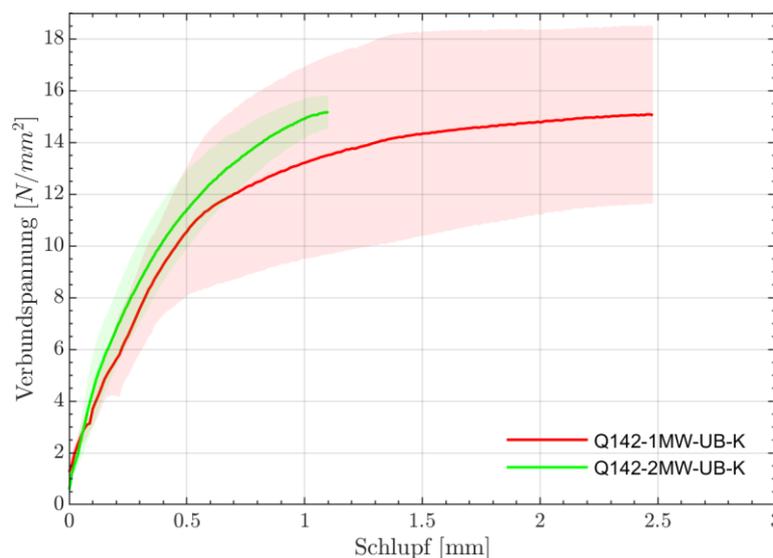


Abb. 5-16: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-1MW-UB-K und Q142-2MW-UB-K

#### Vergleich Q142-1MW-UB-S mit Q142-2MW-UB-S

Vergleicht man die VSB-Ergebnisse der Schussrovings der Serie Q142 mit einmal einer Maschenweite im Verbund und einmal zwei Maschenweiten Verbundlänge, verlaufen die Kurven generell ähnlich und überschneiden sich im Streubereich. Die Mittelwertkurve der Versuchsreihe mit

der kürzeren Verbundstrecke liefert das bessere Verbundergebnis. Die Mittelwertkurve der Schussrovings mit der zweifachen Verbundstrecke liegt zwar im Streubereich der Vergleichskurve des Kettrovings, aber trotzdem merklich unter deren Mittelwert. Als Beispiel kann man die Schlupfweiten bei einer Verbundspannungshöhe von  $11\text{N/mm}^2$  vergleichen. Die durchschnittlichen unteren Schlupfweiten liegen bei der Reihe Q142-2MW-UB-S bei 3mm und sind bei der Reihe Q142-1MW-UB-S nur halb so groß (1,5mm). Man kann dem Diagramm entnehmen, dass sich bei fortschreitenden Schlupfweiten die Kurvenverläufe einander annähern. D.h. dass die Rovings mit der doppelten Verbundlänge bei zunehmendem Schlupf eine höhere Verbundsteifigkeit aufweisen als mit einer Maschenweite. Dies wird auf eine zunehmend bessere Aktivierung des hinteren Verbundbereichs zurückgeführt.

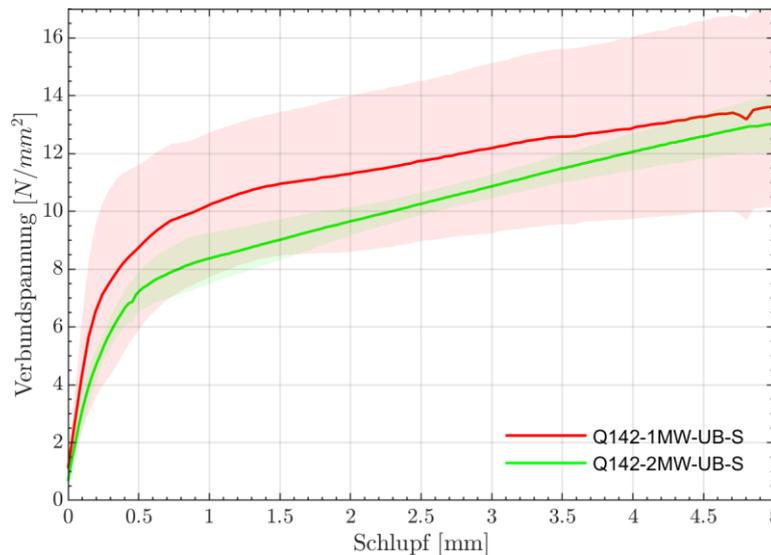


Abb. 5-17: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-1MW-UB-S und Q142-2MW-UB-S

### Einfluss der Verankerungslänge - Fazit

Der Vergleich der Versuchsreihen mit der einfachen und der doppelten Verankerungslänge bringt weitere Erkenntnisse zum Vorschein. Die Ergebnisse der Kettrovings bilden sinngemäß ein besseres Verbundverhalten bei längerer Verbundlänge ab. Die erreichten Verbundspannungen sind zwar ident, die Schlupfweite kann bei doppelter Verankerungslänge aber mehr als halbiert werden. Daraus wird geschlossen, dass die Kettrovings auch bei einer Maschenweite bereits sehr gut im Verbund vorliegen und eine hohe Verbundfestigkeit aufweisen. Eine Erhöhung der Maschenweite wirkt sich darüber hinaus nur mehr positiv auf die Verbundsteifigkeit aus.

Betrachtet man die Ergebnisse der Schussrovings, erreichen beide Versuchsreihen wiederum dieselbe maximale Verbundspannung. Die Reihe mit der doppelten Verbundstrecke erreicht die maximale Verbundspannung jedoch langsamer. Die Ergebniskurven zeigen, dass in diesem Fall, bei vorliegendem Reibverbund der Schussrovings, das Verbundverhalten mit einer zweifachen Verankerungslänge nicht verbessert werden kann. Prinzipiell stimmt das mit der Erwartung überein, dass die Verbundspannung bei längeren Verbundstrecken abnimmt, da gegen Ende des Faserstrangs die Verbundspannungen kleiner werden.

## 5.2.4 Einfluss der Sandbeschichtung

### Vergleich der beschichteten Versuchsreihen mit den unbeschichteten Versuchsreihen<sup>1</sup>

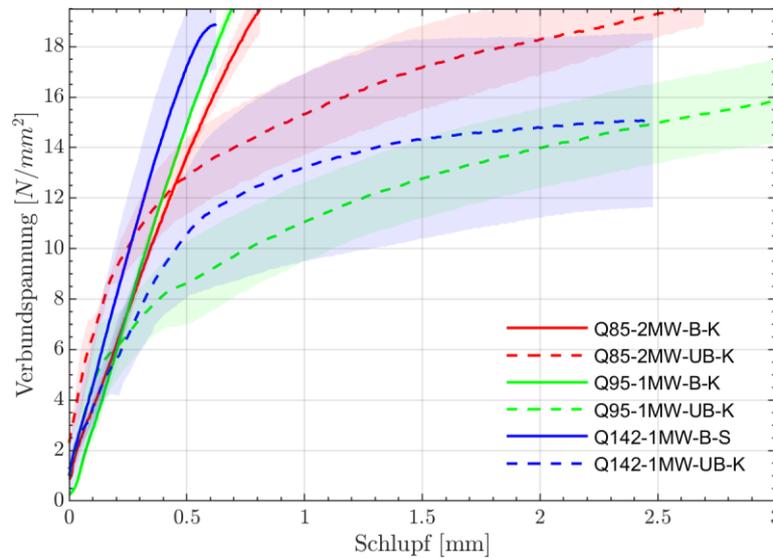


Abb. 5-18: Gemittelte VSB (lastzugewandt) aller beschichteten Reihen im Vergleich zu ihren unbeschichteten Konfigurationen

Vergleicht man die VSB der beschichteten Textilkonfigurationen mit ihren unbeschichteten Versionen kann man in allen drei Fällen die eindeutige verbundsteigernde Wirkung der Sandbeschichtung erkennen. Die VSB der beschichteten Rovings zeichnen von Beginn bis Ende einen sehr steilen linearen Verlauf ab, während die VSB-Kurven der unbeschichteten Serien ab halber Höhe der erreichbaren Verbundspannungen merklich abflachen. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die beschichteten Serien jeweils sehr hohe Verbundspannungen im Bereich von 19-20 N/mm<sup>2</sup> bei Schlupfweiten von 0,6-0,8mm erreichen, während die Ergebnisse der unbeschichteten Serien deutlich geringer ausfallen. Die VSB der unbeschichteten Rovings von Typ Q85 erreichen zwar dieselbe maximale Verbundspannung, aber bei einer deutlich größeren Schlupfweite. Die VSB der unbeschichteten Rovings der Typen Q95 und Q142 erreichen jeweils eine Verbundspannung von etwa 15-16N/mm<sup>2</sup> bei ebenfalls großen Schlupfweiten.

#### Vergleich Q142-1MW-B-S mit Q95-1MW-B-K und Q85-2MW-B-K

In diesem Diagramm werden nochmal explizit die Ergebnisse aller Versuchsreihen mit sandbeschichteten Rovings untereinander verglichen. Wie man erkennen kann, weisen alle Reihen ein sehr ähnliches Verbundverhalten mit sehr geringer Streuung auf. Alle Reihen erreichen Verbundfestigkeiten von 19N/mm<sup>2</sup> bei lastzugewandten Schlupfen im Bereich von 0,6-0,8mm. Dem Diagramm kann entnommen werden, dass die Verbundsteifigkeiten mit abnehmender Faserquerschnittsfläche und abnehmendem Rovingumfang geringfügig abnehmen.

<sup>1</sup> Für den Vergleich werden jeweils die VSB der Ketrovings der unbeschichteten Serie mit den VSB der Testrovings der sandbeschichteten Serie verglichen. Für die Serie Q142 wird hier die VSB der unbeschichteten Ketrovings mit den beschichteten Schussrovings verglichen, was aber keinen großen Einfluss hat, da erfahrungsgemäß die Wirkrichtung der beschichteten Rovings keine relevanten Unterschiede aufweist.

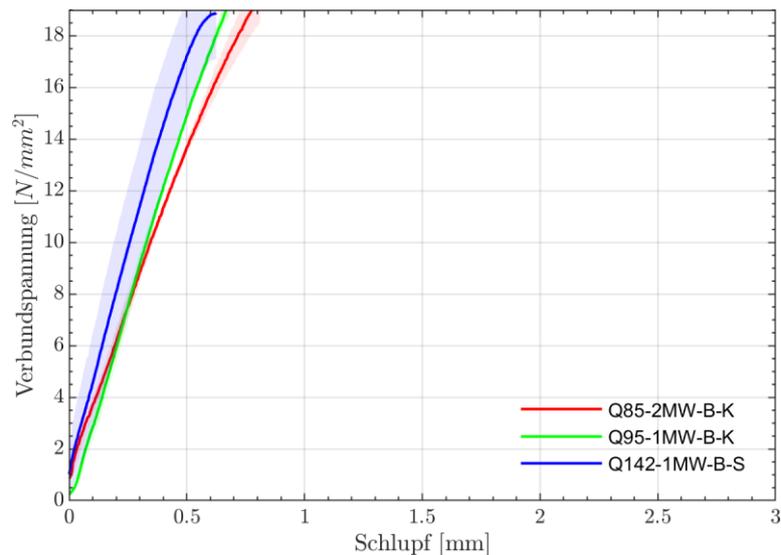


Abb. 5-19: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-1MW-B-S, Q95-1MW-B-K und Q85-2MW-B-K

### **Einfluss der Beschichtung - Fazit**

Wie schon in *Kapitel 5.1 – Versuchsergebnisse* festgestellt wurde, liefern die sandbeschichteten Textilkonfigurationen signifikant bessere Ergebnisse als die Textilien ohne Sandbeschichtung. Dank der zusätzlichen Sandbeschichtung können alle Textilkonfigurationen einen steifen Formverbund erschließen.

## **5.2.5 Einfluss der geometrischen Form**

### **Vergleich Q142-1MW-UB-K mit Q95-1MW-UB-K und Q85-2MW-UB-K**

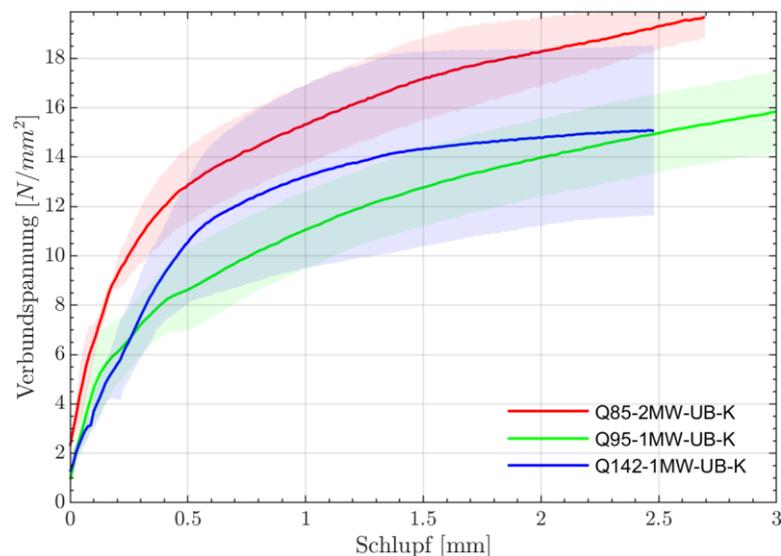


Abb. 5-20: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-1MW-UB-K, Q95-1MW-UB-K und Q85-2MW-UB-K

Beim Vergleich des Verbundverhaltens der unterschiedlichen Kettrovings untereinander schneiden die Kettrovings der Serie Q85 am besten ab, während die Kettrovings der Serie Q95 am schwächsten sind und die Kettrovings der Serie Q142 im mittleren Bereich liegen. Während die Rovings vom Typ Q95 dem VSB-Verlauf der Rovings vom Typ Q85, auch unter Berücksichtigung

der Streuung, eindeutig unterlegen sind, ist der Streubereich der Rovings von Typ Q142 so groß, dass die am besten abgeschnittenen Teststränge das Niveau von Q85 teilweise erreichen, und die schlechtesten teilweise unter das Niveau von Q95 fallen können. Die Kettrovings von Typ Q142 weisen anfangs eine höhere Verbundsteifigkeit auf als die Kettrovings vom Typ Q95. Ab einer Verbundspannung von etwa  $14\text{N/mm}^2$  verliert Typ Q142 jedoch deutlich an Verbundsteifigkeit, während Typ Q95 seine mittlere Verbundsteifigkeit bis zuletzt kontinuierlich halten kann. Letztendlich erreichen beide Typen bei einer Verbundspannung von ca.  $15\text{N/mm}^2$  einen Schlupf von  $2,5\text{mm}$ .

### Vergleich Q142-1MW-UB-S mit Q95-1MW-UB-S und Q85-2MW-UB-S

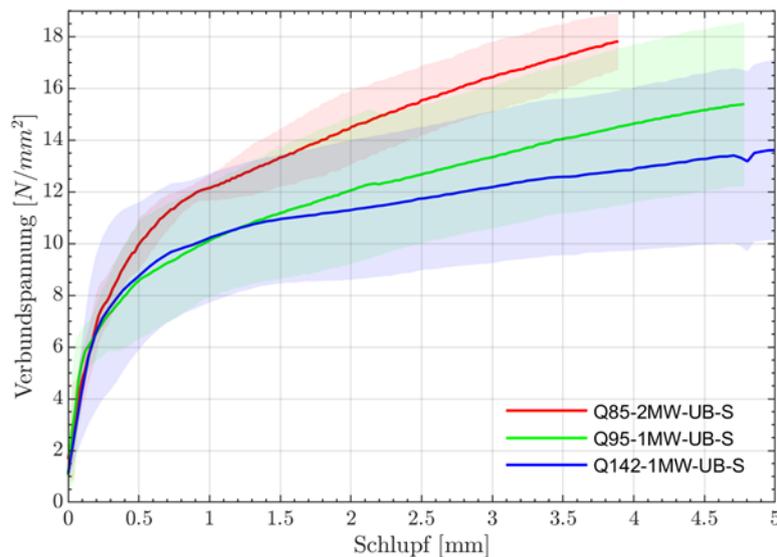


Abb. 5-21: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-1MW-UB-S, Q95-1MW-UB-S und Q85-2MW-UB-S

Beim Vergleich der VSB der Schussrovings der unterschiedlichen Textilkonfigurationen fällt auf, dass die Schussrovings der Typen Q95 und Q142 bis zu einer Verbundspannung von  $11\text{N/mm}^2$  und einem Schlupf von  $1,5\text{mm}$  sehr ähnlich verlaufen. Anschließend flacht die Kurve der Serie Q142 etwas stärker ab als der Verlauf von Q95. Die Erhöhung der Verbundfestigkeit bei fortgeschrittenem Schlupf ist jedoch weniger relevant. Das Verbundverhalten der Schussrovings der Serie Q85 ist im gesamten Verlauf besser. Ihre anfängliche hohe Verbundsteifigkeit kann etwas länger gehalten werden und ihre Kurve flacht weniger steil ab als die der Vergleichsserien.

### Vergleich Q142-2MW-UB-K mit Q85-2MW-UB-K

Da es in diesem Kontext interessant scheint die über zwei Maschenweiten verankerten Faserstränge der Serie Q85 mit einer ebenfalls über zwei Maschenweiten verankerten Versuchsreihe zu vergleichen, wird die Versuchsreihe Q85-2MW-UB-K der Versuchsreihe Q142-2MW-UB-K gegenübergestellt. Beide Versuchsreihen weisen anfangs eine hohe Verbundsteifigkeit auf und können diese bis zu relativ hohen Verbundspannungen beibehalten. Die Reihe Q85-2MW-UB-K weist zwar eine geringfügig höhere Verbundsteifigkeit auf, flacht aber schon früher ab. Die Reihe Q142-2MW-UB-K startet hingegen mit einer etwas geringeren Verbundsteifigkeit, flacht aber bis zum Ende kaum ab. Die Kettrovings von Typ Q85 erreichen eine bemerkenswerte Maximalspannung von fast  $20\text{N/mm}^2$ . Die Kettrovings von Typ Q142 versagen hingegen bereits bei einer durchschnittlichen Spannung von  $15\text{N/mm}^2$ .

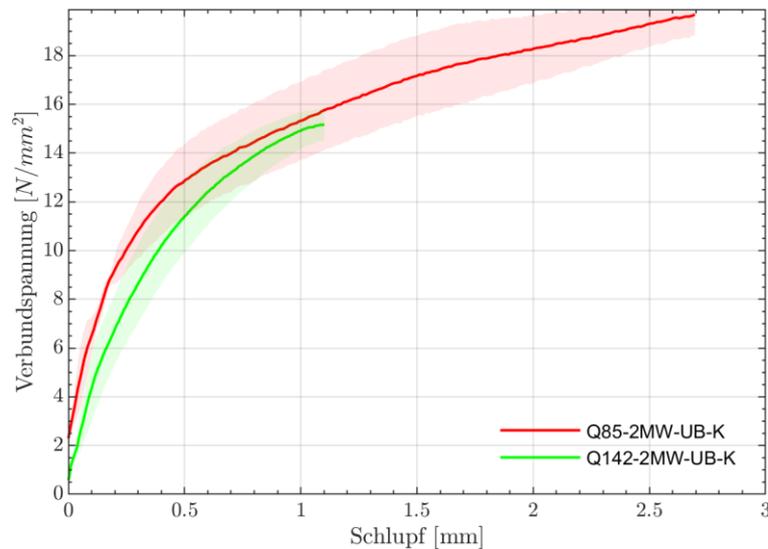


Abb. 5-22: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-2MW-UB-K und Q85-2MW-UB-K

### Vergleich Q142-2MW-UB-S mit Q85-2MW-UB-S

Der Vergleich der über zwei Maschenweiten eingebunden Schussrovings der Typen Q142 und Q85 liefert eindeutige Ergebnisse. Trotz gleicher Voraussetzungen von je zwei Maschenweiten, zwei Knotenpunkten und zwei Querrovings im Verbund, weist die Versuchsreihe Q142-2MW-UB-S keine annähernd so guten Verbundeigenschaften auf wie Typ Q85. Der Steifigkeitsverlauf ist in Relation zwar ähnlich, die Verbundspannungen liegen bei den Schussrovings der Textilkonfiguration Q142 aber deutlich tiefer.

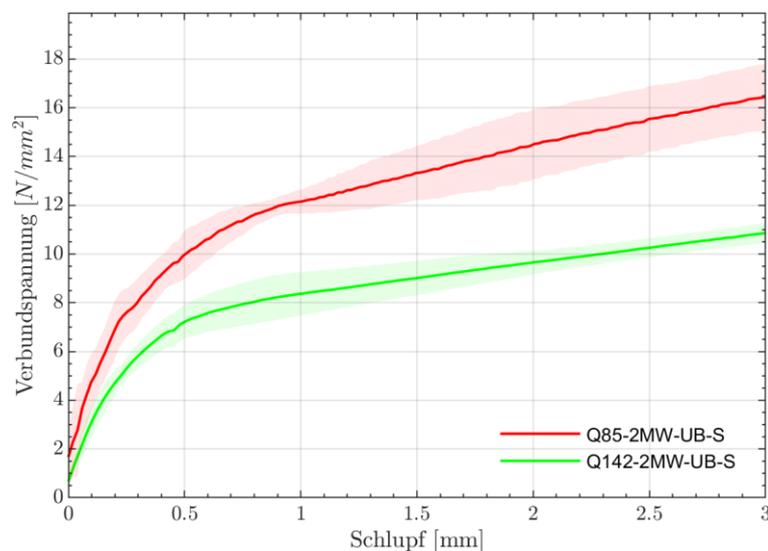


Abb. 5-23: Gemittelte VSB (lastzugewandt) der Reihen Q142-2MW-UB-S und Q85-2MW-UB-S

### Einfluss der geometrischen Form - Fazit

Bei der Gegenüberstellung der Wirkrichtungen der verschiedenen Textiltypen lässt sich generell sagen, dass die Ergebnisse der Kettrovings stärker variieren als die Ergebnisse der Schussrovings, was unter der Betrachtung der unterschiedlicheren Geometrien der Kettfäden und der eher unauffälligen Schussfäden, den Erwartungen entspricht.

Bei der separaten Analyse der Kettrovings und Schussrovings liefert jeweils Typ Q85 die besten Ergebnisse, was nachvollziehbar ist, da diese im Gegensatz zu den Vergleichsserien, mit zwei

Maschenweiten, zwei Knotenpunkten und zwei Querrovings im Verbund liegen. Bei expliziter Betrachtung der Kettrovings von Typ Q85 sind die guten Verbundeigenschaften vor allem aber auf den Einfluss der ausgeprägten geometrischen Formänderung längs der Rovings, wobei hier von einer Dickenaufweitung bzw. einer leichten Welligkeit im Rahmen dieser Dickenaufweitung die Rede ist (siehe Abb. 5-24), zurückzuführen. Bei Betrachtung der Schussrovings resultiert die verbundsteigernde Wirkung vermutlich aus den zwei eingebundenen Knotenpunkten, da die Schussrovings an sich eine eher unauffällige, ebene Form aufweisen.



Abb. 5-24: Laserscan eines Kettrovings Q85-2MW-UB-K, Seitenansicht

Bei Betrachtung der Kettrovings der Typen Q142 und Q95 lässt sich die anfänglich höhere Verbundsteifigkeit der Kettrovings des Typs Q142 gegenüber Q95 aufgrund der vorhandenen Rippung durch die Bindungsart Trikot-Bindung mit Nadelversatz erklären, welche den Kettrovings lokal geometrische Formänderungen verpasst. Im Gegensatz dazu erscheinen die Kettrovings von Typ Q95 lokal eher eben, besitzen hingegen global betrachtet geometrische Formänderungen, weshalb sich der positive Einfluss der Geometrie von Typ Q95 auf die VSB erst zu einem späteren Zeitpunkt im VSB-Verlauf abzeichnet. Die beschriebenen geometrischen Aspekte sind in der Abbildung 5-25 auf Bildern der Laserscans dargestellt. In Abbildung 5-26 ist zusätzlich ein Kettroving von Typ Q142 nach Versagen und somit nach der Abscherung der Harztränkung zu sehen, bei dem die Rippung sehr gut zu Geltung kommt.



Abb. 5-25: Laserscan der Kettrovings Q142-1MW-UB-K (links) u. Q95-1MW-UB-K (rechts); Seitenansicht



Abb. 5-26: Foto eines Kettrovings Q142-2MW-UB-K nach Versagen

Beim Vergleich der Schussrovings der beiden Typen Q142 und Q95 zeigen sich erst ab einem Schlupf von 1,5mm Unterschiede in den VSB. Ab diesem Zeitpunkt flachen beide VSB-Kurven ab, wobei die Kurve von Typ Q142 etwas stärker abflacht. Bei Untersuchung der Laserscans auf geometrische Unterschiede können keine signifikanten geometrischen Merkmale gefunden werden. Der Schussroving von Typ Q95 weist lediglich eine geringfügig größere Breitenaufweitungen auf als der Schussroving des Vergleichstyps Q142 (siehe Abb. 5.27). Das geringfügig bessere Verbundverhalten der Schussrovings von Typ Q95 wird demnach darauf zurückgeführt.

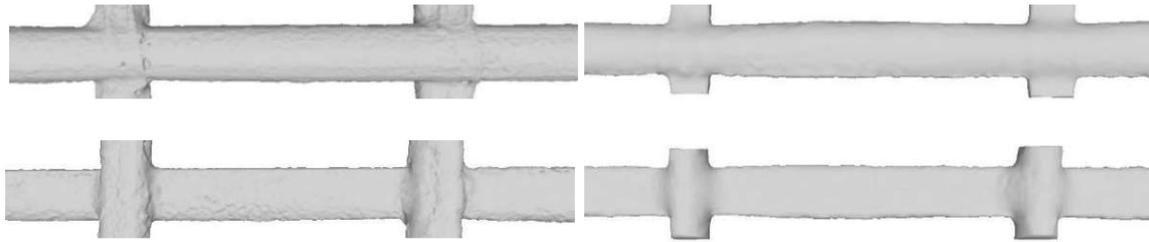


Abb. 5-27: Laserscan der Schussrovings Q142-1MW-UB-S (links) und Q95-1MW-UB-S (rechts); Draufsicht (oben) und Untersicht (unten)

Bei der Gegenüberstellung der mit jeweils zwei Maschenweiten eingebunden Versuchsreihen Q142-2MW-UB mit Q85-2MW-UB ergeben sich bemerkenswerte Ergebnisse. Unter gleichen Bedingungen mit je zwei Feldweiten, zwei Knotenpunkten und zwei Querrovings im Verbund, fallen die Ergebnisse der Kettrovings sehr ähnlich aus, während sich die Ergebnisse der Schussrovings in großem Maße unterscheiden. Den guten Verbund der Kettrovings kann man abermals auf die axiale Formänderung beziehen, welche bei Typ Q85 durch die Doppelt-Trikot-Bindung, gegenläufig, und die daraus resultierende wellige Form gegeben ist (Abb. 5-24). Typ Q142 verdankt seine axiale Formänderung im Gegensatz dazu der Trikot-Bindung mit Nadelversatz, und der daraus resultierenden gerippten Form (Abb. 5-26).

Die Schussrovings beider Typen haben eine sehr ebene und konstante Form und weisen keine geometrischen Auffälligkeiten auf, welche Einfluss auf die VSB nehmen könnten und die Ergebnisse logisch erklären. Betrachtet man die Versuchskörper an sich, liegen aber große Unterschiede vor. Die kleinen Versuchskörper der Typen Q85 haben eine Verbundlänge von zwei Maschenweiten, sprich 42mm. Der Umfang der Schussrovings von Q85 beträgt etwa 8,68 mm, somit weisen die Testrovings eine Verbundfläche von ca. 365mm<sup>2</sup> auf. Im Gegensatz dazu besitzen die Schussrovings der Versuchsreihe Q142-2MW-UB-S eine Verbundlänge von ca. 76mm und einen Rovingumfang von ca. 14,86mm. Das ergibt eine Mantelfläche von ca. 1070mm<sup>2</sup>. Die Versuchsergebnisse beider Versuchsreihen ergaben in beiden Fällen das Vorliegen eines Reibverbundes. Es wird vermutet, dass der Reibverbund sehr ungleichmäßig über die zur Verfügung stehende Reibfläche verteilt ist. Eine Erklärung für die besseren VSB des Typs Q85 wäre, dass der Reibverbund mit Zunahme der Reibfläche umso ungleichmäßiger wird und deswegen der Typ Q85 mit der viel kleineren Verbundfläche bessere Verbundeigenschaften besitzt. Die Schussrovings von Typ Q142 verlieren aufgrund ihrer großen Verbundfläche folglich an Verbundsteifigkeit.

# Kapitel 6

## Zusammenfassung

### 6.1 Zielsetzung

Ziel dieser Diplomarbeit war es, neue Erkenntnisse und Zusammenhänge über das Verbundverhalten von textiler Bewehrung zu erforschen. In diesem Sinne wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um daraus Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen (VSB) zu erhalten und zu analysieren. Es wurden elf Reihen an Pull-Out-Versuchen an einem adaptierten Versuchsaufbau in Anlehnung an den Versuchsaufbau nach RILEM durchgeführt. Bei den getesteten Textilien handelte es sich um Carbonbewehrung mit hoher Garnfeinheit und steifem Tränkungsmaterial des Herstellers *solidian*. Hauptaugenmerk bei den durchgeführten Untersuchungen lag auf dem Einfluss der geometrischen Form und der Oberflächenbeschaffenheit der verschiedenen Textilkonfigurationen auf das Verbundverhalten. Die untersuchten Textilien variierten in den Unterscheidungsmerkmalen der Größe der Faserquerschnittsfläche, der Verbundlänge, der Beschichtung und der Wirkrichtung. Bei der Versuchsdurchführung traten drei unterschiedliche Versagensszenarien der Versuchskörper ein. Die Versuchskörper versagten zufolge eines Ausziehversagens des Faserstrangs, eines Spaltrissversagens des Betonkörpers oder eines Faserrissversagens. Bei einigen wenigen Versuchen trat auch ein kombiniertes Versagen aus Faserriss- und Spaltrissversagen auf. Im Anschluss an das Versagen wurden die Probekörper geöffnet und die Faserstränge auf Schäden untersucht. Die Versagensbilder und die ermittelten VSB stellten die Grundlage für die Versuchsauswertung dar.

### 6.2 Schlussfolgerung der Ergebnisse

Beim Vergleich der VSB der einzelnen Textilkonfigurationen und der Analyse der Versagensbilder konnten folgende Erkenntnisse festgestellt werden:

- Die besten Ergebnisse erreichten die besandeten Varianten der Textilkonfigurationen. Die zusätzliche Sandbeschichtung auf den Textilien ermöglicht einen steifen Formverbund mit dem umgebenden Beton. Alle besandeten Textilien waren auf der geprüften Verbundlänge von etwa 38mm voll verankert.
- Sehr gute Verbundeigenschaften zeigten auch die Ergebnisse der Versuchsreihen des Textiltyps Q85-2MW-UB. Bei den Textilien lag augenscheinlich eine Kombination aus einem Formverbund und einem sehr steifen Reibverbund vor. Alle Versuchskörper versagten mit einem Faserrissversagen. Demnach waren die Textilien vollständig verankert. Dabei ist zu erwähnen, dass die Kettrovings dieses Typs die Ergebnisse der Schussrovings noch deutlich übertreffen. Die Doppelt-Trikot Bindung verleiht den Kettrovings in diesem Fall hervorragende Verbundeigenschaften. Einerseits ermöglicht die dadurch hervorgerufene geometrische Form mit einer Welligkeit bzw. Dickenaufweitung die Erschließung eines Formverbundes, andererseits ermöglicht der Wirkfaden am Kettroving einen sehr steifen Reibverbund.

- Auch die Ketrovings der Serien Q142-1MW-UB und Q142-2MW-UB konnten eine hervorragende Verbundsteifigkeit entwickeln. Der Grund für die guten Ergebnisse ist in diesem Fall auf die Trikot-Bindung mit Nadelversatz zurückzuführen. Der Wirkfaden umwickelt die Ketrovings und verschafft diesen durch die enge Umschnürung eine Rippung. Diese Rippung ermöglicht anfangs einen Formverbund im Beton. Bei fortgeschrittenem Schlupf geht dieser in einen sehr steifen Reibverbund über, weil die Menge an Wirkfadengarnen im Verbundbereich den Reibbeiwert wesentlich erhöht.
- Generell lieferten die Ketrovings bessere VSB als die Schussrovings. Die Schussrovings sind bei der Bindung nur im unmittelbaren Knotenbereich vom Wirkfaden und dessen vorteilhaften Einfluss auf die geometrische Form und auf den Reibverbund betroffen. Auf der übrigen Länge weisen die Schussrovings eine sehr glatte, ebene und konstante Form auf. Aus diesem Grund konnten die Schussrovings nur mittelmäßige Verbundeigenschaften erzielen.
- Bei der Untersuchung der versagten Testrovings konnte außerdem festgestellt werden, dass die Wirkfadengarne sehr robust sind. Der Wirkfaden war im Zuge der experimentellen Versuche sehr hohen Kräften ausgesetzt und befand sich nach Versagen oftmals in einem sehr strapazierten Zustand, wurde aber in den wenigsten Fällen komplett abgeschert.

Letztendlich hat die axiale geometrische Formänderung der Faserstränge den größten Einfluss auf ein gutes Verbundverhalten im Beton. Bei den sandbeschichteten Textilien wird diese Eigenschaft von den Sandkörnern auf den Rovings erbracht. Bei den unbesandeten Textilien hat der Wirkfaden Einfluss auf die geometrische Formänderung der Rovings und somit auf die guten Verbundeigenschaften. Dabei ist es gleichwertig, ob die Formänderung lokal vorliegt, wie bei den Ketrovings mit der Bindung Trikot-Nadelbarrenversatz oder global, wie bei den Ketrovings mit der Doppelt-Trikot-Bindung. In beiden Fällen verbessert der Wirkfaden außerdem den Reibverbund wesentlich.

### 6.3 Zusammenhang mit den Ergebnissen aus Yanik (2021)

Yanik (2021) führte in seiner Diplomarbeit ebenfalls Versuche zum Verbundverhalten von textiler Bewehrung mit denselben Textilkonfigurationen wie in dieser Arbeit durch. Der Fokus seiner Arbeit liegt jedoch auf der Rissbildung in Abhängigkeit von der Betondeckung. Dazu führte er Dehnkörperversuche an Betonscheiben durch. Die besten Ergebnisse erzielten jene Textilkonfigurationen, welche die geringsten Rissweiten und die kleinsten Rissabstände aufzeigten. Wenn man die aus dieser Arbeit gewonnenen Resultate mit den Ergebnissen aus der Diplomarbeit von Yanik vergleicht, fallen einige Gemeinsamkeiten auf:

- In beiden Forschungsarbeiten erbrachten die sandbeschichteten Textilien die besten Verbundresultate. Die zusätzliche Sandbeschichtung verleiht den Textilien ein vorteilhaftes Verbundverhalten sowie ein vorteilhaftes Rissbildungsverhalten mit geringen Rissweiten und kleinen Rissabständen.
- Unter den unbeschichteten Textilkonfigurationen lieferte der Typ Q85-UB-S sehr gute Resultate bezüglich des Rissbildungsverhaltens. Hier ist zu erwähnen, dass in der Arbeit von Yanik die Ketrovings der Serie Q85-UB leider nicht geprüft wurden. Aufgrund der Ergebnisse der aktuellen Arbeit und der Kenntnis der Auswirkungen der geometrischen Formen von Typ Q85-UB-S und Typ Q85-UB-K, kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse des Rissbildungsverhaltens von Typ Q85-UB-K noch etwas besser ausfallen würden als die vorliegenden Ergebnisse vom Typ Q85-UB-S.

- Weiters fällt auf, dass auch in den Versuchen von Yanik die Textilkonfiguration Q142-UB-K sehr gute Resultate erreichte, die jene der anderen unbeschichteten Textilien (mit Ausnahme von Q85-S) übertraf.

Im Großen und Ganzen stimmen die Ergebnisse des in dieser Arbeit untersuchten Verbundverhaltens und die Ergebnisse des in Yaniks Arbeit untersuchten Rissbildungsverhaltens der geprüften Textilkonfigurationen sehr gut überein.

# Literaturverzeichnis

- Auer, M. (2014). „Ein Verbundmodell für Stahlbeton unter Berücksichtigung der Betonschädigung“. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie.
- Beßling, M. und Orłowsky, J. (2022). „Quantification of the Influence of Concrete Width per Fiber Strand on the Splitting Crack Failure of Textile Reinforced Concrete (TRC)“. *Polymers* 2022, 14, 489.
- Burtscher S.L. (2019). „Betonbau 3 Vorlesung“. Wien: burtscher consulting GmbH.
- Bielak, J., A. Spelter, N. Will und M. Claßen (2018). „Verankerungsverhalten textiler Bewehrungen in dünnen Betonbauteilen“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* (113) 7, S. 515–524.
- Cherif, C. (2011). *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Cherif, C., J. Hausding, U. Berger, A. Younes, und R. Kleicke (2011). „Textile Betonbewehrungen auf Basis der Multiaxial-Kettenwirktechnik“. In: *Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum 6. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS6)*, Hrsg. Von Curbach M. und Ortlepp R., TU Dresden, S. 27-40.
- Curbach, M. und F. Jesse (2009). „Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* (104) 1, S. 9–16.
- Hausding, J. (2010). „Multiaxiale Gelege auf Basis der Kettenwirktechnik – Technologie für Mehrschichtverbunde mit variabler Lagenanordnung“. Dissertation. TU Dresden.
- Hegger, J., C. Kulas, M. Raupach und T. Büttner (2011). „Tragverhalten und Dauerhaftigkeit einer schlanken Textilbetonbrücke“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* (106) 2, S. 72–80.
- Kollegger, J. (2014). „Betonbau Vorlesung“. 7. Auflage. TU Wien.
- Krüger, M. (2004). „Vorgespannter textilbewehrter Beton“. Dissertation. Universität Stuttgart. Institut für Werkstoffe im Bauwesen.
- Kulas, C. (2013). „Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile“. Dissertation. RWTH Aachen.
- Lieboldt, M. (2015). „Feinbetonmatrix für Textilbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* (110) S1, S. 22–28.
- Lettow, S. (2006). „Ein Verbundelement für nichtlineare Finite Elemente Analysen - Anwendung auf Übergreifungsstöße“. Dissertation. Universität Stuttgart.
- Lindorf, A. (2011). „Ermüdung des Verbundes von Stahlbeton unter Querzug“. Dissertation. TU Dresden. Institut für Massivbau.
- Lorenz, E. (2014). „Endverankerung und Übergreifung textiler Bewehrungen in Betonmatrices“. Dissertation. TU Dresden. Institut für Massivbau.
- Leonhardt, F. und E. Mönning (1986). „Vorlesungen über Massivbau. Teil 1: Grundlagen zur Bemessung im Stahlbetonbau.“ 3. Auflage; Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo.
- Niederwald, M. (2017). „Zum Einfluss der viskoelastischen Eigenschaften des beschichteten Bewehrungsmaterials auf das Zugtragverhalten von carbonbewehrtem Beton“. Diss. Universität der Bundeswehr München.

- Petersen, L. (2003). „Einfluss baustofflicher Schädigungsprozesse auf das Tragverhalten von Stahlbetonteilen“. Dissertation. Universität Hannover. Institut für Baustoffe.
- Preinstorfer, P., B. Kromoser und J. Kollegger (2018). „Einflussparameter auf die Spaltrissbildung in Textilbeton“. In: Beton- und Stahlbetonbau (113) 12, S. 877–885.
- Preinstorfer, P. (2019). „Zur Spaltrissbildung von textilbewehrtem Beton“. Dissertation. TU Wien. Institut für Tragkonstruktionen.
- Preinstorfer, P. und J. Kollegger (2019). „Kategorisierung des Verbundverhaltens von Textilbeton“. Bauingenieur 94, S. 416– 424.
- Preinstorfer, P., A. Pinzek und J. Kollegger (2020). „Modellierung des Verankerungsverhaltens getränkter textiler Bewehrungen“. In: Beton- und Stahlbetonbau (115), S. 1–11.
- Preinstorfer, P. und J. Kollegger (2020). „New insights into the splitting failure of textile-reinforced concrete“. Compos Struct 243:1–10.
- Reichenbach, S., B. Kromoser, P. Preinstorfer und T. Huber (2021). "Application potential of textile reinforcement in concrete construction for infrastructure buildings: environmental performance and availability". In: "Structural Engineering for Future Societal Needs", IABSE, Zürich, S. 836 - 844.
- Richter, M. (2005). „Entwicklung mechanischer Modelle zur analytischen Beschreibung der Materialeigenschaften von textilbewehrtem Feinbeton“. Dissertation. TU Dresden.
- RILEM (1994). Recommendations for the testing and use of constructions materials. Techn. Ber. London: RILEM Technical Committee.
- Scheerer, S. und D. Proske (2008). „Stahlbeton for Beginners“. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Schoene, J., U. Reisinger, M. Schleser und J. Jeřábek (2011). „Theoretische und experimentelle Untersuchung des spaltungsinduzierten Versagens von TRC Prüfkörpern“. In: 6th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS6) – Textilbeton in Theorie und Praxis. Hrsg. von Curbach M. und Ortlepp R. TU Dresden. Dresden, S. 73–84.
- Tepfers, R. (1973). "A Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars". Dissertation, Division of Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Wommelsdorff O. (2002). „Stahlbetonbau - Bemessung und Konstruktion. Teil 1: Grundlagen - Biegebeanspruchte Bauteile.“ 7. Auflage. Werner Verlag Düsseldorf.
- Yanik, S. (2021) „Einfluss der Überdeckung auf die Rissbildung von Hochleistungsbeton mit Carbonbewehrung unter Zugbeanspruchung“. Diplomarbeit. TU Wien. Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie.
- Zilch, K. und G. Zehetmaier (2010). Bemessung im konstruktiven Betonbau. Berlin/Heidelberg: Springer.

# Anhang A

## Auswertung der Scans

## 7.1 Prüfserie Q 142–UB

Tab. 7-1: Geometrische Größen aus den Scans ermittelt

Prüfrichtung	A [mm <sup>2</sup> ]	U [mm]	b [mm]	h [mm]
Kett	13,91	14,84	5,99	2,70
Schuss	13,80	14,86	5,97	2,69

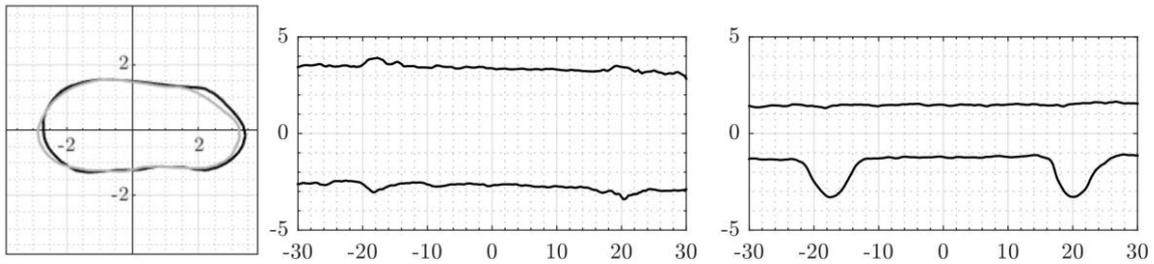


Abb. 7-1: Ketroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal

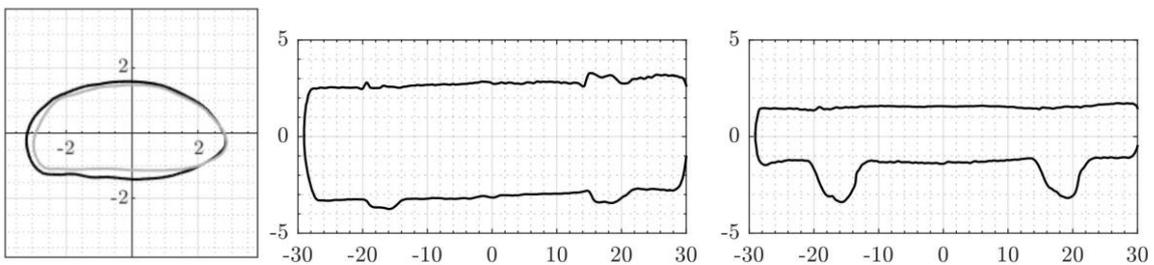


Abb. 7-2: Schussroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal



Abb. 7-3: Seitenansicht Ketroving (links), Schussroving (rechts)

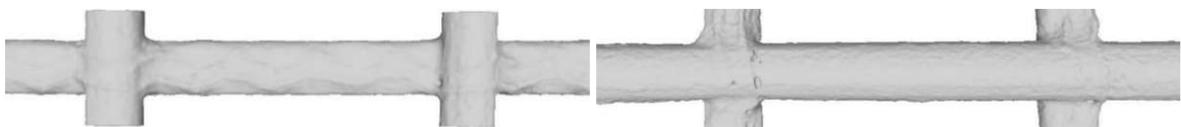


Abb. 7-4: Draufsicht Ketroving (links), Schussroving (rechts)



Abb. 7-5: Untersicht Ketroving (links), Schussroving (rechts)

## 7.2 Prüfserie Q 142–B

Tab. 7-2: Geometrische Größen aus den Scans ermittelt

Prüfrichtung	A [mm <sup>2</sup> ]	U [mm]	b [mm]	h [mm]
Kett	12,27	14,42	5,66	2,37
Schuss	13,97	16,94	6,81	2,15

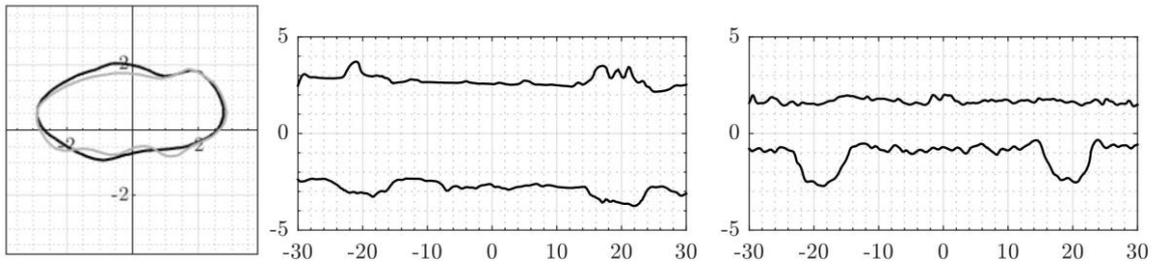


Abb. 7-6: Kettroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal

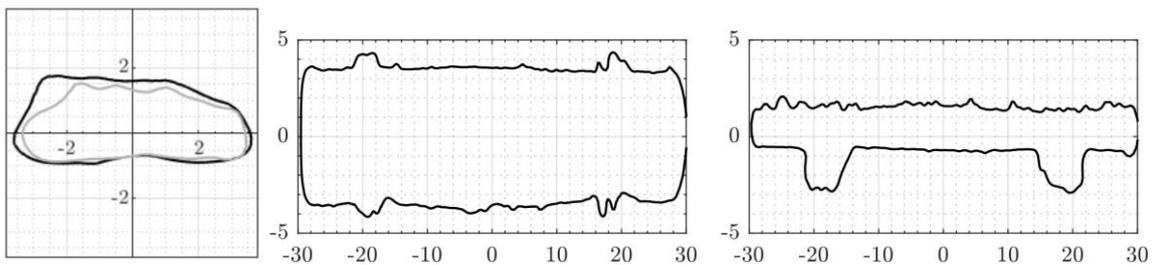


Abb. 7-7: Schussroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal



Abb. 7-8: Seitenansicht Kettroving (links), Schussroving (rechts)

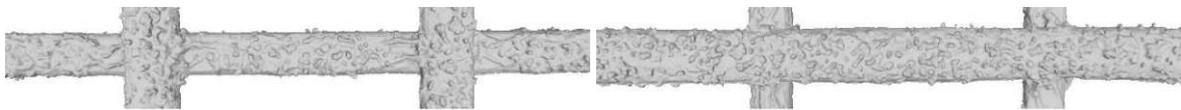


Abb. 7-9: Draufsicht Kettroving (links), Schussroving (rechts)

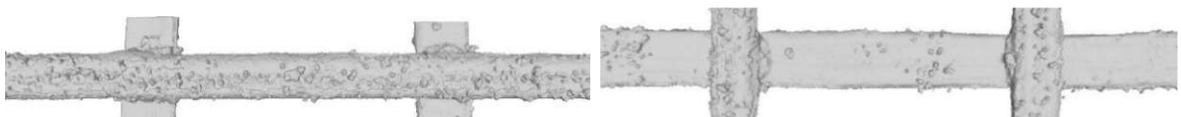


Abb. 7-10: Untersicht Kettroving (links), Schussroving (rechts)

### 7.3 Prüfserie Q 95–UB

Tab. 7-3: Geometrische Größen aus den Scans ermittelt

Prüfrichtung	A [mm <sup>2</sup> ]	U [mm]	b [mm]	h [mm]
Kett	8,43	11,13	4,18	2,50
Schuss	8,66	12,74	5,40	1,81

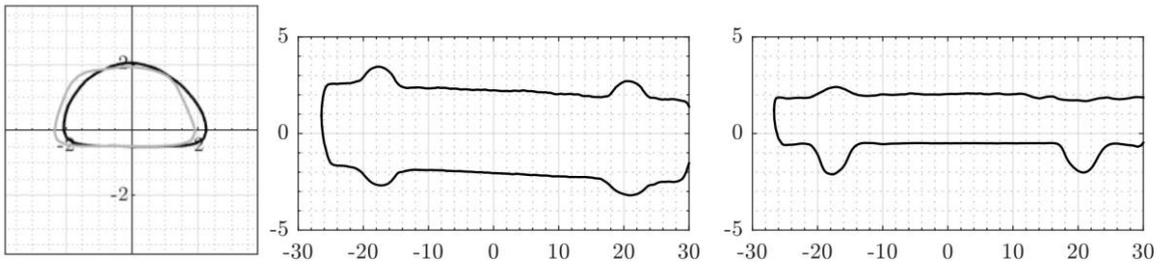


Abb. 7-11: Kettroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal

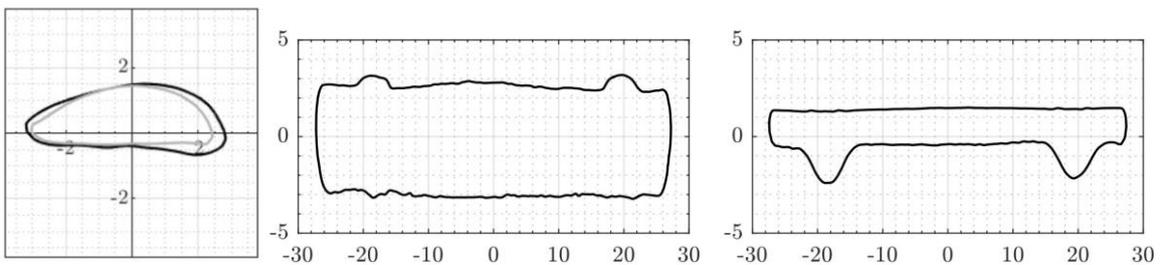


Abb. 7-12: Schussroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal



Abb. 7-13: Seitenansicht Kettroving (links), Schussroving (rechts)

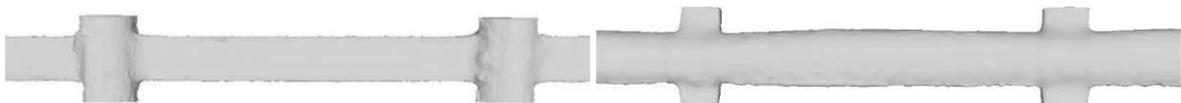


Abb. 7-14: Draufsicht Kettroving (links), Schussroving (rechts)

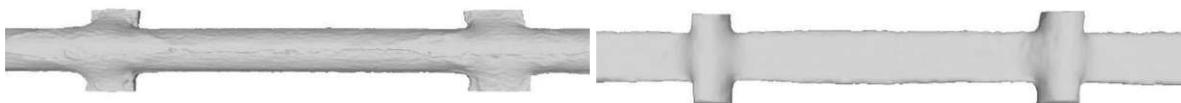


Abb. 7-15: Untersicht Kettroving (links), Schussroving (rechts)

## 7.4 Prüfserie Q 95–B

Tab. 7-4: Geometrische Größen aus den Scans ermittelt

Prüfrichtung	A [mm <sup>2</sup> ]	U [mm]	b [mm]	h [mm]
Kett	11,55	13,19	4,74	2,71
Schuss	13,54	14,59	5,46	2,72

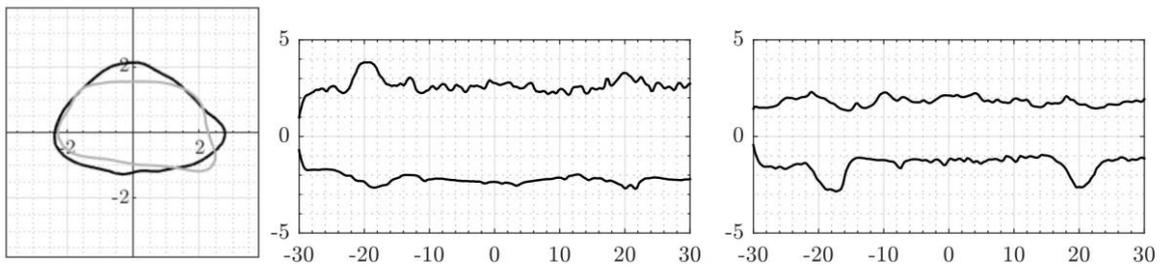


Abb. 7-16: Ketroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal

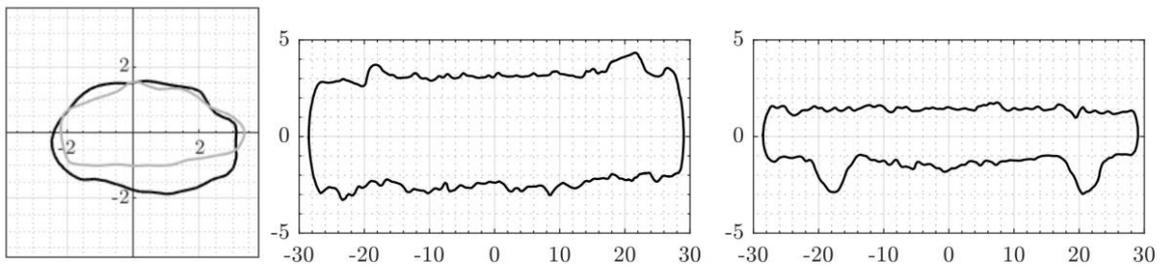


Abb. 7-17: Schussroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal



Abb. 7-18: Seitenansicht Ketroving (links), Schussroving (rechts)

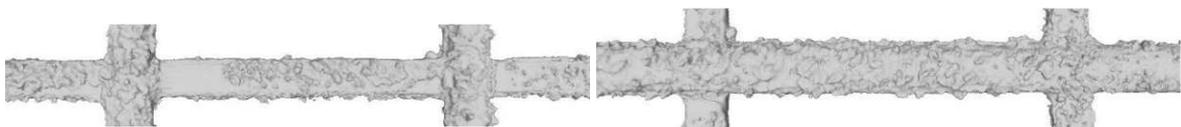


Abb. 7-19: Draufsicht Ketroving (links), Schussroving (rechts)



Abb. 7-20: Untersicht Ketroving (links), Schussroving (rechts)

## 7.5 Prüfserie Q 85–UB

Tab. 7-5: Geometrische Größen aus den Scans ermittelt

Prüfrichtung	A [mm <sup>2</sup> ]	U [mm]	b [mm]	h [mm]
Kett	4,12	7,94	3,13	1,52
Schuss	4,03	8,68	3,74	1,30

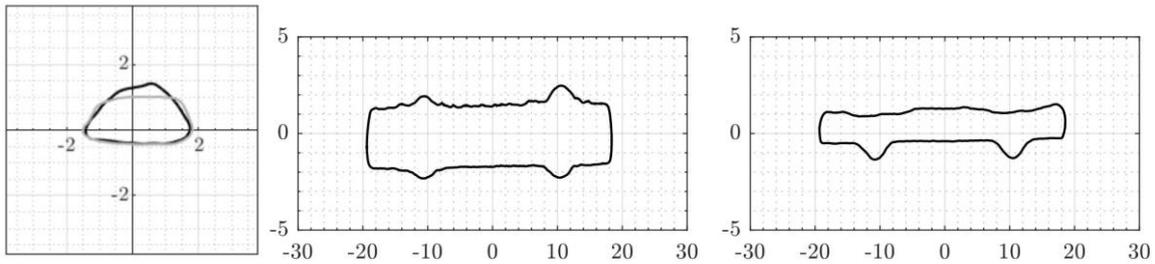


Abb. 7-21: Kettroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal

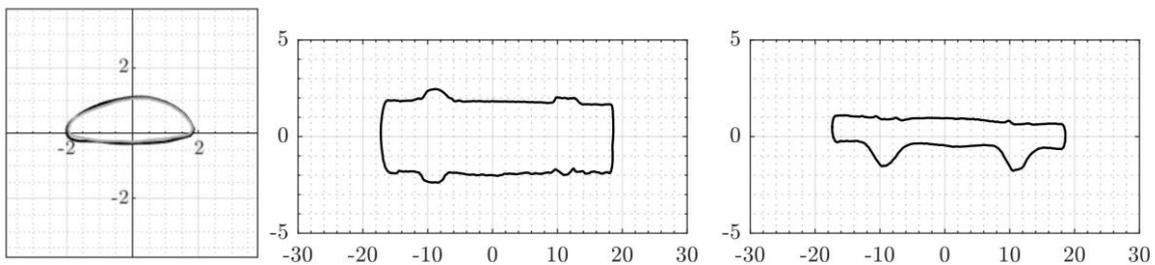


Abb. 7-22: Schussroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal



Abb. 7-23: Seitenansicht Kettroving (links), Schussroving (rechts)

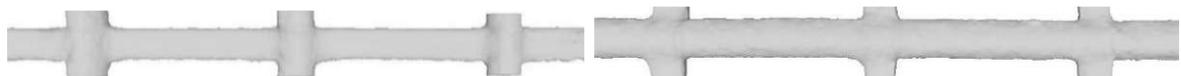


Abb. 7-24: Draufsicht Kettroving (links), Schussroving (rechts)



Abb. 7-25: Untersicht Kettroving (links), Schussroving (rechts)

## 7.6 Prüfserie Q 85–B

Tab. 7-6: Geometrische Größen aus den Scans ermittelt

Prüfrichtung	A [mm <sup>2</sup> ]	U [mm]	b [mm]	h [mm]
Kett	6,64	10,40	3,88	2,37
Schuss	6,94	11,44	4,16	2,10

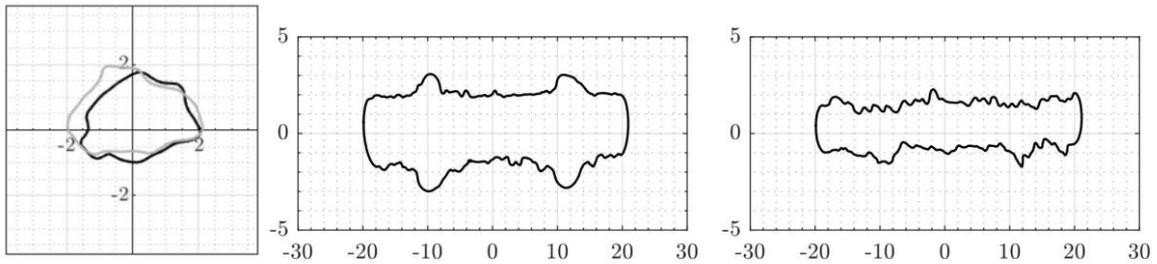


Abb. 7-26: Ketroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal

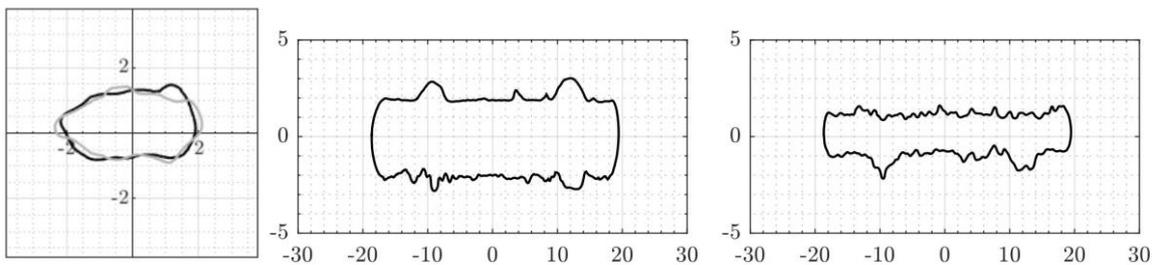


Abb. 7-27: Schussroving: Querschnitt, Längsschnitt horizontal, Längsschnitt vertikal



Abb. 7-28: Seitenansicht Ketroving (links), Schussroving (rechts)

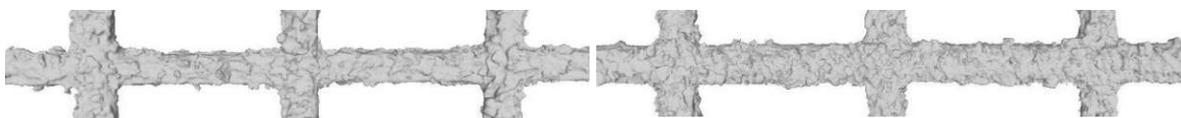


Abb. 7-29: Draufsicht Ketroving (links), Schussroving (rechts)



Abb. 7-30: Untersicht Ketroving (links), Schussroving (rechts)

## Anhang B

# Auswertung der Prüfkörper

## 8.1 Prüfserie Q 142–UB

### Prüfserie

Typ: Q 142  
 Beschichtung: UB  
 Einbindelänge: 1MW + 2MW  
 Prüfrichtung: Kett + Schuss

### Textil

Faserquerschnittsfläche:  $5,42 \text{ mm}^2$   
 Beschichtung: Epoxidharz  
 Maschenweite: 38 mm  
 Bindeart: Trikot - Nadelversatz

### Beton

Betonage: 28.06.2021  
 Prüfdatum: 12.08.2021  
 Druckfestigkeit:  $114,8 \text{ N/mm}^2$   
 Biegezugfestigkeit:  $11,3 \text{ N/mm}^2$

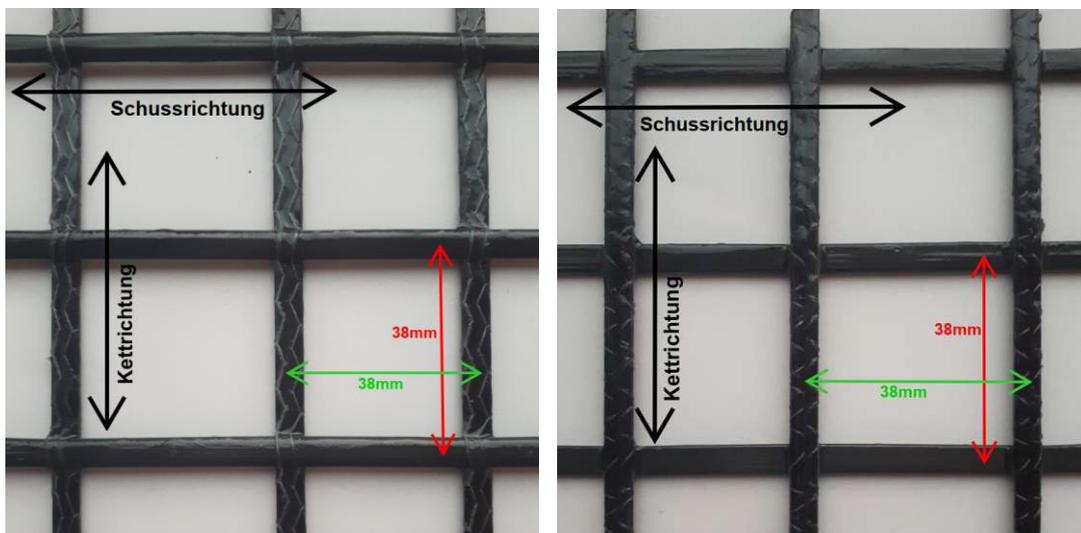


Abb. 8-1: solidian-GRID\_Q142-CCE-38-E5; Vorderseite (links) und Rückseite (rechts);

## Prüfreihe Q142–1MW–UB–K

Tab. 8-1: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q142–1MW–UB–K

Übersicht:	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4*
<b>Versagensart:</b>	Herausziehen	Herausziehen	Herausziehen	Herausziehen
<b>Einbindelänge:</b>	37 mm	37,5 mm	36,5 mm	36 mm
<b><math>F_{\max}</math>:</b>	6699,6 N	7910,3 N	10252,1 N	8968,2 N
<b><math>w_{\max}</math>:</b>	6,8 mm	6,6 mm	9,6 mm	7,9 mm
<b><math>s_{,u}</math>:</b>	2,90 mm	1,20 mm	3,30 mm	--
<b><math>s_{,o}</math>:</b>	2,50 mm	0,90 mm	3,00 mm	2,25 mm
<b><math>s_{,m}</math>:</b>	2,70 mm	1,05 mm	3,15 mm	--

\*Aufgrund von unplausiblen Ergebnissen bei der Auswertung der VSB, wurde Versuch 4 für die Ergebnisermittlung der VSB dieser Versuchsreihe herausgenommen. Der Versuchsverlauf, die erreichte Maximalkraft, sowie die Größe des oberen Schlupfes bleiben dennoch plausibel und sind in den Protokollen angeführt.

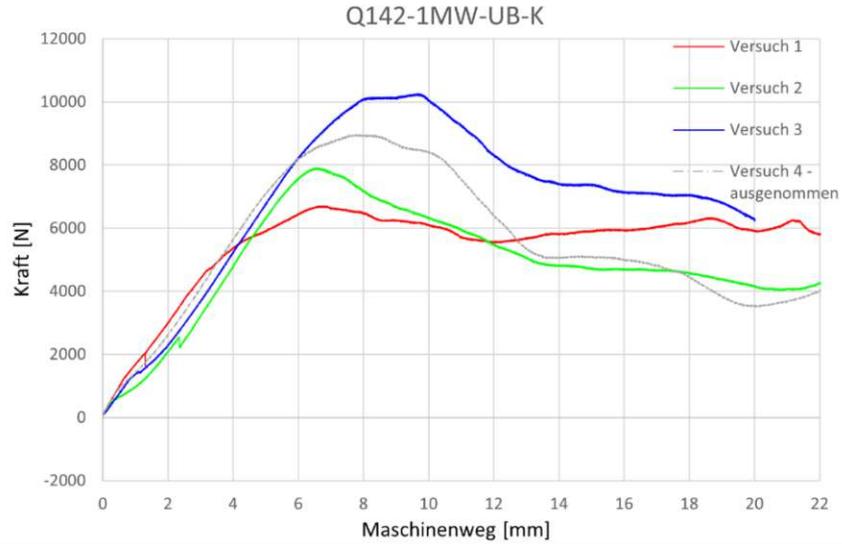


Abb. 8-2: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine

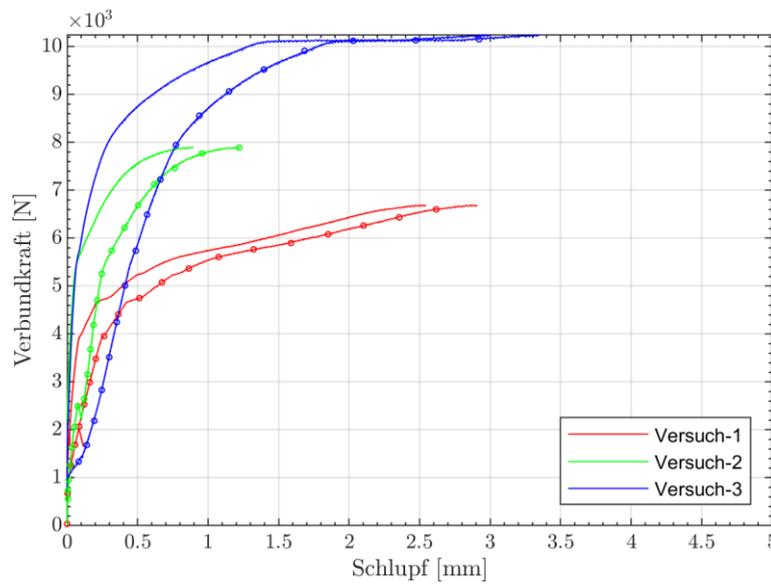


Abb. 8-3: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktirt)

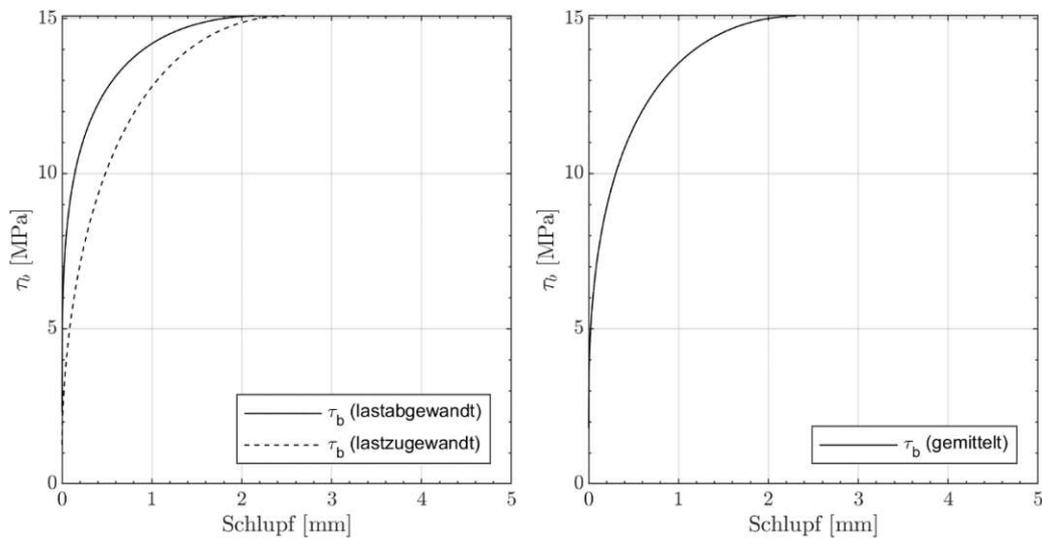


Abb. 8-4: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts)

## Auswertung der versagten Versuchskörper

### Versuch 1 Q142-1MW-UB-K-V1



Abb. 8-5: Abgescherter Faserstrang im geöffneten Versuchskörper

Versagensart: Ausziehversagen

$F_{\max}$ : 6699,6 N

Anmerkung: Der Testroving schaut ziemlich zerstört aus. Der Querroving, das Harz, der Wirkfaden und der Faserstrang selbst sind abgescherert. Es sieht so aus, als wurde außerdem der angrenzende Beton abgescherert.

### Versuch 2 Q142-1MW-UB-K-V2



Abb. 8-6: Geöffneter Versuchskörper: abgescherter Testroving (links); abgescherter Querroving (rechts)

Versagensart: Ausziehversagen

$F_{\max}$ : 7910,3 N

Anmerkung: Der Testroving schaut insgesamt weniger zerstört aus als die anderen Testrovings dieser Versuchsreihe. Der Querroving wurde abgescherert. Die Harzimprägnierung, der Wirkfaden und der Roving selbst sind im oberen Bereich zwar beschädigt, aber nicht abgescherert. Im unteren Bereich sind Wirkfaden, Harzbeschichtung und der Faserstrang selbst abgescherert.

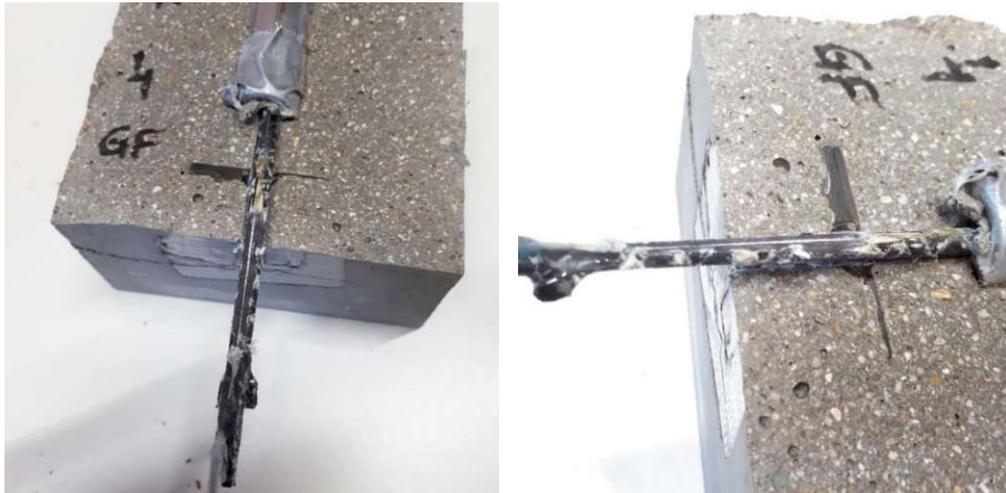
**Versuch 3 Q142-1MW-UB-K-V3**

Abb. 8-7: Abgescherter Faserstrang im geöffneten Versuchskörper

Versagensart: Ausziehversagen

 $F_{\max}$ : 10252,1 N

Anmerkung: Der Querroving, der Wirkfaden, die Harzbeschichtung und der Längsroving selbst sind auf ganzer Verbundlänge abgeschert.

**Versuch 4 Q142-1MW-UB-K-V4**

Abb. 8-8: Abgescherter Faserstrang im geöffneten Versuchskörper

Versagensart: Ausziehversagen

 $F_{\max}$ : 8968,2 N

Anmerkung: Der Testroving schaut ziemlich zerstört aus. Der Querroving wurde abgeschert. Die Harzimpregnierung, der Wirkfaden und der Roving selbst sind auf der gesamten Verbundstrecke größtenteils abgeschert.

## Prüfreihe Q142-1MW-UB-S

Tab. 8-2: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q142-1MW-UB-S

Übersicht:	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
<b>Versagensart:</b>	Spalten	Herausziehen	Faserriss	Faserriss
<b>Einbindelänge:</b>	38 mm	38 mm	36 mm	35,5 mm
<b><math>F_{\max}</math>:</b>	9859,1 N	6687,8 N	10589,1 N	9253,1 N
<b><math>w_{\max}</math>:</b>	17,2 mm	19,0 mm	14,8 mm	10,4 mm
<b><math>s_{,u}</math>:</b>	>10,00 mm	>10,00 mm	9,20 mm	5,20 mm
<b><math>s_{,o}</math>:</b>	>10,00 mm	>10,00 mm	8,80 mm	4,20 mm
<b><math>s_{,m}</math>:</b>	>10,00 mm	>10,00 mm	9,00 mm	4,70 mm

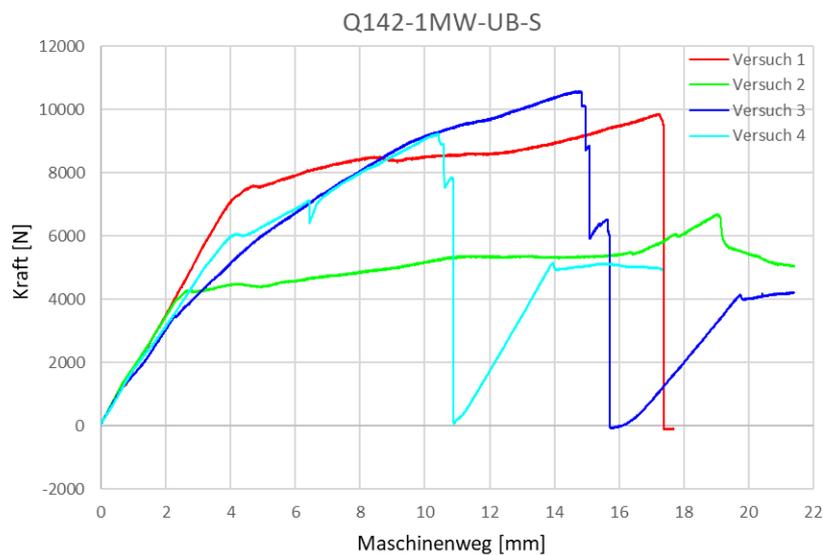


Abb. 8-9: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine

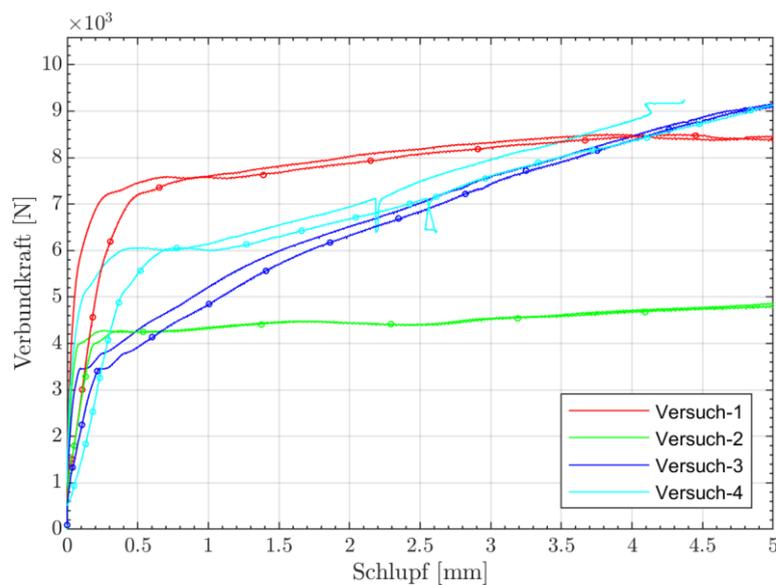


Abb. 8-10: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert)

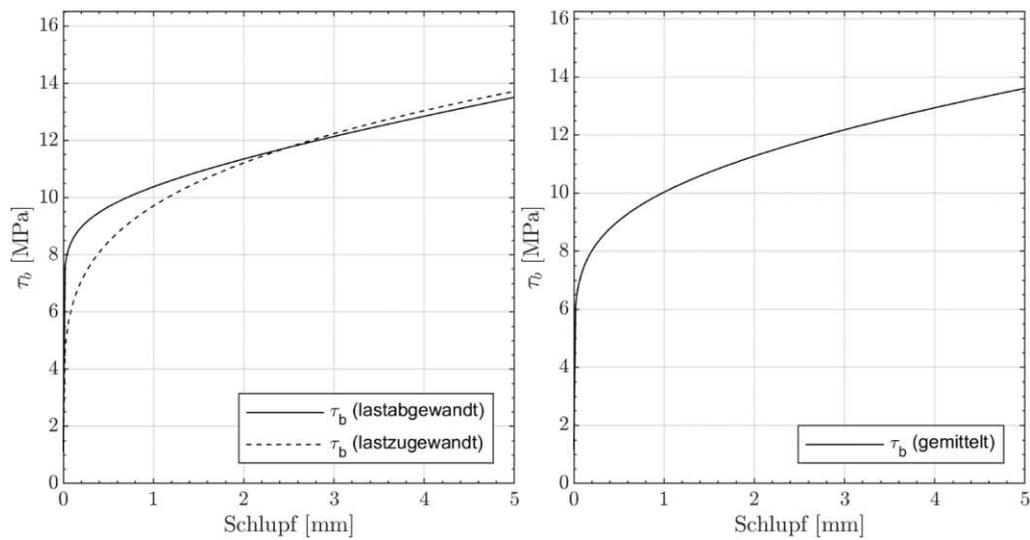


Abb. 8-11: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts)

## Auswertung der versagten Versuchskörper

### Versuch 1 Q142-1MW-UB-S-V1



Abb. 8-12: Spaltriss am Versuchskörper (links); geöffneter Versuchskörper (rechts)

Versagensart: Spaltrissversagen

$F_{\max}$ : 9859,1 N

Anmerkung: Der Querrovung wurde vom Längsrovung abgeschert. Der Testrovung ist maßgeblich zerstört. Die Harzbeschichtung und der Längsrovung selbst sind auf ganzer Verbundlänge abgeschert.

**Versuch 2 Q142-1MW-UB-S-V2**

Abb. 8-13: Herausgezogener Roving (links); geöffneter Versuchskörper (rechts)

Versagensart: Ausziehversagen

 $F_{\max}$ : 6687,8 N

Anmerkung: Der Querroving wurde vom Längsroving abgeschert. Beim Längsroving wurde im Zuge des Herausziehens die Harzbeschichtung und in geringem Maße abgeschert. Der Roving selbst ist auf ganzer Länge oberhalb des Querrovings abgeschert.

**Versuch 3 Q142-1MW-UB-S-V3**

Abb. 8-14: Gespaltener Faserstrang (rechts); herausschauendes Faserstrangende nach Versagen (mittig); zerstörter Faserstrang im Verbundbereich (rechts)

Versagensart: Zugbruchversagen

 $F_{\max}$ : 10589,1 N

Anmerkung: Der Roving versagte mit einem Zugbruchversagen. Der Faserstrang wurde länglich in mehrere Stränge gespalten. Das mittlere Foto zeigt das obere Faserstrangende nach Abbruch des Versuches. Es wird angenommen, dass der Testroving auf einer Seite besser im Verbund lag und einseitig rausgezogen wurde. Im geöffneten Betonkörper ist zu sehen, dass der Querroving

abgeschert wurde. Die Harzbeschichtung ist vom Längsroving abgeschert und der Längsroving ist im Verbundbereich gebrochen.

#### Versuch 4 Q142-1MW-UB-S-V4



Abb. 8-15: Verbundbereich und Bruchstelle des Rovings im geöffneten Versuchskörper

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 9253,1 N

Anmerkung: Der Faserstrang versagte zufolge Zugbruch. Der Längsroving brach direkt an der unteren Einbindestelle in den Beton. Der Querroving und die Imprägnierung waren vom Testroving abgeschert. In Abbildung 8-15 ist der Roving in seiner Lage verschoben dargestellt. Für das Foto wurde der Roving ein Stück weit aus dem Rohr herausgezogen, damit die Bruchstelle ersichtlich wurde.

Hier ist anzumerken, dass es sich bei diesem Versuchskörper um einen Versuchskörper mit eingebauter Faseroptik-Messung handelt. Für den Einbau der Glasfaser, wurde der Roving eingeritzt. Bei der Versagensstelle könnte die Einritzung des Längsrovings eine Rolle spielen.

## Prüfreihe Q142-2MW-UB-K

Tab. 8-3: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q142-2MW-UB-K

Übersicht:	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
<b>Versagensart:</b>	Faserriss	Herausziehen	Herausziehen	Faserriss
<b>Einbindelänge:</b>	75 mm	77 mm	76 mm	77 mm
<b><math>F_{\max}</math>:</b>	17843,6 N	16963,5 N	17349,8 N	16756,3 N
<b><math>w_{\max}</math>:</b>	9,1 mm	9,9 mm	10,4 mm	9,6 mm
<b><math>s_{,u}</math>:</b>	0,83mm	1,07mm	1,30	1,20 mm
<b><math>s_{,o}</math>:</b>	0,50 mm	0,45 mm	0,65 mm	0,50 mm
<b><math>s_{,m}</math>:</b>	0,67 mm	0,76 mm	0,98 mm	0,85 mm

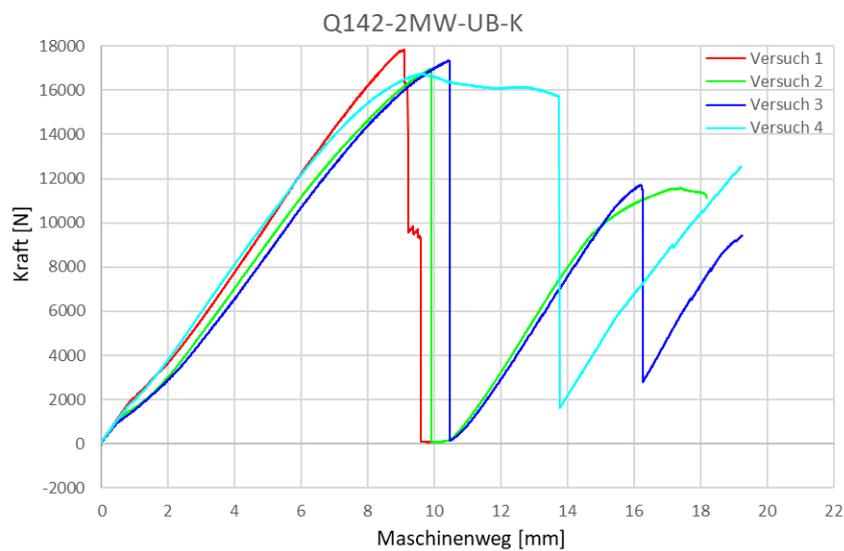


Abb. 8-16: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine

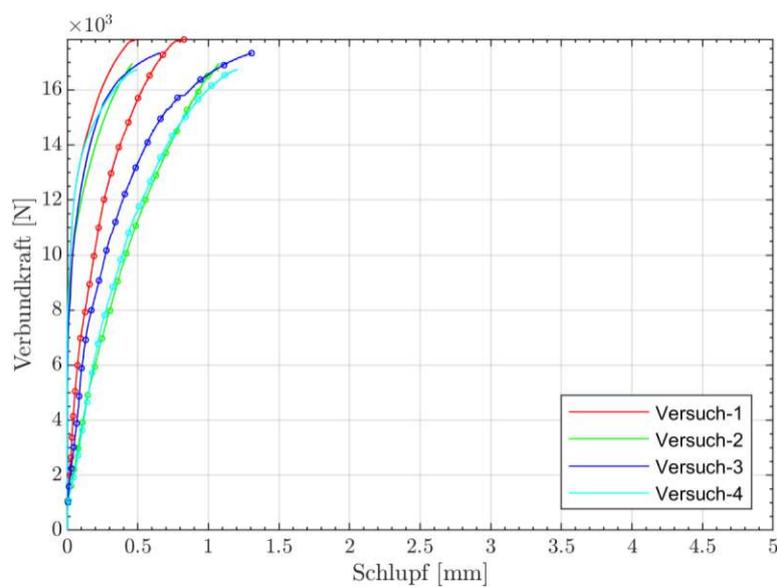


Abb. 8-17: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert)

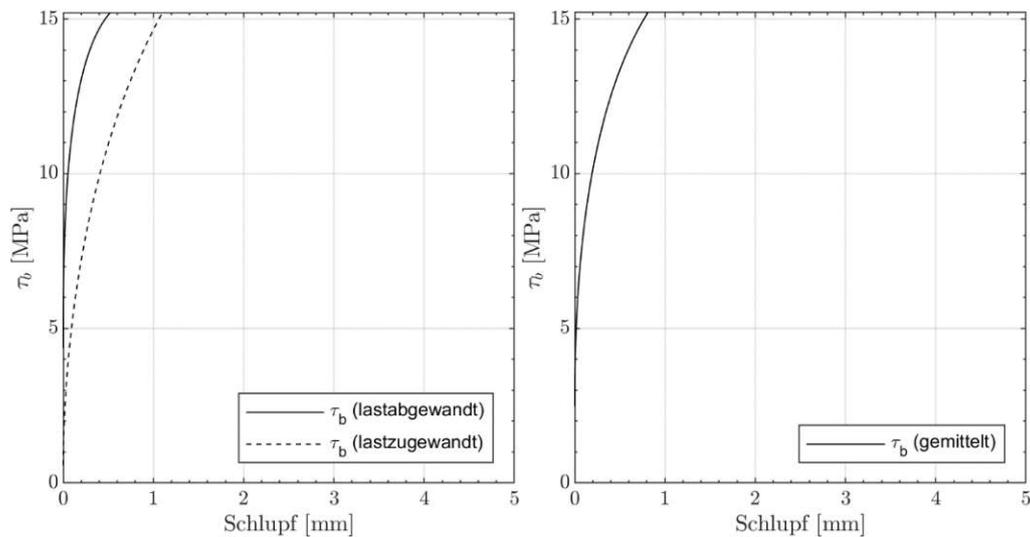


Abb. 8-18: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts)

## Auswertung der versagten Versuchskörper

### Versuch 1 Q142-2MW-UB-K-V1



Abb. 8-19: Versagter Versuchskörper (links); verankertes Rovingstück nach Versagen (rechts)

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 17843,6 N

Anmerkung: Der Roving versagte infolge Zugbruch an der lastzugewandten Einbindestelle. Der Faserstrang wurde in viele dünne Strähnen gespalten. Beim Öffnen des Versuchskörpers weist der Roving im Verbundbereich kaum Schädigungen auf. Die Querrovings haften weiterhin am Längsroving. Der Wirkfaden ist teilweise leicht beschädigt. Die Harzbeschichtung ist teilweise abgeschert. Dies könnte auch im Zuge der Öffnung passiert sein.

**Versuch 2 Q142-2MW-UB-K-V2**

Abb. 8-20: Schlupf im Einspannrohr; Abscherung des geschlüfteten Faserstrangs; Verbundbereich im geöffneten Betonkörper: Längsroving und Querrovings (von links nach rechts)

Versagensart: Ausziehversagen

$F_{\max}$ : 16963,5 N

Anmerkung: Der Versuch versagte mit einem Ausziehversagen und wurde nach 18 Minuten abgebrochen. Die erhaltenen Daten dieses Versuches sind nicht 100%ig aussagekräftig, da der Roving an der Einspannstelle schlüpfte, anstatt an der Einbindestelle in den Versuchskörper. Der Schlupf an der Einspannstelle ist am ersten Bild von links ersichtlich. Am zweiten Bild kann man die Abscherung der Harzbeschichtung des Rovings erkennen. Das Einspannrohr wurde nicht geöffnet, weswegen keine genaueren Aussagen gemacht werden können. Es ist davon auszugehen, dass das Harz in der Verbundstrecke auf weiteren Stellen abgeschert wurde. Beim Öffnen des Probekörpers kann keine Beschädigung des Längsrovings festgestellt werden. Die Querrovings sind abgeschert. Dies könnte auch im Zuge des Öffnens des Probekörpers verursacht worden sein.

**Versuch 3 Q142-2MW-UB-K-V3**

Abb. 8-21: Schlupf am herausschauenden Rovingende (links); Schlupf im Einspannrohr (mittig); abgescherteter Längsroving (rechts)

Versagensart: Ausziehversagen

$F_{\max}$ : 17349,8 N

Anmerkung: Der Versuchskörper versagte mit einem Ausziehversagen. Der Längsroving wurde aus dem Betonkörper herausgezogen. Beim Öffnen des Versuchskörpers sind beide Querrovings vom Längsroving abgesichert. Der Wirkfaden ist im gesamten Verbundbereich ebenfalls abgesichert. Die Harzbeschichtung und der Testroving selbst sind nur wenig abgesichert. Der Faserstrang schlupfte an der Einspannstelle ca. einen Millimeter (Abb. 8-21-mittig). Am feien Ende schlupfte der Roving so lange, bis der Versuch abgebrochen wurde. Man kann die Harzabschöpfung am herausstehenden Ende des Roving sehen (Abb. 8-21-links).

#### Versuch 4 Q142-2MW-UB-K-V4



Abb. 8-22: Versagter Prüfkörper (links); Verbundbereich (mittig); Schulpf im Einspannrohr (rechts)

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 16756,3 N

Anmerkung: Der Roving versagte zufolge Zugbruch. Der Faserstrang wurde von Beginn der Einbindestelle auf der lastzugewandten Seite bis zur Einbindestelle gespalten. In der Verbundfläche können kaum Beschädigungen am Roving festgestellt werden. Die Querrovings sind vom Prüfroving getrennt. Der Längsroving schlupfte in der Einspannstelle und verringert deshalb die Aussagekraft des Versuches.

## Prüfreihe Q142-2MW-UB-S

Tab. 8-4: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q142-2MW-UB-S

Übersicht:	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
<b>Versagensart:</b>	Spalten	Faserriss	Spalten	Faserriss
<b>Einbindelänge:</b>	78 mm	77 mm	76 mm	75 mm
<b>F<sub>max</sub>:</b>	15197,3 N	13956,0 N	16250,5 N	14124,0 N
<b>W<sub>max</sub>:</b>	14,2 mm	16,5 mm	12,7 mm	13,2 mm
<b>S<sub>u</sub>:</b>	6,10 mm	4,60 mm	3,60 mm	5,70 mm
<b>S<sub>o</sub>:</b>	5,30 mm	3,90 mm	3,10 mm	5,10 mm
<b>S<sub>m</sub>:</b>	5,70 mm	4,25 mm	3,35 mm	5,40 mm

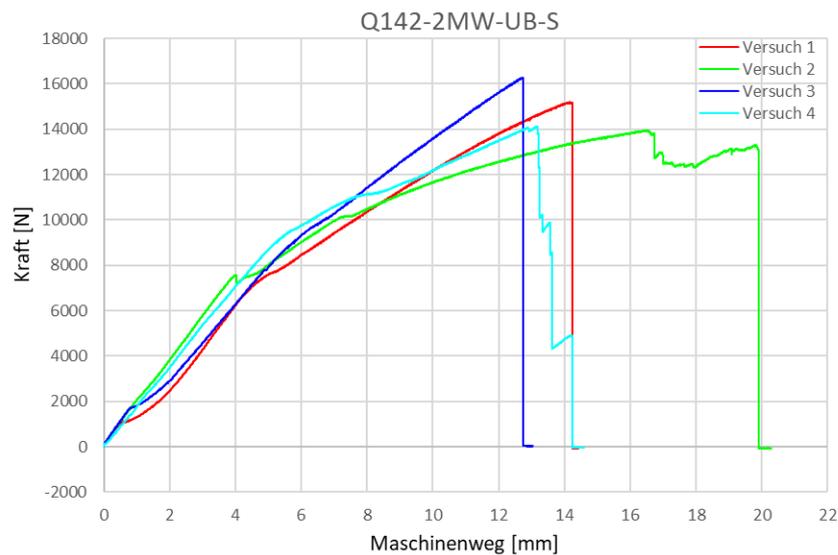


Abb. 8-23: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine

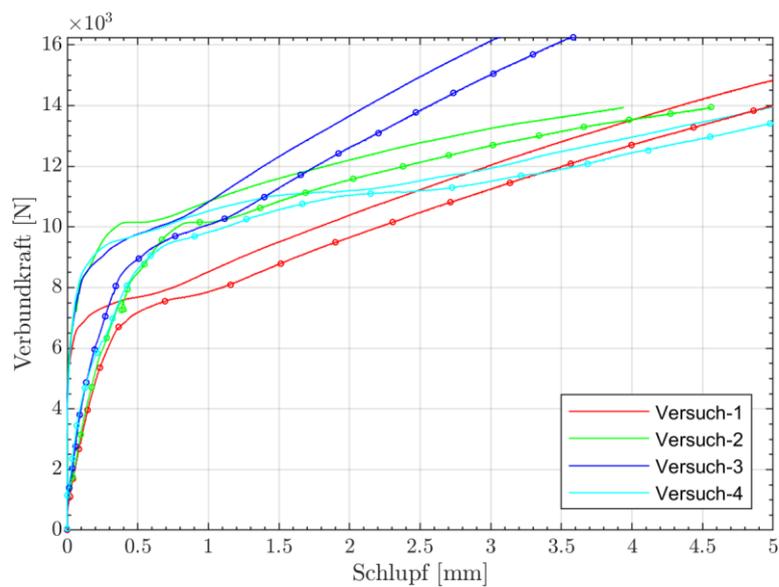


Abb. 8-24: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert)

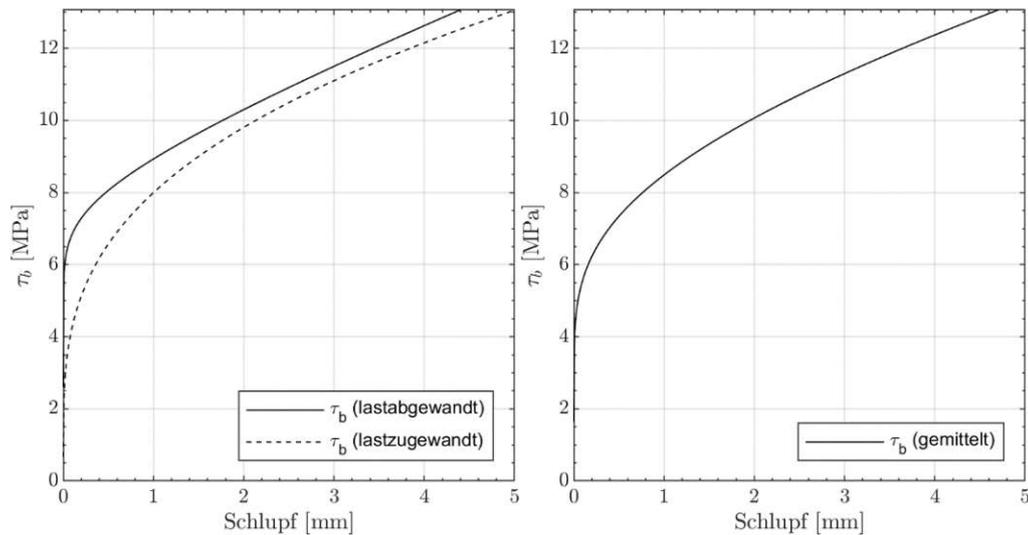


Abb. 8-25: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts)

## Auswertung der versagten Versuchskörper

### Versuch 1 Q142-2MW-UB-S-V1



Abb. 8-26: Spaltriss am Probekörper (links); abgescherter Prüfroving in Endlage (rechts)

Versagensart: Spaltrissversagen

$F_{\max}$ : 15197,3 N

Anmerkung: Der Probekörper versagte infolge Spaltrissbildung in der Bewehrungsebene. Beim Öffnen des Versuchskörpers sind beide Querrovings und der Wirkfaden vom Längsroving abgeschert. Am Längsroving sind teilweise die Harzbeschichtung und geringfügig Fasern des Längsrovings abgeschert. Am rechten Foto ist der Längsroving infolge des Spaltrisses nach unten verschoben dargestellt.

## Versuch 2 Q142-2MW-UB-S-V2



Abb. 8-27: Versagensbild des Prüfkörpers (links); gespaltener Roving (mittig); rekonstruierter Roving (rechts)

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 13956,0 N

Anmerkung: Der Roving versagte zufolge Zugbruch in der Verbundstrecke. Am versagten Prüfkörper war auffällig, dass das lastabgewandte Ende des Rovings schief geneigt war. Das lässt auf eine unsymmetrische Belastung schließen. Der Roving teilte sich in Folge des Bruchs in drei Teile. Am rechten Bild ist der zerstörte Roving rekonstruiert dargestellt. Am mittleren Bild wurde der Roving ein Stück aus dem Rohr gezogen, um die Bruchstelle analysieren zu können. Da sich der Roving von oben betrachtet nach rechts neigte, bekam die rechte Seite vermutlich mehr Last. Die rechte Seite des lastabgewandten Endes des Rovings war an der lastabgewandten Einbindestelle in den Beton gebrochen, die linke Seite des Rovings etwa an der Stelle des unteren Querrovings. Der Spalt führt von der lastzugewandten Einbindestelle in den Beton bis zum herausragenden Ende des Rovings. Die Querrovings wurden vom Längsroving abgeschert. Die Harzbeschichtung wurde auf der rechten Hälfte des Rovings teilweise abgeschert und ist auf der linken Hälfte noch vorhanden.

## Versuch 3 Q142-2MW-UB-S-V3



Abb. 8-28: Spaltriss am Probekörper (links); Abgescherter Roving (rechts)

Versagensart: Spaltrissversagen

$F_{\max}$ : 16250,5 N

Anmerkung: Der Versuchskörper versagte infolge Spaltrissbildung. Der Spaltriss verläuft etwas schräg zur Bewehrungsebene. Im geöffneten Körper waren die Querrovings abgetrennt. Man kann ein Abscheren der Harzbeschichtung im Bereich, wo sich der dickere Roving durch den kleineren Betonquerschnitt zieht, erkennen. Der Testroving schaut ansonsten unbeschädigt aus.

#### Versuch 4 Q142-2MW-UB-S-V4

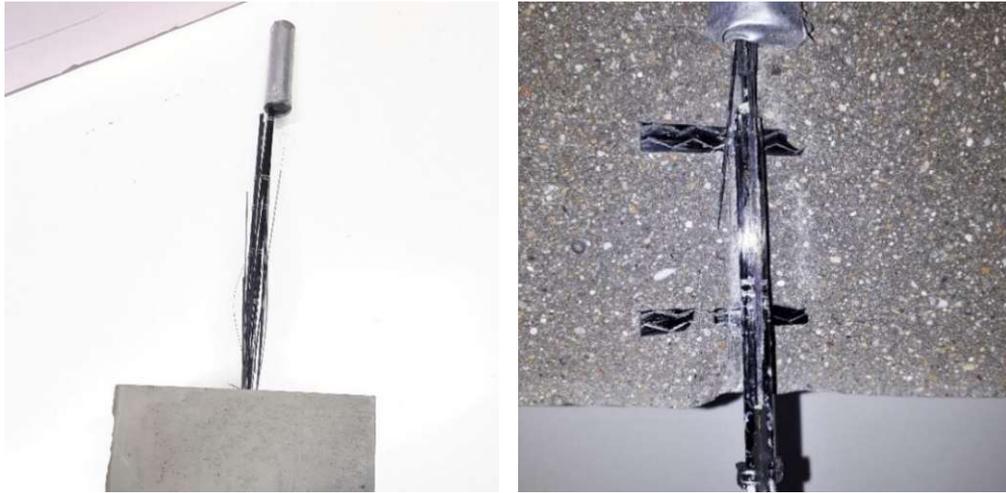


Abb. 8-29: zerstörter Faserstrang (links); Bruchstelle (rechts)

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 14124,0 N

Anmerkung: Der Roving versagte zufolge Faserriss. Der Faserstrang ist ab Beginn der Einbindung in den Betonkörper am lastzugewandten Ende bis zur Einbindung in das Rohr bei der Einspannstelle in viele Strähnen gespalten. Die Querrovings sind abgetrennt. Der Längsroving schaut im ungespaltenen Bereich unzerstört aus. Übrigens scheint es so, als wäre der Roving im Rohr in der Einspannstelle minimal geschlüpft.

## 8.2 Prüfserie Q 142–B

### Prüfserie

Typ: Q 142  
 Beschichtung: B  
 Einbindelänge: 1MW  
 Prüfrichtung: Schuss

### Textil

Faserquerschnittsfläche:  $5,42 \text{ mm}^2$   
 Beschichtung: Epoxidharz mit Sand  
 Maschenweite: 38 mm  
 Bindeart: Trikot - Nadelversatz

### Beton

Betonage: 28.06.2021  
 Prüfdatum: 12.08.2021  
 Druckfestigkeit:  $114,8 \text{ N/mm}^2$   
 Biegezugfestigkeit:  $11,3 \text{ N/mm}^2$

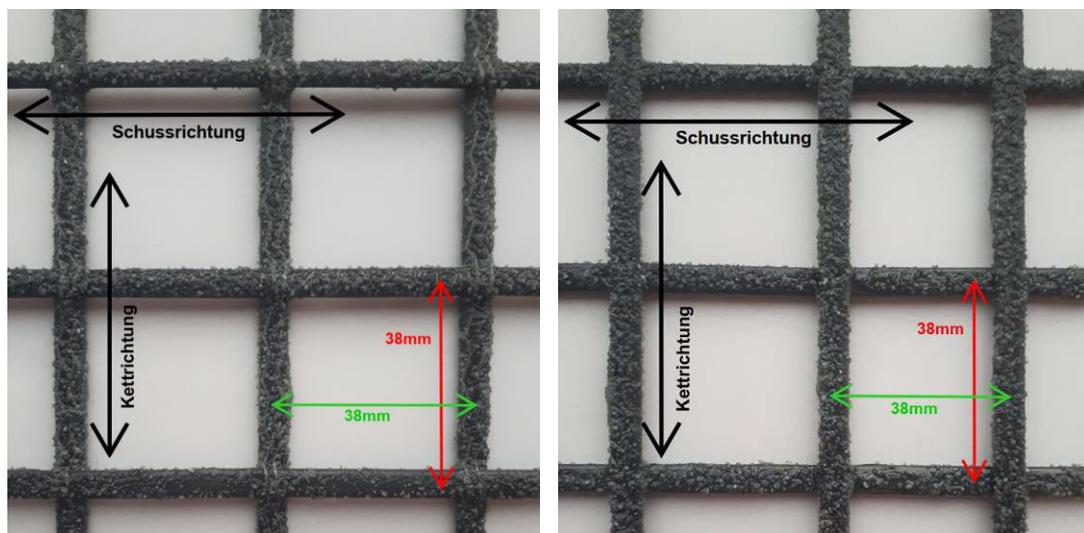


Abb. 8-30: solidian-ANTICRACK\_Q142-CCE-38-E5; Vorderseite (links) und Rückseite (rechts);

### Prüfreihe Q142–1MW–B–S

Tab. 8-5: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q142–1MW–B–S

Übersicht:	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
<b>Versagensart:</b>	Spalten	Spalten	Spalten	Spalten
<b>Einbindelänge:</b>	38 mm	37 mm	38 mm	35 mm
<b><math>F_{\max}</math>:</b>	12817,9 N	11506,3 N	10755,2 N	12266,7 N
<b><math>w_{\max}</math>:</b>	6,5 mm	7,4 mm	6,5 mm	6,8 mm
<b><math>s_{,u}</math>:</b>	0,55 mm	0,70 mm	0,55 mm	0,70 mm
<b><math>s_{,o}</math>:</b>	0,15 mm	0,10 mm	0,10 mm	0,05 mm
<b><math>s_{,m}</math>:</b>	0,35 mm	0,40 mm	0,33 mm	0,38 mm

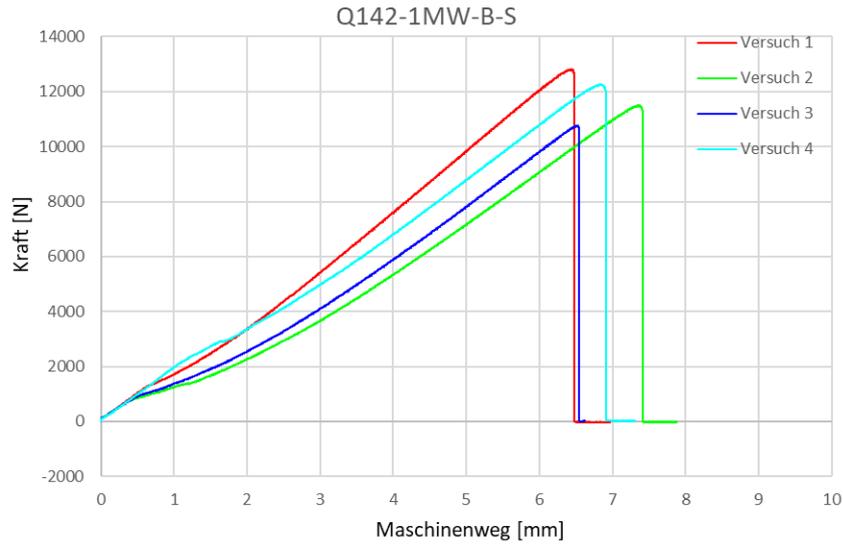


Abb. 8-31: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine

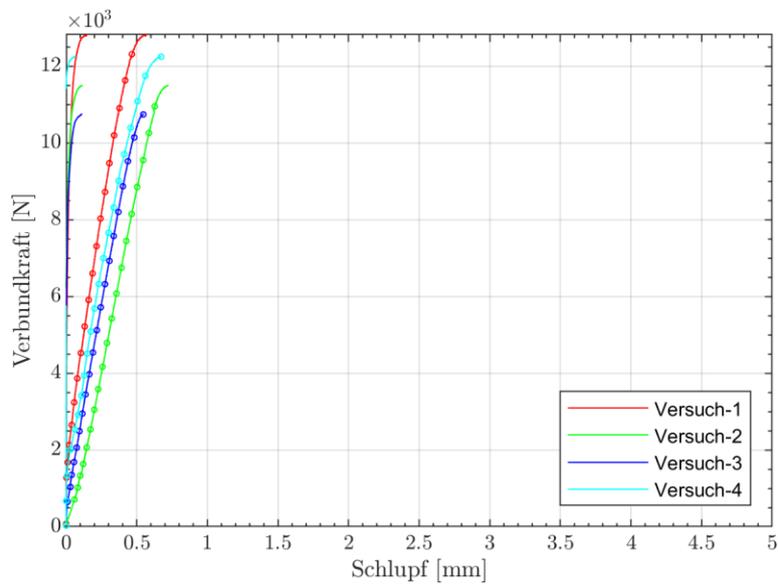


Abb. 8-32: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktirt)

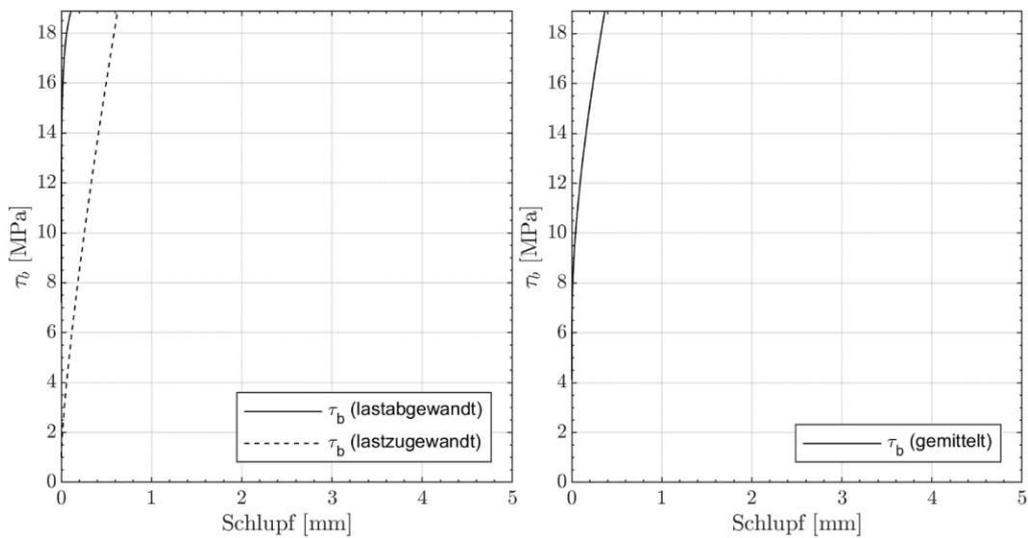


Abb. 8-33: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts)

## Auswertung der versagten Versuchskörper

### Versuch 1 Q142-1MW-B-S-V1

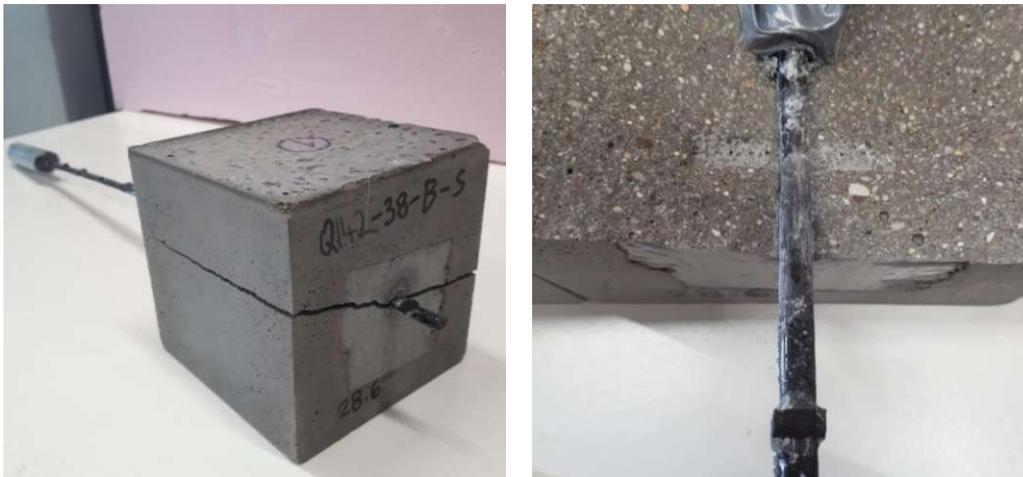


Abb. 8-34: Spaltriss am Probekörper (links); abgescherter Prüfroving (rechts)

Versagensart: Spaltrissversagen

$F_{\max}$ : 12817,9 N

Anmerkung: Der Probekörper versagte mit einer Spaltrissbildung. Der Spaltriss verläuft in der Ebene der Bewehrung und spaltet den gesamten Probekörper. Im geöffneten Versuchskörper sind der Querroving und die Sand-Harz-Beschichtung vom Längsroving abgescher. Dies geschah vermutlich im Zuge des Spaltens. Der Längsroving sieht ansonsten unbeschädigt aus.

### Versuch 2 Q142-1MW-B-S-V2



Abb. 8-35: Spaltriss am Probekörper (links); abgescherter Prüfroving (rechts)

Versagensart: Spaltrissversagen

$F_{\max}$ : 11506,3 N

Anmerkung: Der Probekörper versagte mit einer Spaltrissbildung. Der Spaltriss verläuft in der Ebene der Bewehrung und spaltet den gesamten Probekörper. Im geöffneten Versuchskörper sind der Querroving und die Sand-Harz-Beschichtung vom Längsroving abgescher. Dies geschah vermutlich im Zuge des Spaltens. Der Längsroving sieht ansonsten unbeschädigt aus.

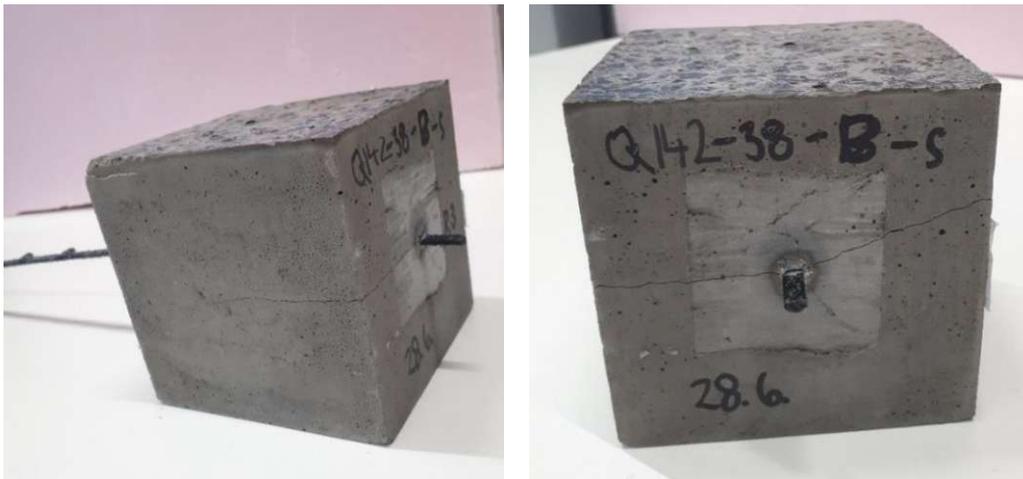
**Versuch 3 Q142-1MW-B-S-V3**

Abb. 8-36: Spaltriss am Probekörper

Versagensart: Spaltrissversagen

 $F_{\max}$ : 11506,3 N

Anmerkung: Der Probekörper versagte mit einer Spaltrissbildung. Das Erscheinungsbild des Risses ist feiner als bei den anderen Versuchen dieser Versuchsreihe. Fotos vom geöffneten Versuchskörper sind keine vorhanden. Es wurde jedoch festgehalten, dass das Versagensbild des Rovings den Versagensbildern der übrigen Rovings dieser Reihe entspricht (siehe Abb. 8-34 - 8-37).

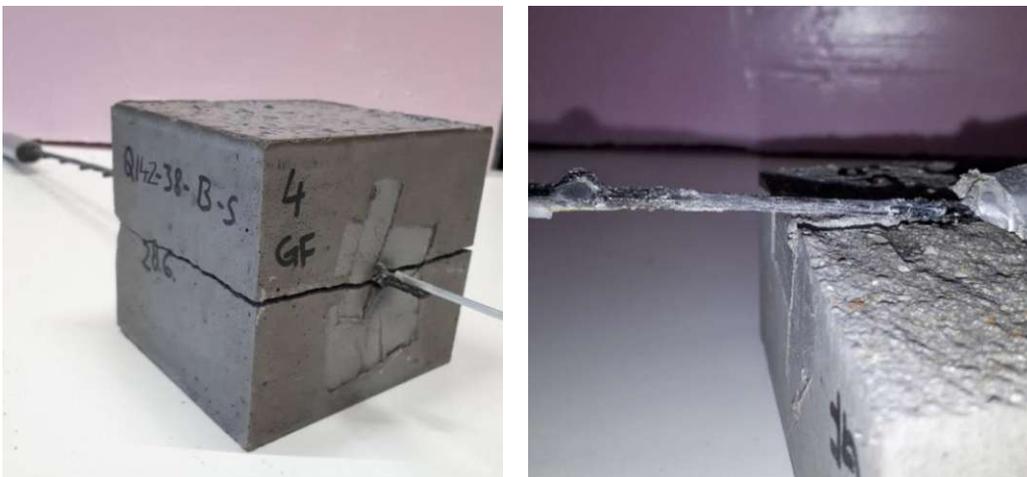
**Versuch 4 Q142-1MW-B-S-V4**

Abb. 8-37: Spaltriss am Probekörper (links); abgescherter Prüfroving (rechts)

Versagensart: Spaltrissversagen

 $F_{\max}$ : 12266,7 N

Anmerkung: Der Probekörper versagte mit einer Spaltrissbildung. Der Spaltriss verläuft in der Ebene der Bewehrung und spaltet den gesamten Probekörper. Im geöffneten Versuchskörper sind der Querroving und die Sand-Harz-Beschichtung vom Längsroving abgescher. Dies geschah vermutlich im Zuge des Spaltens. Der Längsroving sieht ansonsten unbeschädigt aus.

### 8.3 Prüfserie Q 95–UB

#### Prüfserie

Typ: Q 95  
 Beschichtung: UB  
 Einbindelänge: 1MW  
 Prüfrichtung: Kett + Schuss

#### Textil

Faserquerschnittsfläche: 3,62 mm<sup>2</sup>  
 Beschichtung: Epoxidharz  
 Maschenweite: 38 mm  
 Bindeart: Trikot - gegenlegig

#### Beton

Betonage: 02.08.2021  
 Prüfdatum: 07.09.2021  
 Druckfestigkeit: 113,2 N/mm<sup>2</sup>  
 Biegezugfestigkeit: 12,8 N/mm<sup>2</sup>

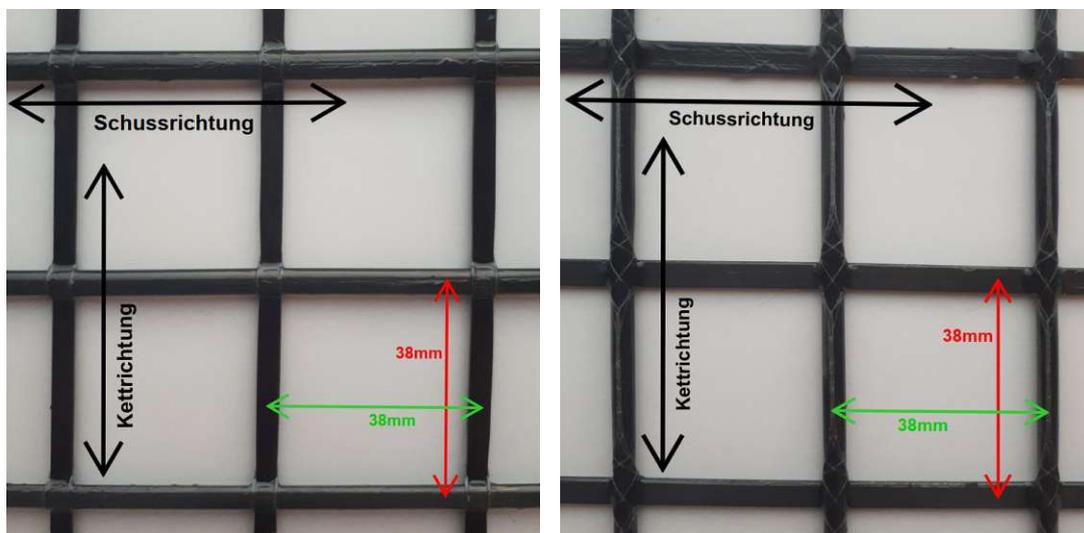


Abb. 8-38: solidian-GRID\_Q95-CCE-38-E5; Vorderseite (links) und Rückseite (rechts);

### Prüfreihe Q95–1MW–UB–K

Tab. 8-6: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q95–1MW–UB–K

Übersicht	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
<b>Versagensart:</b>	Faserriss+Spalten	Faserriss	Spalten
<b>Einbindelänge:</b>	40 mm	41,5 mm	42,5 mm
<b>F<sub>max</sub>:</b>	8533,9 N	7219,3 N	9601,2 N
<b>w<sub>max</sub>:</b>	11,7 mm	12,2 mm	9,1 mm
<b>S<sub>u</sub>:</b>	5,80 mm	7,40 mm	2,20 mm
<b>S<sub>o</sub>:</b>	5,50 mm	6,70 mm	1,70 mm
<b>S<sub>m</sub>:</b>	5,65 mm	7,05 mm	1,95 mm

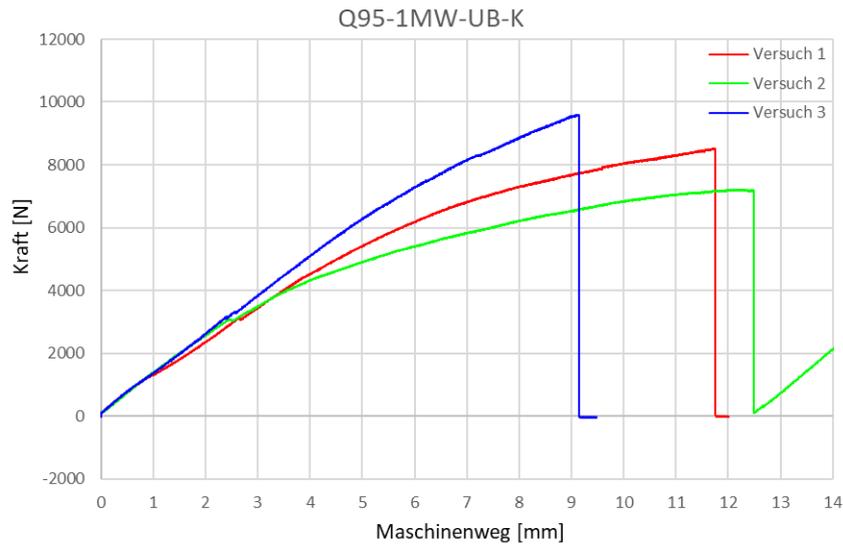


Abb. 8-39: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine

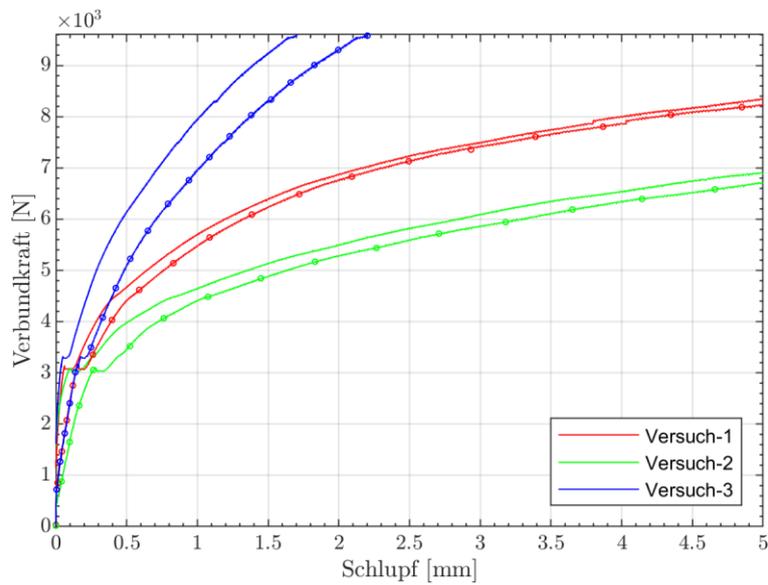


Abb. 8-40: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert)

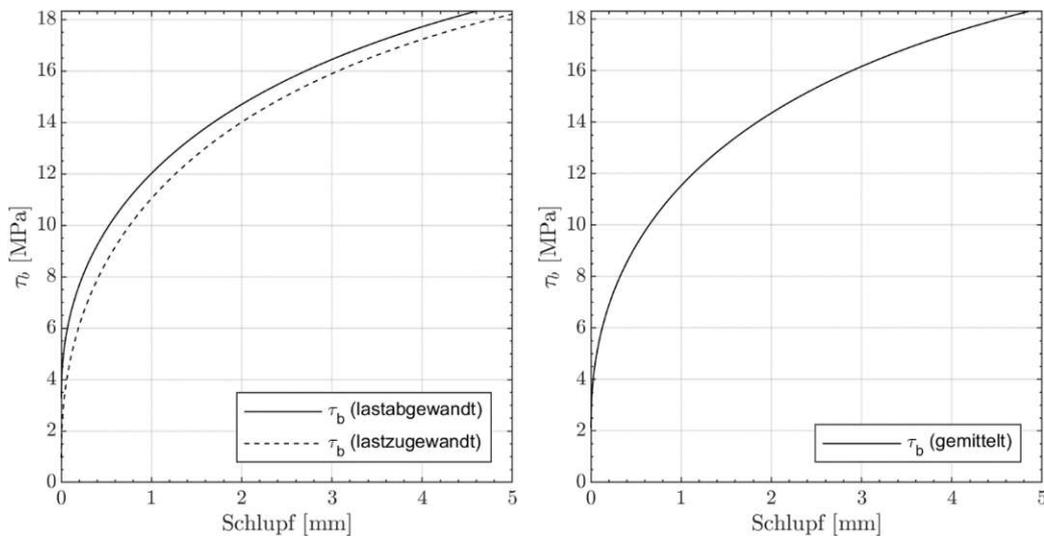


Abb. 8-41: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts)

## Auswertung der versagten Versuchskörper



Abb. 8-42: Übersicht der Versagensursachen der Versuchskörper

### Versuch 1 Q95-1MW-UB-K-V1



Abb. 8-43: Abscherung im Verbundbereich (links); Bruchstelle beim Einspannrohr (rechts)

Versagensart: Zugbruch- und Spaltrissversagen

$F_{\max}$ : 8533,9 N

Anmerkung: Der Versuchskörper versagte zufolge eines kombinierten Zugbruch- und Spaltbruchversagens. Der Faserstrang brach ca. eine Maschenweite oberhalb der Einbindung in das Einspannrohr. In der Verbundfläche im Versuchskörper sind der Querrovig und die Harzbeschichtung auf je halber Maschenweite abgeschert.

Versuch 2 Q95-1MW-UB-K-V2



Abb. 8-44: Zerstörter Roving im Verbundbereich: Vorderseite (links) und Rückseite (rechts)

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 7219,3 N

Anmerkung: Der Prüfkörper versagte zufolge eines Zugbruchversagens des Rovings. Der Roving versagte an der lastzugewandten Einbindestelle in den Betonkörper und spaltete sich auf kompletter Länge bis zur Einspannstelle. Der Querroving war von Längsroving abgetrennt. Eine Abscherung der Harzbeschichtung an der Vorderseite des Längsrovings ist nicht erkennbar. Auf der Rückseite des Längsrovings sind leichte Spuren einer Harzabscherung ersichtlich.

### Versuch 3 Q95-1MW-UB-K-V



Abb. 8-45: Spaltriss am Probekörper (links); abgescherter Roving (rechts)

Versagensart: Spaltrissversagen

$F_{\max}$ : 9601,2 N

Anmerkung: Der Versuchskörper versagte zufolge Spaltrissbildung. Der Riss verläuft in der Ebene des Rovings und spaltet den kompletten Körper. Der Querroving und die Harzbeschichtung sind vom Längsroving abgesichert. Der Testroving schaut ansonsten unzerstört aus.

## Prüfreihe Q95-1MW-UB-S

Tab. 8-7: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q95-1MW-UB-S

Übersicht	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
<b>Versagensart:</b>	Faserriss	Faserriss	Faserriss+Spalten
<b>Einbindelänge:</b>	41 mm	41 mm	39 mm
<b><math>F_{\max}</math>:</b>	6310,7 N	8333,5 N	9118,6 N
<b><math>w_{\max}</math>:</b>	9,9 mm	12,3 mm	11,9 mm
<b><math>s_{,u}</math>:</b>	3,40 mm	6,40 mm	4,50 mm
<b><math>s_{,o}</math>:</b>	3,40 mm	5,90 mm	4,40 mm
<b><math>s_{,m}</math>:</b>	3,40 mm	6,15 mm	4,45 mm



Abb. 8-46: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine

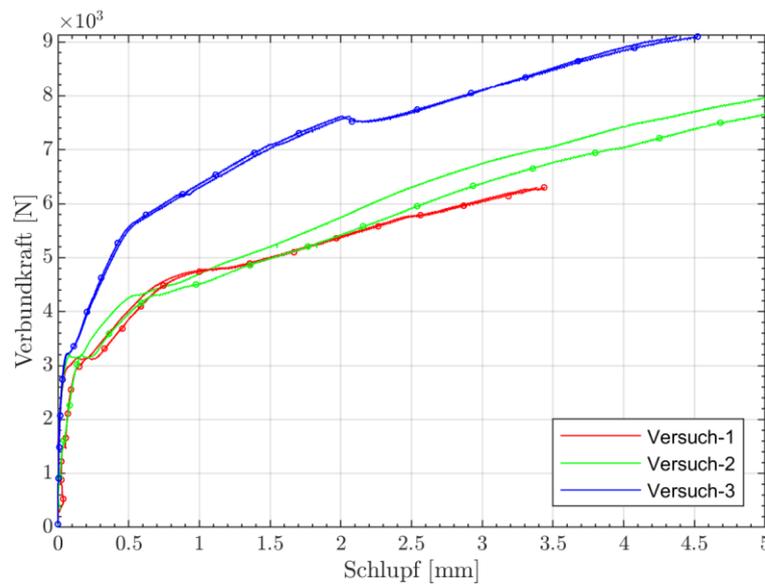


Abb. 8-47: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert)

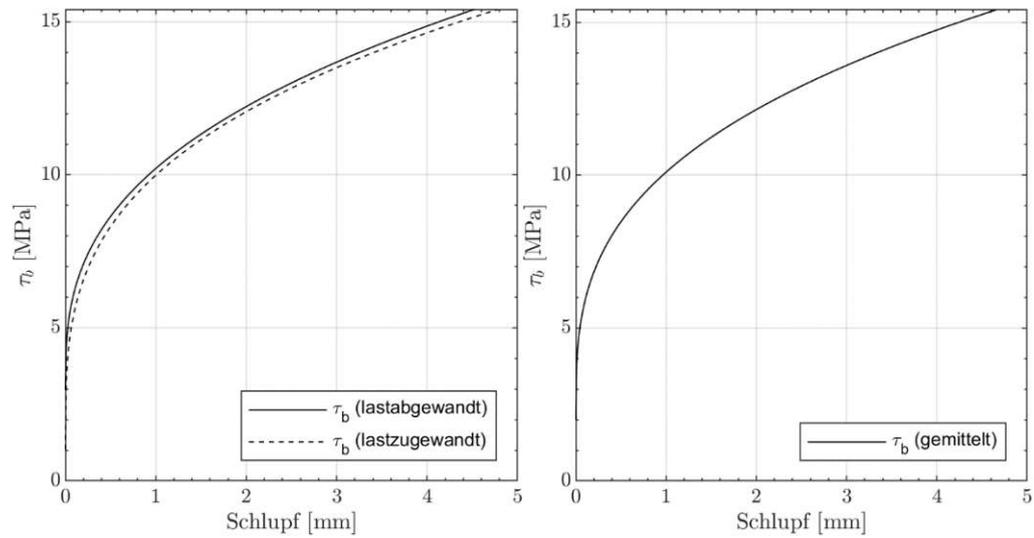


Abb. 8-48: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts)

### Auswertung der versagten Versuchskörper



Abb. 8-49: Übersicht der Versagensursachen der Versuchskörper

**Versuch 1 Q95-1MW-UB-S-V1**

Abb. 8-50: Bruchstelle an der Einspannstelle (links); abgescherte Rückseite (mittig) und Vorderseite (rechts) des Prüfrovings

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 6310,7 N

Anmerkung: Der Faserstrang versagte in Form eines Faserstrangbruchs direkt an der Einbindestelle in das Rohr für die Einspannung. Das Versagen entspricht demzufolge keinem eindeutigen Versuchsergebnis, da das Ergebnis nichts Eindeutiges über das Verbundverhalten im Versuchskörper preisgibt. Die Versagensursache resultiert aufgrund den auftretenden Querdruckspannungen auf den Faserstrang in der Einspannstelle. Hätte der Faserstrang an dieser Stelle nicht versagt, hätte die Belastung vermeintlich noch weiter gesteigert werden können.

Beim Öffnen des Betonkörpers ist der Querrovings vom Längsrovings abgeschert. Die Harzschichtung ist oberhalb des Querrovings vom Längsrovings abgeschert.

**Versuch 2 Q95-1MW-UB-S-V2**

Abb. 8-51: Gespaltener Faserstrang (links); Faserstrangbruchstücke aus dem Verbundbereich (mittig und rechts)

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 8333,5 N

Anmerkung: Der Roving versagte infolge eines Faserstrangrisses längs des Faserstrangs. Der Faserstrang wurde auf ganzer Länge in mehrere Strähnen gespalten. Der Strang wurde vermutlich auf einer Seite mehr belastet als auf der anderen und teilte sich in der Verbundstrecke längs. Beim Öffnen des Betonkörpers konnte die Bruchstelle festgestellt werden. Die Harzbeschichtung des Längsrovings ist in der Verbundstrecke abgeschert.

### Versuch 3 Q95-1MW-UB-S-V3



Abb. 8-52: Spaltriss am Probekörper (links); Bruchstelle an der Einspannstelle (mittig); abgescherteter Roving im Verbundbereich (rechts)

Versagensart: Zugbruch- und Spaltrissversagen

$F_{\max}$ : 9118,6 N

Anmerkung: Der Probekörper versagte zufolge einer Spaltrissbildung durch den kompletten Betonkörper und einem Faserstrangbruch an der Einbindestelle in das Rohr bei der Einspannstelle. Aufgrund des Versuchsverlaufs und der erreichten Maximalkraft kann angenommen werden, dass die Versagensursache die Spaltrissbildung ausmachte und im Zuge dessen der Strang an der Einspannstelle brach. Der Querroving und das Harz des Längsrovings sind im Verbundbereich abgeschert.

## 8.4 Prüfserie Q 95–B

### Prüfserie

Typ: Q 95  
 Beschichtung: B  
 Einbindelänge: 1MW  
 Prüfrichtung: Kett

### Textil

Faserquerschnittsfläche:  $3,62 \text{ mm}^2$   
 Beschichtung: Epoxidharz  
 Maschenweite: 38 mm  
 Bindeart: Trikot - gegenlegig

### Beton

Betonage: 02.08.2021  
 Prüfdatum: 07.09.2021  
 Druckfestigkeit:  $113,2 \text{ N/mm}^2$   
 Biegezugfestigkeit:  $12,8 \text{ N/mm}^2$

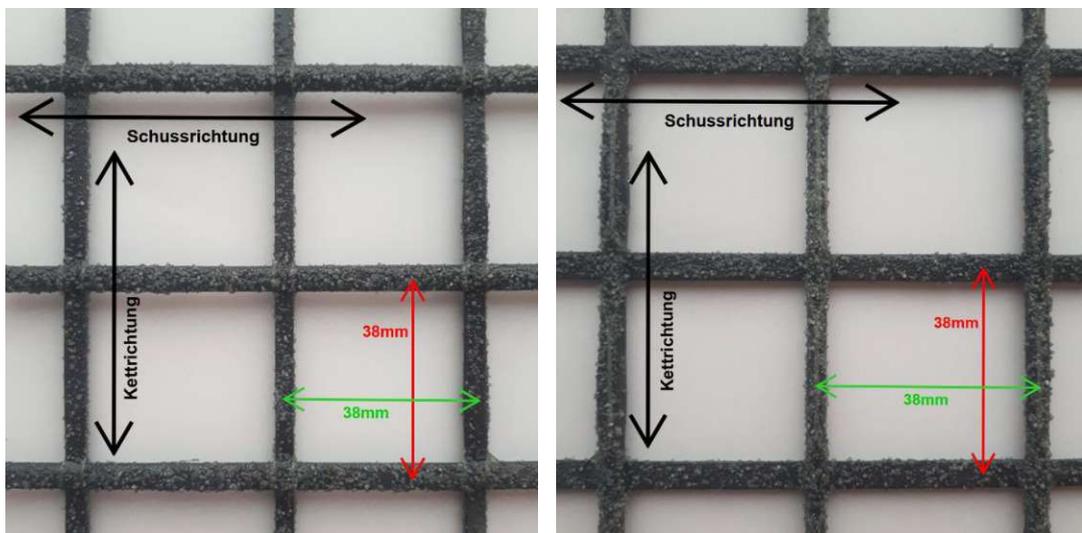


Abb. 8-53: solidian-GRID\_Q95-CCE-38-E5; Vorderseite (links) und Rückseite (rechts);

## Prüfreihe Q95–1MW–B–K

Tab. 8-8: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q95–1MW–B–K

Übersicht	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
<b>Versagensart:</b>	Spalten	Spalten	Spalten
<b>Einbindelänge:</b>	41 mm	42 mm	40 mm
<b><math>F_{\max}</math>:</b>	11348,0 N	12193,2 N	11383,9 N
<b><math>w_{\max}</math>:</b>	7,3 mm	7,9 mm	8,5 mm
<b><math>s_{,u}</math>:</b>	0,73 mm	0,93 mm	0,86 mm
<b><math>s_{,o}</math>:</b>	0,00 mm	0,00 mm	0,10 mm
<b><math>s_{,m}</math>:</b>	0,37 mm	0,47 mm	0,48 mm

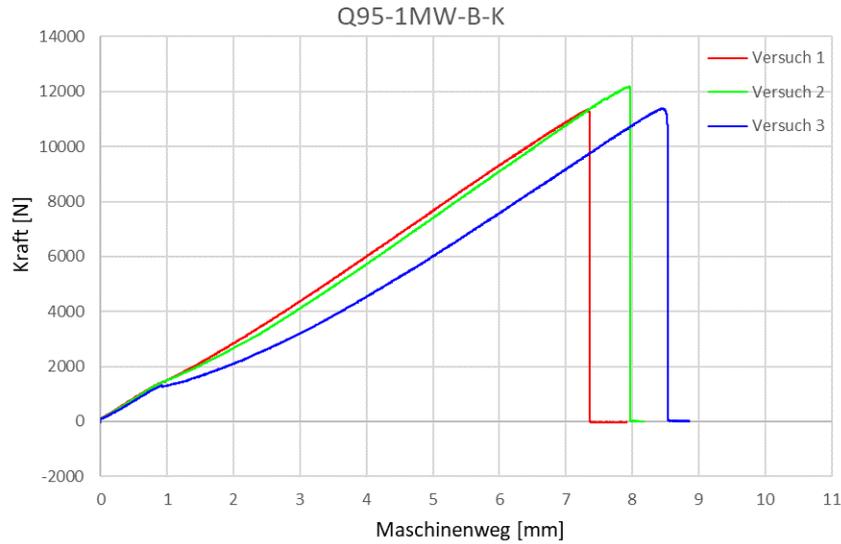


Abb. 8-54: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine

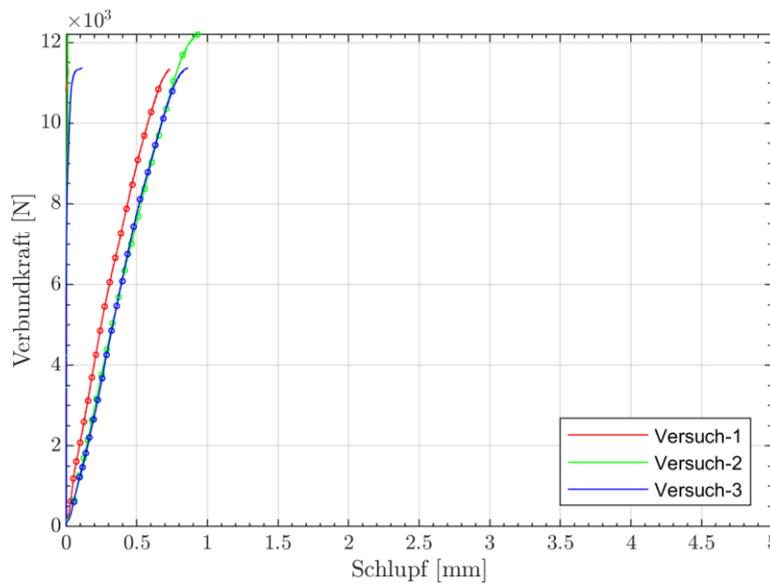


Abb. 8-55: VKSb je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert)

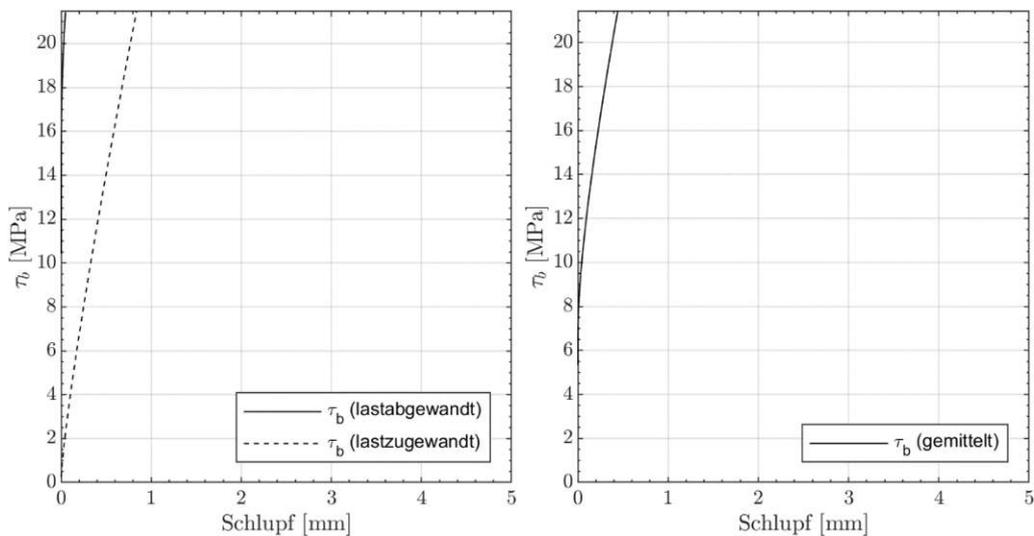


Abb. 8-56: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts)

## Auswertung der versagten Versuchskörper

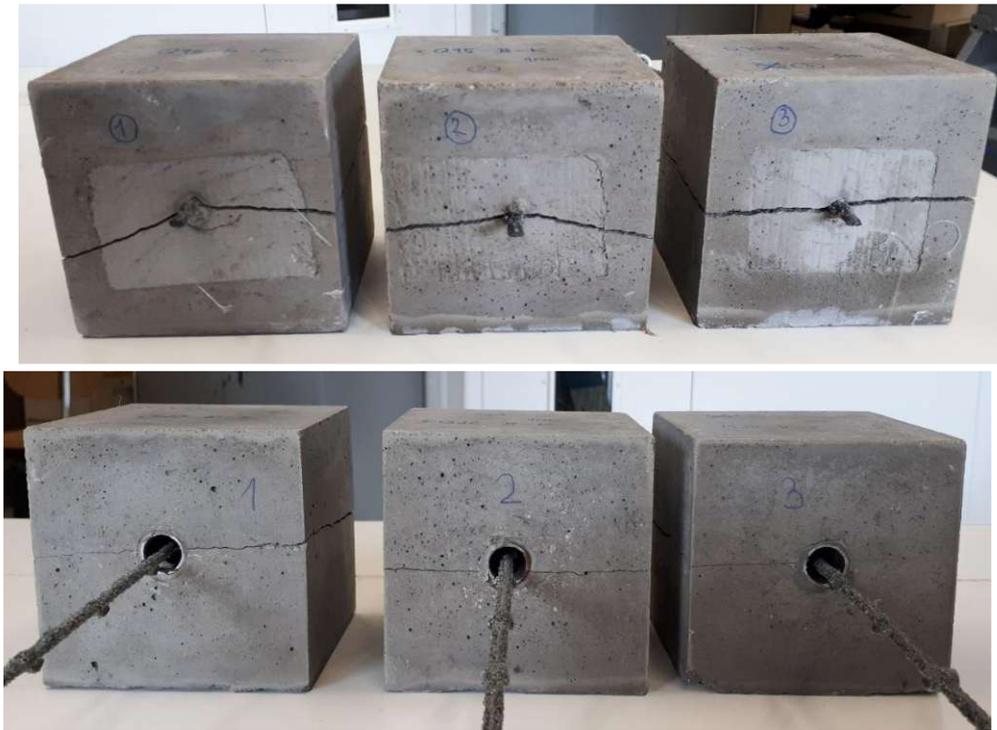


Abb. 8-57: Übersicht der Versagensursachen der Versuchskörper

### Versuch 1 Q95-1MW-B-K-V1



Abb. 8-58: Abgescherter Längs- und Querroving im geöffneten Versuchskörper

Versagensart: Spaltrissversagen

$F_{\max}$ : 11348,0 N

Anmerkung: Der Probekörper versagte mit einem Spaltrissversagen in der Ebene der Bewehrung. Der Querroving und die Sand-Harz-Beschichtung sind abgescher. Die geschah vermutlich im Zuge des Spaltens.

**Versuch 2 Q95-1MW-B-K-V2**

Abb. 8-59: Abgescherter Längs-und Querroving im geöffneten Versuchskörper

Versagensart: Spaltrissversagen

 $F_{\max}$ : 12193,2 N

Anmerkung: Der Probekörper versagte mit einem Spaltrissversagen in der Ebene der Bewehrung. Der Querroving und die Sand-Harz-Beschichtung sind abgeschert. Die geschah vermutlich im Zuge des Spaltens.

**Versuch 3 Q95-1MW-B-K-V3**

Abb. 8-60: Abgescherter Prüfroving (links); abgescherte Sand-Harz-Beschichtung (rechts)

Versagensart: Spaltrissversagen

 $F_{\max}$ : 11383,9 N

Anmerkung: Der Probekörper versagte mit einem Spaltrissversagen in der Ebene der Bewehrung. Der Querroving und die Sand-Harz-Beschichtung wurden vermutlich im Zuge des Spaltens vom Längsroving abgeschert. Die Sand-Harz-Beschichtung ist im gesamten Verbundbereich vollkommen abgeschert und haftet im Beton (Abb. 8-60-rechts).

## 8.5 Prüfserie Q 85–UB

### Prüfserie

Typ: Q 85  
 Beschichtung: UB  
 Einbindelänge: 2MW  
 Prüfrichtung: Kett + Schuss

### Textil

Faserquerschnittsfläche:  $1,81 \text{ mm}^2$   
 Beschichtung: Epoxidharz  
 Maschenweite: 21 mm  
 Bindeart: Trikot - gegenlegig

### Beton

Betonage: 02.08.2021  
 Prüfdatum: 07.09.2021  
 Druckfestigkeit:  $113,2 \text{ N/mm}^2$   
 Biegezugfestigkeit:  $12,8 \text{ N/mm}^2$

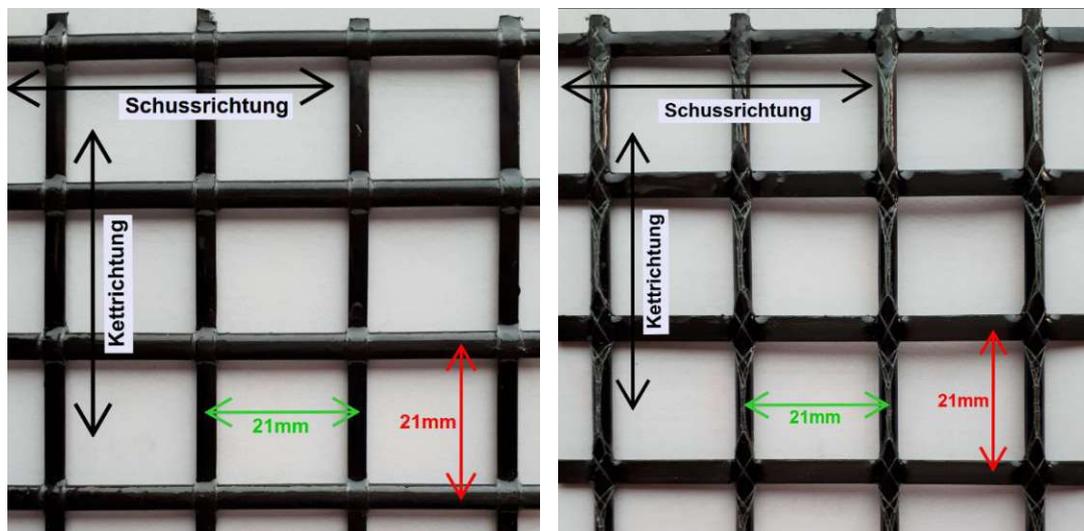


Abb. 8-61: solidian-GRID\_Q95-CCE-38-E5; Vorderseite (links) und Rückseite (rechts);

## Prüfreihe Q85–2MW–UB–K

Tab. 8-9: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q85–2MW–UB–K

Übersicht	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
<b>Versagensart:</b>	Faserriss	Faserriss	Faserriss+Spalten
<b>Einbindelänge:</b>	37 mm	42 mm	42 mm
<b><math>F_{\max}</math>:</b>	5978,7 N	6717,3 N	6275,3 N
<b><math>w_{\max}</math>:</b>	10,4 mm	10,3 mm	9,4 mm
<b><math>s_{u\cdot}</math>:</b>	3,50 mm	2,50 mm	2,20 mm
<b><math>s_{o\cdot}</math>:</b>	3,00 mm	2,20 mm	1,80 mm
<b><math>s_{m\cdot}</math>:</b>	3,25 mm	2,35 mm	2,00 mm

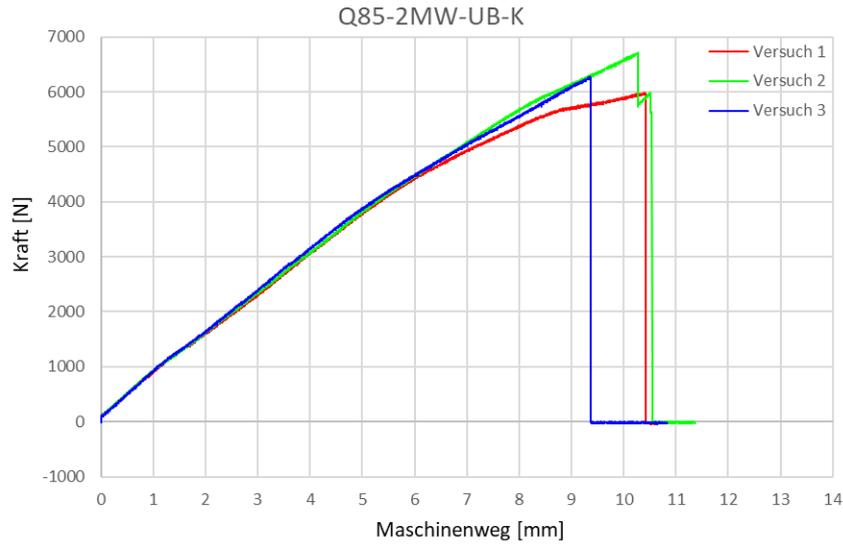


Abb. 8-62: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine

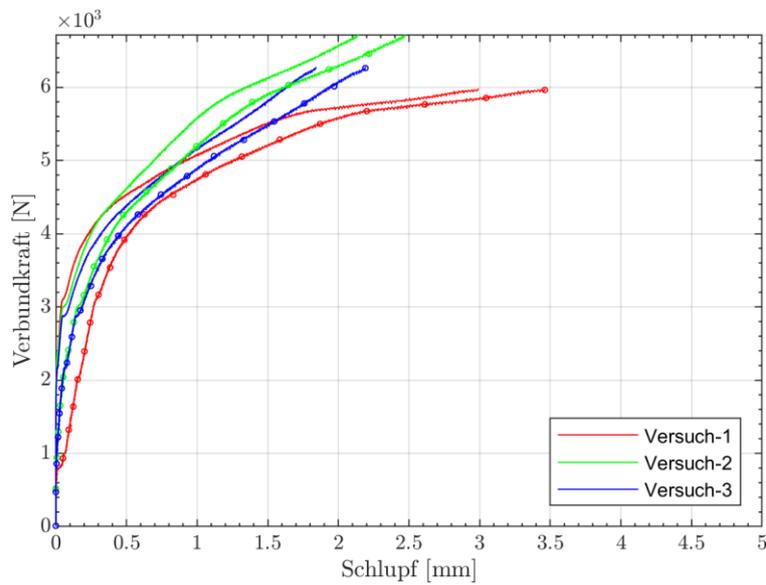


Abb. 8-63: VKSb je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert)

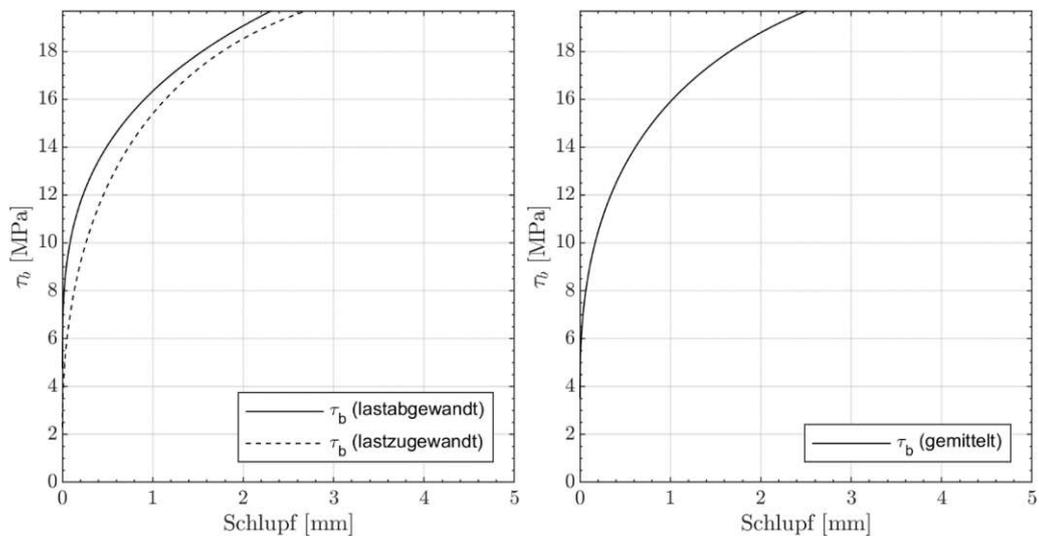


Abb. 8-64: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts)

## Auswertung der versagten Versuchskörper



Abb. 8-65: Übersicht der Versagensursachen der Versuchskörper

### Versuch 1 Q85-2MW-UB-K-V1

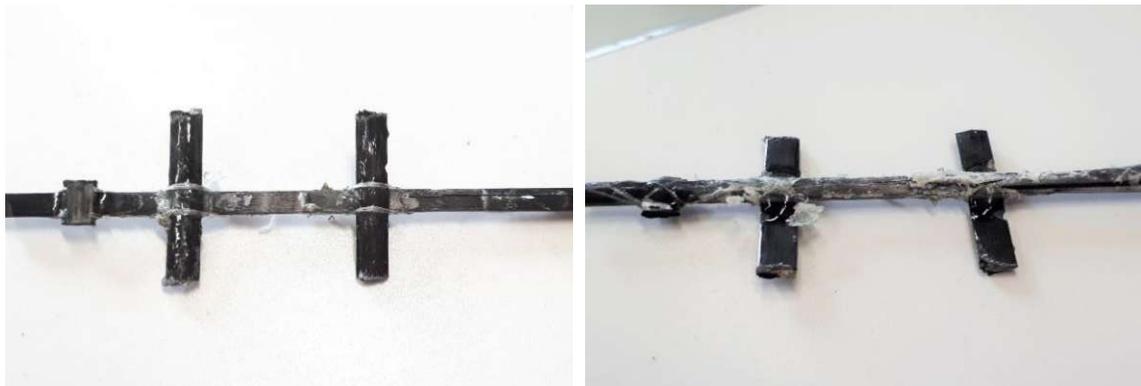


Abb. 8-66: Zerstörter Testroving: Oberseite (links) und Unterseite (rechts)

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 5978,7 N

Anmerkung: Dieser Versuch wurde zweimal belastet. Nach Erreichen der Maximallast bei 5978,7N krachte der Probekörper und die Lastkurve fiel auf null herab. Nach außenhin wies der Probekörper weder ein Spaltrissversagen noch ein Faserrissversagen auf, noch wurde der Roving herausgezogen. Deshalb wurde der Probekörper erneut eingespannt und erneut belastet. Nach einer Belastung von ca. 3000N versagte der Probekörper mittels Zugbruchversagen. Der

Faserstrang wurde in viele Strähnen gespalten (Abb. 5.84). Die Spaltung reicht von der Einbindestelle in den Beton bis zum Einspannrohr. Einige Risse im imprägnierten Faserstrang reichen bis zum zweiten Querrovings hinauf. Bei der Öffnung des Betonkörpers haften die Querrovings noch am Längsroving. Dies ist nur durch die robusten Wirkfäden möglich. Auf den Fotos erkennt man, dass die Querrovings am Längsroving verschoben sind und eigentlich vom Längsroving gelöst sind. Der Testroving schaut ziemlich zerstört aus. Das Harz und der Wirkfaden sind auf der Unterseite abgeschert. Der Roving selbst sieht bei näherer Betrachtung noch ganz in Ordnung aus.

## Versuch 2 Q85-2MW-UB-K-V2



Abb. 8-67: erster Bruch des Prüfrovings (links); zweiter Bruch des Prüfrovings (mittig); Vorder- und Rückseite des Prüfrovings (rechts)

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 6717,3 N

Anmerkung: Der Probekörper versagte anhand eines Zugbruchversagen des Roving. Der Roving brach einmal im Verbundbereich an der Stelle des unteren Querrovings (linkes Bild) und einmal im Isolationsrohr (mittiges Bild). Der restliche Faserstrang riss in viele Teile (Abb. 5-84). Die Querrovings haften nach Versagen dank des Wirkfadens noch am Längsroving, sind aber abgeschert. Die Harz imprägnierung ist an der Vorderseite des Prüfrovings teilweise abgeschert. Auf der Rückseite sind das Harz und der Wirkfaden hauptsächlich in den Knotenbereichen abgeschert. Der Roving selbst schaut ansonsten unbeschädigt aus.

### Versuch 3 Q85-2MW-UB-K-V3



Abb. 8-68: Verbundbereich im geöffneten Versuchskörper (links)

Versagensart: Zugbruch- und Spaltrissversagen

$F_{\max}$ : 6275,3 N

Anmerkung: Der Probekörper versagte mit einer Spaltrissbildung in der Ebene der Bewehrung und mit einem Zugbruch des Faserstrangs knapp oberhalb der Einspannstelle (Abb. 5-84). Die Querrovings sind nach Versagen dank des Wirkfadens noch mit dem Längsroving verbunden und nur in ihrer Position verrutscht. Auf der Vorderseite ist das Harz in den Knotenpunkten im Zuge des Durchziehens des Längsrovings unter den Querrovings abgespalten worden. Auf der Rückseite ist das Harz hauptsächlich in den Knotenbereichen abgeschert. Der Roving selbst schaut ansonsten unbeschädigt aus.

## Prüfreihe Q85-2MW-UB-S

Tab. 8-10: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q85-2MW-UB-S

Übersicht	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
<b>Versagensart:</b>	Faserriss	Faserriss	Faserriss
<b>Einbindelänge:</b>	40 mm	40 mm	41 mm
<b><math>F_{\max}</math>:</b>	6360,0 N	5787,8 N	6688,1 N
<b><math>w_{\max}</math>:</b>	11,3 mm	10,5 mm	10,6 mm
<b><math>s_{,u}</math>:</b>	4,15 mm	4,45 mm	3,15 mm
<b><math>s_{,o}</math>:</b>	3,60 mm	4,00 mm	2,40 mm
<b><math>s_{,m}</math>:</b>	3,88 mm	4,23 mm	2,78 mm

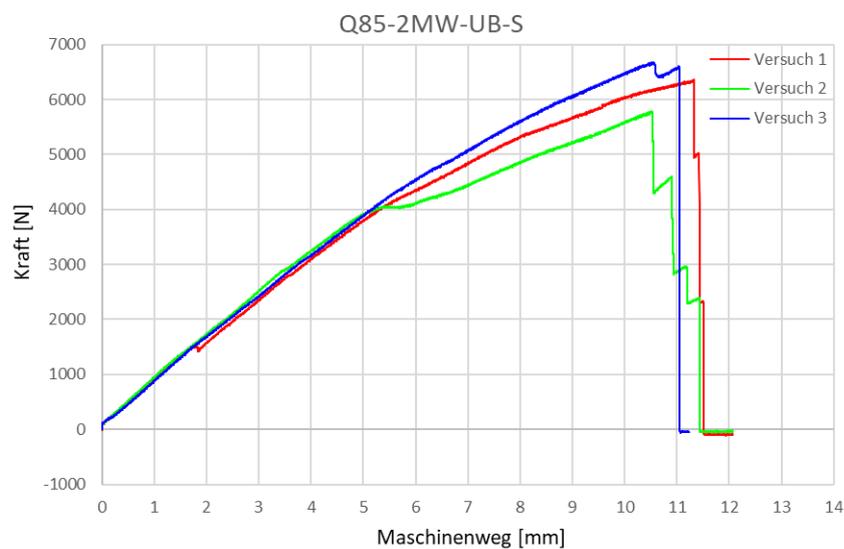


Abb. 8-69: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmachine

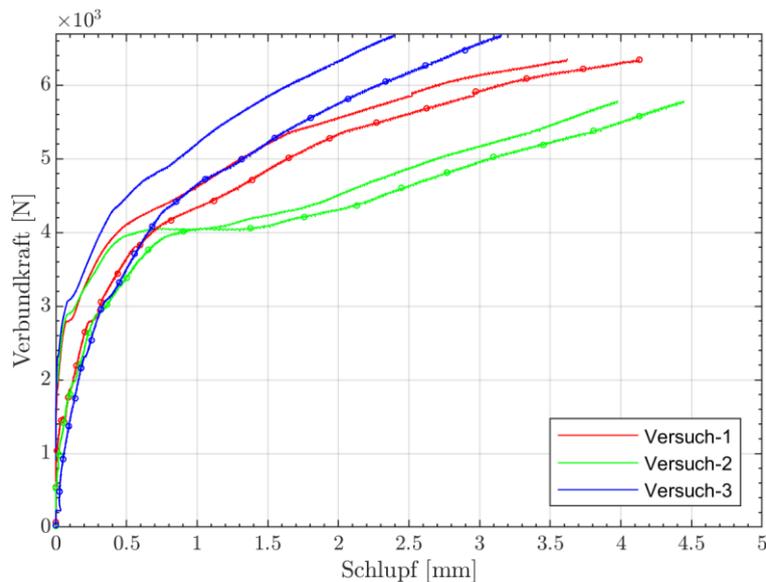


Abb. 8-70: VKSB je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert)

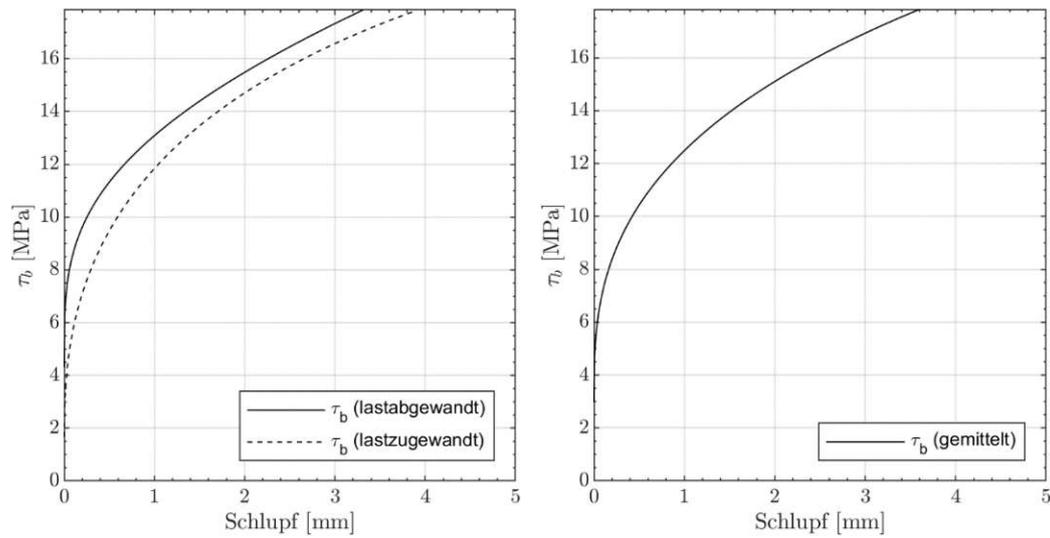


Abb. 8-71: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts)

### Auswertung der versagten Versuchskörper

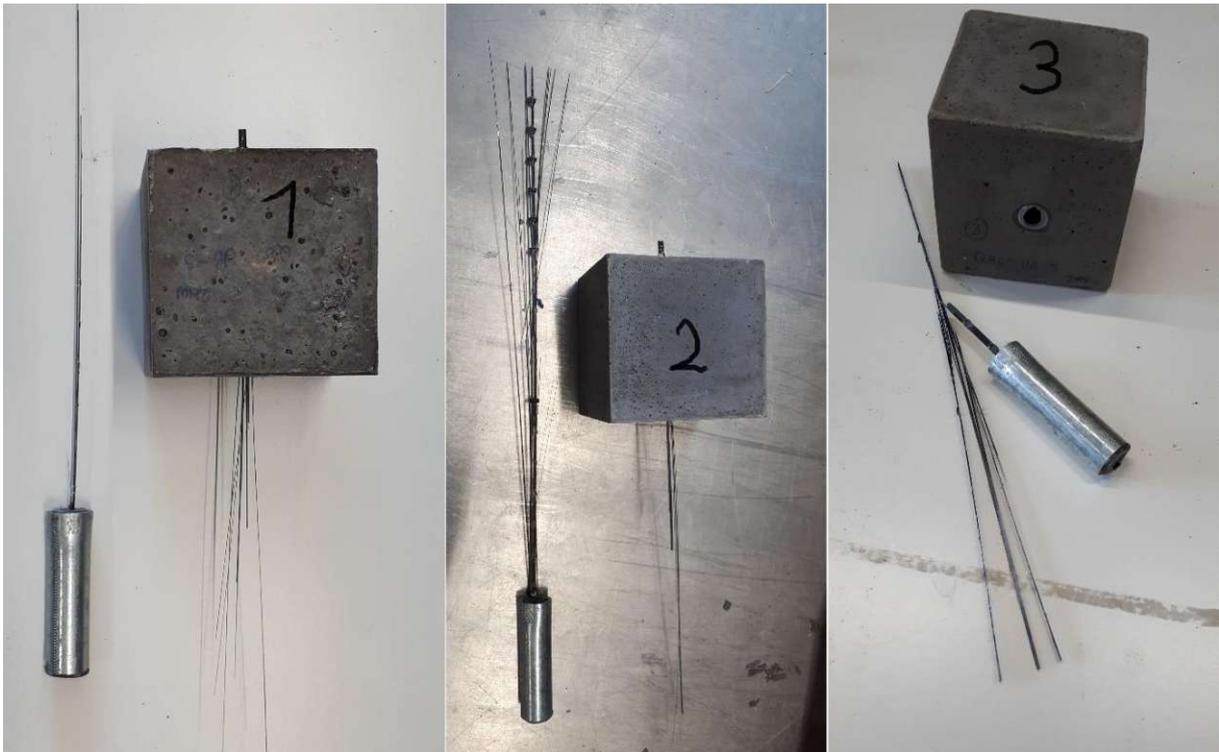


Abb. 8-72: Übersicht der Versagensursachen der Versuchskörper

**Versuch 1 Q85-2MW-UB-S-V1**

Abb. 8-73: Bruchstelle des Faserstrangs (links); Vorderseite (mittig) und Rückseite (rechts) des Textils im Verbundbereich

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 6360,0 N

Anmerkung: Der Probekörper versagte zufolge Faserrissbildung im Faserstrang. Die Risse reichen von der Einbindestelle in das Betonrohr bei der Einspannstelle bis zum unteren Querroving in der Verbundfläche im Prüfkörper. Der Faserstrang brach an der Einbindestelle in den Prüfkörper (linkes Foto). Die Querrovings haften nach Versagen dank des Wirkfadens noch am Längsroving. Auf der Vorderseite des Rovings ist kaum eine Abscherung des Harzes zu sehen. Anhand der Wirkfäden ist eine Verschiebung der Lage der Querrovings ersichtlich (mittleres Foto). Auf der Rückseite sind in den Verschiebungsbereichen Harzabscherungen zu sehen (rechtes Foto). Der Testroving befindet sich sonst in einem guten Zustand.

**Versuch 2 Q85-2MW-UB-S-V2**

Abb. 8-74: Bruchstelle des Faserstrangs (links); Vorderseite (mittig) und Rückseite (rechts) des Textils im Verbundbereich

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 5787,8 N

Anmerkung: Der Probekörper versagte zufolge Rissbildung im Faserstrang. Der Faserstrang spaltete sich ab der Einbindestelle in das Betonrohr bei der Einspannstelle bis zum unteren Querroving in der Verbundfläche im Prüfkörper. Der Faserstrang brach unter dem zweitem Querroving in der Verbundfläche (linkes Foto). Die Querrovings sind nach Versagen durch die Wirkfäden noch am Längsroving gebunden. Auf Vorder- und Rückseite sind Lageverschiebungen der Querrovings zu sehen. Das Harz wurde im Zuge dessen in den Knotenbereichen abgeschert. Weitere Schädigungen am Testroving sind nicht ersichtlich.

### Versuch 3 Q85-2MW-UB-S-V3



Abb. 8-75: Bruchstelle des Faserstrangs (links); Vorderseite (mittig) und Rückseite (rechts) des Textils im Verbundbereich

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 6688,1 N

Anmerkung: Der Probekörper versagte zufolge Faserstrangbruch. Der Faserstrang brach einmal oberhalb der Einspannstelle im freiliegenden Strang und ein weiteres Mal direkt unter dem zweitem Querroving. Der freiliegende Strang wurde in mehrere Strähnen gespalten. Nach Öffnen des Probekörpers wird festgestellt, dass der Längsroving nur wenig beschädigt ist. Der untere Querroving ist vom Prüfroving abgetrennt, der obere Querroving haftet dank des Wirkfadens noch am Prüfroving. Auf Vor- und Rückseite des Faserstrangs sind Verschiebungen der Querrovings längs des Prüfrovings erkennbar. Auf der Rückseite war infolgedessen in den Knotenbereichen das Harz am Längsroving abgespalten.

## 8.6 Prüfserie Q 85–B

### Prüfserie

Typ: Q 85  
 Beschichtung: B  
 Einbindelänge: 2MW  
 Prüfrichtung: Kett

### Textil

Faserquerschnittsfläche:  $1,81 \text{ mm}^2$   
 Beschichtung: Epoxidharz mit Sand  
 Maschenweite: 21 mm  
 Bindeart: Trikot - gegenlegig

### Beton

Betonage: 02.08.2021  
 Prüfdatum: 07.09.2021  
 Druckfestigkeit:  $113,2 \text{ N/mm}^2$   
 Biegezugfestigkeit:  $12,8 \text{ N/mm}^2$

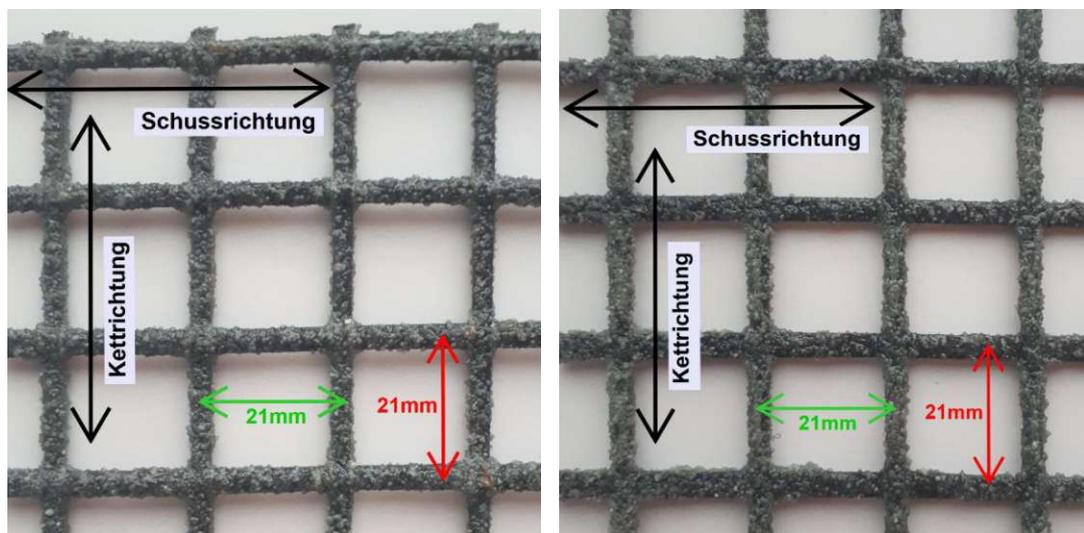
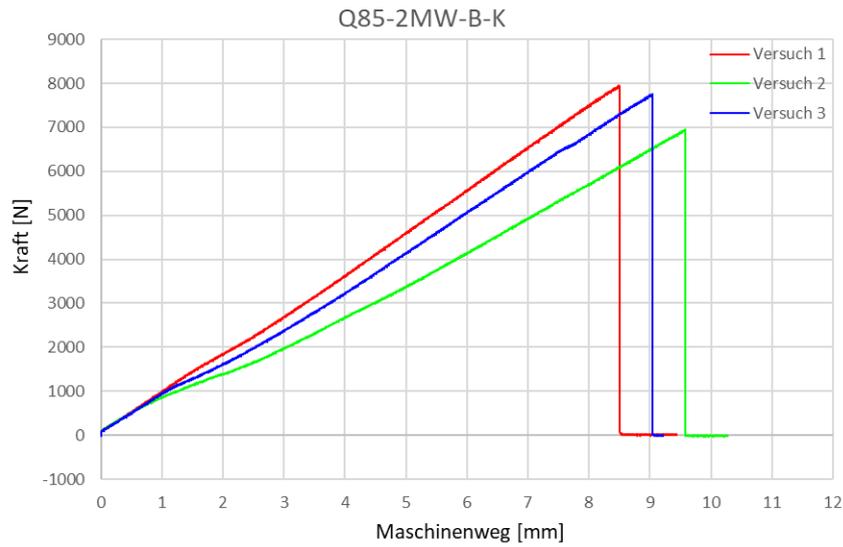


Abb. 8-76: solidian-GRID\_Q95-CCE-38-E5; Vorderseite (links) und Rückseite (rechts);

## Prüfreihe Q85–2MW–B–K

Tab. 8-11: Übersicht der Versuchsergebnisse der Prüfreihe Q85–2MW–B–K

Übersicht	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
<b>Versagensart:</b>	Faserriss	Faserriss	Faserriss
<b>Einbindelänge:</b>	38 mm	36 mm	37 mm
<b><math>F_{\max}</math>:</b>	7947,9 N	6947,2 N	7757,5 N
<b><math>w_{\max}</math>:</b>	8,5 mm	9,6 mm	9,0 mm
<b><math>s_{,u}</math>:</b>	0,95 mm	0,45 mm	1,05 mm
<b><math>s_{,o}</math>:</b>	0,05 mm	0,00 mm	0,05 mm
<b><math>s_{,m}</math>:</b>	0,50 mm	0,23 mm	0,55 mm



Abb;b. 8-77: Kraft-Weg-Diagramm aus der Prüfmaschine

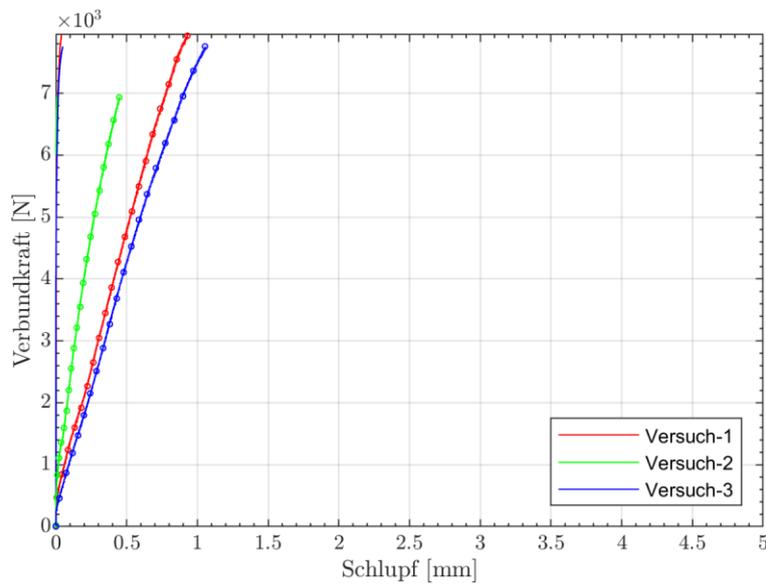


Abb. 8-78: VKSb je Versuch; lastzugewandtes Ende (durchgezogen); lastabgewandtes Ende (punktiert)

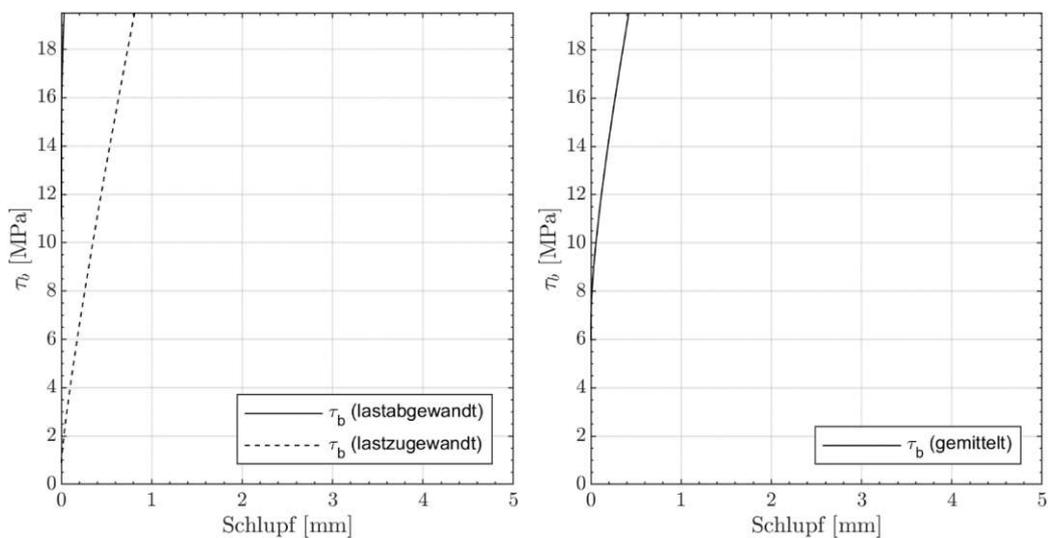


Abb. 8-79: gemittelte VSB für das lastzu- und lastabgewandte Faserstrangende (links) u. gemittelt (rechts)

## Auswertung der versagten Versuchskörper



Abb. 8-80: Übersicht der Versagensursachen der Versuchskörper

### Versuch 1 Q85-2MW-B-K-V1



Abb. 8-81: Bruchstelle am Einspannrohr (links); Abgescherter Querroving (rechts)

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 7947,9 N

Anmerkung: Der Roving versagte mit einem Zugbruchversagen. Der Faserstrang brach einmal knapp oberhalb der Einspannstelle, ein weiteres Mal an der Übergangsstelle von Hohlrohr in den Beton und ein oder zweimal im freiliegenden Strang. Beim Öffnen des Versuchskörpers befindet sich der obere Querroving vom Längsroving abgetrennt vor. Die Trennung passierte wahrscheinlich beim Öffnen des Körpers. Die Harz-Sandbeschichtung ist nicht abgescher.

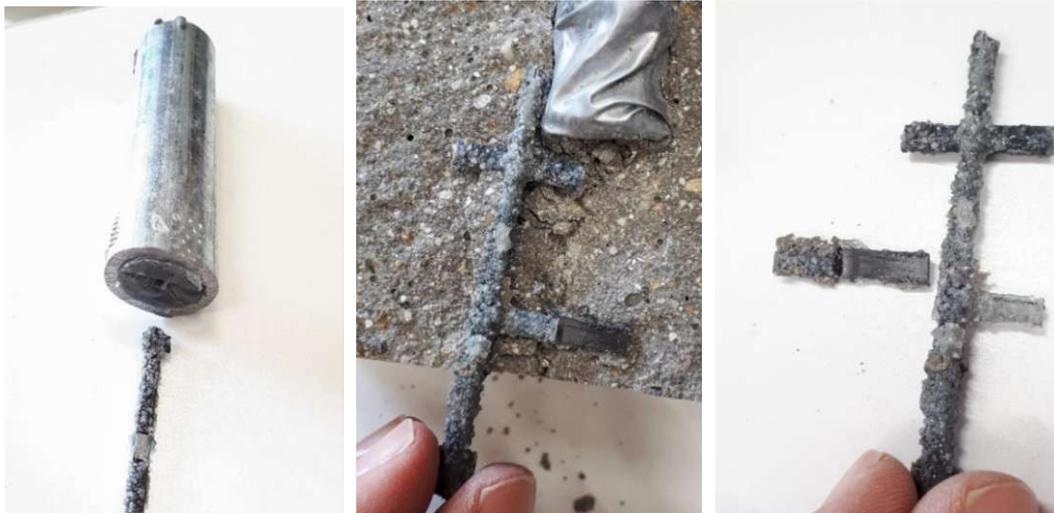
**Versuch 2 Q85-2MW-B-K-V2**

Abb. 8-82: Bruchstelle an der Einspannstelle (links); Bruchstelle im Hohlrohr (mittig); Abgescherter Querroving (rechts)

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 6947,2 N

Anmerkung: Der Roving versagte mit einem Zugbruchversagen. Der Faserstrang brach in vier Teile (Abb. 8-80). Er brach einmal direkt an der Einbindestelle in das Betonrohr bei der Einspannstelle (linkes Foto), zwei weitere Male im freiliegenden Faserstrang und ein drittes Mal im hohlen Rohr im Betonkörper, nahe der Einbindestelle in den Beton (mittiges Foto). Beim Öffnen des Versuchskörpers befindet sich der obere Querroving vom Längsroving abgetrennt vor. Die Trennung passierte wahrscheinlich beim Öffnen des Körpers. Die Harz-Sandbeschichtung ist nicht abgeschert.

**Versuch 3 Q85-2MW-B-K-V3**

Abb. 8-83: Bruchstelle an der Einspannstelle (links); Bruchstelle im Verbundbereich (mittig); Abgescherter Querroving (rechts)

Versagensart: Zugbruchversagen

$F_{\max}$ : 7757,5 N

Anmerkung: Der Roving versagte mit einem Zugbruchversagen. Der Faserstrang brach in vier Teile. Er brach einmal knapp oberhalb der Einbindestelle in das Betonrohr bei der Einspannstelle (linkes Foto), ein zweites Mal an der Einbindestelle beim Hohlrohr in den Beton (mittiges Foto), ein drittes Mal im freiliegenden Faserstrang im Hohlrohr und ein viertes Mal im freiliegenden Faserstrang. Beim Öffnen des Versuchskörpers befindet sich der obere Queroving vom Längsroving abgetrennt vor. Die Trennung passierte wahrscheinlich beim Öffnen des Körpers. Die Harz-Sandbeschichtung ist nicht abgeschert.