

DOCTORAL THESIS

On the splitting behaviour of textile reinforced concrete

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Doctor of Science in Civil Engineering
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DISSERTATION

Zur Spaltrissbildung von textilbewehrtem Beton

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Dipl.-Ing. **Philipp Preinstorfer**, BSc
Matr.Nr.: 00825812
Leibnizgasse 5/17, 1100 Wien, Österreich

- Betreuer: O.Univ.Prof. Dr.-Ing. **Johann Kollegger**
Institut für Tragkonstruktionen – Betonbau
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/E212-2, 1040 Wien, Österreich
- Betreuer Univ.Prof. Dr.techn. **Benjamin Kromoser**
Institut für konstruktiven Ingenieurbau
Universität für Bodenkultur Wien
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien, Österreich
- Gutachter: Univ.Prof. Dr.-Ing. **Josef Hegger**
Institut für Massivbau
RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen, Deutschland
- Gutachter: Univ.Prof. **Agathe Robisson**, PhD
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/E207-1, 1040 Wien, Österreich

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Zuge meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Tragkonstruktionen der TU Wien. Ausgangspunkt stellt die Mitwirkung am Forschungsprojekt „Sustainable Building with textile reinforced UHPC“ dar. Bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Benjamin Kromoser, der mit die Mitarbeit an diesem spannenden Projekt ermöglicht hat. Der Firma solidian GmbH sei für die gute Zusammenarbeit während des Projektes und auch darüber hinaus gedankt.

Mein besonderer Dank richtet sich an Herrn Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger, der mir die Möglichkeit gegeben hat, an seinem Lehrstuhl zu forschen. Das von ihm entgegengebrachte Vertrauen in meine Tätigkeit motivierte mich von Anbeginn und war stets ein wichtiger Grundpfeiler in dieser Zeit.

Für die Übernahme des Koreferates möchte ich besonders Herrn Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger und Frau Prof. Agathe Robisson, PhD danken. Die Arbeiten von Prof. Hegger zum Thema des Textilbetons inspirierten mich seit jeher und umso mehr freut es mich, ihn als Gutachter meiner Arbeit zu wissen. Frau Prof. Robisson sei die sehr gute Zusammenarbeit mit ihrem Forschungsbereich während meiner Zeit an der TU Wien gedankt.

Ein Dank gebührt allen, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Insbesondere ist hier unser Labormitarbeiter Herr Dipl.-Ing. Herbert Pardatscher zu nennen, der bei den Versuchsplanungen stets eine wertvolle Hilfe ist. Herrn Dr. Johannes Kirnbauer möchte ich für die sehr gute und unkomplizierte Zusammenarbeit bei der Probekörperherstellung danken. Ein weiterer Dank gebührt meinen Diplomanden, mit denen ich zahlreiche fachliche Diskussionen führen konnte und so immer wieder meine eigenen Gedanken zu der Thematik reflektieren musste.

Danken möchte ich auch meinen Kollegen am Institut. Insbesondere Herrn Dr. Patrick Huber, für die wissenschaftlichen Anregungen während unserer gemeinsamen Zeit am Institut. Seine Arbeiten waren fortwährend Vorbild für meine eigenen Tätigkeiten. Herrn Dr. Bernhard Eichwalder und Herrn Dr. Ilja Fischer sei gedankt, dass sie stets ein offenes Ohr hatten, wenn Fragestellungen im Zuge meiner wissenschaftlichen Tätigkeit auftauchten. Frau Dr. Sara Reichenbach danke ich, dass sie mein Englisch wieder aufgebessert hat.

Ein besonderer Dank gebührt meiner Partnerin Frau Dr.med.univ. Karin Venzl, die in dieser anspruchsvollen Zeit die wichtigste Stütze für mich war.

Ich widme diese Arbeit meinen Geschwistern Melanie, Christoph und Daniel sowie meinen Eltern Waltraud und Hannes, die seit jeher bedingungslos an mich glauben.

Kurzfassung

Mit Textilbeton den Betonbau neu denken. Dieser innovative Verbundwerkstoff, der in den letzten Jahrzehnten entwickelt wurde, gibt dem Ingenieur neue Möglichkeiten in der Projektierung und Planung in die Hand. Durch die Kombination der Werkstoffe Textilbewehrung und Hochleistungsbeton können schlanke und dauerhafte Bauteile hergestellt werden, die den Anwendungsbereich des klassischen Betonbaus erweitern. Aufgrund geänderter Randbedingungen ist eine Übertragung der Modelle aus dem Stahlbetonbau zur Beschreibung des Tragverhaltens nur bedingt möglich. Ein wesentlicher Aspekt diesbezüglich betrifft das Verbundverhalten. In zahlreichen Untersuchungen am Institut für Tragkonstruktionen der TU Wien konnte ein Abspalten der Betondeckung zufolge hoher Verbundbeanspruchungen beobachtet werden. War dieses Verbundversagen auch schon in den Anfängen der Textilbetonherstellung bekannt, so hat sich diese Problematik in den letzten Jahren weiter verschärft. Die Hintergründe, warum es zu einer Spaltrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung kommt, werden in der Literatur unterschiedlich beantwortet.

Im Zuge dieser wissenschaftlichen Arbeit wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die Verbundparameter zu separieren und deren Einfluss auf die Spaltrissbildung zu quantifizieren. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Spaltrissbildung im Wesentlichen von der Geometrie der Rovinge abhängig ist. So bewirkt eine sehr flache Form Spaltrkräfte, die primär orthogonal auf die Ebene der textilen Bewehrung gerichtet sind. Des weiteren treten hohe Spaltzugbeanspruchungen auf, wenn der Roving herstellungsbedingt in Längsrichtung eine periodische Dickenaufweitung aufweist. Voraussetzung hierfür ist, dass der Roving mit einem steifen Tränkungsmaterial imprägniert ist, sodass sich ein Formschluss der Bewehrung mit dem umgebenden Beton ergibt. Zur Charakterisierung der geometrischen Eigenschaften der jeweiligen Faserstränge wurden geometrische Kennwerte eingeführt, mit deren Hilfe eine genaue Beschreibung der Rovinge möglich ist.

Um den Kraftfluss innerhalb des Bauteils zu untersuchen wurde ein numerisches Modell erstellt. Die Modellparameter dazu sind an den experimentellen Untersuchungen kalibriert worden. Im Zuge der numerischen Berechnungen konnten die Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen validiert werden. Sind die Rovinge mit einem steifen Tränkungsmaterial versehen, wird die periodische Aufweitung des Rovings soweit in der Form gefestigt, dass ein Formschluss der Bewehrung mit dem umgebenden Beton gegeben ist. Bei Belastung stützt sich der Roving, ähnlich der Bewehrung im konventionellen Stahlbetonbau, auf dem Beton ab und erzeugt hohe Pressungen entlang dieser periodischen Aufweitung. Der Kraftfluss lässt sich äquivalent dazu mit einem Ringzugbandmodell beschreiben, wobei die Ringzugspannungen in Abhängigkeit der Rovinggeometrie nicht mehr gleichmäßig im Betonquerschnitt verteilt sind.

Auf Basis dieser Untersuchungen wird ein Modell vorgestellt, das eine Berechnung der auftretenden Spaltzugkräfte ermöglicht. Der vorgestellte Modellansatz beruht im wesentlichen auf geometrischen Annahmen und erlaubt eine einfache und schnelle Berechnung der auftretenden Spaltzugkräfte. Vorab wurde dazu eine umfangreiche numerische Parameterstudie durchgeführt, in der die geometrische Form des Faserstrangs anhand der eingeführten geometrischen Kennwerte variiert wurde. Ein Vergleich der mit dem vorgestellten Modellansatz berechneten Spaltzugkräfte mit den numerisch ermittelten Spaltzugkräften zeigt eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Für die Herstellung von Textilbewehrungen wird in Bezug auf die Spaltrissbildung empfohlen, eine rundere Rovingform anzustreben, da dadurch die Neigung zu einer Spaltrissbildung am effektivsten reduziert werden kann.

Abstract

Rethinking Structural Concrete by introducing textile reinforcement. This innovative composite material, which was developed in the last decades, opens up new possibilities in planning and development. By combining textile reinforcement with high performance concrete a crucial reduction of the material weight of structural components is possible, while simultaneously creating a very durable structure, thus expanding the application area of structural concrete. Due to different boundary conditions, a simple transfer of existing models for describing the structural behaviour is not possible. In particular, but not exclusively, this is related to the bond behaviour of textile reinforcement. In numerous investigations at the Institute of Structural Engineering at TU Wien a spalling of the concrete cover due to high bond stresses in between the textile reinforcement and the surrounding concrete was observed. While this failure criteria has been noticed in cases since the very beginning of the implementation of textile reinforcement, this problem intensified in the last couple of years. The theoretical background for the previously described failure mechanisms has not been fully understood until the present day with different declarations found in various literature.

In the course of this scientific work experimental investigations were carried out, aiming to separate different bond mechanisms from each other and to quantify their influence on the longitudinal cracking. It can be shown that the geometrical characteristics of the rovings are the main influencing parameters on the longitudinal cracking. In the case of a flat roving geometry a high tendency for spalling of the concrete cover could be observed. This same effect occurs when there is a pronounced periodical thickening of the roving alongside its longitudinal axis. Major requirement therefore is a stiff impregnation material of the roving, thus exhibiting an interlocking between the roving and the concrete. In dependency of the geometrical form of a roving, different parameters are introduced in this work, by which a clear specification of the rovings is given.

To investigate the load transmission in the test specimens, a numerical model of a pull-out specimen was established. The model parameters were calibrated with the results of the experimental investigations. With this calculations the main conclusions from the experimental investigations can be verified. By impregnating the rovings with a stiff impregnation material, the geometrical form is preserved, enabling an interlocking of the roving with the surrounding concrete. When the roving is loaded, high pressure forces occur where the roving is supported by the concrete. The load transmission can be described similar to the strut and tie model of conventional structural concrete, whereby in the case of textile reinforcement the resulting splitting forces are not orientated uniform alongside the concrete cross section, rather than orthogonally to the layer of the textile reinforcement.

Based on this studies a model is introduced, which allows an assessment of the occurring splitting forces. The theoretical assumptions of the model are of geometric character, making it possible to calculate the splitting forces in an easy way. In advance a broad parametrical study was carried out, differing the geometrical parameters, which were introduced before. Comparing the splitting forces, which were calculated with the new model approach, with the splitting forces calculated in the numerical study, a good agreement can be attested. With regard to the occurring splitting forces, it can be stated that a rounder cross section of the roving should be aspired in the production process.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Wissenschaftliche Methodik	3
1.4 Abgrenzung	4
2 Verbundwerkstoff Textilbeton - Stand der Kenntnisse	5
2.1 Allgemeines	5
2.2 Textilbewehrung	6
2.2.1 Allgemeines - textile Prozesskette	6
2.2.2 Textile Faser	7
2.2.3 Einfachgarn	10
2.2.4 Textile Halbzeuge	10
2.2.5 Textile Bewehrung	12
2.2.6 Charakterisierung der textilen Bewehrung	16
2.3 Feinbetonmatrix	21
2.3.1 Allgemeines	21
2.3.2 Zusammensetzung und Eigenschaften	21
2.3.3 Betonierverfahren	23
2.4 Verbund zwischen Textilbewehrung und umgebender Matrix	24
2.4.1 Grundlegendes	24
2.4.2 Charakterisierung des Verbundes	26
2.4.3 Bestimmung der Verbundspannungs-Schlupf Beziehung	28
2.4.4 Einflussparameter auf den Verbund zwischen Textilbewehrung und Betonmatrix	32
3 Zur Spaltrissbildung in textilbewehrtem Beton	36
3.1 Durchgeführte Bauteilversuche am Institut	36
3.2 Ursachen für die Spaltrissbildung	38

3.3	Experimentelle Untersuchungen zur Spaltrissbildung	42
3.3.1	Versuchskörper	44
3.3.2	Versuchsaufbau	51
3.3.3	Ergebnisse	53
3.4	Diskussion der Ergebnisse	65
4	FE-Analyse	67
4.1	Vorgehensweise	67
4.2	Modellierung	68
4.2.1	Geometrie	68
4.2.2	Materialmodelle	69
4.2.3	Interface	73
4.2.4	FE-Netz	76
4.2.5	Randbedingungen	76
4.3	Numerische Ergebnisse	77
4.3.1	Allgemeines zur Auswertung	77
4.3.2	Orientierung und Größe der Hauptspannungen	79
4.3.3	Dehnungen und Spannungen	80
4.3.4	Erkenntnisse aus der FE-Berechnung	84
4.4	Parameterstudie	85
4.4.1	Untersuchungsparameter	85
4.4.2	Ergebnisse	88
4.4.3	Erkenntnisse aus der Parameterstudie	96
4.5	Modell zur Berechnung der Spaltzugkräfte	97
5	Zusammenfassung	105
5.1	Problemstellung	105
5.2	Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen	106
5.3	Überlegungen zur Berücksichtigung der Spaltrissbildung in der Beurteilung des Verbundverhaltens	109
5.4	Offene Fragestellungen/weitere Vorgehensweise	110
A	Experimentelle Untersuchungen	117
A.1	Versuchsserie Typ S	119
A.2	Versuchsserie Typ O	120
A.3	Versuchsserie Typ F	121
A.4	Versuchsserie Typ R	122
A.5	Versuchsserie Typ K	123
A.6	Versuchsserie Typ U	124
B	Python-Code	125
C	Rovingparameter	133

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymere
CDP	Concrete-Damage-Plasticity
FFG	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
KRB	Kraft-Rissöffnungs-Beziehung
SBR	Styrol-Butadien-Copolymer
SFB	Sonderforschungsbereich
TFP	Tailored Fibre Placement
TRUHPC	Textile reinforced ultra-high performance concrete
UHPC	Ultra-high performance concrete
VSF	Verbundspannungs-Schlupf Beziehung

Englische Indizes

<i>b</i>	Bond
<i>c</i>	Compression
<i>cr</i>	Crack
<i>ct</i>	Tension
<i>f</i>	Friction
<i>max</i>	Maximum
<i>m</i>	Mean
<i>r</i>	Roving
<i>R</i>	Resistance
<i>sp</i>	Splitting
<i>tex</i>	Textil
<i>u</i>	Ultimate

Deutsche Indizes

<i>E</i>	Einwirkung
<i>F</i>	Feldbereich (definiert als Mitte zwischen zwei Knotenbereichen)
<i>gem</i>	Gemessen
<i>K</i>	Knotenbereich (Kreuzungspunkt Kett und Schussroving)
<i>kr</i>	Kreis
<i>U</i>	Umlenkraft

Sonstige Indizes

1,2,3	Hauptrichtungen
x,y,z	Koordinatenachsen des kartesischen Koordinatensystems

Griechische Buchstaben

$\alpha_{ct,sp}$	Abminderungsfaktor der Betonzugfestigkeit in der Spaltfläche [-]
α_F	Einflussfaktor auf die Spaltkräfte in Abhängigkeit der Garnform [-]
ε_c	Betondehnung [mm/m]
ε_{c1}	Dehnung des Betons unter der Maximalspannung [mm/m]
ε_{cu1}	Bruchdehnung des Betons [mm/m]
ε	Exzentrizitätsparameter [-]
ε_{tex}	Textildehnung [mm/m]
μ	Reibbeiwert [-]
ν_{\perp}	Querdehnung in 23-Richtung [-]
ν_{\parallel}	Querdehnung in 12, bzw. 13 -Richtung [-]
φ	Neigung der Betondruckstrebe quer zur Längsrichtung [°]
ψ	Dilatanzwinkel [°]
ρ	Dichte des Fasermaterials [g/cm ³]
ρ_0	Verschiebung ab der eine Schädigung der Kohäsion eintritt [mm]
ρ_1	Verschiebung ab der eine vollständige Schädigung der Kohäsion vorhanden ist [mm]
σ_1	Min. Hauptspannung [N/mm ²]
σ_2	Mittlere Hauptspannung [N/mm ²]
σ_3	Max. Hauptspannung [N/mm ²]
σ_{b0}	Biaxiale Betondruckfestigkeit [N/mm ²]
σ_c	Betondruckspannung [N/mm ²]
σ_{c0}	Einaxiale Betondruckfestigkeit [N/mm ²]
σ_{ct}	Betonzugspannung [N/mm ²]
σ_N	Normalspannung [N/mm ²]
σ_{tex}	Textilspannung [N/mm ²]
τ_b	Verbundspannung [N/mm ²]
$\tau_{b,m}$	Mittlere Verbundspannung [N/mm ²]
$\tau_{b,max}$	Maximal übertragbare Verbundspannung [N/mm ²]
τ_f	Verbundspannung im Reibbereich [N/mm ²]
θ	Neigung der Betondruckstrebe zur Längsachse des Textils [°]

Lateinische Buchstaben groß

A_F	Faserquerschnittsfläche (Nettoquerschnittsfläche) eines Faserstrangs [mm ²]
$A_{r,F}$	Querschnittsfläche des Rovings im Feldbereich [mm ²]

$A_{r,m}$	Mittlere Querschnittsfläche des Rovings [mm ²]
A_{sp}	Spaltfläche [mm ²]
E_{\perp}	E-Modul in Transversalrichtung [N/mm ²]
E_{\parallel}	E-Modul in Längsrichtung [N/mm ²]
E_{tex}	E-Modul des Rovings [N/mm ²]
$E_{t,m}$	Mittlerer E-Modul des Rovings [N/mm ²]
$E_{t,o}$	Tangenten E-Modul des Rovings am Beginn der Spannungs-Dehnungs-Beziehung [N/mm ²]
$E_{t,u}$	Tangenten E-Modul des Rovings am Ende der Spannungs-Dehnungs-Beziehung [N/mm ²]
F	Belastung [N]
F_{sp}	Resultierende Spaltzugkraft [N]
$F_{sp,R}$	Resultierender Spaltwiderstand [N]
$F_{sp,y}$	Resultierende Spaltzugkraft orthogonal auf die Ebene des Textils [N]
$F_{sp,z}$	Resultierende Spaltzugkraft in der Ebene des Textils [N]
F_u	Bruchkraft des Rovings [N]
F_f	Übertragbare Verbundkraft nach erfolgter Sprengrissbildung [N]
G_F	Bruchenergie [N/mm]
G_{\perp}	Schubmodul in 23 - Richtung [N/mm ²]
G_{\parallel}	Schubmodul in 12 bzw. 13 - Richtung [N/mm ²]
K	Steifigkeit [N/mm ³]
K_c	Formfaktor zur Beschreibung der Bruchfläche [-]
T_t	Feinheit eines Faserstrangs [tex]
U_{kr}	Umfang eines Kreises mit dem selben Flächeninhalt wie der Roving [mm]
U_r	Umfang des Rovings [mm]
$U_{r,F}$	Umfang des Rovings im Feldbereich [mm]
$U_{r,m}$	Mittlerer Umfang des Rovings [mm]

Lateinische Buchstaben klein

a	Größere Halbachse der Ellipse [mm]
a_1	Größere Halbachse der Ellipse im Knotenbereich des Rovings [mm]
a_2	Größere Halbachse der Ellipse im Feldbereich des Rovings [mm]
b	Kleinere Halbachse der Ellipse [mm]
b_1	Kleinere Halbachse der Ellipse im Knotenbereich des Rovings [mm]
b_2	Kleinere Halbachse der Ellipse im Feldbereich des Rovings [mm]
$b_{b,o}$	Breite des Untersuchungsgebietes [mm]
$b_{r,F}$	Breite des Rovings in Feldmitte [mm]
$b_{r,K}$	Breite des Rovings im Knotenbereich [mm]
d_c	Verfestigungsparameter im Druckbereich [-]
$d_{r,F}$	Dicke des Rovings in Feldmitte [mm]
$d_{r,K}$	Dicke des Rovings im Knotenbereich [mm]
d_s	Durchmesser eines Bewehrungsstabes (Stahl) [mm]

d_t	Verfestigungsparameter im Zugbereich [-]
e	Maschenweite [mm]
f	Ausmitte der Faserstrangachse innerhalb einer Maschenweite [mm]
f_{cm}	Mittelwert der Betondruckfestigkeit [N/mm ²]
$f_{ct,m}$	Mittlere Betonzugfestigkeit in der Spaltfläche [N/mm ²]
$f_{ctm,sp}$	Mittelwert der Spaltzugfestigkeit [N/mm ²]
$f_{tex,u}$	Zugfestigkeit der Textilbewehrung [N/mm ²]
k_A	Beiwert zur Beschreibung der Größenordnung der Flächenaufweitung [-]
k_F	Beiwert zur Beschreibung der Rovingform [-]
k_P	Beiwert zur Beschreibung der Richtungsdominanz der periodischen Aufweitung [-]
k_W	Beiwert zur Beschreibung der Rovingwelligkeit [-]
l	Länge eines Faserstranges [km]
$l_{b,o}$	Länge des oberen Verankerungsbereiches [mm]
$l_{b,u}$	Länge des unteren Verankerungsbereiches [mm]
l_r	Länge des Rovings [mm]
m	Gewicht eines Faserstranges [g]
s	Schlupf [mm]
s_{cr}	Rissabstand [mm]
u_G	Umfang der Ellipse [mm]
u	Verschiebung [mm]
w	Rissöffnung [mm]
$w_{F,max}$	Zu maximaler Laststufe zugehörige Rissöffnung [mm]

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Textilbeton ist ein innovativer Verbundwerkstoff, der dem Ingenieur neue Möglichkeiten sowohl in ästhetischer als auch statisch konstruktiver Weise eröffnet. Die Ausgangsmaterialien dieses Verbundwerkstoffes zeichnen sich durch eine sehr hohe Festigkeit und eine hervorragende Dauerhaftigkeit aus. Durch die hohe Korrosionsbeständigkeit der nichtmetallischen Bewehrung - insbesondere ist Carbon in diesem Zusammenhang zu nennen - ist eine Minimierung der Betondeckung möglich, wodurch filigrane und in weiterer Folge auch leichte Bauteile und Tragwerke errichtet werden können (Hegger, Will et al. 2004). Die Vorteile dieses Verbundwerkstoffes bedenkend wurde im Jahr 2015 vom Institut für Tragkonstruktionen - Forschungsbereich Betonbau der TU Wien das Forschungsprojekt *Sustainable Building with Textile reinforced ultra-high performance concrete (TRUHPC)* beantragt und von der Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) gefördert. Betrachtet man den hohen Ressourcen- und Materialverbrauch der Bauindustrie, sind innovative Entwicklungen zur Erreichung einer nachhaltigeren Zukunft notwendig. Bei einem effizienten Einsatz und einer Kombination der textilen Bewehrung mit einer mineralisch gebundenen Hochleistungsmatrix ist eine beträchtliche Materialreduktion und Ressourceneinsparung möglich, wodurch ein erhebliches Nachhaltigkeitspotential vorhanden ist (Portal et al. 2015).

Als Textilbewehrung stehen dem Projektierenden zur Zeit zahlreiche verschiedene Produkte zur Auswahl. Dies ist einerseits der immer noch fortschreitenden Entwicklung sowie andererseits den zahlreichen unterschiedlichen Ausgangsmaterialien und Herstellungsmethoden geschuldet. Wurden anfangs feinmaschige textile Bewehrungen ohne jedwede Imprägnierung der Rovinge verwendet, sind heute unter anderem sogenannte Heavy Tows, welche zusätzlich mit einem steifen Tränkungsmaterial imprägniert werden, am Markt erhältlich. Textilien dieser Art wurden auch im bereits genannten Forschungsprojekt verwendet. Sie weisen zahlreiche Vorteile auf, die von der hohen Faserquerschnittsfläche der Bewehrung, der hohen Bruchfestigkeit der Garne sowie den guten Verbundeigenschaften und den damit einhergehenden geringen Rissabständen und Rissweiten reichen. Speziell für diese Art der Bewehrung konnte aber bei fortgeschrittenen Laststufen eine Längsrissbildung¹ im Bauteil, die zu einem Abspalten der Betondeckung führt, beobachtet werden. Diese Rissbildung kann in weiterer Folge zum vorzeitigen Versagen der textilbewehrten Bauteile führen.

¹Eine Längsrissbildung beschreibt eine Sprengrissbildung zufolge hoher Verbundbeanspruchungen. Die Längsrissbildung im Textilbetonbau findet primär in der Ebene der textilen Bewehrung statt und wird für diesen Fall in dieser Arbeit synonym als Spaltrissbildung beschrieben



(a) Spaltrissbildung unter Zugbeanspruchung



(b) Spaltrissbildung während eines Biegeversuches

Abb. 1.1: Beispiele für eine Spaltrissbildung bei textilbewehrten Betonbauteilen

In Abb. 1.1 sind Beispiele für eine Längsrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung zu sehen, die im Zuge von Versuchsdurchführungen am Institut für Tragkonstruktionen der TU Wien beobachtet wurden. In Abb. 1.1b führte die Spaltrissbildung zu einem Abplatzen der Betondeckung und in weiterer Folge zu einem vorzeitigem Versagen des Bauteils in Form eines Verankerungsversagens am Auflager. In Anbetracht dieser Schadensformen wurden mehrere Fragestellungen aufgeworfen:

- Welche Verbundmechanismen wirken an der Grenzfläche zwischen Beton und Textil
- Welche Mechanismen sind für die Längsrissbildung, die zu einem Abspalten der Betondeckung führt, verantwortlich?
- Wie kann ein Abspalten der Betondeckung in Zukunft bei textilbewehrten Betonbauteilen vermieden werden?

1.2 Zielsetzung

Die Gründe für ein Abspalten der Betondeckung von der textilen Bewehrung können vielfältig sein. In zahlreichen Untersuchungen wurde diese Problematik beobachtet und in Publikationen deren mögliche Hintergründe diskutiert (Preinstorfer, Kromoser et al. 2018; Bielak et al. 2018). Eine grundlegende Abhandlung und einen guten Überblick über die Verbundthematik bietet Lorenz (2014). Diese Arbeit beschränkt sich primär aber auf Garne mit einer verhältnismäßig geringen Feinheit. Zwar konnte auch hier z.T. ein Abplatzen der Betondeckung beobachtet werden, diese Schädigung kann aber im Wesentlichen auf die Garnwelligkeit zurückgeführt

werden. Mit der zunehmenden Verwendung von Heavy Tows, mit einer immer größer werdenden Faserquerschnittsfläche, treten neue Verbundmechanismen in Kraft, deren Wechselwirkungen noch nicht geklärt sind. Erklärtes Ziel ist es, die Mechanismen, die zu einer Längsrissbildung in der Ebene der Bewehrung führen, zu identifizieren und deren Größenordnung zu quantifizieren. Aufbauend auf den Untersuchungen soll die optimale Geometrie für Textilhersteller auf Basis der verwendeten Materialien ersichtlich sein. Dadurch soll ein Beitrag geleistet werden, um einen effizienten Einsatz von Textilbewehrungen in Betonkonstruktionen zu ermöglichen.

1.3 Wissenschaftliche Methodik

Die wissenschaftliche Methodik in dieser Arbeit ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Ausgangspunkt dieser Dissertation bildet die Mitarbeit an dem Forschungsprojekt *Sustainable Building with textile reinforced ultra-high performance concrete*. Im Zuge dieses Forschungsprojektes wurde in mehreren Versuchskonfigurationen eine Spaltrissbildung entlang der Zugbewehrung beobachtet. Alle Versuchskörper, bei denen dieses Verhalten während der Versuchsdurchführung auftrat, waren mit epoxidharzgetränkte Carbontextilien, welche eine hohe Garnfeinheit aufwiesen, bewehrt. Aufgrund der zum Teil sehr früh einsetzenden Rissbildung, wird die Effizienz dieser eigentlich sehr vielversprechenden Bewehrung beeinträchtigt. Bei genauer Betrachtung stellte sich heraus, dass die Ursachen, die zu einer Spaltrissbildung entlang der Bewehrung führen, noch nicht abschließend geklärt sind und ein Bedarf an einer wissenschaftlichen Untersuchung besteht. Der Inhalt der wissenschaftlichen Untersuchung wird in dieser Dissertation abgebildet.

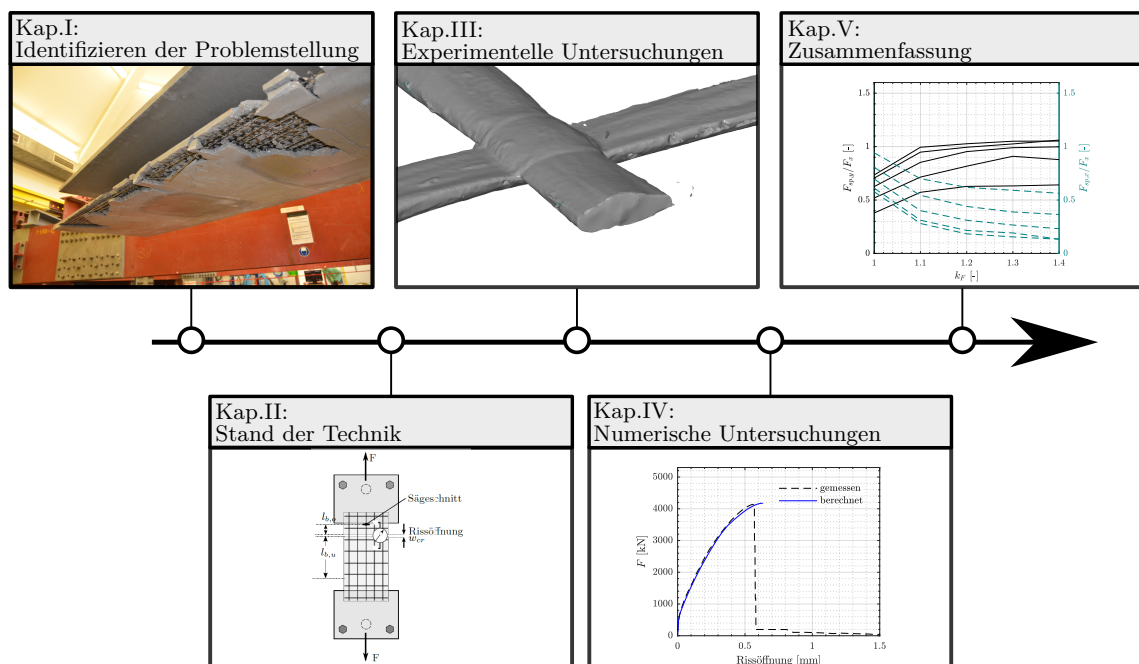


Abb. 1.2: Methodik in dieser wissenschaftlichen Arbeit

Stand der Technik (Kap. II): In einer umfangreichen Literaturstudie werden die einzelnen Entwicklungsstufen einer textilen Bewehrung studiert und der derzeitige Stand der Technik abgebildet. Das Verbundverhalten spielt eine wesentliche Rolle in Bezug auf die Spaltrissbildung in textilbewehrten Bauteilen. Mögliche Ursachen werden in dieser Literaturstudie eruiert und deren Hintergründe dargestellt. In Bezug auf eigene Untersuchungen zum Verbundverhalten werden gängige Versuchskonfigurationen recherchiert und die jeweiligen Vor- und Nachteile bewertet.

Experimentelle Untersuchungen (Kap. III): Verschiedene Parameter nehmen Einfluss auf die Längsrissbildung in textilbewehrten Bauteilen. Um die Einflüsse zu eruieren und deren Größenordnung zu quantifizieren, werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Dabei wird versucht, die einzelnen Parameter weitestgehend zu separieren, um gegenseitige Beeinflussungen auszuschließen. Vorab werden die bei den experimentellen Untersuchungen verwendeten Rovinge mit einem Laserscan vermessen, um die Geometrien der einzelnen Faserstränge genau zu dokumentieren.

Numerische Simulationen (Kap. IV): Es wird ein numerisches Modell der eigenen Verbundversuche erstellt, das in der Lage ist, die Spannungsverteilung innerhalb des Versuchskörpers abzubilden. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen werden herangezogen, um das Modell zu kalibrieren. Mit dem kalibrierten Modell wird eine umfangreiche Parameteruntersuchung vorgenommen, um die geometrischen Einflüsse auf die Spaltrissbildung in textilbewehrten Bauteilen zu eruieren.

Schlussfolgerungen (Kap. V): Die Ergebnisse aus den Untersuchungen werden zusammengefasst und Schlussfolgerungen aus den jeweiligen Erkenntnissen gezogen. Es wird ein Ausblick auf weiterführende Untersuchungen gegeben und weitere offene Fragestellungen erörtert.

1.4 Abgrenzung

Zur Zeit sind zahlreiche unterschiedliche Textilbewehrungen am Markt erhältlich. Diese unterscheiden sich unter anderem durch die Ausgangsmaterialien, die Art und Menge der Tränkung, die Herstellungsart und die Querschnittsabmessungen. Die vorliegende Problematik der Spaltrissbildung konnte bis dato nur bei Textilien mit einer steifen Tränkung (z.B. Epoxidharz oder Polyacrylat) und einer hohen Garnfeinheit (>3200 tex) beobachtet werden. In Gesprächen mit anderen Projektanten und in einer umfangreichen Literaturstudie zeigte sich ein ähnliches Bild. Für die vorliegende Arbeit werden die Untersuchungen deshalb auf ebendiese Textilart eingeschränkt.

2 Verbundwerkstoff Textilbeton - Stand der Kenntnisse

2.1 Allgemeines

Textilbeton besteht aus offenmaschigen, hochfesten und hoch korrosionsbeständigen Textilien, eingebettet als Bewehrung in einer Hochleistungsbetonmatrix. Die Entwicklung von Textilbeton begann in den 1990er Jahren, wobei eine systematische Erforschung ab dem Jahre 1999 im Zuge von zwei Sonderforschungsbereichen (SFBs) vorrangig an den beiden deutschen technische Hochschulen RWTH Aachen (Hegger (2012)) und TU Dresden (Curbach und Ortlepp (2011))¹ erfolgte. Seither hat der Werkstoff Textilbeton viele Entwicklungsstufen durchlebt und ist auch weiter noch in Entwicklung. Aufgrund der speziellen Eigenschaften der Ausgangsmaterialien kann er den konventionellen Stahlbetonbau sinnvoll ergänzen bzw. neue Anwendungsgebiete erschließen. Die folgende Auflistung gibt nur einen kleinen Überblick über Anwendungsgebiete, die für den Einsatz von Textilbeton prädestiniert sind, und in ersten Pilotprojekten bereits erschlossen wurden:

- Sanierung und Ertüchtigung mit geringem Materialeinsatz (Erhard et al. 2015)
- Neubau von leichten Tragkonstruktionen bspw. Fußgängerbrücken, Fassadenplatten, Tragelemente für den Hochbau (Hegger, Kulas et al. 2011; Rempel, Will et al. 2015)
- Herstellung freigeformter Konstruktionen bspw. Dachschalen (Hegger, Curbach et al. 2018; Scholzen et al. 2015)
- Herstellung von Kunstobjekten und Möbelstücken (Kromoser und Ritt 2016)

Diese ersten erfolgreichen Pilotprojekte in den diversen Anwendungsgebieten geben Anlass für weitere Entwicklungen. Derzeit werden in dem großen Forschungsprojekt C^3 ² die notwendigen wissenschaftlichen Voraussetzungen geschaffen, um einen breiten Markteintritt des Werkstoffes zu ermöglichen (Lieboldt et al. 2018).

In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels wird der Stand der Kenntnisse zu den Komponenten des Verbundwerkstoffes aufgezeigt. Insbesondere für textile Bewehrungen werden ausgehend von den Ausgangsmaterialien, dem Herstellungsprozess

¹Während in Dresden im SFB 528 der Fokus auf die Verstärkung bestehender Bauteile gelegt wurde, erforschten die Wissenschaftler der RWTH Aachen im SFB 532 vorrangig das Tragverhalten neuer Bauteile

² C^3 steht für Carbon Concrete Composite - ein interdisziplinäres Forschungsprojekt an dem zahlreiche deutsche Universitäten und Unternehmen aus der Baubranche beteiligt sind

folgend, bis zum fertigen Textil die wesentlichen Prozessschritte angeführt. Dabei ist festzustellen, dass in der Literatur zum Teil unterschiedliche Begrifflichkeiten für den selben Sachverhalt verwendet werden. Die genaue Darstellung der Prozesskette soll insbesondere auch dazu beitragen, Fehlinterpretationen beim Lesen dieser Arbeit zu vermeiden. Des Weiteren liefert die Kenntnis der Herstellung wichtige Hintergrundinformationen zu geometrischen und mechanischen Eigenschaften der Textilien, die für die Interpretation der eigenen Untersuchungen notwendig sind.

2.2 Textilbewehrung

2.2.1 Allgemeines - textile Prozesskette

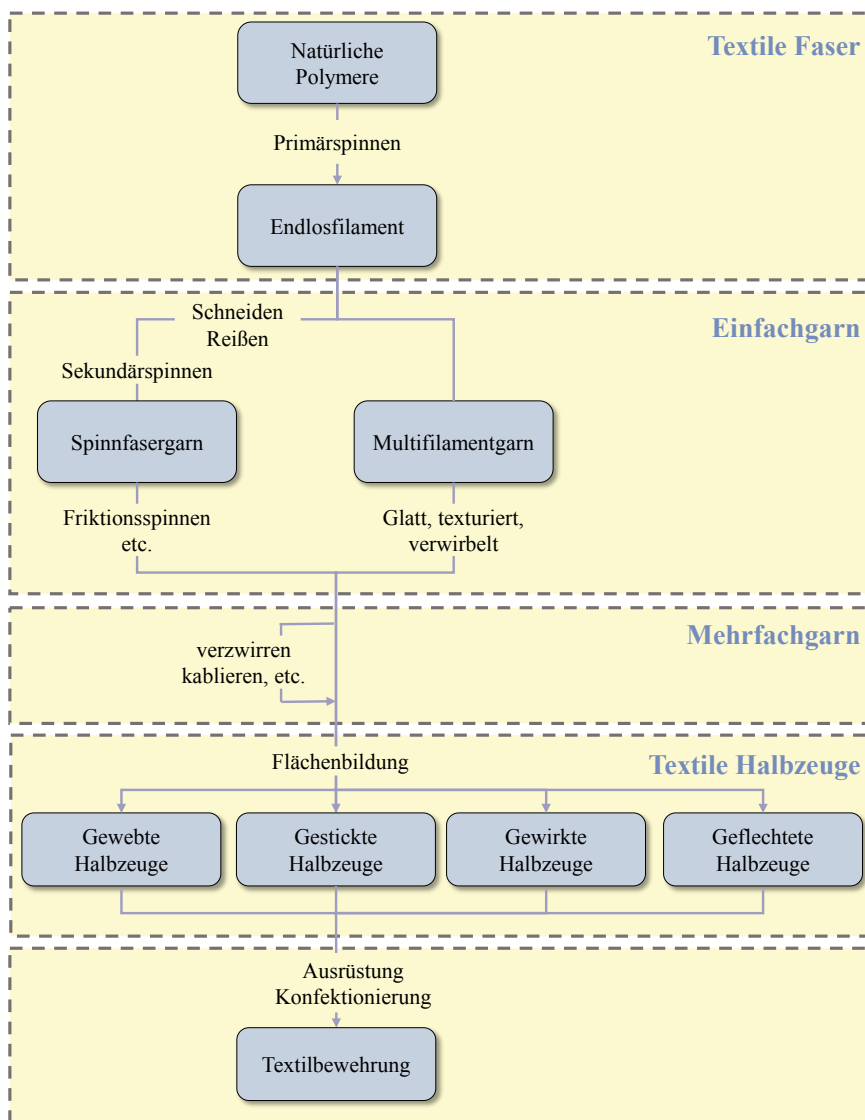


Abb. 2.1: Prozesskette Textilbewehrung

Abb. 2.1 gibt einen Überblick über die textile Prozesskette von einer textilen Faser zu einer textilen Bewehrung. Die Abbildung ist vereinfacht und legt den Fokus auf wesentliche Prozessschritte und gängige Verfahren zur Herstellung einer textilen Bewehrung. Daneben existieren noch weitere Verfahren und Kombinationsmöglichkeiten, die aber aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht angeführt sind (Cherif 2011).

Textile Bewehrungen werden aus Hochleistungsfaserwerkstoffen (Kap. 2.2.2) hergestellt. Die Herstellung erfordert großes Know-How und hochentwickelte Technologien. In einem Primärspinnprozess werden Endlosfasern (Filamente) gewonnen, die zu Einfachgarnen (Kap. 2.2.3) bzw. in weiterer Folge zu Mehrfachgarnen weiterverarbeitet werden. Zur Flächenbildung stehen zahlreiche Methoden aus der Textilindustrie zur Verfügung (Kap. 2.2.4). In einem letzten Prozessschritt werden die textilen Halbzeuge ausgerüstet und konfektioniert (Kap. 2.2.5).

2.2.2 Textile Faser

Textile Faserstoffe bilden das Ausgangsprodukt für die Herstellung von textilen Bewehrungen. Diese werden in Form von Endlosfasern (Filamenten) aus organischen oder anorganischen Materialien hergestellt, wobei die Eigenschaften der Faserstoffe in weiterer Folge maßgeblich die Eigenschaften der Textilbewehrung bestimmen. Um als Fasermaterial für den Einsatz als Bewehrung im Beton geeignet zu sein, muss diese nach (Curbach und Jesse 2009) mehreren Anforderungen genügen:

- Hohe Korrosionsbeständigkeit im alkalischen Milieu des Betons
- Hohe Dehnsteifigkeit für den Gebrauchszustand
- Wirtschaftlichkeit
- Hohe Bruchdehnung für eine gute Versagensankündigung
- Textile Bearbeitbarkeit
- Hohe Ermüdungsfestigkeit

Freudenberg (2011) gibt einen Überblick über die Eigenschaften und Materialkennwerte verschiedener Fasermaterialien. In Tab. 2.1 sind daraus Materialien angeführt, die auf Basis der vorhin angeführten Anforderungen für einen Einsatz als Bewehrung in Beton in Frage kommen. Aramidfasern und Basaltfasern weisen diesbezüglich zwar gute Materialeigenschaften auf, sind im alkalischen Milieu des Betons aber nicht dauerhaft. Zusätzlich neigen Aramidfasern zur Wasseraufnahme. Deshalb haben sich im wesentlichen Carbon- und Glasfasern als Ausgangsmaterial durchgesetzt, welche in Kap. 2.2.2.1 bzw. 2.2.2.2 genauer beschrieben werden.

Die Herstellung der Fasern erfolgt im Primärspinnungsprozess. Dieser unterscheidet sich je nach verwendetem Material. Im Anschluss an den Primärspinnungsprozess wird vor der Weiterverarbeitung der Fasern zu Garnen eine Schlichte aufgetragen. Diese soll eine entsprechende Verarbeitbarkeit der Fasern gewährleisten (Reduzierung

Tab. 2.1: Mechanische Eigenschaften verschiedener Fasermaterialien³

Faser	Dichte [g/cm ³]	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [mm/m]
AR-Glas	2,7	76	2000	26
Carbon	1,73....1,96	200....500	1750....7000	3,5....24
Aramid	1,39....1,47	58....186	2760....3620	19....44
Basalt	2,75	89	2000....4840	3,15
B550	7,86	200	550	20

von Filamentschädigungen, Verbesserung der Haftung der Fasern in der späteren Kunststoffmatrix bei textilen Bewehrungen, Vermeidung elektrostatischer Aufladung).

2.2.2.1 Glasfasern

Faserglas als Ausgangsmaterial für die Glasfaserherstellung ist ein anorganischer Werkstoff hauptsächlich bestehend aus Siliziumdioxid SiO₂ und weiteren Oxiden (Calciumoxid CaO, Natriumoxid Na₂O, Zirconiumoxid ZrO₂ u.a.), deren genaue Zusammensetzung die chemischen und physikalischen Eigenschaften bestimmt. Beim Düsenziehverfahren – der am meist verbreiteten Herstellungsart von Glasfasern –, wird das Faserglas, das in Form von Pellets oder Kugeln vorliegt, bei Temperaturen von ca. 1400°C geschmolzen. Anschließend gelangt die flüssige Schmelze mithilfe der Schwerkraft zu dünnen Düsen, an denen die Schmelze mit hoher Geschwindigkeit abgezogen wird. Die Höhe der Abzugsgeschwindigkeit bestimmt den Durchmesser der Filamente. Aufgrund der raschen Abkühlung der Glasfasern wird eine Kristallisation unterbunden. Die Anordnung der Moleküle liegt richtungsunabhängig vor, woraus eine Isotropie der Materialeigenschaften resultiert (Freudenberg 2011).

Ein wesentlicher Nachteil von Glasfasern ist die geringe Beständigkeit im basischen Milieu des Betons. Dieser Nachteil kann z.t mit der Zugabe von Zirconiumoxid ZrO₂ im Herstellprozess ausgeglichen werden, wodurch alkaliresistentes (AR) Glas entsteht. Entgegen dem Namen wird zwar keine vollständige Beständigkeit erzielt, jedoch kann eine wesentliche Verbesserung diesbezüglich eingestellt werden. Durch eine zusätzliche Tränkung (siehe Kap. 2.2.5.1) im späteren Textilherstellungsprozess, kann die Beständigkeit noch weiter erhöht werden (Schleser 2008). Wie in Tab. 2.2 ersichtlich geht die höhere Beständigkeit allerdings mit einer Verschlechterung der mechanischen Kennwerte einher.

2.2.2.2 Carbonfasern

Carbonfasern werden vorrangig aus Polyacrylnitril (PAN) oder in geringerem Maße auch aus Pechen oder Viskosen hergestellt. Am Anfang der Prozesskette zur Herstellung von Carbonfasern wird der Precursor⁴ ersponnen. Im weiteren Verfahren werden

³Zusammengefasst aus Freudenberg (2011)

⁴Als Precursor bezeichnet man in der Chemie den Ausgangsstoff zur Bildung von Kettenmolekülen

2.2 Textilbewehrung

Tab. 2.2: Auswirkung der Zirkoniumoxidzugabe auf die Kennwerte der Glasfasern⁵

Faser	Dichte [g/cm ³]	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [GPa]	Bruchdehnung [mm/m]
E-Glas	2,52....2,60	72....77	3400....3700	33....48
AR-Glas	2,70	76	2000	26

in mehreren Stufen (Streckung, Stabilisierung, Carbonisierung und gegebenenfalls Graphitisierung) die Eigenschaften der Fasern eingestellt. Die Temperatur spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Je nach verwendetem Material und Temperatur in der Carbonisierung bzw. in der Graphitisierung erfolgt eine Beeinflussung zugunsten entweder der Zugfestigkeit oder der Steifigkeit. Ein Überblick über verschiedene Carbonfasertypen und deren mechanischen Eigenschaften wird in Tab. 2.3 gegeben.

Tab. 2.3: Mechanische Eigenschaften unterschiedlicher Carbonfaser-Typen⁶

Faser	Dichte [g/cm ³]	E-Modul [GPa]	Zugfestigkeit [GPa]	Bruchdehnung [mm/m]
HT	1,74....1,80	200....250	2700....3750	12,0....16,0
IM	1,73....1,80	250....400	3400....5900	11,0....19,3
HM	1,76....1,96	300....500	1750....3200	3,5....10,0
HST	1,78....1,83	230....270	3900....7000	17,0....24,0

(HT)...High Tensile (IM)...Intermediate Modulus

(HM)...High-Modulus (HST)...High Strain and Tenacity

Carbonfasern sind aus zahlreichen Graphitschichten aufgebaut, die entlang der Faserlängsrichtung orientiert sind. Die chemische Bindung der Kohlenstoffatome in Längsrichtung ist eine kovalente Bindung, wohingegen die Graphitschichten in Querrichtung durch schwach wirkende van-der-Waal'sche Kräfte interagieren. Aufgrund dessen ist allen Carbonfasern ein stark anisotropes Materialverhalten gemeinsam, welches sich durch hohe Festigkeiten in Faserlängsrichtung und eine hohe Druckempfindlichkeit in Faserquerrichtung kennzeichnet (Freudenberg 2011).

Neben den ausgezeichneten Materialeigenschaften in Faserlängsrichtung und der geringen Dichte (ca. 1/4 von Stahl) verfügt Carbon über zahlreiche weitere Vorteile. Allen voran ist Carbon im Gegensatz zu AR-Glas korrosionsbeständig (ebd.). Auch konnte nachgewiesen werden, dass selbst bei hohen Belastungen kein Kriechen der Faser auftritt (Böder et al. 1980). Für einen Einsatz als Bewehrung in Betonbauteilen kommen primär HT-Fasern zum Einsatz. Dies liegt vor allem an den geringen Kosten im Vergleich zu anderen Carbonfasertypen. Zusätzlich weisen sie hohe Bruchdehnun-

⁵Zusammengefasst aus Freudenberg (ebd.), auf Basis von (Wulfhorst, Kaldenhof et al. 1993; Faulstich und Mally 1993; Butler et al. 2009)

⁶Zusammengefasst von Freudenberg (2011), auf Basis von (Flemming et al. 1995; Michaeli und Wegener 1989; Neitzel und Mitschang 2004; Wulfhorst und Becker 1989; Ehrenstein 2006)

gen auf, die eine ausreichende Verformungskapazität im Traglastzustand erlauben (Curbach und Jesse 2009).

2.2.3 Einfachgarn

Aus den Fasern werden im nächsten Prozessschritt Einfachgarne bzw. in weiterer Folge auch Mehrfachgarne hergestellt. Diese müssen für die Weiterverarbeitung zu textilen Halbzeugen eine gute Verarbeitbarkeit aufweisen. Für die Herstellung von textilen Bewehrungsstrukturen eignen sich nach heutigem Stand der Technik, da vorwiegend getränkte Textilien als Bewehrung verwendet werden, insbesondere glatte Multifilamentgarne, welche aus zahlreichen gestreckten Filamenten im Anschluss an die Primärspinnerei gebündelt werden. Vor dem Bündeln wird, wie bereits erwähnt, durch das Aufbringen einer Schlichte die Weiterverarbeitung verbessert. Da die Filamente in gestreckter Lage vorliegen, weisen die Faserstränge ähnliche mechanische Eigenschaften wie die Filamente auf. Zusätzlich kann durch die gestreckte Lage der Faserstränge das Tränkungsmedium, welches im späteren Herstellungsverlauf (siehe Kap. 2.2.5.1) aufgebracht wird, besser in den Garn eindringen. Zahlreiche Weiterverarbeitungsmethoden sowohl für Einfachgarne als auch Mehrfachgarne, mit denen in der Vergangenheit versucht wurde den Verbund zum umliegenden Beton beim Einsatz als Bewehrung zu verbessern (u.a. Friktionsspinnen, Cablieren, Zwirnen), haben in Zusammenhang mit einer vollständigen Tränkung der Garne an Bedeutung verloren und werden in weiterer Folge nicht behandelt.

Im Bauwesen hat sich für glatte, ungedrehte Multifilamentgarne der Begriff Roving eingebürgert (Cherif 2011). Vorwiegend werden Rovings ab einer Feinheit von 300 tex hergestellt. Für den Inhalt dieser Arbeit sind in weiterer Folge vor allem Heavy Tows aus Carbon von großem Interesse. Diese beschreiben einen Roving mit einer sehr hohen Filamentanzahl (derzeit ab einer Filamentanzahl >24.000). Insbesondere in wirtschaftlicher Hinsicht ergeben sich hier Vorteile, da aufgrund der großen Faserquerschnittsfläche hohe Tragfähigkeiten erzielt werden können (Curbach und Jesse 2009).

2.2.4 Textile Halbzeuge

Um flächige Strukturen zu erzeugen werden Einfachgarne bzw. Mehrfachgarne in einem weiteren Prozessschritt zu textilen Halbzeugen in Form von textilen Flächengebilden verarbeitet. Es existieren zahlreiche Verfahren, um diese Flächengebilde zu erzeugen. Diese reichen von Verkreuzungen der Einzelgarne (Gewebe, Geflechte) hin zur Ausbildung von Fadenschlaufen (Gestricke, Gewirke). Der Herstellungsprozess stellt dabei hohe Anforderungen an die Ausgangsmaterialien, da diese einerseits eine gute textile Verarbeitbarkeit aufweisen müssen (gedrehte Filamente weisen hier Vorteile auf) andererseits aber eine gute Imprägnierbarkeit gewährleisten müssen (gerade, ungedrehte Direktrovings weisen hier Vorteile auf) (Lehmann und Herzberg 2011). Des Weiteren müssen die entstehenden Flächengebilde über eine offene Struktur verfügen, um ein Durchdringen der Bewehrungsstruktur mit Beton zu gewährleisten, und eine hohe Verschiebesteifigkeit aufweisen. Diese zum Teil widersprüchlichen

Anforderungen geben Spielraum für verschiedene Arten von Herstellungsmethoden. Im Wesentlichen durchgesetzt hat sich bis dato aber das nähgewirkte Gelege (Kap. 2.2.4.1). Die Vorteile dieser Herstellungsmethode, die im Folgenden näher beschrieben werden, liegen einerseits darin, dass die Verstärkungsfasern in gestreckter Lage vorliegen, wodurch eine effiziente Ausnutzung der Materialien ermöglicht wird, und andererseits in der großen Flexibilität in der Orientierung und Anordnung der Verstärkungsfasern zueinander. Neben den Gelegen wird weiters noch kurz auf gestickte Halbzeuge (Kap. 2.2.4.2) eingegangen, da sich hier interessante Möglichkeiten vor allem für räumliche Bewehrungsstrukturen ergeben können.

2.2.4.1 Gewirkte Halbzeuge

Unter Gewirken versteht man durch Maschenbildung von Fadensystemen erzeugte textile Halbzeuge⁷. Dabei besteht die Möglichkeit parallele Fadenscharen, die in gestreckter Form vorliegen, einzubinden. Diesen Umstand macht man sich bei der Herstellung von Textilbewehrungen zunutze. Hierbei dienen die Wirkfadensysteme hauptsächlich zum Fügen der Fadenscharen aus Verstärkungsfasern zu einer flächigen Struktur (im Falle von Textilbewehrung vorzugsweise Fadenscharen bestehend aus Rovingen).

Beim Kettenwirken werden dazu die Rovinge vorab auf einer Verlegestation eingebracht (gelegt). Die Orientierung der Rovingscharen kann dabei in beliebigen Grenzen variiert werden. Von Kettrovungen spricht man, wenn ihre Orientierung in Produktionsrichtung der Maschine verläuft. Die quer dazu liegenden Rovinge werden als Schussrovinge bezeichnet. Es können bis zu sieben Lagen an Rovingen, die in unterschiedlichen Richtungen zueinander orientiert sind, in den vollautomatisierten Anlagen abgelegt werden. Das entstehende Gelege wird im nächsten Prozessschritt durch die eingangs beschriebenen Wirkfadensysteme zu einem flächigen Gebilde gefügt. Bei Vorhandensein von zwei Rovingscharen spricht man von biaxialen Gelegen (üblicherweise sind die Rovinge in 0° und 90° orientiert), bei mehreren Rovingscharen von multiaxialen Gelegen (Younes et al. 2015).

Eine wesentliche Anforderung an textile Gelege ist, dass eine gute Durchlässigkeit des Betons zwischen den Rovingscharen der Bewehrung gegeben ist. Es existieren verschiedene Bindungsarten der Wirkfadensysteme, die diesem Anspruch unterschiedlich gerecht werden. Die Fransebindung erfüllt diese Anforderung am besten, da sie keine Querverbindungen zwischen den Rovingen aufweist. Die geringere Verschiebesteifigkeit der Fransebindung wird durch die in den folgenden Prozessschritten aufgetragene Imprägnierung kompensiert. Durch die Bindung wird der Querschnitt an den Bindungsstellen kompaktiert, wodurch wiederum ein Einfluss auf das Verbundverhalten zu beobachten ist. Diese Aspekte werden noch ausführlich in Kapitel 2.4 diskutiert. Weiters ist darauf zu achten, dass die Rovinge in gestreckter Form vorliegen, damit gute mechanische Eigenschaften erzielt werden können (hohe Steifigkeit, hohe Festigkeit).

⁷Gewirke gehören wie die Gestricke zu den Maschenwaren. Anders als beim Stricken können beim Wirken mehrere Fadensysteme gleichzeitig zu Maschen umgeformt werden (nähere Informationen dazu siehe auch (Hausding und Märtin 2011))

2.2.4.2 Gestickte Halbzeuge

Rovinge die aus Hochleistungsfasern hergestellt werden sind sehr energieintensiv und teuer in der Herstellung. Um die Materialien optimal auszunutzen und somit ökologisch und ökonomisch sinnvoll einzusetzen, ist es zielführend, die Fasern entsprechend der Hauptbeanspruchungsrichtung zu orientieren. Die Sticktechnik bietet hierbei weitreichende Möglichkeiten, um die Faser bedarfsgerecht anzuordnen. Grundsätzlich wird beim Sticken ein Muster mit einem Stickfaden auf einen Stickgrund aufgebracht. Mit der Tailored Fibre Placement (TFP) Methode kann zusätzlich noch ein Funktionsmaterial (im Fall einer Textilbewehrung ein Roving) durch den Stickfaden auf dem Stickgrund befestigt werden. Die Verstärkungsfasern können dabei in Orientierung und Menge angepasst werden. Weitere interessante Möglichkeiten bieten sich für dreidimensionale Strukturen. Durch Anbringen mehrerer Lagen an Rovingen auf dem Stickgrund kann nach Fertigstellung und Abtrennung des Stickgrundes die räumliche Struktur aus der zweidimensional gestickten Struktur einfach entwickelt werden (siehe dazu Schade (2011)). Nachteilig am Sticken ist die geringe Produktivität im Vergleich zum bereits genannten Kettenwirken und auch anderen textilen Verarbeitungsmethoden. Dennoch kann auch hier das lokale Verstärken von z.B. biaxialen Gelegen mit der Sticktechnik ein interessantes Einsatzgebiet darstellen. Das biaxiale Gelege wird vorab mit hoher Produktivität hergestellt, um anschließend die einzelnen Rovinge durch lokale Verstärkungen, welche mit der Sticktechnik aufgebracht werden, effizient auszunutzen. In Österreich hat sich vor allem in Vorarlberg⁸, aufgrund der sehr langen Erfahrung in der Textilindustrie, großes Know-How gebildet. Derzeit wird in einem Forschungsprojekt an der Markteinführung von gestickten Textilien gearbeitet (Egger und Walth 2019).

2.2.5 Textile Bewehrung

Die Anforderungen an textile Bewehrungen sind weitreichend. Essentiell für einen ökonomisch und ökologisch sinnvollen Einsatz von Textilbewehrungen aus Hochleistungsmaterialien ist eine gute Ausnutzung der Ausgangsmaterialien. In diesem Zusammenhang hat sich vor allem eine Tränkung (detailliert behandelt in Kap. 2.2.5.1) der textilen Halbzeuge mit Kunststoffmatrices, im Anschluss an die textile Flächenbildung, als besonders effektiv herausgestellt. Nach dem Auftrag des Tränkungsmaterials besteht die Möglichkeit, die Textilien in einem Umformprozess in eine gewünschte dreidimensionale Form zu bringen (siehe dazu Kap. 2.2.5.2). Nach der Fixierung und Aushärtung können die fertigen Textilien konfektioniert werden. Im Zuge des bereits erwähnten Forschungsprojektes C³ wird derzeit an einem automatisierten Prozess gearbeitet⁹, der all diese Schritte beinhaltet.

⁸Vorarlberg hatte über lange Zeit eine sehr dominante Textilindustrie, die in den Spitzenzeiten über 70 Prozent aller Einwohner beschäftigte. Infolge der Auslagerung von immer mehr Produktionen in Billiglohnländern hat eine sehr starke Spezialisierung auf technische Textilien stattgefunden (Egger und Feix 2017)

⁹Teilprojekt C3-V1.1 | Textile Preformgitter und deren Handling im Carbonbetonbau (Hahn 2018)

2.2.5.1 Imprägnieren

Werden Filamente zu Faserbündeln zusammengefasst entstehen Hohlräume zwischen den Filamenten. Selbst bei Verwendung sogenannter Feinkornbetone¹⁰ kann der Beton nicht in diese Hohlräume eindringen. Als Konsequenz stehen nur die äußeren Filamente des Faserbündels in direktem Verbund mit dem umgebenden Beton. Die inneren Filamente werden lediglich über Reibung zu geringen Teilen an der Lastabtragung beteiligt. Daraus resultiert eine sehr ungleichmäßige Spannungsverteilung innerhalb des Rovingquerschnittes und eine ineffiziente Ausnutzung der Hochleistungsfilamente. Deshalb ist man dazu übergegangen die Rovings nach der textilen Flächenbildung mit einer Imprägnierung¹¹ aus Kunststoffen zu versehen. Diese dringt vollständig in den Roving ein und sichert im ausgehärteten Zustand den Verbund zwischen den einzelnen Filamenten. Im Vergleich zu ungetränkten Textilien ergeben sich dadurch wesentlich höhere Steifigkeiten und Festigkeiten (Siehe Abb. 2.3). Die Tränkung hat weiters auch wesentlichen Einfluss auf die Biegesteifigkeit und die transversale Steifigkeit der Textilien. Es kann eine stabile Form mit einer ausreichenden Verschiebesteifigkeit in den Knotenpunkten gewährleistet werden. Zudem wird durch die erhöhte transversale Steifigkeit der Verbund zum umgebenden Beton maßgebend beeinflusst (siehe dazu auch Kap. 2.4.4)

Als Tränkung kommen unterschiedliche Materialien zur Anwendung. Diese müssen zahlreichen Anforderungen gerecht werden. Insbesondere sollten sie ein gutes Eindringvermögen in den Roving aufweisen, dh. eine niedrige Viskosität besitzen, und sich durch eine gute Benetzbarkeit der Filamente auszeichnen. Zur Übertragung von Verbundkräften müssen sie eine hohe Kohäsionsfestigkeit aufweisen. Zudem ist eine hohe Steifigkeit im ausgehärteten Zustand vorteilhaft. Zusätzlich müssen sie dauerhaft sein und eine ausreichende Temperaturbeständigkeit aufweisen (Schleser 2008). Gängige Kunststoffsysteme, die auf Basis dieser Anforderungen Verwendung als Matrixmaterial bei textilen Bewehrungen finden sind nachfolgend angeführt. Entsprechend der Unterteilung in Schleser (ebd.) werden diese in reaktive Harze und Dispersionen eingeteilt. Je ein Vertreter dieser Kategorien ist mit den entsprechenden mechanischen und physikalischen Eigenschaften in Tab. 2.4 angeführt.

Reaktive Harze bestehen aus einem reaktiven Grundharz und einem Härter. Werden die beiden Komponenten vermischt, liegt das Material zuerst in flüssiger Form vor. Je nach verwendetem Härter erfolgt die Härtung dann entweder unter Raumtemperatur (Kalthärtung) oder unter erhöhten Temperaturen (Warmhärtung). Für die Herstellung von Textilbewehrungen wird in vielen Fällen

¹⁰Als Feinkornbeton bezeichnet man Betone mit einem Größtkorn $\leq 4\text{mm}$ (Curbach und Jesse 2009)

¹¹Als Imprägnierung bezeichnet man die vollständige Durchtränkung eines Rovings, wohingegen eine Beschichtung nur den oberflächennahen Auftrag einer Schlichte beschreibt. Obwohl bei Textilbewehrungen eine vollständige Durchtränkung des Rovings angestrebt wird hat sich in der Literatur fachlich nicht ganz korrekt der Terminus Sekundärbeschichtung als Imprägnierung eingebürgert, auch in Hinweis darauf dass bereits eine primäre Schlichte auf die Fasern direkt im Anschluss an die Primärspinnerei aufgetragen wird. Für die vorliegende Arbeit wird der Terminus Tränkung synonym für die Imprägnierung verwendet und von einer Verwendung des Terminus Sekundärbeschichtung Abstand genommen

Tab. 2.4: Eigenschaften gängiger Tränkungsmaterialien¹²

Tränkung	Dichte [g/cm ³]	E-Modul [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Bruchdehnung [mm/m]
Epoxidharz	1,90	2600....3700	4....176	18....130
Styrol-Butadien	1,05	1800....2500	26....38	250....600

Epoxidharz als Tränkungsmaterial verwendet. Epoxidharze sind im ausgehärteten Zustand den Duroplasten zuzuordnen. Die Härtung erfolgt durch Polyaddition¹³. Da es unzählige Kombinationsmöglichkeiten aus Grundharzen und Härtern gibt, lässt sich feststellen, dass die verwendeten Materialien von Hersteller zu Hersteller variieren. Da die Wahl des Grundharzes und der Härter die Materialeigenschaften des Endproduktes beeinflusst, geben die Hersteller dementsprechend wenig über ihre Tränkungsmaterialien preis. Im Allgemeinen kann jedoch festgehalten werden, dass Epoxidharz ein sehr gutes Eindringvermögen in den Rovingquerschnitt besitzt und im ausgehärteten Zustand ein sehr steifes Materialverhalten aufweist. Dadurch erzielen im Vergleich zu anderen Tränkungsmaterialien epoxidharzgetränkte Textilien die besten mechanischen Kennwerte. Zusätzlich können aufgrund des steifen Materialverhaltens sehr gut vorgeformte Textilien hergestellt werden (siehe dazu Kap. 2.2.5.2) (Kulas 2013).

Polymerdispersionen bezeichnen stabile Dispersionen von Polymerpartikel in einer wässrigen Phase. Häufig verwendet für textile Bewehrungen wird Styrol-Butadien-Copolymer (SBR), bei dem Butadien in Styrol als disperse Phase vorliegt. Dabei weist die Dispersion einen hohen Butadien Anteil auf, wodurch nach der Polymerisation eine Kautschukmatrix mit darin dispergierter Polystyrol-Phase entsteht. Man spricht in diesem Fall auch von Synthesekautschuk, welches den Elastomeren zugeordnet wird. Die Polymerisation kann als Emulsionspolymerisation¹⁴ bei 5°C (Kaltpolymerisation) oder unter Zufuhr von Wärme (Warmpolymerisation) erfolgen. Bei der Warmpolymerisation wird der entstehende Synthesekautschuk weniger elastisch (Kulas 2013; Benedix 2006; H. Hund und R. D. Hund 2011).

Die Eigenschaften von Styrol-Butadien unterscheiden sich wesentlich von denen des Epoxidharzes. Es ist im ausgehärteten Zustand weniger steif, wodurch es biegsam und zum Teil auch formbar bleibt. Textilien getränkt mit Styrol-Butadien können in Rollen gewickelt und als Rollenware auf die Baustelle geliefert werden. Die erzielbaren Festigkeiten und Steifigkeiten sind niedriger als bei epoxidharzgetränkten Textilien, jedoch ist im Vergleich zu ungetränkten Textili-

¹²Zusammengefasst von Kulas (2013), auf Basis von Domininghaus (2012) und Ehrenstein (2006)

¹³Als Polyaddition bezeichnet man eine Reaktion von Monomeren miteinander zu Polymeren. Es entstehen keine Reaktionsnebenprodukte

¹⁴als Emulsionspolymerisation bezeichnet man eine radikalische Polymerisation von Monomeren zu einer Polymerdispersion. Die Monomere liegen vor der Reaktion in einer wässrigen Phase vor

en auch hier eine wesentliche Verbesserung der mechanischen Kennwerte erzielbar. Ein Nachteil von SBR ist die geringe Wärmebeständigkeit. Als Alternative kann für die Tränkung von Textilien Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymere (ASA) verwendet werden. ASA besteht aus einem Styrol-Acrylnitril-Polymer, in dem Acrylester Anteile dispers vorliegen. Dieser Kunststoff ist ebenfalls den Styrol-Polymeren zuzuordnen und zeichnet sich durch eine höhere Witterungs- und Wärmebeständigkeit, sowie eine höhere Zähigkeit aus. Für den Einsatz bei textilen Bewehrungen ist insbesondere die höhere Wärmebeständigkeit von Interesse. Neben Dispersionen auf Basis von Styrol existieren Polymerdispersionen auf Basis von Acrylat. Diese können aufgrund der hohen Verfügbarkeit der zugrundeliegenden Ester in großer Bandbreite auf die geforderten Eigenschaften der textilen Bewehrung eingestellt werden (Schleser 2008).

Um die Textilien zu tränken stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Besonders geeignet für den Auftrag einer Tränkung bei textilen Bewehrungen ist das Imprägnierverfahren. Dabei wird über eine Tauch-Quetsch Vorrichtung, die als Foulard bezeichnet wird, eine gute Materialdurchtränkung erreicht. Zu Anfangs wird der textile Werkstoff durch eine Wanne geführt, die mit dem entsprechenden Imprägniermittel (Flotte) gefüllt ist. Im Anschluss wird das getränkte Textil durch ein Walzenpaar geführt, wobei durch Abquetschen der textilen Bewehrung das Imprägniermittel gleichmäßig in den Rovingquerschnitt eingepresst und überschüssiges Material entfernt wird (H. Hund und R. D. Hund 2011). Nach dem Weitertransport erfolgt die Aushärtung der Imprägnierung entweder direkt im Anschluss oder nach einer im nächsten Kapitel beschriebenen Formgebung der textilen Struktur. Das ausgehärtete Textil kann abschließend je nach Imprägnierstoff entweder auf Rollen gewickelt oder in Mattenware konfektioniert werden.

2.2.5.2 Prepreg

Mit den bereits beschriebenen Herstellungsverfahren für textile Bewehrungen können flächige Ausgangsprodukte geschaffen werden. Speziell für komplexe Bauteilgeometrien bzw. Kraftverläufe sind dreidimensionale Formbewehrungen aber vorteilhaft. Im konventionellen Stahlbetonbau kann ein den Anforderungen entsprechender dreidimensionaler Bewehrungskorb, durch Biegen des Bewehrungsstahls und mechanische Verbindung der einzelnen Stäbe untereinander, hergestellt werden. Für textile Bewehrung in Form von bi- oder multiaxialen Gelegen ist diese Modifikation nicht ohne weiteres möglich. Eine Formgebung muss bereits im Rahmen der textilen Herstellung stattfinden.

Für die derzeitig nach Stand der Technik verwendeten getränkten textilen Bewehrungen erfolgt die Formgebung im Anschluss an die Imprägnierung. Dazu müssen die getränkten Textilien nach dem Tränkungsprozess weiterhin formbar bleiben. Möglich ist dies durch sogenannte Prepregs¹⁵. Bei Prepregs erfolgt die Tränkung der Textilien mit Beschichtungssystemen, deren Aushärtung stark verzögert erst unter erhöhten Temperaturen (warmhärtend) abläuft (Diestel und Hausding 2011). Für

¹⁵Abkürzung aus der englischen Bezeichnung preimpregnated fibers

die Formgebung wird das Prepreg-Textil in Form gebracht. Dies geschieht z.B. über eine Stahlschalung, in die das Prepreg-Textil gelegt wird. Um ein Verformen der Bewehrung (Wellenschlag) im Aushärtungsprozess zu vermeiden, wird das Textil an der freien Oberfläche mit einer zweiten Schalung fixiert. Im nächsten Prozessschritt erfolgt der eigentliche Aushärtungsprozess durch Zufuhr von Wärme (entweder direkt über Beheizen der Stahlformen oder indirekt durch Einbringen der textilen Struktur mitsamt der Schalung in einen Ofen) (Kulas 2013; Janetzko 2013).

Als Nachteil ist anzuführen, dass Formbewehrungen im Gegensatz zu flächigen Textilien eine geringere Festigkeit und Steifigkeit aufweisen. Dies lässt sich auf die zusätzlichen Prozessschritte und die damit einhergehenden zusätzlichen Filamentschädigungen zurückführen. Des Weiteren liegen aufgrund des Formgebungsprozesses nicht mehr alle Filamente in den Rovingen in einer gestreckten Lage vor. Dadurch ergibt sich eine unterschiedliche Materialbeanspruchung in den Rovingen. Grundsätzlich ist aber anzumerken, dass durch die Tränkung die dreidimensionale Bewehrung formstabil ist. Dadurch wird ermöglicht, auch im Textilbeton komplexe Geometrien und Kraftverläufe effektiv abzubilden. Die daraus entstehenden Vorteile wiegen in vielen Fällen die Nachteile auf.

2.2.6 Charakterisierung der textilen Bewehrung

2.2.6.1 Strukturelle Charakterisierung

Der Aufbau der textilen Bewehrung kann strukturell anhand der räumlichen Ausdehnung der Verstärkungsfäden (Rovinge) charakterisiert werden. Im Unterschied zu einer rein geometrischen Charakterisierung ist hierbei ausschließlich das räumliche Erscheinungsbild der Verstärkungsfäden von Interesse, da diese im Einbauzustand die Aufgabe der Bewehrung übernehmen (allfällige Wirkfäden dienen zur Stabilisierung der Bewehrung, beteiligen sich im Bauteil aber nicht am Lastabtrag).

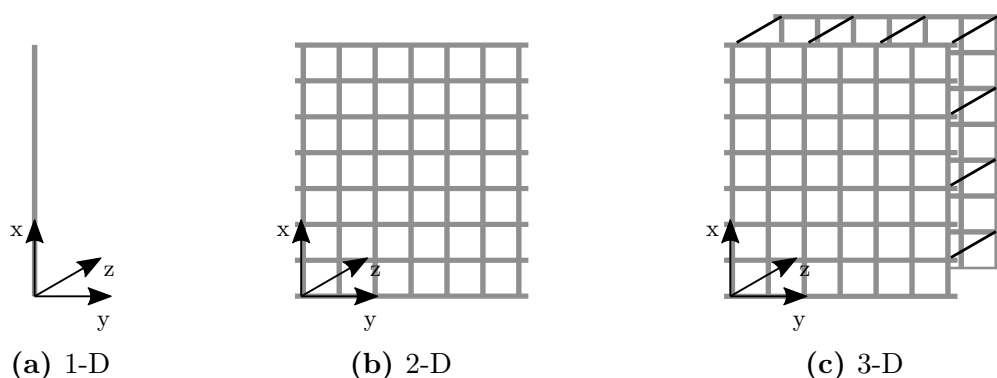


Abb. 2.2: Einteilung textiler Bewehrungsstrukturen anhand der räumlichen Ausdehnung der Verstärkungsfasern

Je nach Dimension der räumlichen Erstreckung der Verstärkungsfasern unterscheidet man zwischen 1-dimensionalen (einzelner Faserstrang), 2-dimensionalen (bi-oder

multiaxiale Gelege) und 3-dimensionalen (multiaxiale Gelege mit Verstärkung in z-Richtung) Strukturen. Abb. 2.2 gibt diesbezüglich einen Überblick.

2.2.6.2 Geometrische Charakterisierung

Im Vergleich zu konventioneller Stahlbewehrung ergeben sich einige Unterschiede in der geometrischen Charakterisierung der Bewehrung. Da der Rovingquerschnitt aus zahlreichen Einzelfilamenten aufgebaut ist, ergibt sich auf Mesoebene kein homogener Querschnitt. Zwischen den einzelnen Filamenten sind Hohlstellen, die mit Luft, bzw. im Fall von getränkten Textilien mit Matrixmaterial gefüllt sind, welche sich nicht bzw. nur gering am Lastabtrag beteiligen. Die Angabe der Bruttoquerschnittsfläche auf Basis der Außenabmessungen (inkl. aller Hohlräume bzw. Matrixmaterial) wird dem inhomogenen Querschnitt nicht gerecht. Aufgrund dessen wird die in der Textilindustrie übliche Feinheit mit der Maßeinheit *tex* als Eingangsgröße verwendet. Die Faserquerschnittsfläche als Nettoquerschnittsfläche, die benötigt wird für die Bestimmung der Materialkennwerte (Spannung, Dehnung, etc...), lässt sich in weiterer Folge einfach aus dieser Maßeinheit ableiten.

Feinheit ist ein textilphysikalische Größe, die zur Charakterisierung von Textilien herangezogen wird. Aufgrund der unregelmäßigen Oberfläche mancher Fasermaterialien, ist eine Angabe des Umfangs der Filamente nicht zielführend. Deshalb wurde die Feinheit (Gl. 2.1) als Maßeinheit eingeführt, die das Verhältnis von Gewicht zu Länge wiedergibt und so eine direkte Vergleichbarkeit unterschiedlicher Fasern und in weiterer Folge auch Rovingquerschnitte zulässt.

$$T_t = \frac{m}{l} \quad (2.1)$$

mit:

$$\begin{aligned} T_t &= \text{Feinheit des Garns [tex]} \\ m &= \text{Gewicht des Garns [g]} \\ l &= \text{Länge des Garns [km]} \end{aligned}$$

Übliche Garnfeinheiten für Textilbewehrungen liegen im Bereich von 800 bis 2400 *tex*. Vor allem für Carbonbewehrungen sind aber auch höhere Garnfeinheiten von Interesse. Überschreiten diese eine Feinheit von 2400 *tex* spricht man von Heavy Tows (Lehmann und Herzberg 2011). Diese Garne sind günstiger in der Herstellung und weisen aufgrund der höheren Faserquerschnittsfläche eine höhere Bruchkraft auf. Dadurch lassen sich Betonbauteile mit einer hohen Tragfähigkeit realisieren (Curbach und Jesse 2009).

Faserquerschnittsfläche (Nettoquerschnittsfläche) gibt im Gegensatz zur Bruttoquerschnittsfläche nur die Querschnittsfläche der Fasern wieder (exkl. Hohlräume bzw. Matrixmaterial). Eine direkte Ermittlung der Faserquerschnittsfläche ist nicht möglich. Die Ermittlung erfolgt deshalb indirekt, in dem die Garnfeinheit durch die Rohdichte des Fasermaterials dividiert wird (Gleichung

2.2). Beide Parameter sind physikalisch eindeutig bestimmbar. Die Faserquerschnittsfläche der Bewehrung ist für die weitere Bestimmung der Festigkeit bzw. Steifigkeit des Bewehrungssystems erforderlich.

$$A_F = \frac{T_t \cdot 10^{-3}}{\rho} \quad (2.2)$$

mit:

$$\begin{aligned} A_F &= \text{Faserquerschnittsfläche (Nettoquerschnittsfläche) des Garns [mm}^2\text{]} \\ \rho &= \text{Dichte des Fasermaterials [g/cm}^3\text{]} \end{aligned}$$

Garnumfang ist für Textilbewehrungen als ein von der Faserquerschnittsfläche unabhängiger Kennwert zu betrachten. Anders als bei der Querschnittsfläche ist hier der Umfang des imprägnierten Garns (Bruttoquerschnitt) von Interesse, da der Garnumfang in weiterer Folge wichtig für die Ermittlung der an der Grenzfläche zwischen Textil und Beton wirkenden Verbundspannungen ist. Je nach Herstellungsart der Textilien können die Garne unterschiedliche Formen aufweisen. Für gewirkte Gelege stellt sich im Regelfall aufgrund des Wirkfadens eine elliptische Form ein. Hausding (2010) schlägt für die Berechnung des Ellipsenumfangs die Näherungsformel nach Ramanujan vor (siehe Gl. 2.3).

$$u_r \sim (a + b) \cdot \pi \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot \lambda^2}{10 + \sqrt{4 - 3 \cdot \lambda^2}} \right) \quad (2.3)$$

mit:

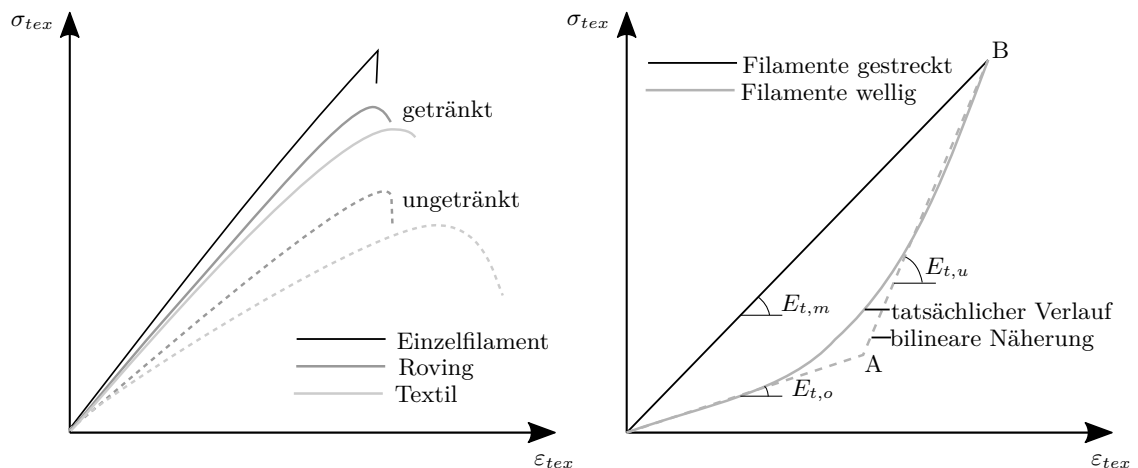
$$\begin{aligned} u_r &= \text{Umfang des Rovings} \\ a, b &= \text{Ellipsenhalbachsen (a > b)} \\ \lambda &= (a - b) / a + b \end{aligned}$$

Im Zuge dieser Arbeit wurden zur genauen Bestimmung des Garnumfangs Laserscans an ausgewählten Textilien durchgeführt. Dadurch kann der Umfang direkt bestimmt und ausgelesen werden. Nähere Informationen dazu sind in Kapitel 3.3.1.1 zu finden. Für die Parameterstudie in Kap. 4 wird aber wiederum auf diese Näherungslösung zurückgegriffen.

2.2.6.3 Mechanische Charakterisierung

Für die mechanische Charakterisierung der Bewehrung sind repräsentative Materialeigenschaften von Interesse. Für den Einsatz der textilen Struktur als Bewehrung in Beton sind die Zugfestigkeit und die Steifigkeit maßgebende Kennwerte. Diese Faktoren hängen wesentlich von den Ausgangsmaterialien, den Bearbeitungsmethoden und der Beschichtung ab. Im Vergleich zu Monofilamenten nehmen die Zugfestigkeit und die Steifigkeit mit jedem weiteren Bearbeitungsschritt ab. Die Abnahme entsteht im wesentlichen einerseits durch ungleiche Filamentdehnungen und andererseits durch

Filamentschädigungen, die aufgrund des Bearbeitungsprozesses entstehen. Werden die Textilien mit einer Kunststoffmatrix getränkt, kann im Vergleich zu ungetränkten Textilien dieser Festigkeits- und Steifigkeitsverlust wesentlich reduziert werden (siehe Abb. 2.3a). Je nach verwendetem Tränkungsmaterial und Imprägnierungsgrad kann eine Kraftübertragung auch über Fehlstellen hinweg gewährleistet werden. Zusätzlich ist auf eine möglichst gestreckte Lage aller Filamente zu achten, da sich sonst ein nichtlinearer Verlauf der $\sigma - \varepsilon$ Beziehung ergibt, aus dem vor allem bei geringen Laststufen eine größere Dehnung resultiert (siehe Abb. 2.3b).



(a) Einfluss des Bearbeitungsgrades und (b) Einfluss der Filamentwelligkeit¹⁷ (über-
der Tränkung¹⁶ holt dargestellt)

Abb. 2.3: Einfluss der Tränkung und Fertigung auf die Festigkeit und Steifigkeit

Die Prüfung der Festigkeit und der Steifigkeit erfolgt in der Textilindustrie in der Regel nach ISO 3341 (2000), indem die Garne an ihren Enden geklemmt und über Umlenkrollen zum Messfeld geführt werden. Für getränkte Textilien mit steifer Imprägnierung, wie dies z.B. bei Epoxidharz der Fall ist, kann eine Umlenkung nach diesem Verfahren nicht bewerkstelligt werden. Da eine direkte Klemmung eines geraden Faserstranges in der Prüfmaschine, aufgrund der Querdruckempfindlichkeit der Bewehrung, ebenfalls nicht möglich ist, wird im Regelfall der beschichtete Faserstrang an den Enden in ein Hüllrohr bzw. eine Hülse eingeklebt, welche dann in die Prüfmaschine geklemmt wird (Hinzen 2017). Dadurch ist eine zuverlässige Bestimmung der Materialkennwerte möglich. Nachteilig an diesem Verfahren ist der hohe Aufwand durch die Klebung an beiden Enden. Aufgrund dessen wurden Bestrebungen in die Entwicklung von praxistauglichen Prüfmethode unternommen. Als Ergebnis ist in Hinzen (ebd.) eine Klemmvorrichtung vorgestellt, die eine direkte Lasteinleitung und anschließende Prüfung des Textils, ohne vorherige Klebung der Faserstränge, ermöglicht. Dadurch kann schnell und zuverlässig eine Prüfung der Faserstränge erfolgen.

¹⁶Bild erstellt in Anlehnung an Lorenz (2014), auf Basis von Offermann et al. (2001) und Cherif (2011)

¹⁷Bild erstellt in Anlehnung an Kulas (2013)

Zugfestigkeit Die Bestimmung der Garnzugfestigkeit erfolgt nach Gleichung 2.4. Aufgrund des inhomogenen Aufbaus der Garne ergibt sich eine Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der geprüften Faserlänge. Die Zugfestigkeit wird in weiterer Folge für die Dimensionierung und Bemessung von textilbewehrten Bauteilen benötigt.

$$f_{tex,u} = \frac{F_u}{A_F} \quad (2.4)$$

mit:

$$\begin{aligned} f_{tex,u} &= \text{Bruchfestigkeit des Garns [MPa]} \\ F_u &= \text{Bruchkraft [N]} \\ A_F &= \text{Faserquerschnittsfläche (Nettoquerschnittsfläche) des Garns [mm}^2\text{]} \end{aligned}$$

E-Modul Liegen die Fasern vollständig gestreckt im Garn vor, kann bei getränkten Textilien von einem weitestgehend linearen Verlauf des Elastizitätsmoduls bis zum Bruch ausgegangen werden. Die Berechnung des E-Moduls erfolgt nach Gleichung 2.5

$$E_{tex} = \frac{\sigma_{tex}}{\varepsilon_{tex}} \quad (2.5)$$

mit:

$$\begin{aligned} E_{tex} &= \text{E-Modul [MPa]} \\ \sigma_{tex} &= \text{Textilspannung [MPa]} \\ \varepsilon_{tex} &= \text{Textildehnung [mm/m]} \end{aligned}$$

Rempel und Ricker (2017) konnten in ihren Untersuchungen zeigen, dass für epoxidharzgetränkte Textilien die Verteilungsfunktion der mechanischen Kennwerte einer Standard-Normalverteilung entspricht. Während beim E-Modul der Erwartungswert und die Standardabweichung von der Prüflänge unabhängig sind, zeigt sich hingegen bei der Garnzugfestigkeit eine deutliche Abhängigkeit von der Prüflänge. Der Mittelwert und die Standardabweichung der Garnzugfestigkeit sinken mit zunehmender Prüflänge aufgrund zunehmender Fehlstellen innerhalb der freien Prüfstrecke. Rempel (2018) leitete in weiterer Folge Formeln auf Basis der statistischen Kennwerte her, mit denen diese Reduktion berücksichtigt werden kann. Liegen mehrere Faserstränge nebeneinander, wie dies bei Textilbewehrungen im Regelfall zutrifft, kann auch hier eine Reduktion der Garnzugfestigkeit, durch Serienschaltung der einzelnen Stränge zu einem langen Strang, abgeleitet werden. Versuche belegen die Zulässigkeit dieser Vorgehensweise.

2.3 Feinbetonmatrix

2.3.1 Allgemeines

Mit Textilbeton wird der Gestaltungsspielraum im Betonbau erweitert. Textilbewehrung rostet nicht, wodurch eine Reduktion der Betondeckung möglich ist. Es können somit leichte und schlanke Bauteile in neuen Dimensionen umgesetzt werden. Die Textilbewehrung stellt jedoch spezielle zusätzliche Anforderungen an die Betonmatrix (u.a. zusammengefasst von Lieboldt (2015)):

- gute Durchdringung des engmaschigen Netzes
- gute Verarbeitbarkeit auch bei komplexen Geometrien
- guter Verbund zur Textilbewehrung, bzw. zum Altbeton (bei Verstärkungen)
- geringe Alkalität bei Textilbewehrungen aus AR-Glas

Auf Basis der Anforderungen an die Betonmatrix wurden zahlreiche Betonrezepturen entwickelt, die in der Literatur zu finden sind (z.B. Lieboldt (2015) und Schneider et al. (2017)). Je nach Anwendungsgebiet (Verstärkung, Fertigteil, etc.) kann sich die Zusammensetzung wesentlich unterscheiden. Allen bisher veröffentlichten Rezepturen gemeinsam ist jedoch das geringe Größtkorn von max. 4 mm. Mineralische Matrices mit solch geringem Größtkorn werden üblicherweise als Mörtel bezeichnet (Größtkorn $\leq 4\text{mm}$) (Neitzel und Mitschang 2004). Da die Matrix im Fall von Textilbeton wie ein Konstruktionsbeton behandelt wird, hat sich stattdessen aber, in Anlehnung an das geringe Größtkorn, die Bezeichnung Feinkornbeton durchgesetzt (Curbach und Jesse 2009).

2.3.2 Zusammensetzung und Eigenschaften

Die spezifische Zusammensetzung von Feinkornbeton ergibt sich aus dem jeweiligen Anwendungsfall. Konkrete Spezifizierungen, die dabei für alle Betonmischungen beachtet werden müssen sind nachfolgend angeführt. Prinzipiell lässt sich ähnlich der Konzeptionierung für HPC und UHPC ein Übergang vom konventionellen Drei-Komponentensystem zu einem fünf-Komponenten System, bestehend aus Wasser, Zement, Zuschlag, Zusatzstoffen und Zusatzmitteln feststellen.

Der Größtkorndurchmesser wird in diesem System aufgrund mehrerer Einflussparameter begrenzt. Allen voran muss eine gute Durchdringung des engmaschigen Bewehrungsnetzes gewährleistet werden und ein geringer Abstand zwischen mehreren Bewehrungslagen eingehalten werden können. Zusätzlich weist Textilbeton eine geringe Betondeckung auf, wodurch eine Begrenzung des Größtkorns notwendig werden kann. Als Richtwert wird eine Korngröße von maximal $1/5$ des Rovingabstandes oder $1/3$ der lichten Öffnungsweite zwischen den Rovingen angestrebt (Lieboldt 2015).

Um dem Hochleistungswerkstoff Textilbewehrung gerecht zu werden, wird für die Betonmatrix eine Festigkeit bzw. Dauerhaftigkeit entsprechend einem Hochleistungsbeton angestrebt. Diese Betone zeichnen sich durch eine dichtes Betongefüge

aus. Intensive Überlegungen dazu wurden unter anderem bei der Erforschung und Entwicklung von HPC bzw. UHPC Mischungen angestellt (Larrard und Sedran 1994; Richard und Cheyrezy 1995). Um ein dichtes Korngefüge zu erzielen, ist die Partikelgrößenverteilung z.B. entlang einer Fullerparabel¹⁸ zu optimieren¹⁹. In Kombination mit dem geringen Größtkorn ergeben sich dabei hohe Bindemittelgehalte. Bei der Zusammensetzung des Bindemittels soll aus ökologischer Sicht ein möglichst geringer Portlandzementklinkeranteil angestrebt werden (Schneider et al. 2017). Zusätzlich wirkt sich der geringere Portlandzementklinkeranteil positiv auf die Dauerhaftigkeit von Glastextilien aus, da diese bei hoher Alkalität zu Korrosion neigen. Um die erforderliche Packungsdichte auch bei geringerem Klinkergehalt zu erreichen, ist in weiterer Folge der Wassergehalt zu reduzieren. Dadurch wird der Kapillarporenanteil im ausgehärteten Zustand reduziert und eine sehr homogene Betonmatrix mit einer hohen Packungsdichte erreicht.

Der hohe Bindemittelanteil und der geringe Wassergehalt führt zwangsläufig zu einer Abnahme der Verarbeitbarkeit des Betons. Der Frischbeton weist eine sehr hohe Viskosität auf. Durch Zugabe von Hochleistungsfließmitteln aus Polycarboxylatheter kann diesem Umstand entgegengewirkt werden. Das Fließmittel bewirkt eine Desagglomeration der Feinstoffe durch Verringerung der Oberflächenspannung des Zugabewassers und erhöht somit die Fließfähigkeit und in weiterer Folge die Verarbeitbarkeit des Betons (BASF 2008).

Im Folgenden sind zwei Betonrezepturen, speziell entwickelt für Carbonbeton, aus Schneider et al. (2017) angeführt. Diese wurden im Zuge eines Optimierungsprozesses innerhalb des Projektes C^3 entworfen. Dem Optimierungsprozess vorausgegangen sind Überlegungen in ökologischer, ökonomischer sowie auch technischer Hinsicht. Die erste Betonrezeptur, mit der Bezeichnung NF-1-150-8, ist den hochfesten Betonen zuzuordnen. Die erreichte Festigkeit liegt bei 85,0 MPa. Der Bindemittelgehalt liegt bei 353 kg, bei einem Wassergehalt von 150 kg. Dadurch ergibt sich ein W/B Wert von 0,425. Als Bindemittel kam ein Kompositzement bestehend aus Portlandzementklinker und den Zusatzstoffen Flugasche und Kalksteinmehl zur Anwendung. Der Leimgehalt wurde über zusätzliche Zugabe von Kalksteinmehl gesteuert. Im geringen Korngrößenbereich wurde ein Quarzsand, entsprechend den Anforderungen aus der optimalen Korngrößenverteilung, zugegeben. Im Vergleich dazu wurde beim Beton mit der Bezeichnung HF-2-145-5 dem Kompositzement zusätzlich reaktive Mikrofüller in Form von hüttensandhaltigen Mikrozementen beigemischt. Das Bindemittel weist einen sehr geringen Wasseranspruch auf, wodurch der W/B Wert auf 0,23 reduziert werden kann. Die entstehende Betonmischung hat selbstverdichtende Eigenschaften. Im ausgehärteten Zustand erreicht sie eine mittlere Festigkeit von 136,7 MPa.

Die hier vorgestellten Betone aus Schneider et al. (ebd.) weisen, neben den bereits genannten Eigenschaften, gegenüber Normalbetonen eine bessere Ökobilanz auf. Möglich ist dies aufgrund des geringen Klinkeranteils und der Verwendung von

¹⁸Benannt nach William B. Fuller, der Anfang des 20. Jh systematische Untersuchungen zu Kornzusammensetzungen und deren Packungsdichte durchführte

¹⁹Schneider et al. (2017) optimierten in ihren Untersuchungen die Kornzusammensetzung entlang einer Fullerparabel. Daneben existieren noch andere Modelle zur Erreichung einer möglichst hohen Packungsdichte

Tab. 2.5: Textilbetonrezepturen und zugehörige 28d Druckfestigkeit²⁰

Bestandteile	NF-1-150-8 [kg/m ³]	HF-2-145-5 [kg/m ³]
CEM II/C-M (S-LL) 42,5 R	353	-
BMK-D5-1	-	621
Easyflow IIa	172	-
BCS 413	175	250
Sand 0/2	625	530
Kies 2/8	900	-
Split 2/5	-	837
Wasser	150	145
Fließmittel	8	16
Betondruckfestigkeit 28d [MPa]	85,0	136,7
BMK-D5-1...hochfestes Bindemittelkonzept Deuna 5-1		
Easyflow IIa ...Kalksteinmehl BCS 413 ...Quarzsand		

größtenteils lokal verfügbaren Ressourcen. Bei der Konzeptionierung eigener Betonzusammensetzungen ist auf die im vorigen Kapitel genannten Anforderungen unbedingt Rücksicht zu nehmen, um ähnlich qualitativ hochwertige Betonmatrices mit einer hohen Dauerhaftigkeit und Festigkeit herstellen zu können.

2.3.3 Betonierverfahren

Für die Herstellung von textilbewehrten Bauteilen stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Die passende Herstellungsmethode unterscheidet sich je nach Bauteil und muss gesondert beurteilt werden. Im Folgenden sind vier Fertigungsverfahren nach Brameshuber, Mott et al. (2008) angegeben:

Laminieren Bei diesem Verfahren erfolgt die Einbringung des Feinkornbetons und des Textils lagenweise in die Schalung. Diese Methode ermöglicht die Herstellung flächiger, in der Regel dünnwandiger, Platten oder Scheiben. Als Bewehrung kommen zweidimensionale flächige Textilien zur Anwendung. Vorteil dieser Herstellungsmethode ist der nahezu beliebig einstellbare Bewehrungsgrad durch abwechselndes lagenweises Übereinanderlegen des Betons und der Bewehrung.

Gießen Das Gießverfahren entspricht dem konventionellen Betonieren im Stahlbetonbau. Dabei wird die Textilbewehrung (oftmals bereits fertiger Bewehrungskorb) in die Schalung eingebracht, welche anschließend mit Beton verfüllt wird. Der Abstand der Bewehrung zur Schalung wird mit Abstandhaltern sichergestellt. Gab es hier zu Anfangs, aufgrund mangelhafter Abstandhalter, Probleme in der Herstellung, sind mittlerweile passende Abstandhalter

²⁰Zusammengefasst aus Schneider et al. (ebd.)

käuflich erwerbbar, die zuverlässig und ohne Spuren an der Oberfläche des ausgehärteten Betons zu hinterlassen, die Lage sichern. Um eine stabile Lage zu gewährleisten, müssen die Textilien eine gewisse Steifigkeit aufweisen. Seit dem Aufkommen von getränkten Textilien stellt diese Anforderung im Regelfall kein Problem mehr dar. Großes Augenmerk ist bei dieser Herstellungsmethode auf die Betonrezeptur zu legen, da der Beton entsprechend fließfähig sein muss, um die Schalung vollständig auszufüllen. Bei sehr dichten Bewehrungsnetzen kann es trotzdem vorkommen, dass selbst unter Aufbringung von Rüttelenergie das Bewehrungsnetz nicht vollständig durchdrungen wird. Vorteilhaft bei dieser Herstellungsvariante ist vor allem, dass nahezu beliebige Formen hergestellt werden können, wobei auch dreidimensionale Bewehrungen inkludiert sind.

Spritzen Beim Spritzverfahren wird der Beton unter Druck auf die gewünschte Fläche gespritzt. Ähnlich dem Laminierverfahren erfolgt die Einbringung der textilen Bewehrung lagenweise. Mit dem Spritzverfahren können horizontale und vertikale Bauteile betoniert werden. Als besonderes Einsatzgebiet ergibt sich hier die nachträgliche Verstärkung bzw. Sanierung von Bauteilen bzw. Bauwerken. Das Spritzverfahren stellt insbesondere bei der Herstellung von vertikalen Bauteilen oder bei Anwendung über Kopf (z.B. Verstärkung in der Zugzone) spezielle Anforderungen an die Betonmischung, da sie entsprechend auf der Oberfläche haften muss und sich beim Spritzen nicht entmischen darf. Spritzbetonmischungen zeichnen sich deshalb meist durch eine höhere Thixotropie aus.

Schleudern Das Schleuderverfahren ist ein spezielles Herstellungsverfahren aus dem konventionellen Stahlbetonbau. Durch Schleudern (schnelles Rotieren) der Betonmischung um eine Längsachse wird der Beton verdichtet. Während des Schleudervorgangs wird der Beton an die Schalung gedrückt, wodurch ein Hohlraum im Inneren entsteht. Dadurch lassen sich sehr gut Rohre, aber auch Masten und hohe Stützen herstellen. Die Betonmatrix muss entsprechend fließfähig sein, darf sich aber beim Schleudervorgang nicht entmischen. Die Textilbewehrung wird während des Schleudervorgangs mittels Abstandhaltern in der Lage gesichert.

2.4 Verbund zwischen Textilbewehrung und umgebender Matrix

2.4.1 Grundlegendes

Die Funktionsfähigkeit von bewehrten Betonbauteilen wird über den Verbund sichergestellt. Reißt der Beton unter Zugbeanspruchung, wird die freigesetzte Zugkraft durch Verbundspannungen, die an der Grenzfläche Bewehrung/Beton wirken, vom Beton auf die Bewehrung übertragen. Die Größe und Art der Kraftübertragung ist

2.4 Verbund zwischen Textilbewehrung und umgebender Matrix

dabei stark von der Relativverschiebung zwischen Bewehrung und Beton (Schlupf) abhängig und kann in drei Mechanismen unterteilt werden:

- Haftverbund
- Reibverbund
- mechanische Verzahnung²¹

Die Abhängigkeit der Mechanismen von der auftretenden Relativverschiebung ist in Abb. 2.4a ersichtlich. Darin ist deutlich zu erkennen, dass der Haftverbund bereits bei geringen Relativverschiebungen zwischen Bewehrung und Beton stark abnimmt, wohingegen der Reib- und Scherverbund sich erst bei größeren Verformungen einstellen kann.

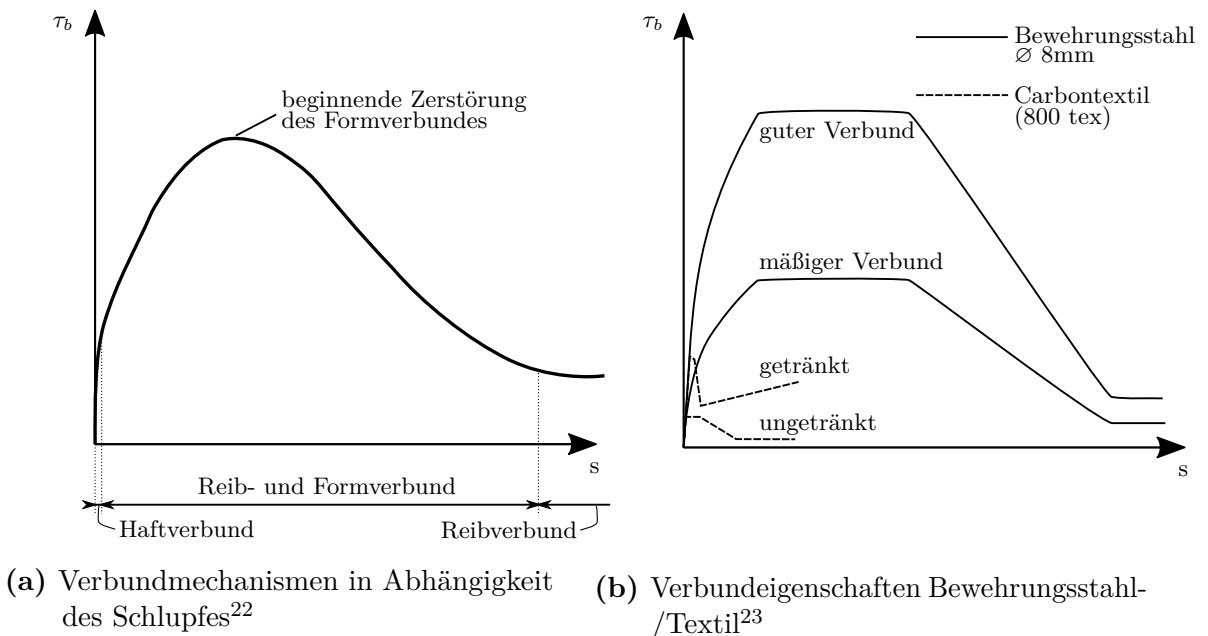


Abb. 2.4: Verbund zwischen Bewehrung und Beton

Ein Vergleich der Verbundeigenschaften von konventioneller Stahlbewehrung und Textilbewehrung ist in Abb. 2.4b ersichtlich. Im Stahlbetonbau wird der Verbund hauptsächlich durch die Rippen auf der Stahlbewehrung und den dadurch entstehenden Formschluss der Bewehrung mit dem Beton sichergestellt. Wird der Bewehrungsstab belastet, stützen sich diese Rippen auf dem umgebenden Beton ab und ermöglichen eine hohe Kraftübertragung. Textile Bewehrungen weisen hingegen im makroskopischen Bereich eine weitestgehend glatte Oberfläche auf. Im Vergleich zum

²¹auch als Scherverbund bzw. formschlüssiger Verbund bezeichnet

²²in Anlehnung an Zilch und Zehetmaier (2010), auf Basis von Offermann et al. (2001) und Cherif (2011)

²³in Anlehnung an Lorenz (2014), auf Basis von Eligehausen et al. (1983)

konventionellen Stahlbetonbau ergeben sich dadurch wesentliche Unterschiede in der Verbundkraftübertragung, wobei auch hier zu unterscheiden ist zwischen getränkten und ungetränkten Textilien. Eine Imprägnierung der Rovinge hat einen positiven Einfluss auf die übertragbare Verbundkraft bei Textilbewehrungen. Aufgrund der gleichmäßigen Imprägnierung kann eine ungleichmäßige Faseraktivierung und ein daraus resultierender vorzeitiger Fadenkernauszug vermieden werden. Zusätzlich lässt sich eine wesentliche Steigerung der Verbundsteifigkeit und -festigkeit beobachten. Da getränkte Textilien derzeit Stand der Technik in der Herstellung von Textilbewehrungen sind, wird auf ungetränkte Textilien in der weiteren Arbeit nicht eingegangen.

Werden Textilien mit einem weichem Imprägnierungsmaterial getränkt, erfolgt die Kraftübertragung vorrangig über Haft- und Reibverbund. Selbst bei Ausbildung von Oberflächenprofilierungen kann aufgrund der geringen Steifigkeit dieser Profilierung kein Formschluss mit dem umgebenden Beton erzielt werden. Anders verhält es sich bei steifen Tränkungsmaterialien. Ist hier eine Oberflächenprofilierung vorhanden, kann, ähnlich dem Stahlbetonbau, eine Kraftübertragung über den Formschluss mit dem umgebenden Beton stattfinden, wodurch die übertragbare Verbundkraft wesentlich erhöht wird. Auf diesen Aspekt wird noch näher in Kapitel 3.3.1.1 eingegangen

2.4.2 Charakterisierung des Verbundes

Die Beschreibung des Verbundes erfolgt über idealisierte Verbundspannungs-Schlupf Beziehungen (VSBs). Dazu wird die Verbundkraftübertragung in der Grenzfläche durch eine am differentiellen Stabelement wirkende Schubspannung (Verbundspannung) τ_b beschrieben und mit dem auftretenden Schlupf s , der als Relativverschiebung zwischen Bewehrung und Beton definiert ist, in Beziehung gesetzt (Rehm 1961). Die komplexen Mechanismen des Haftverbundes, Reibverbundes und Scherverbundes werden dementsprechend summarisch, inklusive deren Wechselwirkungen, in einem Pseudo-Stoffgesetz zusammengefasst (Zilch und Zehetmaier 2010).

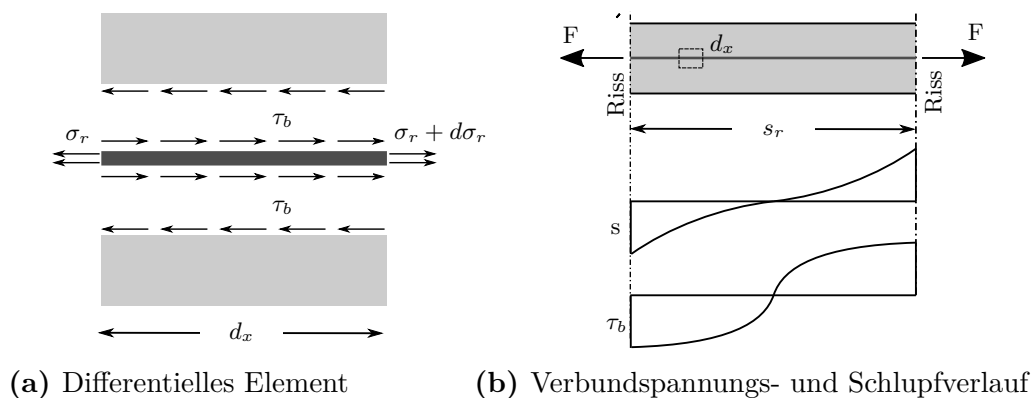


Abb. 2.5: Verbund zwischen Bewehrung und Beton²⁴

²⁴in Anlehnung an Sigrist (1995) und Zilch und Zehetmaier (2010)

Betrachtet man das differentielle Element der Länge d_x in Abb.2.5a, so ist zu sehen, dass die Differenz der an beiden Stabenden auftretenden Beanspruchung mit den über den Umfang und die Länge des Rovings verteilten Verbundspannungen im Gleichgewicht stehen muss.

$$dN_r(x) = \tau(s) \cdot u \cdot dx \quad (2.6)$$

$$dN_c(x) = -\tau(s) \cdot u \cdot dx \quad (2.7)$$

Die Relativverschiebung zwischen Bewehrung und Beton wird als Schlupf bezeichnet und berechnet sich zu:

$$s(x) = u_r(x) - u_c(x) \quad (2.8)$$

Einmalige Differenzierung liefert:

$$\frac{ds(x)}{dx} = \frac{du_r(x)}{dx} - \frac{du_c(x)}{dx} \quad (2.9)$$

$$= \varepsilon_r(x) - \varepsilon_c(x) \quad (2.10)$$

$$= \frac{N_r(x)}{E_r A_r} - \frac{N_c(x)}{E_c A_c} \quad (2.11)$$

Nochmalige Differenzierung

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} = \frac{1}{E_r A_r} \cdot \frac{dN_r(x)}{dx} - \frac{1}{E_c A_c} \cdot \frac{dN_c(x)}{dx} \quad (2.12)$$

und Einsetzen von Gleichung 2.6 und 2.7 in Gleichung 2.12 liefert schlussendlich:

$$\frac{d^2 s(x)}{dx^2} = \left(\frac{1}{E_r \cdot A_r} + \frac{1}{E_c \cdot A_c} \right) \cdot \tau(s) \cdot u \quad (2.13)$$

Diese Formel ist eine mathematische Kopplung der Dehnungen, Verbundspannungen und Relativverschiebungen. Mit geeigneten Verbundgesetzen und Randbedingungen ist die Differentialgleichung analytisch lösbar. Dadurch können Lasteinleitungslängen und Rissbreiten berechnet werden (siehe Abb. 2.5b). Die Durchführung von Auszugsversuchen (Pull-Out Versuchen) gibt Aufschluss über den Verlauf der Verbundspannungs-Schlupf Beziehung (RILEM 1994). Der qualitative Verlauf einer solchen Beziehung für einen einbetonierten Bewehrungsstab in Beton wurde bereits in Abb. 2.4a gezeigt.

Die große Herausforderung besteht in der Modellierung geeigneter Verbundspannungs-Schlupf Beziehungen zur realitätsnahen Abbildung des tatsächlichen Verbundverhaltens. Dazu wurden in der Vergangenheit zahlreiche Ansätze vorgestellt, die sich

in ihren Annahmen und der Komplexität stark unterscheiden. Die in den Pull-Out Versuchen beobachtete anfängliche Verbundspannungssteigerung kann über eine Potenzfunktion beschrieben werden. Dadurch kann ein realitätsnahes Verbundverhalten im Gebrauchszustand abgebildet werden. In den meisten Fällen ist dies bereits ausreichend. Eligehausen et al. (1983) haben zusätzlich für Traglastbemessungen einen abschnittweisen Verbundspannungsverlauf in Abhängigkeit des Schlupfes definiert, der auch das Entfestigungsverhalten nach Überschreiten der Verbundfestigkeit $\tau_{b,max}$ und den anschließenden Reibbereich beinhaltet. Die Verbundspannungssteigerung am Beginn wird auch hier über eine Potenzfunktion abgebildet, die anschließenden Bereiche werden über abschnittsweise gerade Funktionen beschrieben. Dieser Modellansatz hat Einzug in den fib model Code gefunden (Fib 2013).

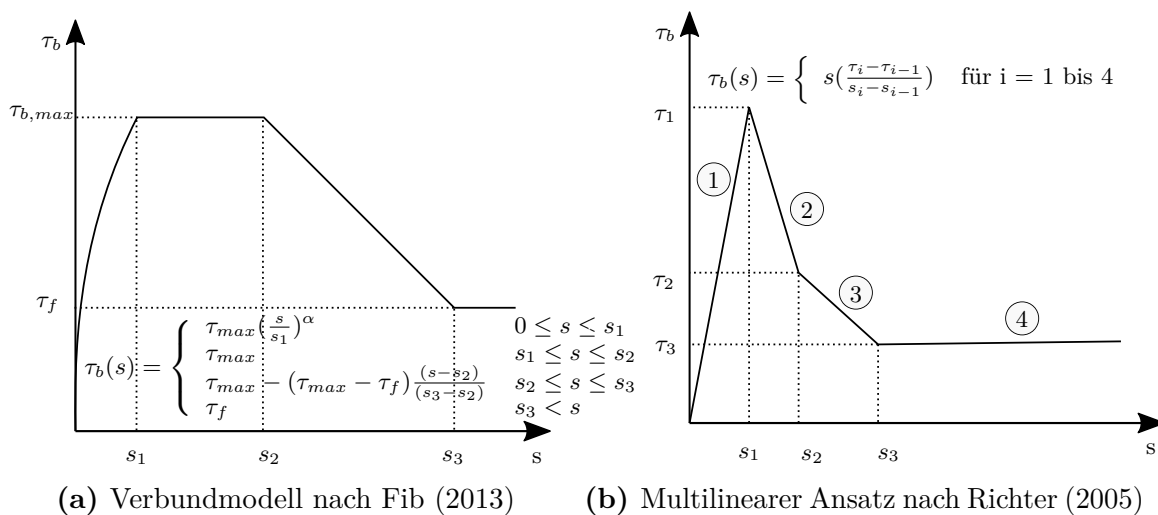


Abb. 2.6: Verbundmodelle

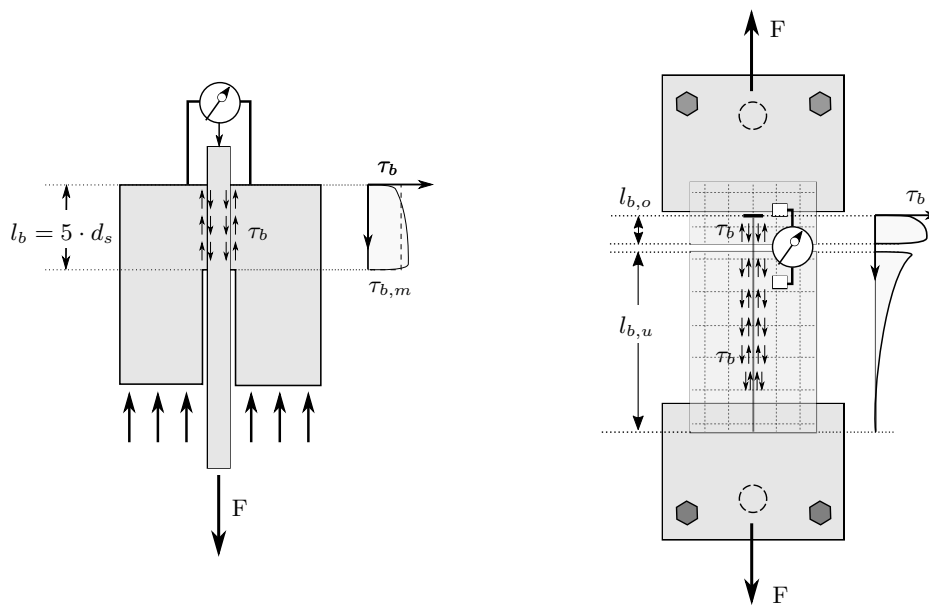
Für textilbewehrte Bauteile wurde das Verbundverhalten in zahlreichen Versuchen an verschiedensten Textilkonfigurationen untersucht (getränkt/ungetränkt, Art des Tränkungsmaterials, Feinheit, Fasermaterial, etc.). Zur Modellierung der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung wird im Regelfall hier auf eine multilineare Funktion zurückgegriffen, die erstmals von Naaman et al. (1991) für das Verbundverhalten von Stahlfasern in Beton bzw. von Abrishami und Mitchell (1996) zur Beschreibung des Verbundverhaltens von Stahlbewehrung in Beton in dieser Form vorgestellt wurde. Banholzer (2004) und weiters Richter (2005) griffen diesen Ansatz für textilbewehrte Bauteile auf und erweiterten den trilinearen Ansatz auf eine multilineare Beschreibung des Verbundes. Dabei konnte von Richter (ebd.) in Versuchen gezeigt werden, dass im Regelfall vier abschnittsweise lineare Bereiche für eine ausreichend genaue Beschreibung des Verbundverhaltens genügen.

2.4.3 Bestimmung der Verbundspannungs-Schlupf Beziehung

Im Stahlbetonbau wird die Verbundspannungs-Schlupf Beziehung anhand von Auszugsversuchen nach RILEM (1994) bestimmt (siehe 2.7a). Gemessen wird in diesem

2.4 Verbund zwischen Textilbewehrung und umgebender Matrix

Versuch einerseits die Prüfkraft und andererseits der Schlupf am lastabgewandten Ende des Bewehrungsstabes. Aufgrund der kurzen Prüflänge und des steifen Bewehrungsmaterials (Stahl) wird der Schlupf, und daraus resultierend auch die Verbundspannung in der Prüfstrecke, näherungsweise als konstant angenommen. Dadurch kann die Verbundspannung einfach ermittelt werden, indem die gemessene Kraft auf die Mantelfläche der Bewehrung in der Messstrecke bezogen wird. Gekoppelt mit dem gemessenen Schlupf erhält man die gesuchte Verbundspannungs-Schlupf Beziehung (siehe 2.7a).



(a) Verbundversuch nach RILEM (1994) (b) Asymmetrischer Auszugversuch nach Lorenz (2014)

Abb. 2.7: Bestimmung der Verbundspannungs-Schlupf Beziehung für Bewehrungsstahl bzw. Textilbeton

Für Textilbewehrungen ist dieses Schema nicht bzw. nur bedingt anwendbar. Aufgrund der relativ hohen Einbindelängen (näheres dazu im nachfolgenden Abschnitt) in Kombination mit der geringen Steifigkeit der Textilbewehrung (dies betrifft vor allem Textilien aus AR-Glas) kann nicht mehr von einem konstanten Schlupf bzw. einer konstanten Verbundspannung in der Messstrecke ausgegangen werden. Wie in Abb. 2.7b ersichtlich können je nach verwendeter Bewehrung mehrere Bereiche der Verbundspannungs-Schlupf Beziehung aktiviert werden.

Zur Bestimmung des Schlupfverlaufes entlang des Messbereiches ist die Kenntnis der Verbundspannungs-Schlupf Beziehung erforderlich. Für den Ansatz einer multiliniaren Beziehung wurden von Richter (2005) analytische Lösungen für linear ansteigende, linear abfallende und konstante Abschnitte der Verbundspannungs-Schlupf Beziehung hergeleitet. Dadurch kann die gesuchte Beziehung iterativ ermittelt werden. Der Aufwand zur Bestimmung der Verbundspannungs-Schlupf Beziehung ist gegenüber einem gemittelten konstanten Schlupfverlauf, wie er im Stahlbetonbau angenähert

wird, zwar höher, die Berechnung lässt sich jedoch nach erfolgreicher Implementierung in ein Berechnungsprogramm schnell und zuverlässig lösen. Lorenz (2014) hat z.B. für zahlreiche Textilien, unter anderem mit unterschiedlichen Imprägnierungsgraden und Tränkungsmaterialien, die Verbundspannungs-Schlupf Beziehung berechnet.

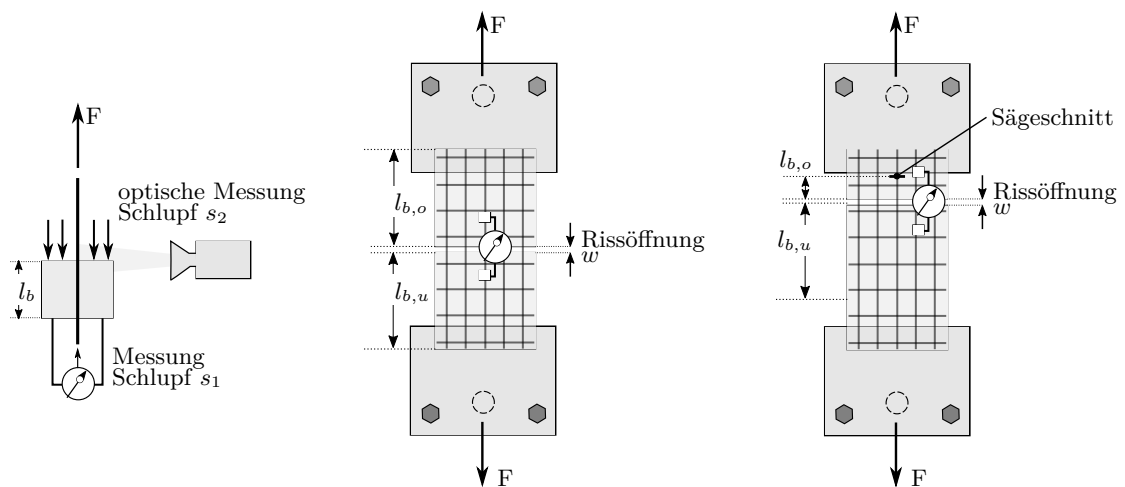
2.4.3.1 Auszugversuche

Aufgrund der laufenden Entwicklungen im Textilbetonbau existiert bis dato kein einheitlicher Versuchsaufbau zur Durchführung von Auszugsversuchen. Erste Untersuchungen von Banholzer (2004) erfolgten sowohl an einzelnen Glasfilamenten als auch an ungetränkten Glasrovingen. Dazu wurden die Filamente bzw. Rovinge in einen Betonblock betoniert, sodass an beiden Enden der Roving übersteht (siehe Abb. 2.8a). An einem Ende wird die Bewehrung von der Prüfmaschine gefasst. Die Messung des Schlupfes erfolgt kontinuierlich während der Dauer des Versuchs sowohl am lastabgewandten Ende des Versuchskörpers (mechanische Sensoren), sowie an der lastzugewandten Seite (per optischer Messung). Die Versuche ähneln dem bekannten RILEM Versuch aus dem Stahlbetonbau, sind jedoch aufgrund der filigranen Bewehrung und deren Querdruckempfindlichkeit aufwendig in der Herstellung. Ähnliche Versuche führten auch Muttoni und Fernández (2017) in ihren Arbeiten durch, wobei hier die Einbindelänge wesentlich höher gewählt wurde.

In vielen Forschungsgruppen ist man aber dazu übergegangen, direkte Auszugversuche an textilbewehrten Scheiben, in unterschiedlichen Konfigurationen durchzuführen. Der Auszug findet an einer vordefinierten Sollbruchstelle statt. Gemessen wird einerseits die Prüfkraft F , sowie andererseits die Rissöffnung w an der Sollbruchstelle (siehe Abb. 2.8b). Vorteilhaft an dieser Variante ist die einfachere Handhabbarkeit, sowie die bauteilgerechtere Prüfung der textilbewehrten Betonbauteile. Butler (2009) führte seine Untersuchungen an symmetrischen Proben mit gleichen Verankerungslängen an beiden Seiten durch. Nachteilig ist anzumerken, dass in diesem Fall nicht immer klar ist, an welchem Ende der Auszug stattfindet, bzw. ob es zu Überlagerungen aus beiden Enden kommt. Krüger (2004) adaptierte den Versuch insofern, als dass in seinen Untersuchungen die Verankerungslänge auf einer Seite klein gegenüber der anderen war. Dadurch konnte er ein klar definiertes Verankerungsversagen auf einer Seite erzwingen.

Lorenz (2014) wiederum entwickelte in seine Untersuchung zum Verbundverhalten den asymmetrischen Textilauszug nach Krüger (2004) weiter. Zur systematischen Untersuchung des Verbundverhaltens wurde die Verankerungslänge als einfacher Achsabstand der Querrovinge definiert und nur ein Roving getestet. Zwar wird auch hier eine Textilbetonscheibe wie in Krüger (ebd.) hergestellt, in der Sollbruchstelle werden aber alle Rovinge, bis auf den zu testenden Roving, vor der Versuchsdurchführung durchtrennt. Dadurch können auch unterschiedliche Bewehrungskonfigurationen direkt miteinander verglichen und das Verbundverhalten von Textilbewehrungen systematisch untersucht werden. Zur Festlegung der Verankerungslänge wird der zu testende Roving im Anschluss an die Herstellung des Probekörpers mit einem Sägeschnitt genau im Abstand der gewünschten Verankerungslänge durchtrennt (siehe Abb. 2.8c). Die Klemmung erfolgt oberhalb dieses Sägeschnittes. Dieser Versuchsauf-

bau hat sich prinzipiell als sehr praxistauglich für Rovinge mit Feinheiten < 3300 tex erwiesen und von Lorenz (2014) wurden mit diesem Aufbau systematische Untersuchungen zum Verbund durchgeführt. Ein gewisser Nachteil des Versuchsaufbaus nach Lorenz (ebd.) liegt in der randnahen Lasteinleitung, wodurch im Untersuchungsbereich ein Querdruckeinfluss nicht ausgeschlossen werden kann. Auch ist von einer gegenseitigen Beeinflussung der Rovinge im Untersuchungsbereich auszugehen. Bielak et al. (2018) stellen in ihren Untersuchungen eine Weiterentwicklung dieses Versuchsaufbaus vor, der einen Einfluss der benachbarten Rovinge weitestgehend ausschließt und auch die Überprüfung der Entstehung von Spaltrissen zulässt. Dazu wird der derzeit gängige einaxiale Zugversuch im Textilbetonbau (Brameshuber, Brockmann et al. 2006) durch Einlage eines Polystrol-Hartschaumwürfels präpariert, sodass im Untersuchungsbereich nur die effektiv dem Faserstrang zuordenbare Betonfläche (Maschenweite \times Maschenweite) vorhanden ist. Der zu prüfende mittige Faserstrang wird äquivalent zu den Untersuchungen von Lorenz (2014) an der entsprechenden Auszugslänge abgetrennt. Der Prüfkörper wird beidseitig eingeklemmt und anschließend getestet. Um einen Querdruckeinfluss zu vermeiden, ist ein ausreichender Abstand der Klemmung einzuhalten. Anhand dieser Versuche kann zwischen Auszugsversagen, Versagen durch Spaltrissbildung oder Versagen durch Garnriss unterschieden werden. Auf diese Art der Versuchsdurchführung wird im weiteren Verlauf der Arbeit zurückgegriffen (Näheres dazu siehe Kap. 3.3).



(a) Verbundversuch nach Banholzer (2004) (b) Verbundversuch nach Krüger bzw. Butler (c) Verbundversuch nach Lorenz (2014)

Abb. 2.8: Versuchskonfigurationen zur Bestimmung der Verbundspannungs-Schlupf Beziehung bei textildbewehrten Bauteilen²⁵

Bei den vorgestellten Versuchen nach Abb. 2.8b und Abb. 2.8c ist keine direkte Schlupfmessung möglich. Die gesuchte Verbundspannungs-Schlupf Beziehung wird hingegen invers aus der gemessenen Kraft-Rissöffnungs-Beziehung (KRB) berechnet.

²⁵in Anlehnung an Lorenz (2014)

2.4.4 Einflussparameter auf den Verbund zwischen Textilbewehrung und Betonmatrix

Der Verbund zwischen Textilbewehrung und umgebender Betonmatrix ist durch eine Vielzahl von Mechanismen gekennzeichnet, die sich untereinander wechselseitig beeinflussen (siehe Abb. 2.9). Anders als im Stahlbetonbau, bei dem der Scherverbund, welcher sich aus den Bewehrungsrippen ergibt, als maßgebende Kenngröße vorhanden ist, sind im Textilbetonbau die einzelnen Mechanismen und deren Größenordnung auf den Verbund schwer zu separieren. In der Vergangenheit wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, um die Einflussparameter auf den Verbund zu identifizieren und deren Größenordnung zu quantifizieren. Lorenz (2014) gibt beispielhaft einen sehr guten Überblick. Nachfolgend wird versucht die in der Literatur diskutierten Einflussparameter zu sammeln und die teils kontroversen Diskussionen zusammenzufassen. Dies geschieht vor allem in Hinblick auf getränkte Textilien, die Gegenstand dieser Arbeit sind. Die einzelnen Einflüsse sind in vielen Fällen voneinander abhängig, wodurch sich Wiederholungen in der folgenden Auflistung ergeben können.

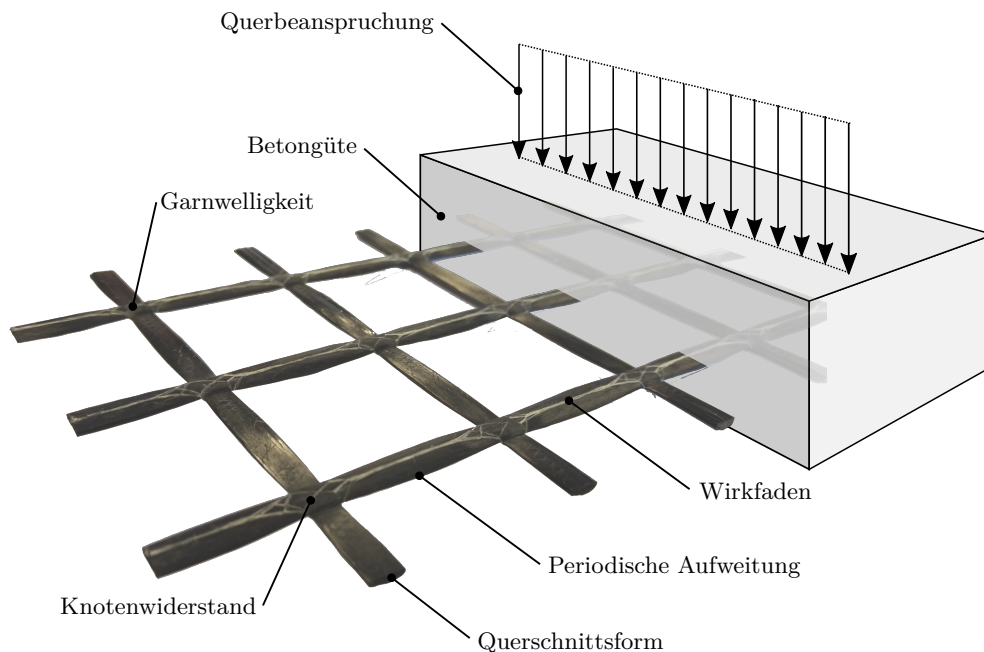


Abb. 2.9: Einflüsse auf den Verbund bei textilbewehrten Bauteilen

Einfluss der Querschnittsform und des Garnumfangs: Das Verhältnis von Umfang zu Fläche hat direkten Einfluss auf die übertragbare Verbundkraft. Je mehr Oberfläche zur Verfügung steht, desto mehr Kräfte können übertragen werden. Die Querschnittsform ist der maßgebende Parameter für dieses Verhältnis. Eine kreisrunde Form stellt das Minimum im Umfang/Fläche Verhältnis für geschlossene Querschnittsformen dar. Bei Textilbewehrungen hängt die Querschnittsform vor allem von der Herstellungsmethode ab. Im Regelfall weisen gewirkte Gelege, die nachträglich imprägniert werden einen gedrungenen, elliptischen Querschnitt (in Abhängigkeit des Wirkfadendruckes und des Rollendruckes

bei der Imprägnierung, siehe Hahn et al. (2019)) auf und haben insofern ein günstiges Oberfläche/Fläche Verhältnis.

Einfluss der makroskopischen Änderung des Garnquerschnittes: Im Endzustand weisen Rovinge zwischen den Kreuzungspunkten der Kett- und Schussrovinge Aufweitungen des Querschnitts auf, die bei entsprechender Ausprägung und bei einer ausreichenden Steifigkeit des Tränkungsmaterials, wie Rippen wirken (Bielak et al. 2018). Maßgeblichen Einfluss hierauf hat der Herstellungsprozess. Die Wirkfadenspannung beim Herstellen erzeugt eine, je nach Größe der Spannung, mehr oder minder stark ausgeprägt Kompression in den Kreuzungspunkten. Zusätzlich erfolgt im anschließenden Tränkungsprozess ein Abquetschen des Tränkungsmaterials (siehe Kap. 2.2.5.1), wodurch es zwischen den Kreuzungspunkten zu einer periodischen Aufweitung des Rovings in Breitenrichtung kommt.

Einfluss der Garnwelligkeit: Textilbewehrungen weisen oftmals eine herstellungsbedingte Welligkeit in Garnlängsrichtung auf. Lorenz (2014) zeigte in seinen Untersuchungen, dass diese Welligkeit bei getränkten Textilien die Verbundfestigkeit steigern kann. Voraussetzung ist eine ausreichende Steifigkeit des Tränkungsmaterials. Da diese Welligkeit an den jeweiligen Wendepunkten Umlenkkräfte erzeugt und dadurch Betonabplatzungen begünstigt, ist man aber bestrebt derartige Welligkeiten bei der Herstellung zu vermeiden (Lorenz et al. 2011). Derzeit am Markt erhältliche Textilien weisen meistens sehr gerade Rovinge auf. Nähere Untersuchungen dazu sind in Kapitel 3.3 ersichtlich.

Einfluss des Tränkungsmaterials: Eine Imprägnierung der Rovinge hat maßgeblichen Einfluss auf das Verbundverhalten von Textilbewehrungen in einer Betonmatrix. Einerseits weisen getränkte Textilien eine sehr glatte Oberfläche auf. Es kommt zu keiner wesentlichen Verzahnung der Betonmatrix mit den Filamenten. Trotzdem konnte in Untersuchungen eine verbundsteigernder Einfluss nachgewiesen werden. So zeigte Lorenz (2014), dass bei imprägnierten Rovingen, durch die bereits erwähnte Garnwelligkeit, die Reibung bei Auszug des Rovings aus dem Beton erhöht ist. Zusätzlich erhöht sich mit zunehmender Steifigkeit des Tränkungsmaterials die Transversalsteifigkeit des Rovings. Bei Vorhandensein einer periodischen Aufweitung des Querschnitt, wie vorhin beschrieben, wird diese Form gefestigt, wodurch ein Formschluss der Bewehrung mit dem Beton erzielt werden kann. In diesem Fall steigt die Verbundsteifigkeit und Verbundfestigkeit stark an (Bielak et al. 2018).

Einfluss des Wirkfadens und der Bindungsart: Durch die geschlossene Oberfläche des Rovings infolge der Imprägnierung dringt kein Beton in den Roving ein. Ein negativer Einfluss auf die Verbundfestigkeit infolge einer Fadenabdeckung, wie sie bei ungetränkten Textilien beobachtet wurde (Jesse 2004), kann daher ausgeschlossen werden. Im Gegensatz dazu hat die Bindungsart aber maßgeblichen Einfluss auf die Querschnittsform und damit auch, wie eingangs erwähnt, auf die Verbundsteifigkeit und Verbundfestigkeit. Zusätzlich wird angenommen,

dass durch eine Imprägnierung der Wirkfaden versteift werden kann. Dadurch entsteht eine zusätzliche Rippung auf dem Textil, die eine verbundsteigernde Wirkung hat (Krüger 2004). Dieser Einfluss wurde von Lorenz (2014) in seinen Untersuchungen aber als gering angesehen.

Einfluss des Knotenwiderstandes: Der Knotenwiderstand an den Kreuzungspunkten der Kett- und Schussrovinge ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen (Bielak et al. 2018; Lorenz 2014). Durch das Wirkfadensystem alleine ist die Verschiebesteifigkeit in den Kreuzungspunkten der textilen Gelege sehr gering. Durch eine Imprägnierung wird der Knoten jedoch ausgesteift. Der daraus resultierende Einfluss auf das Verbundtragverhalten wird z.T. widersprüchlich beantwortet. Während z.B. (Bielak et al. 2018) von keinem ausgeprägtem Knotenwiderstand ausgeht, wird in Ortlepp (2007) eine verbundsteigernde Wirkung angenommen.

Einfluss der Betonzusammensetzung und Betongüte: Aus dem Stahlbetonbau ist ein großer Einfluss der Betongüte auf den Verbund bekannt. So steigt mit höherer Betonfestigkeit in der Regel auch die Verbundsteifigkeit und -festigkeit. Da im Textilbeton vorrangig Feinkornbetone mit einer hohen Festigkeit eingesetzt werden, ist der Einfluss der Betongüte im Vergleich zum konventionellen Stahlbetonbau geringer zu bewerten. Dennoch können sich auch hier Unterschiede, insbesondere in Abhängigkeit der Betonzugfestigkeit ergeben. In Bezug auf die Herstellung ist aus dem Stahlbetonbau bekannt, dass mit zunehmender Verdichtungsenergie Luftblasen aufsteigen, die sich an horizontal liegender Bewehrung sammeln. Dadurch ist eine erhöhte Porosität im Bereich der Bewehrung feststellbar, die die Verbundtragfähigkeit beeinträchtigt. Da im Textilbetonbau in der Regel sehr fließfähige bzw. z.T. selbstverdichtende Betone eingesetzt werden ist der Einfluss der Betonzusammensetzung auch aus diesem Blickwinkel geringer zu beurteilen. Die vorrangig für ungetränkte Textilien beobachtete Verbesserung der mechanischen Verzahnung, durch Eindringen der feinen Betonmatrix in das Rovinginnere, kann hingegen für getränkte Textilien aufgrund der geschlossenen Oberfläche ausgeschlossen werden.

Einfluss der Querbeanspruchung: Bei der Interpretation des Einflusses der Querbeanspruchung auf das Verbundverhalten ist nach Belastungsrichtung zu unterscheiden. Bei Querdruckbeanspruchung ist, in Abhängigkeit der Steifigkeit des Tränkungsmaterials, von einer weniger stark ausgeprägten Verbundfestigkeitssteigerung als im konventionellen Stahlbetonbau auszugehen. Da das Tränkungsmaterial selbst bei steifen Epoxidharztränkungen im Vergleich zum umgebenden Beton weich ist, entzieht es sich einer Querdruckbeanspruchung. Im Gegensatz dazu reduziert eine Querkzugbeanspruchung die Verbundfestigkeit, ähnlich dem Stahlbetonbau durch das Entstehen von Längsrissen entlang der Bewehrung, maßgeblich. Dieses Verhalten ist weitestgehend unabhängig von der Rovingform und dem Tränkungsmaterial. Lediglich die Maschenweite bzw. die effektive Betonfläche zwischen den Rovingen haben hierauf Einfluss (Lorenz et al. 2011).

2.4 Verbund zwischen Textilbewehrung und umgebender Matrix

Diese Auflistung versucht all die möglichen Einflüsse und deren wechselseitige Abhängigkeit auf den Verbund darzustellen. Als primäre Einflussfaktoren auf den Verbund lassen sich in diesem Zusammenhang die Herstellungsmethode der Faserstränge und das verwendete Tränkungsmaterial identifizieren. Die weiteren Einflussfaktoren sind im Wesentlichen ein Resultat aus diesen beiden Ausgangsfaktoren. Nicht angeführt in dieser Auflistung ist der Einfluss einer langandauernden, bzw. zyklischen Belastung auf die Verbundfestigkeit und Verbundsteifigkeit. Aus dem Stahlbetonbau ist bekannt, dass bei langanhaltenden Verbundbeanspruchungen Kriechverformungen eintreten, die mit einer Erhöhung des Schlupfes einhergehen (Franke 1976). Für textilbewehrte Bauteile kann dieser Effekt noch nicht bestätigt werden, da derzeit noch wenig gesicherte Erkenntnisse zu dieser Thematik vorhanden sind.

3 Zur Spaltrissbildung in textilbewehrtem Beton

Im Zuge des FFG-Forschungsprojektes *Sustainable Building with textile reinforced UHPC* wurden in den Jahren 2016-2018 umfangreiche Untersuchungen zum Verbundwerkstoff TRUHPC durchgeführt. Dabei konnte in zahlreichen Dehnkörperversuchen¹ an textilbewehrten Betonstreifen eine Längsrissbildung in den Proben beobachtet werden, die zu einer Schädigung und schlussendlich einem vorzeitigem Abspalten der Betondeckung führte. Im speziellen betraf dies jene Konfigurationen, die eine Textilbewehrung aufwiesen, welche mit einem hochmoduligen Tränkungsmaterial imprägniert waren. Dieses Verhalten wurde bereits mehrfach in der Literatur beschrieben (Preinstorfer, Kromoser et al. 2019; Kulas 2013; Bielak et al. 2018; Niederwald 2017) und z.B. von Kulas (2013) als nicht maßgeblich für das Versagen von textilbewehrten Bauteilen beurteilt. Dass entgegen diesen Überlegungen aber doch ein bedeutender Einfluss durch diese Rissbildung auf das Tragverhalten von textilbewehrten Betonbauteilen besteht, wird im nächsten Abschnitt erläutert.

3.1 Durchgeführte Bauteilversuche am Institut

Die Untersuchungen im eingangs erwähnten Forschungsprojekt fanden ihren Abschluss in der Konzeptionierung und Realisierung von dünnwandigen, sehr leichten Tragelementen aus textilbewehrtem UHPC. Bei der Konzeptionierung wurde auf einen materialeffizienten Einsatz der Ausgangswerkstoffe besonderes Augenmerk gelegt (Kromoser, Preinstorfer et al. 2019). Im Zuge experimenteller Untersuchungen konnte während der Lastaufbringung an mehreren Stellen der Versuchskörper eine Spaltrissbildung im Textilbeton beobachtet werden, welche das Tragverhalten der Bauteile maßgeblich beeinflusste (siehe Abb. 3.1).

Preinstorfer, Kromoser et al. (2019) konnten in ihren Untersuchungen zum Biegetragverhalten von filigranen textilbewehrten Deckenelementen ein spaltrissinduziertes Abplatzen der Betondeckung im Zuggurt des Tragelementes feststellen. Die Spaltrissbildung erfolgte bereits unter Gebrauchslasten. Ausgangspunkt der Spaltrissbildung in diesen Untersuchungen waren jeweils Biegerisse im Zuggurt des Bauteils. Aufgrund hoher Verbundbeanspruchungen wurde ausgehend von den Rissflanken der Biegerisse eine Längsrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung induziert, die bei weiterer Laststeigerung von der Mitte des Tragwerks bis zu den Auflagern fortschritt. Durch die verbundlösende Wirkung fand ein kontinuierlicher Steifigkeitsverlust des

¹Ein Dehnkörperversuch beschreibt einen Standardversuch zur Bestimmung des uniaxialen Zugtragverhaltens von textilbewehrten Betonproben (Schütze, Bielak et al. 2018)

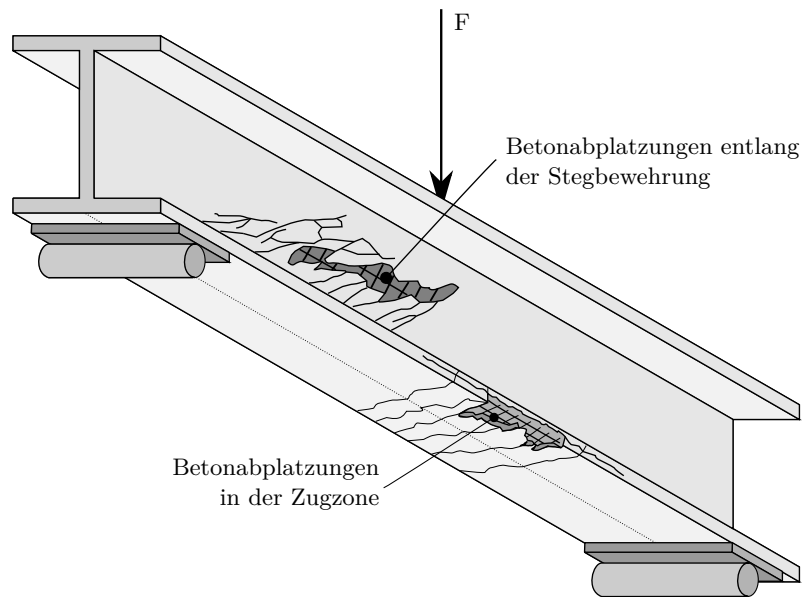


Abb. 3.1: Auftreten von Betonabplatzungen zufolge Spaltzugspannungen

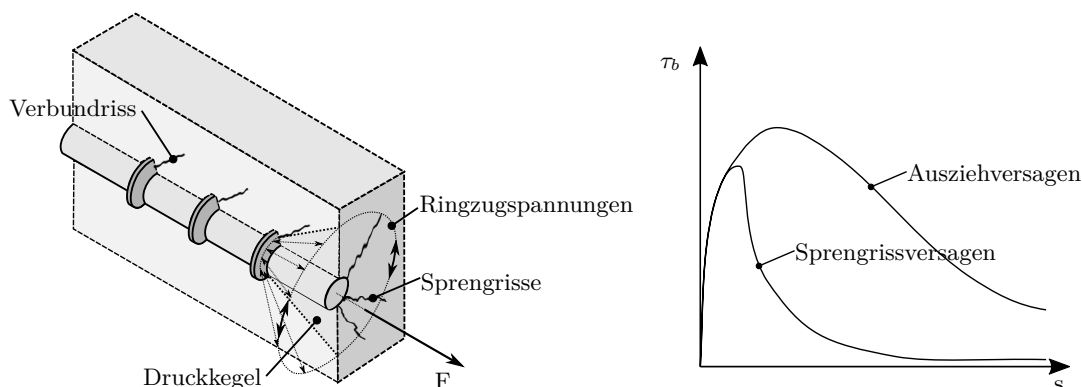
Bauteils statt. Das tatsächliche Versagen des Bauteils erfolgte anschließend durch ein Verankerungsversagen der Bewehrung am Auflager. Ein Vergleich der rechnerisch, unter Annahme einer vollen Materialausnutzung und der Gültigkeit der Bernoulli-Hypothese, ermittelten Bruchlast mit der experimentell ermittelten Bruchlast zeigt ein wesentliches Defizit der experimentell ermittelten Bruchlast gegenüber der theoretisch möglichen. Preinstorfer, Kromoser et al. (ebd.) führten dies auf die Spaltrissbildung im Zuggurt und das anschließende Verankerungsversagen am Auflager zurück.

Kromoser, Huber et al. (2018) hingegen führten Schubversuche an dünnwandigen T-Trägern durch. Die Schubbewehrung wurde zur Gänze in Textilbewehrung ausgeführt. Untersucht wurden unterschiedliche Schubbewehrungsgrade und Tränkungsmaterialien der Schubbewehrung (hochmodulig: Epoxidharz, niedermodulig: Styrol-Butadien). Auch hier konnte für Bewehrungen mit einer hochmoduligen Tränkung eine Spaltrissbildung festgestellt werden. Ausgangspunkt der Spaltrissbildung waren in diesen Untersuchungen ebenfalls Rissflanken, wobei in diesem Fall eine Längsrissbildung entlang der textilen Bewehrung an den Schubrissen induziert wurde. Bei weiterer Erhöhung der Belastung löste sich auch hier schrittweise die Betondeckung von der textilen Bewehrung ab, bis die übriggebliebene Betondruckstrebe die Belastung im Steg nicht mehr aufnehmen konnte. Das Versagen erfolgte spröde in Form eines Betondruckstrebenversagens. Ein Vergleich der Textilien mit den unterschiedlichen Tränkungsmaterialien zeigte zwar, dass EP-getränkte Textilien, aufgrund ihrer größeren Faserquerschnittsfläche, mehr Lasten übertragen konnten als SBR-getränkte Textilien. Vergleicht man jedoch die Ausnutzung der Materialien, ist zu sehen, dass EP-getränkten Textilien, aufgrund des vorzeitigen Druckstrebenversagens zufolge Spaltrissbildung, weniger gut ausgenutzt wurden als die SBR-getränkten Textilien, bei denen ein Faserbruch beobachtet wurde.

3.2 Ursachen für die Spaltrissbildung

Da die Längsrissbildung immer von Primärrissen (Biegerissen, Schubrisse, etc.) ausgehend induziert wird, ist sie mit dem dort auftretenden Schlupf und dem daraus resultierendem Verbund zwischen Textilbewehrung und umgebenden Beton in Beziehung zu setzen. In Kapitel 2.4.4 wurden bereits zahlreiche Parameter angeführt, die Einfluss auf den Verbund bei textilbewehrten Bauteilen haben. Nicht alle davon haben einen Einfluss auf die Entstehung von Spaltzugspannungen orthogonal zur Textilbewehrung, die letztendlich zu einer Längsrissbildung führen. Die maßgeblichen Mechanismen für das Auftreten von Spaltzugspannungen werden in der Literatur derzeit noch unterschiedlich interpretiert. Kulas (2013) und Schoene et al. (2011) gehen ähnlich dem Stahlbetonbau von einem räumlichen Ringzugspannungsmodell aus, wobei in textilbewehrten Bauteilen, aufgrund der ungünstigen Querschnittsform, ein Abspalten der Betondeckung ausgelöst wird. Bielak et al. (2018) hingegen sprechen in ihren Überlegungen von einer Keilwirkung der Bewehrung aufgrund der periodischen Aufweitung in Längsrichtung, welche aus dem Herstellungsprozess resultiert. Durch diese Keilwirkung entstehen Spaltzugkräfte orthogonal zur Textilebene. Niederwald (2017) wiederum geht in seiner Arbeit von einer Keilwirkung des Querrovings aus, der letztlich für das Abspalten der Betondeckung verantwortlich ist. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf diese Aspekte im Detail eingegangen und die theoretischen Überlegungen dazu erläutert.

Garnform: Im konventionellen Stahlbetonbau ermöglichen die Rippen auf der Stahlbewehrung einen formschlüssigen Verbund zwischen Bewehrung und Betonmatrix. Die Rippen stützen sich dabei auf den Betonkonsolen zwischen den Rippen ab und erzeugen rotationssymmetrisch sich ausbreitende Druckspannungen (Druckkegel). Diese werden durch die Ausbreitung umgelenkt, wodurch Ringzugspannungen entstehen, welche vom Beton aufgenommen werden müssen (siehe Abb. 3.2a). Wird die Betonzugfestigkeit überschritten entsteht eine Sprengrissbildung im Beton (Tepfers 1979).



(a) Rissbildung zufolge Ringzugspannungen (b) Verbundspannungs-Schlupf Beziehung

Abb. 3.2: Verbundversagen im Stahlbetonbau zufolge Sprengrissbildung²

²Bild erstellt in Anlehnung an Zilch und Zehetmaier (2010)

3.2 Ursachen für die Spaltrissbildung

Ist eine ausreichende Betondeckung vorhanden, ist die Aufnahme der Ringzugspannungen in der Regel problemlos möglich. Verbundversagen tritt ein, wenn die Betonkonsolen abgeschert werden und ein Auszug des Bewehrungsstabes aus der Betonmatrix stattfindet. Bei geringen Betondeckungen kommt es hingegen zu einem Spalten der Betondeckung, wodurch die Verbundtragmechanismen gestört werden. Dies führt zu einem schlagartigem Abfall der übertragbaren Verbundkraft und schlussendlich zu einem Verankerungsversagen. Die derzeitigen Untersuchungen im Textilbetonbau lassen vermuten, dass es sich bei der Spaltrissbildung in textilbewehrten Bauteilen ebenfalls um eine Sprengrissbildung aufgrund von Ringzugspannungen, ähnlich dem Stahlbetonbau, handelt. Zwar weisen Textilien, anders als im Stahlbetonbau, wo der Scherverbund den maßgeblichen Verbundanteil darstellt, im Regelfall eine glatte Oberfläche auf. Schoene et al. (2011) konnten in ihren Untersuchungen aber zeigen, dass der in diesem Fall wirksame Haft- und Reibverbund ebenfalls einen räumlichen Spannungszustand, ähnlich dem bereits genannten Zugringmodell, erzeugt.

Anders als im konventionellen Stahlbetonbau entsteht die Längsrissbildung aber nicht in Dickenrichtung des Betonbauteils sondern in der Ebene der textilen Bewehrung. Kulas (2013) führte dies auf die Querschnittsform der textilen Bewehrung zurück. Durch den Wirkprozess weisen die Rovinge einen flachen, gedrunen Querschnitt auf. Dadurch wird angenommen, dass die Spaltzugspannungen nicht mehr rotationssymmetrisch ausgerichtet sind, sondern hauptsächlich vertikal zur Textilebene wirken. Überschreiten die Spaltzugspannungen die Betonzugfestigkeit entsteht eine Längsrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung. Kulas (ebd.) führte zur Untermauerung dieser These Dehnkörperuntersuchungen an runden und flachen Rovingen durch. Dabei konnte er den vorher beschriebenen Effekt auch experimentell nachweisen (siehe Abb. 3.3).

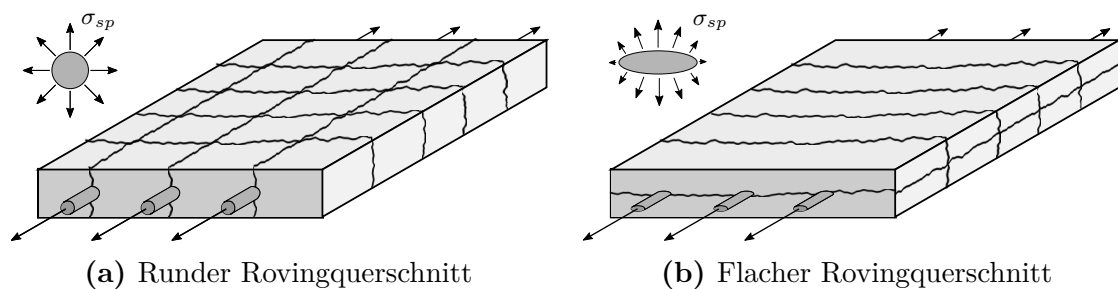


Abb. 3.3: Rissbildung in Abhängigkeit der Rovingquerschnittsform

periodische Dicken- bzw. Breitenaufweitung der textilen Bewehrung: Bei gelegten Gewirken weisen die Faserstränge (Schuss und Kett) eine spezielle Querschnittsform auf (siehe vorheriger Abschnitt), die zusätzlich entlang ihrer Längsachse nicht konstant ist. Im Herstellungsprozess werden die Faserstränge an den Kreuzungspunkten mithilfe eines Wirkfadens miteinander verbunden. Durch die Wirkfadenspannung werden die Faserstränge an ebendiesen Kreuz-

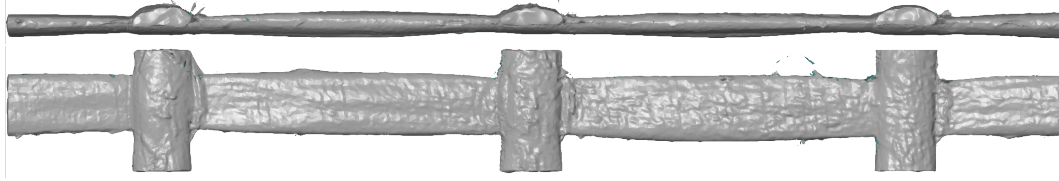


Abb. 3.4: Periodische Aufweitung der Rovinge (näheres dazu siehe Kap. 3.3.1.1)

zungspunkten lokal deformiert. In Längsrichtung entsteht so ein periodisches Wellenmuster, welches ein lokales Minimum an den Kreuzungspunkten und ein lokales Maximum im halben Querrovingabstand aufweist. Im anschließenden Tränkungsprozess werden die Faserstränge in der Quetschvorrichtung (siehe Kap. 2.2.5.1) weiter komprimiert, wobei im darauffolgenden Erhärtungsprozess diese Form konserviert wird. Die daraus resultierende periodische Aufweitung in Dicken- und Breitenrichtung ist in Abb. 3.4 abgebildet. Dabei ist zu sehen, dass in der Draufsicht eine symmetrische Breitenaufweitung vorliegt, wohingegen in der Seitenansicht eine asymmetrische Dickenaufweitung vorliegt. Dies ist auf die asymmetrische Überkreuzung der Kett- und Schussrovings zurückzuführen. Auch beim Vergleich des Kettrovings mit dem Schussroving fallen Unterschiede auf. Durch die Umschnürung mit einem Wirkfaden weist der Kettroving eine flachere Form auf als der Schussroving. Beim Schussroving hingegen ist im Regelfall die periodische Dickenaufweitung stärker ausgeprägt. Detailliert wird auf diese Aspekte in Kap. 3.3.1.1 eingegangen.

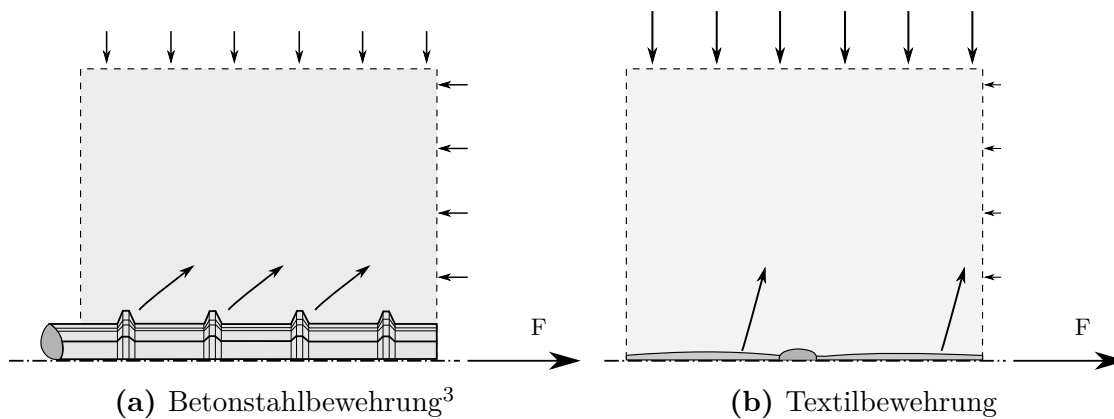


Abb. 3.5: Resultierende Druckstrebe zufolge des Formschlusses der Bewehrung mit dem Beton

Bielak et al. (2018) schlussfolgern in ihren Überlegungen, dass diese periodische Aufweitung einer langgestreckten Rippe gleichkommt. Dadurch kann für Textilien, welche mit einer hochmoduligen Tränkung versehen sind, ein Formschluss der Bewehrung mit dem umgebenden Beton erzielt werden. Da im Vergleich zum konventionellen Stahlbetonbau diese Rippen wesentlich flacher sind, ergeben sich bedeutend größere spaltzugerzeugende Komponenten des Kraftvektors,

³Bild erstellt in Anlehnung an Zilch und Zehetmaier (2010)

welche orthogonal zur Textilebene wirken (siehe Abb. 3.5). Dadurch wird eine Längsrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung begünstigt.

Knotenwiderstand: Die Faserstränge in Kett- und Schussrichtung sind in den Kreuzungspunkten durch den Wirkfaden fixiert. Durch die aufgebrachte Tränkung wird dieser Knoten versteift und eine entsprechende Verschiebesteifigkeit erzielt. Lorenz (2014) und Niederwald (2017) gehen in ihren Untersuchungen davon aus, dass bei hochmoduligen Tränkungen der Knoten eine so hohe Verschiebesteifigkeit aufweist, dass der Queroving, welcher am belasteten Roving angeschlossen ist, gegen den Betonkörper gepresst wird. Aufgrund dieser Pressung entstehen Querkzugbeanspruchungen direkt unterhalb des Querovinges.

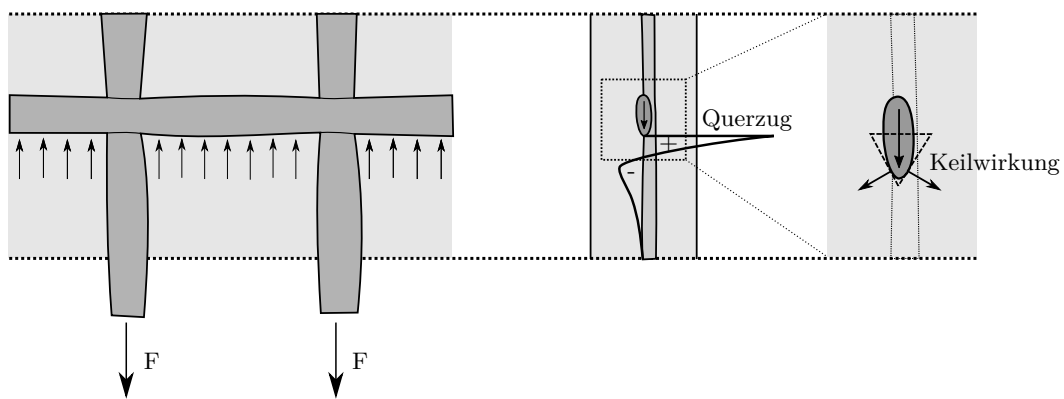


Abb. 3.6: Querkzugspannungen als Folge einer hohen Knotensteifigkeit⁴

Ähnliche Querkzugbeanspruchungen sind aus dem Stahlbetonbau bekannt, wenn z.B. ein Querstab angeschweißt oder angerödelt wird und so eine steife Knotenverbindung erzeugt wird. Voraussetzung hierfür ist jeweils ein entsprechender Knotenwiderstand, um diese lokale Pressung unterhalb des Querstabes zu erzeugen. Verstärkt wird dieser Effekt durch die elliptische Form des Querovinges. Dadurch kommt es zu einer Keilwirkung und einer ausgeprägten Kraftumlenkung orthogonal auf die Ebene der textilen Bewehrung (siehe Abb. 3.6). Die entstehenden Spaltzugspannungen im Betonkörper führen bei Überschreiten der Betonzugfestigkeit zu der bereits beschriebene Längsrissbildung im Beton. Für Textilbetonbauteile geht Lorenz (2014) davon aus, dass der Knotenwiderstand einen entsprechenden Einfluss auf die Spaltrissbildung in textilbewehrten Bauteilen hat, während Niederwald (2017) diesen Knotenwiderstand sogar als die maßgebliche Ursache für die Entstehung von Spaltrissen beurteilt.

Garnwelligkeit: Im Textilherstellungsprozess werden die Rovinge in der Textilmaschine abgelegt und anschließend verwirkt. Liegen die Filamente nicht in völlig gestreckter Lage vor, weisen die Rovinge eine entsprechende Welligkeit auf. Lorenz et al. (2011) zeigte in seinen Untersuchungen, dass an den Wendepunkten Umlenkkräfte entstehen (siehe Abb. 3.7), die zu Betonabplatzungen führen können.

⁴Bild erstellt in Anlehnung an Zilch und Zehetmaier (2010) und Lorenz (2014)

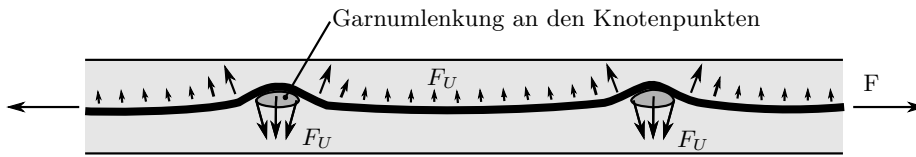


Abb. 3.7: Umlenkkräfte zufolge einer globalen Textilwelligkeit⁵

Im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Mechanismen ist dieses Verhalten bei geringen Betondeckungen auf örtliche Betonabplatzungen an den Kreuzungspunkten der Faserstränge begrenzt. Erst bei größeren Betondeckungen kommt es zu einer durchgehenden Spaltrissbildung zufolge der Garnwelligkeit. Lorenz et al. (2011) und Hausding (2010) entwickelten aufgrund ihrer Untersuchungsergebnisse ein Verfahren zur Herstellung von möglichst gestreckten Rovingen, wodurch eine Spaltrissbildung, bzw. örtliche Betonabplatzung zufolge der Garnwelligkeit weitestgehend vermieden werden kann.

Die Textilien, welche im Zuge dieser Arbeit behandelt werden, weisen eine weitestgehend gerade Form auf. Eine gewisse Welligkeit kann aber auch hier durch eine asymmetrische Dickenaufweitung entstehen. Dadurch kommt es zu einer Ausmitte der Faserstrangachse entlang der Längsachse, das der bereits beschriebenen Welligkeit gleichzusetzen ist. Detailliert beschrieben ist diese Thematik in Kap. 3.3.1.1.

3.3 Experimentelle Untersuchungen zur Spaltrissbildung

Wie im vorigen Abschnitt aufgezeigt, existieren unterschiedliche Thesen, welche Parameter hauptsächlich für die Spaltrissbildung bei textilbewehrten Bauteilen verantwortlich sind. In den folgenden Abschnitten wird versucht, die einzelnen Ursachen und deren Einfluss auf die Spaltrissbildung zu quantifizieren. Dazu wurden experimentelle Untersuchungen in Form von Auszugsversuchen durchgeführt. Einschränkend wurden nur Heavy Tows, welche mit einem steifen Tränkungsmedium imprägniert sind, untersucht, da in der Literatur und bei eigenen experimentellen Untersuchungen speziell für diese Textilkonfiguration vermehrt eine Spaltrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung beobachtet wurde.

Im Vorfeld der Untersuchungen wurde ein Versuchsprogramm konzipiert, das eine weitestgehende Separation der Einflussparameter in den einzelnen Versuchskonfiguration zulässt. Dadurch können die unterschiedlichen Parameter und deren Einfluss auf die Spaltrissbildung isoliert betrachtet werden. Das entsprechende Versuchsprogramm ist in Abb. 3.8 ersichtlich. Ausgehend von einem Ausgangstextil, welches in Schussrichtung geprüft wird, kann in einem ersten Schritt durch Entfernung des Querrovings gezielt der Einfluss des Knotenwiderstandes überprüft werden. In zwei

⁵Bild erstellt in Anlehnung an Lorenz (2014)

3.3 Experimentelle Untersuchungen zur Spaltrissbildung

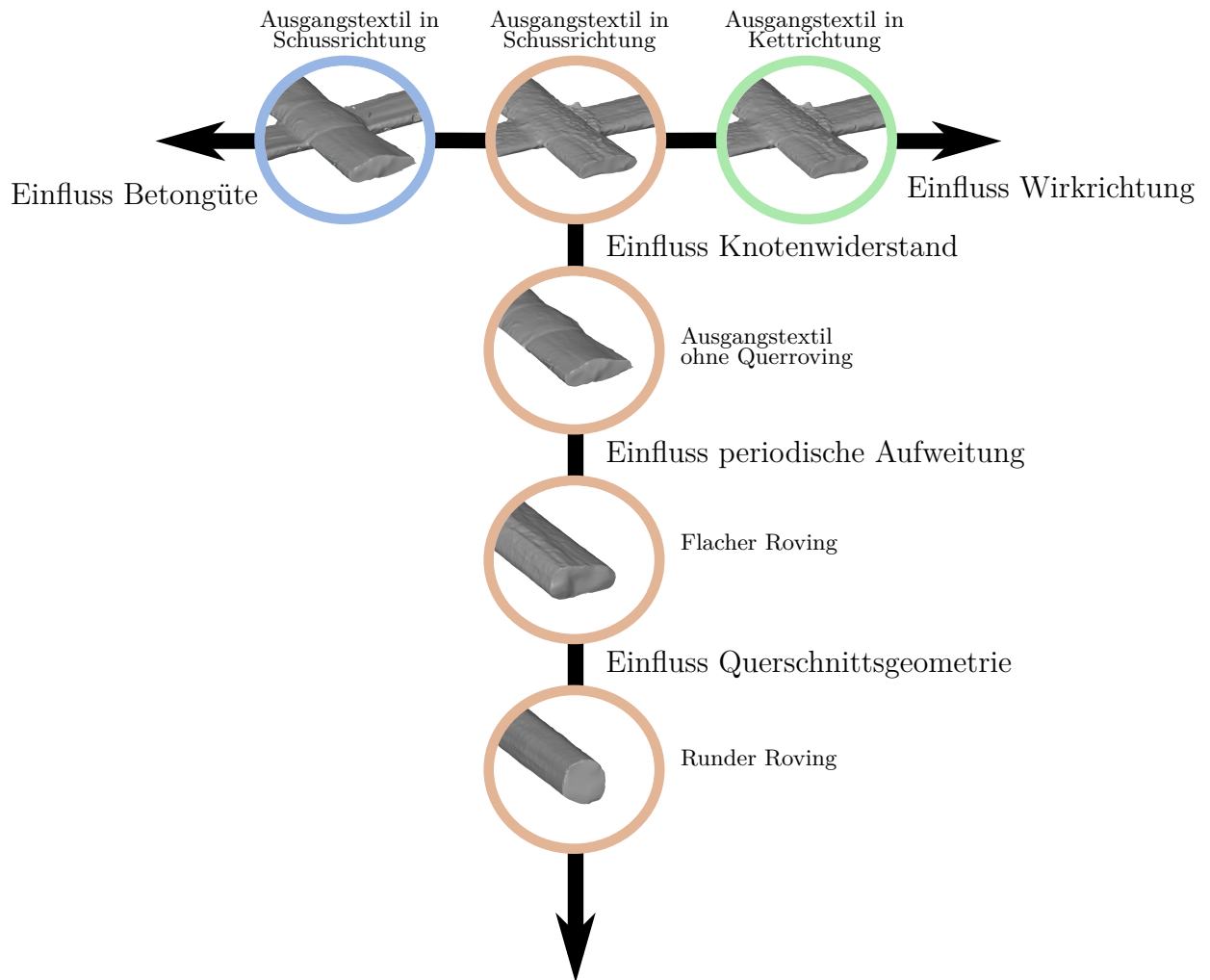


Abb. 3.8: Versuchsprogramm zur quantitativen Bestimmung der Einflussgröße einzelner Parameter auf die Spaltrissbildung

weiteren Konfigurationen wird, in Kooperation mit dem Hersteller, das Ausgangstextil in der Herstellung manuell bereits soweit präpariert, dass die gewünschten Einflüsse untersucht werden können. Dazu wird zuerst ein einzelner Faserstrang hergestellt, der keine periodische Aufweitung in Längsrichtung aufweist. Die Querschnittsform bleibt aber weiterhin, gleich wie zum Ausgangstextil, elliptisch. Dadurch kann gezielt der Einfluss der textilen Verarbeitung, der sich für die periodische Aufweitung verantwortlich zeigt, untersucht werden. In einem weiteren Schritt wird zudem die Querschnittsform von einem elliptischen Querschnitt hin zu einem runden Querschnitt angepasst, wodurch gezielt der Einfluss der Querschnittsform aufgezeigt werden kann.

Parallel dazu wird in einer weiteren Versuchsserie der Einfluss der Betongüte untersucht. Zu diesem Zweck werden weitere Versuchskörper äquivalent zur Versuchsserie mit dem Ausgangstextil hergestellt, wobei in diesem Fall Beton mit einer höheren Festigkeit verwendet werden. Zuletzt wird noch untersucht, ob die Belastungsrichtung

(Kett- oder Schussfaden) Einfluss auf die beginnende Spaltrissbildung hat (in dieser Konfiguration sind mehrere bereits genannte Einflussparameter vereint). Der Einfluss der Garnwelligkeit auf die Spaltrissbildung, wie im vorigen Abschnitt erwähnt, wird hier nicht untersucht, da einerseits dieser Einfluss von Lorenz (2014) in seinen Untersuchungen detailliert betrachtet wurde, und andererseits dass vorliegende Textil eine weitestgehend gerade Form aufweist (siehe dazu Kap. 3.3.1.1). Zur besseren Kennung der einzelnen Versuchskonfigurationen wird in den nachfolgenden Abschnitten eine Kurzbezeichnung verwendet, die auf die jeweilige Konfiguration schließen lässt:

- Ausgangstextil geprüft in Schussrichtung (Typ S)
- Ausgangstextil ohne Querroving (Typ O)
- Flathe Rovingform ohne periodische Aufweitung (Typ F)
- Runde Rovingform ohne periodische Aufweitung (Typ R)
- Ausgangstextil geprüft in Schussrichtung, Betongüte UHCP (Typ U)
- Ausgangstextil geprüft in Kettrichtung (Typ K)

3.3.1 Versuchskörper

3.3.1.1 Charakterisierung der Bewehrung

Als Ausgangstextil für die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Untersuchungen wurde ein gelegtes Gewirk der Firma solidian GmbH mit Sitz in Albstadt, Deutschland gewählt. Das Textil wird aus Carbonfilamenten hergestellt und weist eine Rovingfeinheit von 6400 tex auf, was einer Faserquerschnittsfläche von 3,62 cm² entspricht. Faserstränge mit einer so hohen Feinheit wie im vorliegenden Fall werden als Heavy Tow bezeichnet. Sie werden des öfteren aus mehreren Rovingen zusammengefügt (schematisch erkenntlich z.B. in Abb. 3.10b). Bei vorliegendem Textil wurden die einzelnen Faserstränge in Kett- und Schussrichtung aus zwei Rovingen mit jeweils 3200 tex zusammengefügt. Die einzelnen Faserstränge besitzen in Längs- und Querrichtung einen Achsabstand von 38 mm zueinander. Da die Textilien mit Epoxidharz getränkt sind, weisen sie eine sehr hohe Steifigkeit und Zugfestigkeit auf. Tab. 3.1 gibt einen Überblick über die Materialkennwerte gemäß Herstellerangaben.

Tab. 3.1: Kennwerte der Textilbewehrung gemäß Herstellerangaben (solidian 2019)

Kennwerte	Kettrichtung	Schussrichtung
Achsabstand [mm]	38	38
Feinheit [tex]	6400	6400
Faserquerschnittsfläche je Strang [mm ²]	3,62	3,62
Bruchspannung (Mittelwert) [N/mm ²]	3200	3300
E-Modul [N/mm ²]	>220.000	>205.000

3.3 Experimentelle Untersuchungen zur Spaltrissbildung

Die Adaptionen des Ausgangstextils für die Konfigurationen Typ R und Typ F erfolgten in Kooperation mit dem Hersteller der Textilbewehrung. Beide Typen weisen dieselbe Feinheit wie das Ausgangstextil auf (6400 tex je Faserstrang). Im Unterschied zu diesem werden die Faserstränge aber nicht zu einem gelegten Gewirk verarbeitet, sondern direkt nach dem Zusammenfügen zu einem Multifilamentgarn mit dem Imprägniermittel versehen. Die Querschnittsform wird manuell eingestellt. Die flache Form wird durch Quetschen der Bewehrung in Querrichtung erzielt, wohingegen die runde Form durch ein Straffen des Faserstrangs in Längsrichtung eingestellt wird.

Von besonderer Bedeutung für die durchgeführten Untersuchungen sind die geometrischen Beschaffenheiten der einzelnen Konfigurationen. Insbesondere die Querschnittsform und die periodische Aufweitung in Längsrichtung der Faserstränge sind schwer zu bestimmen. Diese wurden in der Vergangenheit durch verschiedene Verfahren idealisiert beschrieben (z.B. Annäherung der Querschnittsform durch Superellipsen). Für die vorliegende Arbeit wurde im Gegensatz dazu eine vollständige Vermessung der Faserstrangtypen durchgeführt. Dadurch können die genauen Abmessungen im dreidimensionalen Raum bestimmt werden. Die Vermessung erfolgte mit einem Nikon/Metris MCA3600 Messarm mit aufgebrachtem Metris MMD50 Laserscanner in der Metrology Grade Ausführung. Nach erfolgter Kalibrierung im Raum kann die Oberfläche der Textilien mithilfe des Laserkopfes, der an dem Koordinatenmessarm befestigt ist, abgetastet werden. Durch Reflexion des Laserstrahls an der Oberfläche des zu scannenden Objektes kann die genaue Lage im Raum bestimmt werden (siehe Abb. 3.9a). Die Messgenauigkeit beträgt $7\ \mu\text{m}$.

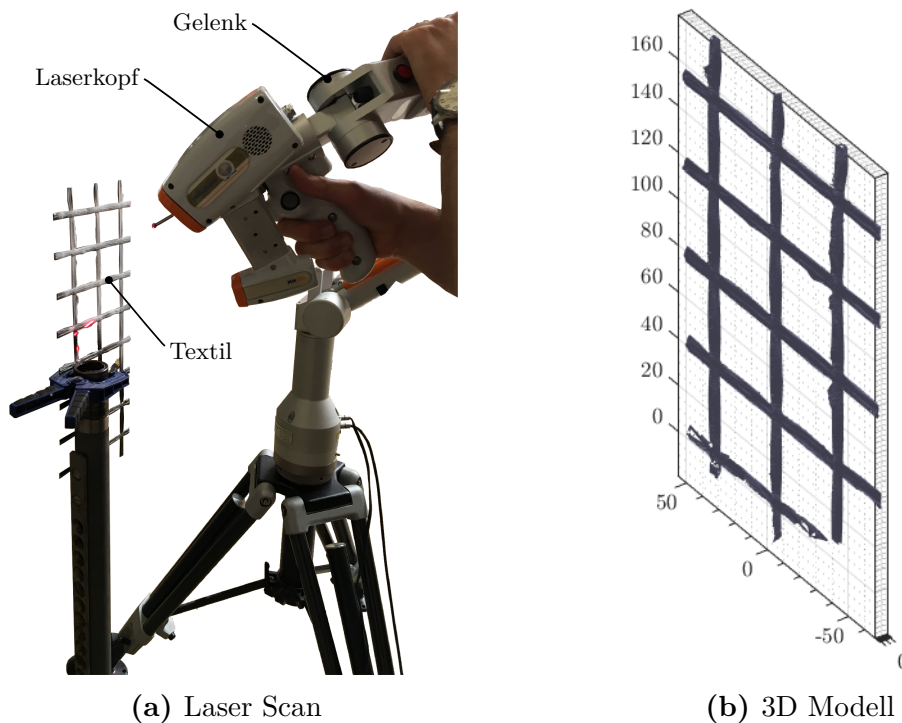


Abb. 3.9: Vermessung und Digitalisierung der Textilien

Die dadurch entstehende digitale Punktwolke kann mittels geeigneter Software zu einer triangulierten Fläche zusammengefügt werden. Das so erhaltene digitale Abbild der einzelnen Versuchstypen liefert in weiterer Folge die Möglichkeit, die gewünschten Abmessungen genau auszulesen (siehe Abb. 3.9b). Geeignete Software, die in diesem Zusammenhang auch in dieser Arbeit verwendet wurde, ist z.B. GOM Correlate der Firma Gom GmbH aus Deutschland (GOM 2019).

Bei der Auswertung der digitalen Modelle wurden die geometrischen Charakteristika der jeweiligen Versuchstypen gut ersichtlich (siehe Abb. 3.10). Dabei sind einerseits die Unterschiede im Querschnitt als auch im Längsschnitt von Interesse. Die Querschnittsabmessungen der unterschiedlichen Faserstrangtypen sind in Abb. 3.11 ersichtlich. Dabei wird jeweils ein Querschnitt im Knotenbereich und ein Querschnitt im Abstand $x = 19 \text{ mm}$ (entspricht bei Faserstrang Typ S und K dem halben Querovingabstand) abgebildet. Typ R weist eine, wie in Abb. 3.11a zu sehen, annähernd runde Form auf. Im Vergleich zu einer kreisrunden Form ergeben sich nur geringe Abweichungen. Typ F hingegen weist eine sehr flache Form auf (siehe Abb. 3.11b). Zu sehen ist in dem Bild, dass dieser Faserstrang aus zwei Einzelrovings mit jeweils 3200 tex zusammengefügt wurde. Dadurch ergeben sich auch geringe Abweichungen von einer ideal elliptischen Form. In beiden Fällen ergeben sich herstellungsbedingte Ungenauigkeiten die jedoch auf die kurze Messstrecke bezogen gering ausfallen. In Abb. 3.11c ist der Schussroving des Ausgangstextils zu sehen. Dieser weist aufgrund des Herstellungsprozesses eine flache Form auf. Ähnlich verhält es sich beim Kettroving in Abb. 3.11d. Durch die Umschnürung mit dem Wirkfaden ergibt sich hier sogar eine noch flachere Form als beim Schussroving.

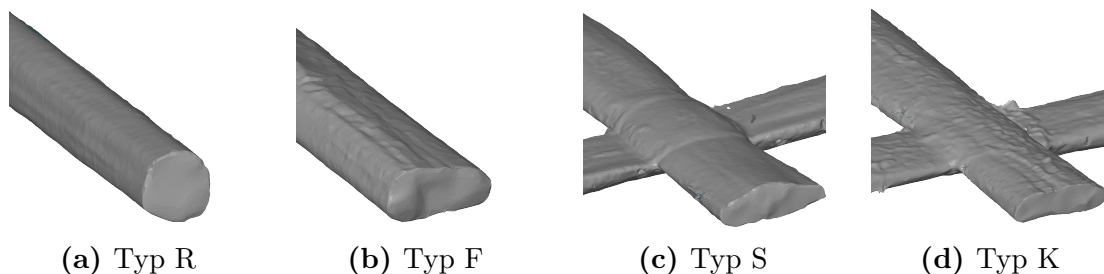


Abb. 3.10: Querschnittsformen der verschiedenen Faserstrangtypen

Für die Bestimmung des mittleren Umfangs $U_{r,m}$ wird die gemessene Mantelfläche $A_{r,m}$ durch die gemessene Wegstrecke l_r geteilt (siehe Gl. 3.1). Diese Vorgehensweise erlaubt eine einfache und schnelle Berechnung des gesuchten Eingangswertes für die Berechnung der Verbundspannungs-Schlupf Beziehung (näheres dazu siehe Kap. 3.3.3.2). Selbiges Verfahren wird auch für die Bestimmung der Fläche $A_{r,m}$ verwendet. Durch Division des gemessenen Volumens $V_{r,m}$ durch die gemessene Wegstrecke l_r wird die gemittelte Querschnittsfläche errechnet (siehe Gl.3.2).

$$U_{r,m} = \frac{A_{r,m}}{l_r} \quad (3.1)$$

$$A_{r,m} = \frac{V_{r,m}}{l_r} \quad (3.2)$$

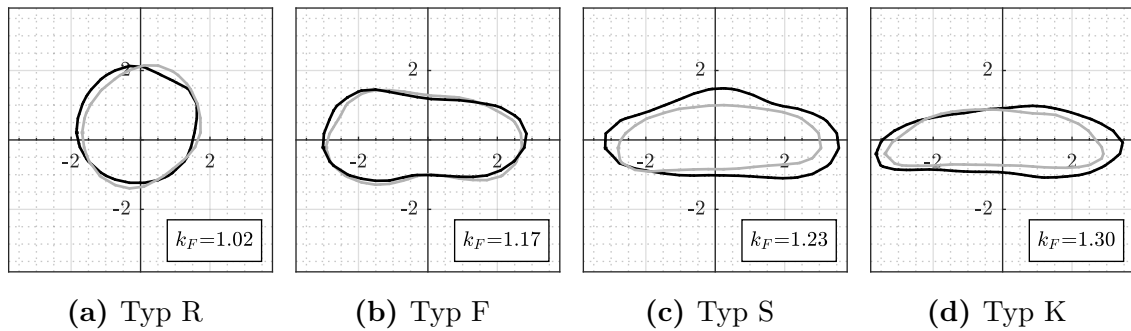


Abb. 3.11: Querschnittsabmessungen der einzelnen Faserstrangtypen

Für die Beschreibung der Querschnittsform wird in weiterer Folge ein Beiwert k_F eingeführt, der ein Maß für die Kompaktheit des Faserstrangquerschnittes darstellt (siehe Gl. 3.3). Tendiert dieser Wert zu 1,0 liegt eine perfekt kreisrunde Form vor. Je größer dieser Wert hingegen wird, desto gedrungener und flacher ist die Querschnittsform.

$$k_F = \frac{U_{r,m}}{U_{kr}} \quad (3.3)$$

mit:

U_{kr} = Umfang eines Kreises, der den selben Flächeninhalt $A_{r,m}$ des gemessenen Faserstrangs besitzt [mm]

In den Längsschnitten (Grundriss/Seitenriss) sind weitere wesentliche Charakteristika der unterschiedlichen Faserstrangtypen zu sehen, die in weiterer Folge Einfluss auf den Verbund zwischen Textilbewehrung und umgebender Matrix haben können (siehe Abb. 3.12).

Betrachtet man Typ S (Abb. 3.12c) und Typ K (Abb. 3.12d) ist die bereits erwähnte periodische Aufweitung, sowohl in der Seitenansicht als auch in der Draufsicht, gut zu erkennen. Im Vergleich dazu weisen die Faserstrangtypen R (Abb. 3.12a) und F (Abb. 3.12b) in beiden Ansichten eine annähernd gerade Form auf. Zur Beschreibung der Aufweitung wird in weiterer Folge eine bezogene Aufweitung k_A eingeführt⁶ (siehe Gl. 3.4), welche die Größenordnung der Flächenaufweitung in Feldmitte des Rovings⁷ im Vergleich zum Kreuzungsbereich des Rovings beschreibt.

$$k_A = \frac{A_{r,F}}{A_{r,K}} \quad (3.4)$$

mit:

$A_{r,F}$ = Flächeninhalt in der Feldmitte des Rovings [mm²]

$A_{r,K}$ = Flächeninhalt im Kreuzungsbereich des Rovings [mm²]

⁶vergleiche dazu die Analogie zur bezogenen Rippenfläche $f_R = F_R/F_S$, wie sie von Rehm (1961) für den konventionellen Stahlbetonbau formuliert wurde.

⁷Feldmitte bezeichnet im Folgenden die Stelle im halben Querovingabstand vom Knotenbereich.

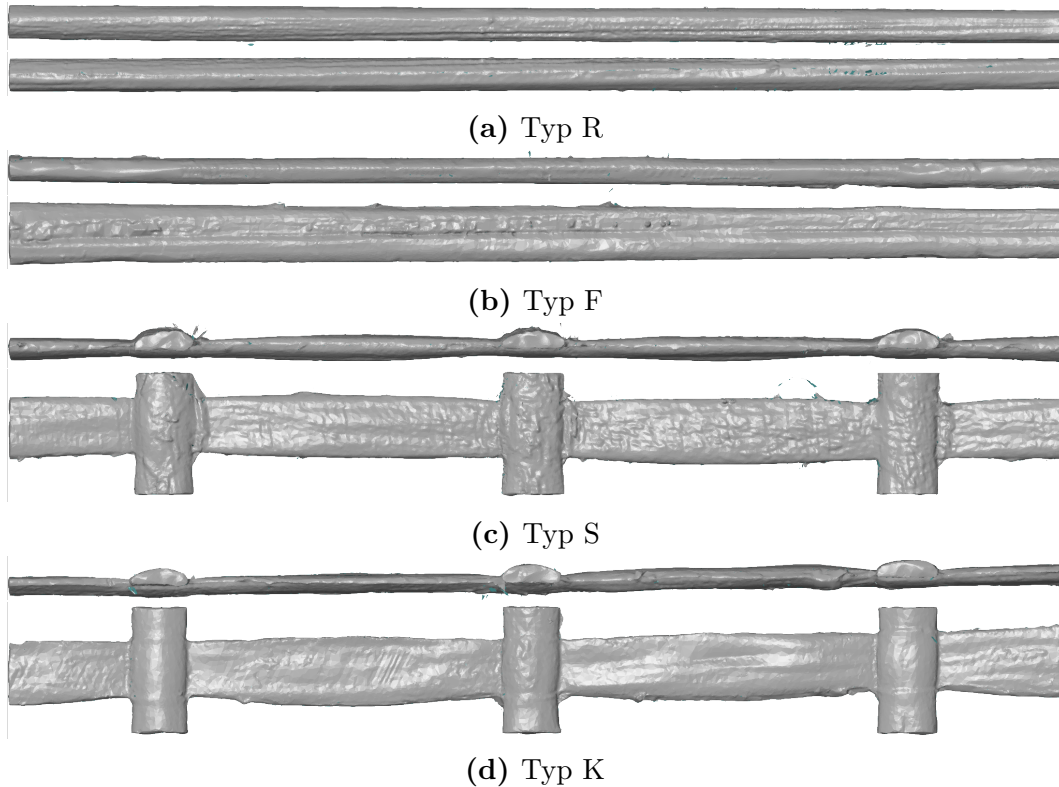


Abb. 3.12: Darstellung der verschiedenen Faserstrangtypen in Längsrichtung

Da davon ausgegangen wird, dass die jeweilige Aufweitung in der Dickenrichtung (erkenntlich in der Seitenansicht) bzw. in der Breitenrichtung (erkenntlich in der Draufsicht) unterschiedlichen Einfluss auf die Spaltrissbildung hat, wird zusätzlich ein Beiwert k_P eingeführt, der angibt in welche Richtung die periodische Aufweitung dominiert (siehe Gl. 3.5). Tendiert dieser Wert zu $k_P = 1$ liegt eine dominante Aufweitung in Dickenrichtung vor. Tendiert hingegen der Wert zu $k_P = -1$ liegt eine dominante Aufweitung in Breitenrichtung vor. Liegt eine gleichmäßige Aufweitung vor ergibt sich $k_P = 0$

$$k_P = \frac{(d_{r,F} - d_{r,K}) - (b_{r,F} - b_{r,K})}{(d_{r,F} - d_{r,K}) + (b_{r,F} - b_{r,K})} \quad (3.5)$$

mit:

- $d_{r,F}$ = Dicke in der Feldmitte des Rovings [mm]
- $d_{r,K}$ = Dicke im Kreuzungsbereich des Rovings [mm]
- $b_{r,F}$ = Breite in der Feldmitte des Rovings [mm]
- $b_{r,K}$ = Breite im Kreuzungsbereich des Rovings [mm]

Unabhängig von der periodischen Dickenaufweitung, die in den Laserscans gut zu sehen ist, kann eine globale Textilwelligkeit auftreten. Diese Welligkeit tritt einerseits auf, wenn die Faserstränge nicht in gestreckter Form vorliegen. Andererseits kann eine asymmetrische Dickenaufweitung vorliegen, die zu einer Exzentrizität der

3.3 Experimentelle Untersuchungen zur Spaltrissbildung

Faserstrangachse führt und so in weiterer Folge eine Garnwelligkeit erzeugt. Zur Beschreibung dieser Garnwelligkeit wird ein weiterer Beiwert k_W eingeführt, der das Verhältnis der Ausmitte der Faserstrangachse zur Maschenweite beschreibt (siehe Gl. 3.6). Liegt dieser Wert bei 0, entspricht dies einem perfekt geraden Strang. Je größer die Abweichung von 0 hingegen ist, desto ausgeprägter ist die Welligkeit des Textils.

$$k_W = \frac{f}{e} \quad (3.6)$$

mit:

f = Ausmitte der Faserstrangachse innerhalb einer Maschenweite [mm]
 e = Maschenweite [mm]

In Abb. 3.13 sind die genauen geometrischen Abmessungen in Längsrichtung für die Faserstrangtypen S und K des Versuchsprogramms dargestellt. Für Typ R und F werden keine gesonderten Darstellungen abgebildet, da diese eine durchgehend gerade Form aufweisen.

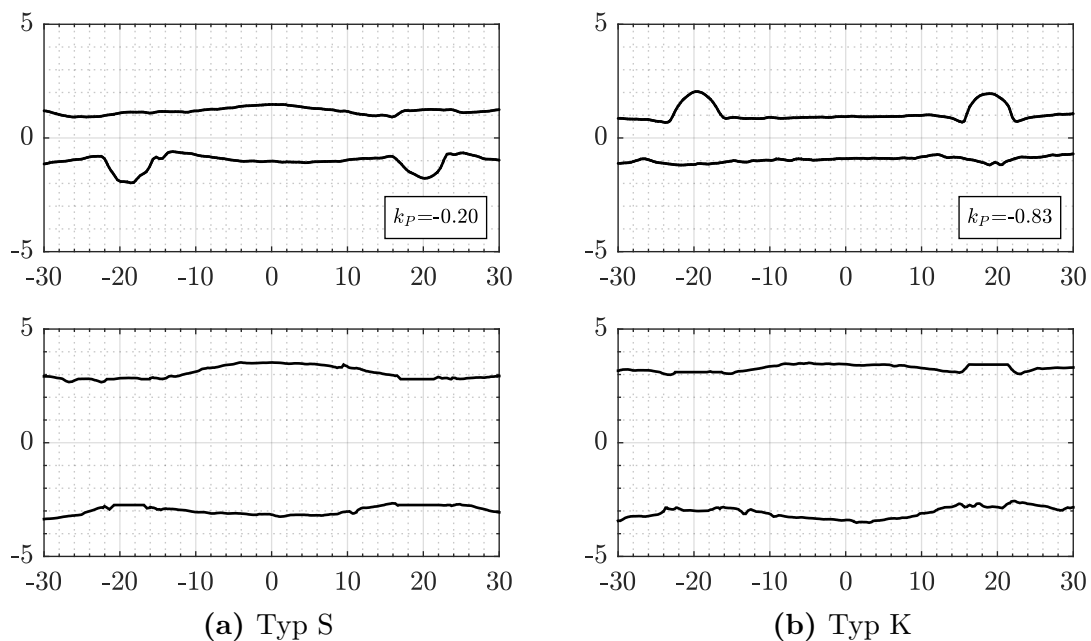


Abb. 3.13: Längsschnitt in Dickenrichtung (oben) und Breitenrichtung (unten)

Die zusammengefassten geometrischen Kennwerte sind in Tab. 3.2 ersichtlich. Die unterschiedlichen Kennwerte für den Schussroving (Typ S) bzw. den Kettroving (Typ K) des Ausgangstextils lässt sich durch die Herstellungsmethode des gewirkten Geleges erklären. Bei der Herstellung werden die einzelnen Faserstränge des Ausgangstextils durch den Wirkfaden miteinander verbunden. Der Wirkfadendruck in den Kreuzungspunkten erzeugt einen Schussfaden mit einer ausgeprägten Dickenänderung in der Seitenansicht (Abb. 3.13a). Beim Kettroving (Typ K) ist diese Charakteristik

weniger stark ausgeprägt, da der Faserstrang über die Länge kontinuierlich mit dem Wirkfaden umwickelt ist, wodurch ein flacherer Querschnitt entsteht. Durch das anschließende Abquetschen der Faserstränge beim Tränkungsvorgang wird in beiden Fällen die charakteristische periodische Breitenänderung über die Länge, die in diesem Fall für den Kett- und den Schussroving ähnlich ausgeprägt ist (Abb. 3.13 (unten)), bestärkt. Bei der geometrischen Auswertung sind diese Zusammenhänge gut an den eingeführten Beiwerten ersichtlich. Die Kompression an den Kreuzungspunkten und die Aufweitung in Feldmitte ist am Beiwert k_A ablesbar. Diese ist für beide Wirkrichtungen vorhanden, jedoch für den Kettroving aufgrund der bereits erwähnten Umwicklung mit dem Wirkfaden weniger stark ausgeprägt. Der Beiwert k_P weist auf eine dominante Dickenaufweitung sowohl für den Schuss- als auch für den Kettroving hin. Aufgrund der fehlenden Dickenaufweitung beim Kettroving ist die Breitenaufweitung für diesen Roving folglich sogar noch ausgeprägter. Die hier verwendeten Faserstränge sind allesamt sehr gerade. Dieser Sachverhalt schlägt sich im Beiwert k_W nieder. Lediglich für den Schussroving sind geringe Abweichungen von einer geraden Form feststellbar.

Tab. 3.2: Geometrische Kennwerte der verschiedenen Faserstrangtypen⁸

Roving	$U_{r,m}$ [mm]	$A_{r,m}$ [mm ²]	k_F [-]	k_A [-]	k_P [-]	k_W [-]
Typ R	10,997	9,287	1,018	1,000	1,000	0,000
Typ F	14,209	11,750	1,170	1,000	1,000	0,000
Typ S	14,799	11,454	1,234	1,500	-0,200	0,010
Typ K	14,970	10,529	1,302	1,390	-0,834	0,002

3.3.1.2 Charakterisierung des Betons

Für die Herstellung der Versuchskörper wurden zwei verschiedenen Betonzusammensetzungen gewählt. Der Großteil der Untersuchungen (Typ S, Typ O, Typ F, Typ R, Typ K) wurde mit einer feinkörnigen Betonmischung hergestellt. Als Grundlage diente die Standardfeinbetonmischung PZ-0899-01 aus dem SFB 532 (Brameshuber, Brockmann et al. 2006). Dadurch kann eine Vergleichbarkeit mit bereits bestehenden Arbeiten gewährleistet werden. Die Mischung wurde geringfügig an die lokale Ressourcenverfügbarkeit und die eigenen Erfahrungen bzgl. der Verarbeitbarkeit angepasst. Die Betonzusammensetzung ist gekennzeichnet durch einen hohen Bindemittelgehalt und ein Größtkorn $\leq 0,5$ mm. Bei den Untersuchungen zum Einfluss der Betongüte wurde für die Betonmatrix der Versuchskonfiguration Typ O eine Betongüte entsprechend einem Ultrahochleistungsbeton angestrebt. Die Mischungszusammensetzung basiert auf einer Standardbetonmischung des Institutes für Baustofflehre der TU Wien, welche bereits in zahlreichen Untersuchungen des Institutes zur Anwendung

⁸Die geometrischen Kennwerte wurden mit MatLab ermittelt

kam (Preinstorfer und Kollegger 2017; Preinstorfer, Kromoser et al. 2018; Kromoser, Preinstorfer et al. 2019). Diese Zusammensetzung zeichnet sich ebenfalls durch einen sehr hohen Bindemittelgehalt aus. Im Vergleich zur vorigen Mischung weist diese aber einen wesentlich geringeren w-B Wert auf. Um dennoch eine gute Verarbeitbarkeit zu gewährleisten ist ein Zusatz von ca. 60 kg/m³ Fließmittel notwendig. Die jeweiligen genauen Betonzusammensetzungen sind in Tab. 3.3 ersichtlich.

Tab. 3.3: Verwendete Betonrezepturen im Versuchsprogramm

Bestandteile	HPC [kg/m ³]	UHPC [kg/m ³]
CEM I 42,5 N	496,55	784,32
Flugasche	181,24	-
Mikrosilika	35,45	154,90
Quarzmehl	506,48	-
Dolomitmehl	-	196,08
Sand 0,1/0,5	715,50	-
Sand 0/1,6	-	980,50
Wasser	283,03	206,27
Fließmittel	4,97	58,83
Betondruckfestigkeit 28d [MPa]	75,20	137,26

3.3.2 Versuchsaufbau

Für die Durchführung der Auszugversuche wird auf den von Lorenz (2014) vorgestellten und von Bielak et al. (2018) weiterentwickelten asymmetrischen Textilauszugversuch zurückgegriffen. Dabei wird der Prüfkörper, wie in Abb. 3.14 ersichtlich, im Untersuchungsbereich beidseitig verschmälert. Vorteilhaft bei dieser von Bielak et al. (ebd.) vorgestellten Adaption des Versuchsaufbaus ist, dass dem getesteten Faserstrang jene repräsentative Betonfläche, die dem Spalten entgegenwirkt, zugeordnet werden kann (Im Regelfall ergibt sich diese Fläche aus dem Rovingabstand jeweils in Kett- und Schussrichtung). Bei der Versuchsdurchführung wird der zu testende Faserstrang aus dem Untersuchungsbereich ausgezogen. Nachteilig bei diesem Versuchsaufbau ist der Umstand, dass die gesamte aufgebrachte Prüfkraft über die Betonfläche am Anschluss des Untersuchungsbereiches zum oberen Prüfkörperabschnitt übertragen werden muss. Für große Prüfkraft kann es hier zu einem Abreißen des Untersuchungsbereiches vor Erreichen der eigentlichen Auszugslast kommen. Auf diesen Aspekt ist bei der Versuchskörperkonzeptionierung unbedingt Acht zu geben. Für die hier beschriebenen Untersuchungen lagen die zu erwartenden Prüfkraft, und die daraus resultierenden Betonzugspannungen an dieser Stelle, deutlich unterhalb der Betonzugfestigkeit, wodurch ein frühzeitiges Versagen ausgeschlossen werden konnte.

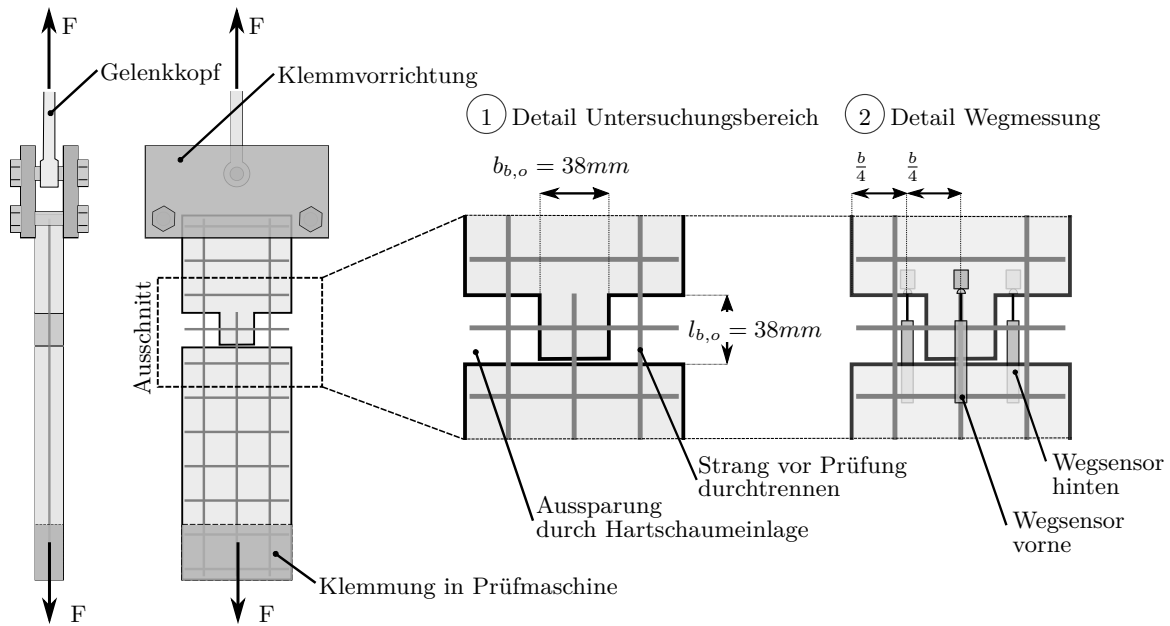


Abb. 3.14: Versuchsaufbau und Messtechnik der experimentellen Untersuchungen

Versuchskörper: Für die Herstellung der eigenen Versuche wurde die Verschränkung im Untersuchungsbereich mit einer Aussparung aus PE-Hartschaum, welche direkt in die Schalung platziert wurde, erzielt. Die Einbindelänge des zu testenden Faserstranges wurde für vorliegende Untersuchungen jeweils mit einer Maschenweite definiert. Dadurch kann für die gewirkten Gelege jeweils eine vollständige Dicken- bzw. Breitenaufweitung abgebildet werden. Jene Faserstränge, welche einen Querfaserstrang aufwiesen (während des Versuches noch vorhanden - Typ S, Typ K, Typ U, bzw. kurz vor dem Versuch entfernt - Typ O) wurden zudem so angeordnet, dass der Knotenpunkt des Längs- und Querfaserstrangs genau in der Mitte des Untersuchungsbereiches zu liegen kam. Durch Einlegen eine PE-Folie wurde zudem ein vordefinierter Solriss hergestellt, an dem die einzelnen Faserstränge ausgezogen wurden. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abb. 3.14 dargestellt. Die eigentliche Betonage erfolgte nach Erledigung dieser Vorarbeiten im Gießverfahren. Im Zuge der Nachbehandlung blieben die Prüfkörper zwei Tage abgedeckt unter einer Folie in der Schalung. Im Anschluss wurden sie entschalt und bis zum siebenten Tag in einem Wasserbecken gelagert. In einem letzten Schritt wurden die Prüfkörper aus dem Wasserbad genommen und in einer Klimakammer bei 20°C und 60% Raumfeuchte bis zum Prüfbeginn gelagert. Insgesamt wurden für jede Versuchskonfiguration fünf Versuchskörper hergestellt. Die Dicke der Versuchskörper wurde für alle Konfigurationen mit 30 mm gewählt. Dies entspricht einer Betondeckung von ca. 15 mm. Zusätzlich wurden für jede Betonage Prüfkörper zur Messung der Betoneigenschaften angefertigt, welche gemeinsam mit den eigentlichen Versuchskörpern nachbehandelt wurden. Diese bestanden einerseits aus Prismen (40/40/160 mm) nach ÖNORM EN 196-1 (2016) zur Messung

der Biegezug- und der Spaltzugfestigkeit, sowie Würfeln 100/100/100 zur Messung der Betondruckfestigkeit. Die ermittelten Kennwerte für die einzelnen Versuchskörper sind in Tab. 3.4 zusammengefasst.

Prüf- und Messtechnik: Für die Prüfung wurden die Versuchskörper zuerst in die Prüfmaschine eingebaut. Dazu wurden sie am oberen, bzw. am unteren Ende eingeklemmt. Während dies am oberen Ende durch eine gelenkige Lagerung erfolgte, wurden sie am unteren Ende direkt in den Klemmbacken der Prüfmaschine befestigt. Im Anschluss wurden vor der eigentlichen Prüfung die Aussparungen aus PE-Würfeln entfernt und die Faserstränge, welche in den Hohlräumen verliefen, durchtrennt. Die Prüfung selbst erfolgte weggesteuert mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min bis eine Rissöffnung von 10 mm erreicht war, oder keine Kraft mehr messbar war. Die Messung der Kraft erfolgte über eine in die Prüfmaschine eingebaute Zugkraftmessdose. Die Messung der Rissöffnung erfolgte über drei induktive Wegaufnehmer, die auf dem Versuchskörper appliziert wurden, wobei einer mittig auf den Versuchskörper und die beiden anderen auf der gegenüberliegenden Seite jeweils in den Viertelpunkten angebracht wurden (siehe Abb. 3.14). Dadurch konnten eventuell auftretende Verdrehungen aufgrund von Imperfektionen registriert und beurteilt werden. Nach Beendigung der Prüfung wurde der Versuchskörper ausgebaut und der tatsächlich vorhandene Untersuchungsbereich ($b_{b,o}$ und $l_{b,o}$) gemessen. Dadurch können herstellungsbedingte Ungenauigkeiten in der Beurteilung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

3.3.3 Ergebnisse

3.3.3.1 Rissbildung

Die durchgeführten Versuche waren allesamt von einer ausgeprägten Sprengrissbildung bei Erreichen der Maximallast F_{max} begleitet. Dabei konnte ein wesentlicher Zusammenhang zwischen der Querschnittsform und der auftretenden Rissbildung festgestellt werden (siehe Abb. 3.15).

Für runde Rovinge wurden radiale Längsrisse festgestellt, wobei diese Risse je Versuchskörper zufällig entlang des Umfangs der Bewehrung verteilt waren (siehe Abb. 3.3a). Bei allen anderen Faserstrangtypen – gemeinsam ist ihnen die flache Form des zu testenden Rovings, konnte hingegen eine Längsrissbildung ausschließlich in der Ebene der textilen Bewehrung festgestellt werden (siehe Abb. 3.3b). Dies entspricht der in dieser Arbeit definierten Spaltrissbildung.

3.3.3.2 Allgemeines zur Auswertung

Die erhaltenen Messgrößen aus dem Auszugversuch, F und w , werden in den folgenden Abschnitten in einer Kraft-Rissöffnungs-Beziehung (KRB) dargestellt. Die Kraftgröße F entspricht dem beim Versuch gemessenen Auszugswiderstand im Untersuchungsbereich. Die Rissöffnung für jeden Versuchskörper wird aus den drei Wegaufnehmermessungen gemittelt. Liegt eine unverhältnismäßig große Verdrehung

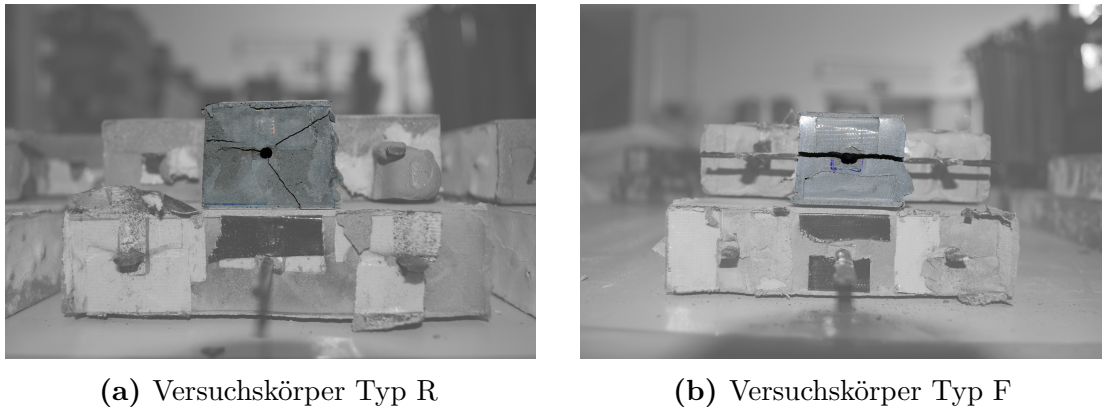


Abb. 3.15: Rissbildung in Abhängigkeit der Querschnittsform (Preinstorfer, Kromoser et al. 2018)

vor (Rissflanke stützt sich gegenseitig ab) wird der Versuchskörper nicht in die Auswertung miteinbezogen. Abb. 3.16 gibt exemplarisch die Auswertung für Versuchskörper Typ S wieder. Der qualitative Verlauf der KRB, der anhand dieser Messdaten ausgelesen werden kann, ist für alle Faserstrangtypen, die in dieser Arbeit untersucht wurden gleich und gliedert sich in drei Abschnitte. Bei Belastungsbeginn kommt es zu einem Anstieg der Kraft F und der Rissöffnung w (Bereich a) bis zum Erreichen der Maximallast F_{max} . Wird F_{max} überschritten, kommt es bei allen Versuchskonfigurationen zu einer Sprengrissbildung und zu einem abruptem Abfall der Verbundkraft auf den Wert F_f (Bereich b). Die anschließend übertragbare Verbundkraft ergibt sich aus der Reibung zwischen Textilbewehrung und umgebender Matrix und nimmt mit fortlaufendem Auszug aufgrund der größer werden Rissweite kontinuierlich ab, bis keine Kraft mehr übertragen werden kann (Bereich c). Die weitere Auswertung gliedert sich in die folgenden drei Schritte:

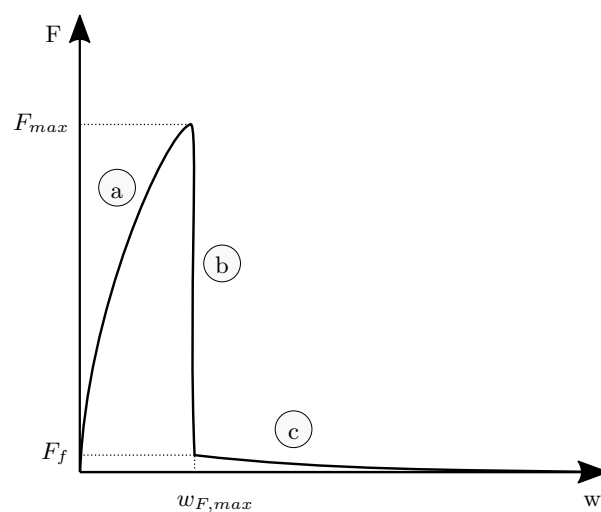


Abb. 3.16: Charakteristische Kraft-Rissöffnungs-Beziehung (KRB) in den vorliegenden Untersuchungen

Mittelwertkurven: In einem ersten Schritt werden, wie bereits angeführt, die einzelnen Wegaufnehmermessungen je Versuchskörper arithmetisch gemittelt und so eine Kraft-Rissöffnungsbeziehung für jeden Versuchskörper erstellt (siehe Abb. 3.17a). Um die Faserstrangtypen miteinander vergleichen zu können, werden im Anschluss Mittelwertkurven der einzelnen Versuchskonfigurationen gebildet. Die Mittelwertbildung erfolgt anhand der in Butler et al. (2009) vorgestellten Methode der abschnittswiseen Mittelung (siehe Abb. 3.17b). Dazu werden die vorher definierten Bereiche a und b in jeweils j -Intervalle (für vorliegende Untersuchungen wurde $j = 100$ gewählt) unterteilt und die zugehörigen Messwerte je Intervall gemittelt. Der weiterführende Verlauf im Abschnitt c wird in festen Intervallen mit einer Länge von 0,01 mm gemittelt. Die Auswertung für alle Versuchskonfigurationen ist in Abb. 3.21 - Spalte 1, bzw. detaillierter in Anhang A ersichtlich.

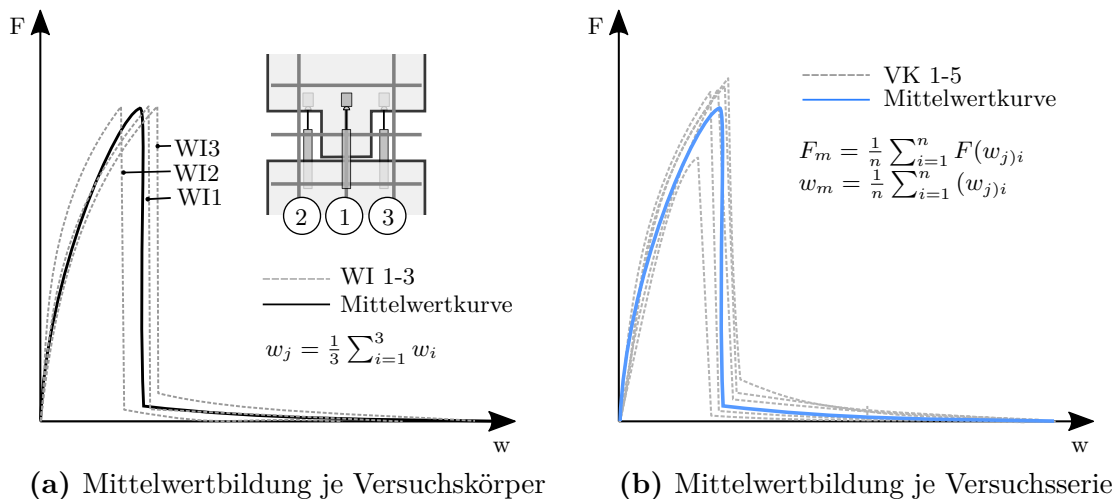


Abb. 3.17: Bestimmung der gemittelten Kraft-Rissöffnungsbeziehung je Versuchsserie

Belastungsniveau bei Spaltrissbildung: Um eine Aussage über das Belastungsniveau bei beginnender Längsrissbildung treffen zu können, ist in weiterer Folge der Betonwiderstand $F_{sp,R}$ von Interesse. Dieser ergibt sich aus der tatsächlichen Größe der Spaltfläche und der Spaltzugfestigkeit des Betons, welche anhand von Spaltzugversuchen ermittelt wurde. Die Spaltfläche ergibt sich für Versuchskörper Typ S, Typ O, Typ F, Typ U und Typ K jeweils aus der Größe des Untersuchungsgebietes, da die Rissfläche in der Ebene der textilen Bewehrung verlief. Für Faserstrangtyp R wurde die Spaltfläche extra gemessen, da die Rissbildung nicht in der Ebene der textilen Bewehrung verlaufen ist (siehe Kap. 3.3.3.1). Um eine Betonabdeckung durch den Faserstrang zu berücksichtigen, wird zudem bei allen Versuchskonfigurationen die Fläche der Faserstränge von der, dem Spalten entgegenwirkenden Betonfläche abgezogen. Die Vorgehensweise, bzw. der Betonwiderstand ist in Abb. 3.18 ersichtlich.

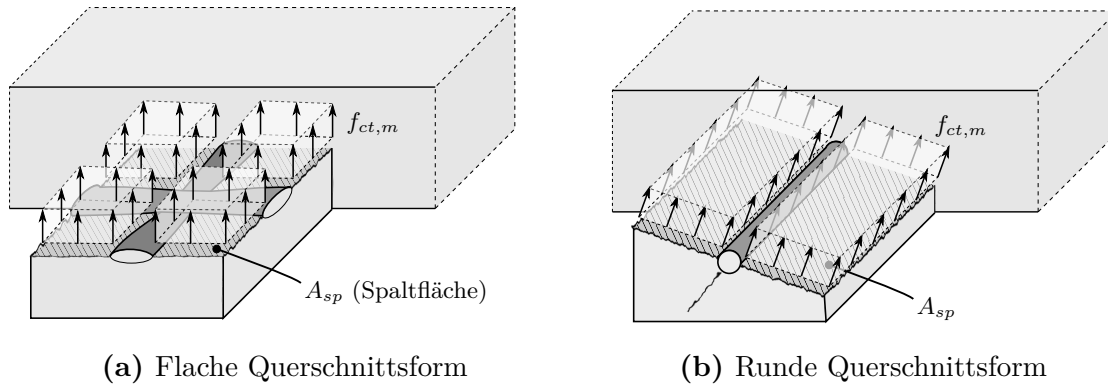


Abb. 3.18: Bestimmung des Spaltwiderstandes⁹

Das Verhältnis von Prüfkraft zu Betonwiderstand gibt Auskunft über das Belastungsniveau bei beginnender Längsrissbildung im Versuchskörper. Die gemittelten Messwerte und der zugehörige gemittelte Widerstand sind in Tab. 3.4 zusammengefasst. Die ersten beiden Spalten geben hierbei die gemittelte max. Auszugskraft F_{max} und die zugehörige Rissöffnung $w_{F,max}$ wider. Spalte drei bis fünf geben die Spaltfläche A_{sp} bzw. die Spaltzugfestigkeit $f_{ctm,sp}$ und die gemittelte Betonzugfestigkeit in der Spaltfläche $f_{ct,m}$ wider. Daraus wird der in Spalte sechs angegebene Widerstand $F_{sp,R}$ ermittelt. Die Gegenüberstellung der Einwirkung mit dem Widerstand erfolgt schließlich in Spalte sieben.

Tab. 3.4: Auszugwiderstand und Betonwiderstand gegen Spalten

Roving	F_{max} [N]	$w_{F,max}$ [mm]	A_{sp} [mm ²]	$f_{ctm,sp}$ [MPa]	$f_{ct,m}$ [MPa]	$F_{sp,R}$ [N]	$F_{max}/F_{sp,R}$ [-]
Typ S	4480,7	0,4132	993,5	6,89	4,59	4563,4	1,000
Typ O	4139,1	0,5582	1193,3	9,71	6,47	4797,1	0,865
Typ F	2860,2	1,3853	1163,8	6,03	4,02	4678,4	0,616
Typ R	3561,8	2,1102	1313,8	6,03	4,02	5281,5	0,680
Typ K	3774,3	0,3989	916,3	6,03	4,02	3683,4	1,024
Typ U	4679,3	0,6004	1092,9	6,03	4,02	7074,7	0,664

Da das Verhältnis der Einwirkung zum Widerstand in weiterer Folge speziell von Interesse ist, sind die Verhältniszahlen der jeweiligen Versuchsserien, mit den zugehörigen Minimal- und Maximalwerten in Abb. 3.19 genauer dargestellt. Da die Stichprobenanzahl in den Versuchsserien gering war, wird auf eine statistische Auswertung verzichtet. Die Darstellung der Ergebnisse liefert dennoch einen soliden Anhaltspunkt für die Interpretation der Ergebnisse.

⁹Der Spaltwiderstand ist hier in Form einer gleichmäßigen Spannungsverteilung dargestellt. Wie später noch gezeigt wird, tritt in Realität hingegen ein steiles Spannungsgefälle innerhalb des Untersuchungsbereiches auf. Für die Gegenüberstellung der Ergebnisse, wird entsprechend den Ergebnissen in Kap. 4.5 eine gemittelte Betonzugfestigkeit, die 2/3 der Spaltzugfestigkeit beträgt, angenommen.

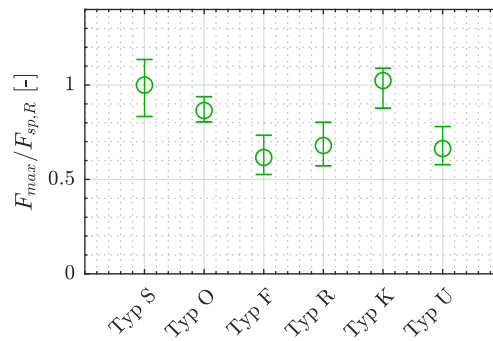


Abb. 3.19: Verhältnis der Verbundbeanspruchung F_{max} zum Spaltwiderstand $F_{sp,R}$

Verbundspannungs-Schlupf Beziehung (VSB): Um Rückschlüsse auf die aktivierten Verbundmechanismen zu erhalten, wird in einem dritten Schritt, aufbauend auf der analytischen Lösung von Richter (2005), eine abschnittsweise lineare VSB mittels inverser Berechnung aus der KRB ermittelt. Dabei wird von einer konstanten Verbundspannung entlang des Umfangs der Bewehrung ausgegangen. Ähnlich dem Stahlbetonbau ist diese Annahme, bei Vorliegen eines Formschlusses (von dem auch hier bei den endverarbeiteten Textilien ausgegangen wird) eine Näherung und beschreibt den realen Verbundspannungsverlauf nur bedingt. Für die Ermittlung der VSB wird zuerst ein qualitativer Verlauf der Beziehung angenommen (siehe Abb. 3.20a), die durch mehrere Stützstellen, zwischen denen ein linearer Verlauf vorliegt, charakterisiert ist (multilineare VSB). Die Stützstellen werden anschließend solange angepasst, bis die Abweichung der errechneten KRB zur gemessenen KRB ein Minimum erreicht (siehe Abb. 3.20b). Die Auswertung für alle Versuchskonfigurationen ist in Abb. 3.21 - Spalte 3, bzw. detaillierter in Anhang A ersichtlich.

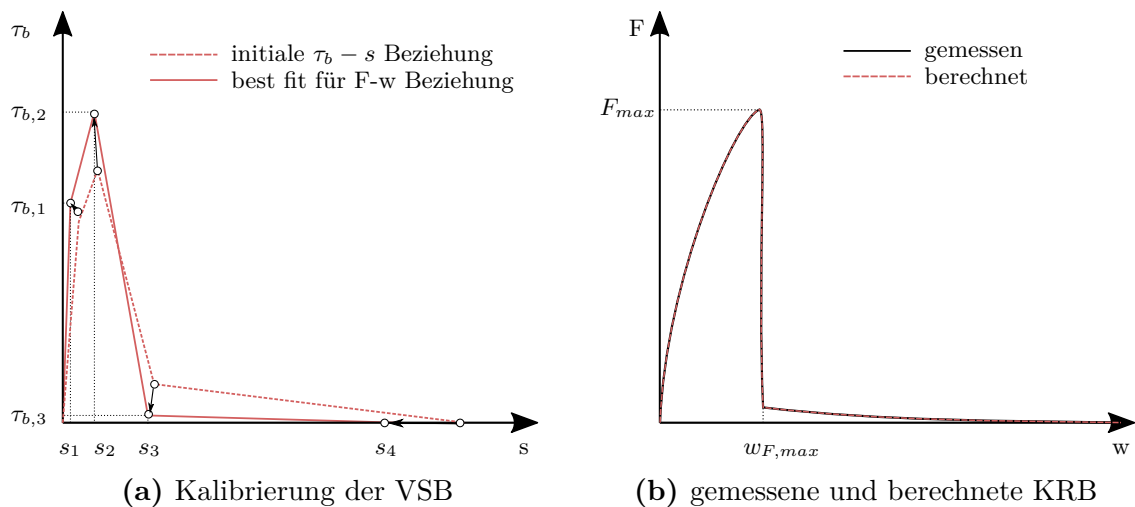


Abb. 3.20: Inverse Bestimmung der Verbundspannungs-Schlupf Beziehung (VSB)

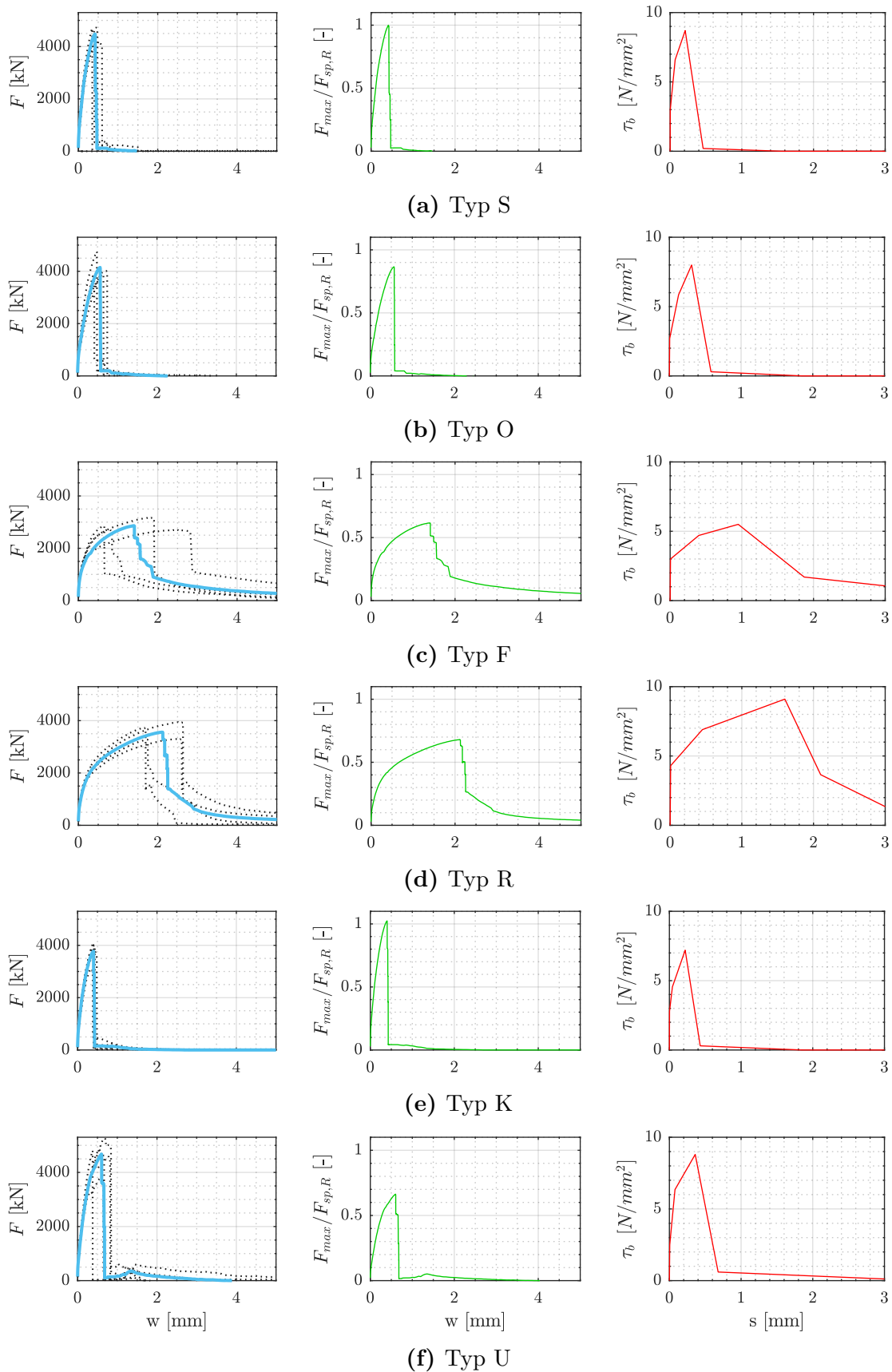


Abb. 3.21: Versuchsergebnisse: KRB (links), KRB normiert (mitte), VSB (rechts)

3.3.3.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse treten zahlreiche Aspekte in Bezug auf die Spaltrissbildung zutage. Auf einige dieser Aspekte wurde bereits in Preinstorfer, Kromoser et al. (2018) eingegangen. An dieser Stelle werden diese Beschreibungen detaillierter noch einmal angeführt und um weitere Untersuchungen ergänzt. Dabei wird auf das vorgestellte Versuchskonzept in Abb. 3.8 Bezug genommen. Für die Beurteilung der Verbundsteifigkeit wird die KRB der einzelnen Versuchsserien herangezogen. Für die genaue Beurteilung des Belastungsniveaus bei einsetzender Spaltrissbildung wird hingegen der normierte Wert $F_{max}/F_{sp,R}$ herangezogen.

Einfluss des Knotenwiderstandes: Wie bereits erwähnt wurde in der Literatur mehrfach der Beitrag des Knotenwiderstandes zur Verbundfestigkeit diskutiert. Im vorliegenden Fall konnte bei Vergleich von Typ S (Ausgangstextil in Schussrichtung) und Typ O (Ausgangstextil in Schussrichtung - ohne Querroving) ein geringer Einfluss des Knotenwiderstandes auf die Verbundfestigkeit festgestellt werden (siehe Abb. 3.22 rechts). Dies deckt sich mit eigenen Erfahrungen, da in der Regel die Querfaserstränge mit mäßigem Kraftaufwand von Hand abgelöst werden können. Selbiger Effekt ist bei der Verbundsteifigkeit erkennbar. Der Querstrang erzeugt einen Verschiebewiderstand, aus dem eine erhöhte Verbundsteifigkeit resultiert. Im Umkehrschluss wird durch das Fehlen des Querstranges die Verbundsteifigkeit reduziert und die Rissöffnung im Vergleich zum Ausgangstextil größer (siehe Abb.3.22 links).

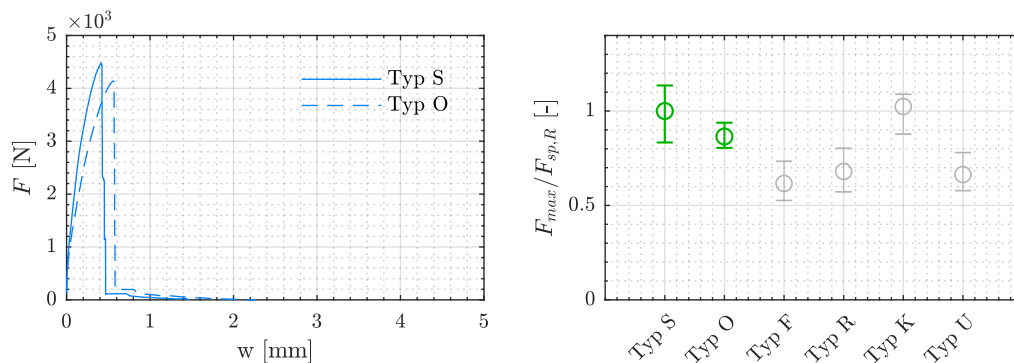


Abb. 3.22: Vergleich zum Einfluss des Knotenwiderstandes

Der Knotenwiderstand ist im Allgemeinen vom Wirkfadensystem, dem Wirkfadendruck und der Steifigkeit und Festigkeit des Tränkungsmaterials abhängig. Diese Parameter sind zwar veränderbar, im vorliegendem Fall liegt aber ein Textil mit einem vergleichsweise sehr hohem Verschiebewiderstand vor. Daher ist festzuhalten, dass der Einfluss des Knotenwiderstands gering ausfällt und dieser keinen wesentlichen Beitrag zum Verbundverhalten leistet.

Einfluss der periodischen Aufweitung: Bei der Betrachtung von Versuchskörper Typ O (Ausgangstextil in Schussrichtung - ohne Querroving) und Typ F (flache

Rovingform ohne periodische Aufweitung) können weitreichende Unterschiede im Verbundverhalten festgestellt werden. Typ O weist eine periodische Dicken- und Breitenaufweitung auf, wodurch ein Formschluss der Bewehrung mit dem umgebenden Beton erzielt wird. Dieser ist durch eine sehr hohe Verbundsteifigkeit gekennzeichnet. Im Vergleich dazu weist Faserstrang Typ F, welcher ohne diese charakteristische Aufweitung hergestellt wurde, ein viel weiches Verbundverhalten auf. Die Verformungen nach Überschreiten des Haftverbundes nehmen so stark zu, dass von keinem Formschluss ausgegangen werden kann. Demzufolge stellt sich bei dieser Konfiguration als maßgebender Verbundmechanismus ein Reibverbund ein. Auf Bauteilebene bedeutet die höhere Verbundsteifigkeit bei Vorhandensein einer periodischen Aufweitung kleinere Rissabstände und damit einhergehend geringere Rissbreiten.

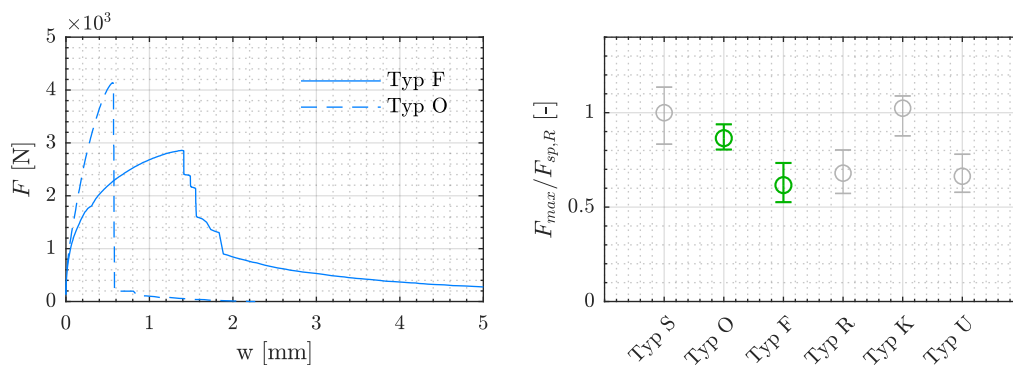


Abb. 3.23: Vergleich zum Einfluss der periodischen Aufweitung

Beim Betrachten des Belastungsniveaus bei Spaltbeginn stellte sich heraus, dass Faserstrang Typ O in der Lage war höhere Verbundkräfte zu übertragen als Typ F. Dieser Aspekt ist insofern interessant, da in Publikationen die periodische Dickenaufweitung als maßgebender Mechanismus, der zum Spalten führt, betrachtet wird (Bielak et al. 2018). Diese Vermutung kann anhand dieser Untersuchungen nicht bestätigt werden. Feststellbar ist aber, dass durch die höhere Verbundkraft beim Auftreten der Spaltrissbildung bei Typ O mehr Energie freigesetzt wird und der Spaltriss sich soweit öffnet, dass keine Kraftübertragung nach der Rissbildung mehr möglich ist. Bei Versuchskörper Typ F ist im Anschluss an die Spaltrissbildung, und dem damit einhergehenden Lastabfall, eine – wenn auch geringe – Kraftübertragung durch Reibung möglich.

Einfluss der Querschnittsform: Verglichen werden im folgenden Typ R (runde Rovingform ohne periodische Aufweitung) und Typ F (flache Rovingform ohne periodische Aufweitung). Beide Faserstrangtypen weisen durch das Fehlen einer periodischen Aufweitung ein sehr weiches Verbundverhalten auf. Im Vergleich konnten mit Faserstrang Typ R höhere Kräfte übertragen werden, die in weiterer Folge auch zu einer größeren Rissöffnung führten. Beide Versuchskonfigurationen versagten durch eine Sprengrissbildung. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale konnten hierbei in der Rissorientierung festgehalten werden. Wie bereits in

3.3 Experimentelle Untersuchungen zur Spaltrissbildung

Kap. 3.3.3.1 erwähnt, bildeten sich bei Versuchskörper Typ F die Risse in der Ebene der textilen Bewehrung aus, während für Versuchskörper Typ R die Rissbildung radial um die Bewehrung entstand (ähnlich der Sprengrissbildung welche aus dem Stahlbetonbau bekannt ist). Dies lässt darauf schließen, dass die Spannungen bei flachen Faserstrangquerschnitten primär orthogonal zu der Ebene der textilen Bewehrung orientiert sind, während für runde Faserstrangtypen eine gleichmäßigere Spannungsverteilung ähnlich dem Ringzugbandmodell, welches aus dem Stahlbetonbau bekannt ist, entsteht.

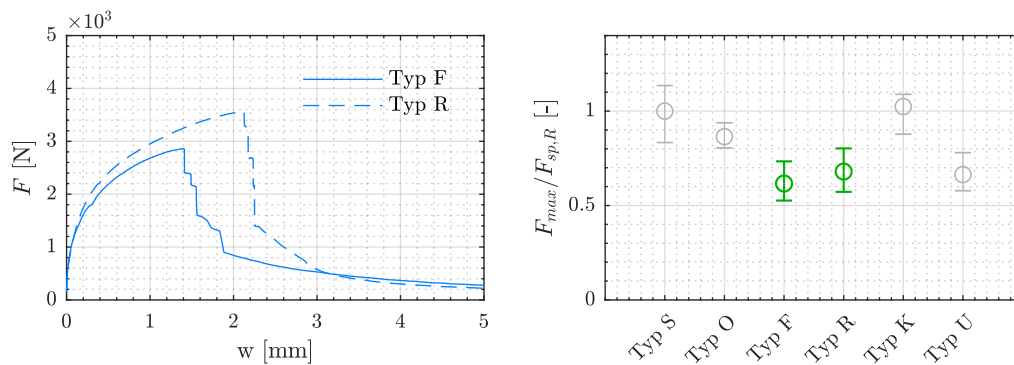


Abb. 3.24: Vergleich zum Einfluss der Querschnittsform

Einfluss der Wirkrichtung: Beim Vergleich von Faserstrang Typ S (Ausgangstextil in Schussrichtung) mit Typ K (Ausgangstextil in Kettrichtung) werden mehrere sich wechselseitig beeinflussende Mechanismen verglichen. Beide Faserstrangtypen weisen eine flache Querschnittsform mit unterschiedlichem Beiwert k_F , sowie eine periodische Aufweitung, jedoch mit unterschiedlicher Ausprägung k_A und k_P , auf. Trotz dieser ungleichen Ausprägung konnten nur minimale Unterschiede in der KRB festgestellt werden. Faserstrang Typ K weist eine geringfügig verminderte Verbundsteifigkeit auf, die eventuell auf die fehlende Aufweitung in Dickenrichtung zurückzuführen ist. Das Belastungsniveau bei Spaltbeginn hingegen ist für beide Versuchskörper annähernd gleich.

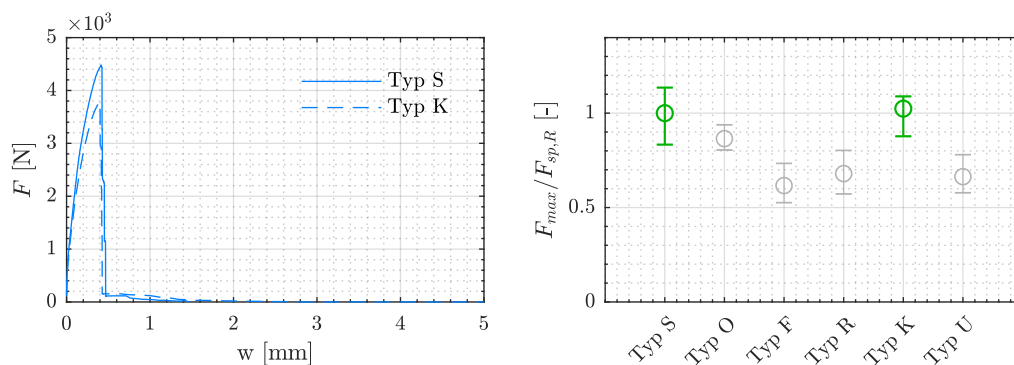


Abb. 3.25: Vergleich zum Einfluss der Wirkrichtung

Bei der numerischen Parameterstudie in Kap. 4.4 wird aufgezeigt, dass die einzelnen geometrischen Parameter sich gegenseitig beeinflussen. Während die flachere Form von Faserstrang Typ K eine Spaltrissbildung eher begünstigt, wird durch die dominanteren Breitenaufweitung bei ebendiesem Faserstrangtyp die Spaltrissneigung reduziert. Für vorliegende Textilkonfiguration ergibt sich durch diese wechselseitige Beeinflussung bei Typ K und Typ S zufällig ein sehr ähnliches Belastungsniveau bei Einsetzen der Spaltrissbildung. Durch den Vergleich dieser beiden Faserstrangtypen kann aber gezeigt werden, dass neben der Querschnittsform auch die periodische Aufweitung Einfluss auf die beginnende Spaltrissbildung hat.

Einfluss der Betongüte: In dieser Betrachtung werden Versuchskörper Typ S (Ausgangstextil in Schussrichtung) und Typ U (Ausgangstextil in Schussrichtung - Betongüte UHPC) verglichen. Beide Typen weisen denselben Faserstrang und identischen Abmessungen im Untersuchungsbereich auf. Unterscheidungsmerkmal bei diesem Vergleich ist die Betonzusammensetzung bzw. die Betonfestigkeit. Während Typ U eine höhere Spaltzugfestigkeit aufweist überraschen die Ergebnisse insofern, da die höhere Festigkeit sich nicht merklich in den Ergebnissen widerspiegelt. Zwar ist eine geringe Laststeigerung möglich, diese fällt im Vergleich zur höheren Festigkeit aber sehr gering aus. Der Vergleich der KRB kann diesbezüglich Hinweise geben. Für Versuchskörper Typ U wurde bereits vor dem eigentlichen Versagen bei Überschreiten von F_{max} ein kurzzeitiger Lastabfall mit darauffolgender Verminderung der Verbundsteifigkeit in den Messungen beobachtet, die eine beginnende Spaltrissbildung andeutet.

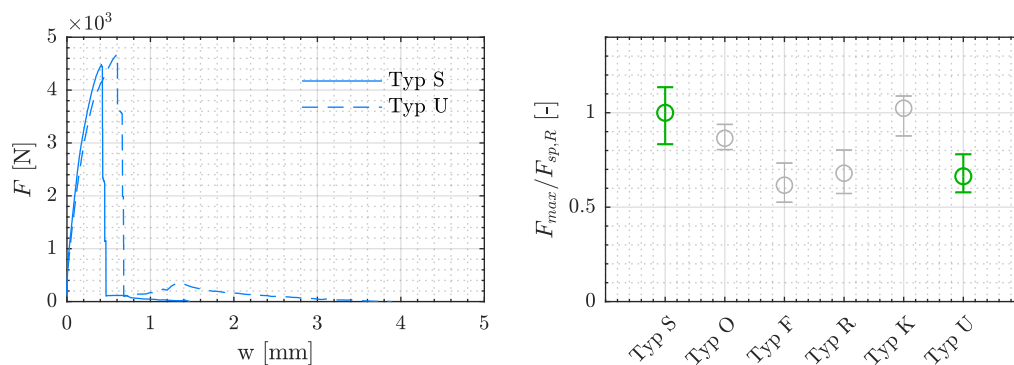


Abb. 3.26: Vergleich zum Einfluss der Betongüte

Diese frühe Spaltrissbildung kann auf mehrere Aspekte zurückgeführt werden. Am wahrscheinlichsten ist in diesem Zusammenhang, dass UHPC mit seiner hohen Steifigkeit und der geringen spezifischen Bruchenergie ein sehr sprödes Materialverhalten aufweist, und bei erstmaliger Überschreitung der Betonzugfestigkeit versagt, wohingegen bei niederfesten Betonen eine gewisse Duktilität vorhanden ist. Ähnliche Beobachtungen wurden in eigenen Untersuchungen an zahlreichen einaxialen Zugversuchen mit unterschiedlichen Betongüten gemacht.

Für eine valide Beurteilung des Einflusses der Betongüte sind aber weitere Untersuchungen nötig, da die Ergebnisse Interpretationsspielraum lassen.

3.3.3.4 Akivierte Verbundmechanismen

Bei Belastungsbeginn der einzelnen Versuchsserien liegt ein Haftverbund zwischen den Fasersträngen und der umgebenden Betonmatrix vor. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, dass keine bzw. nur minimale Relativverschiebungen zwischen der Bewehrung und dem Beton auftreten. Tritt eine Relativverschiebung ein, so ist demnach davon auszugehen, dass der Haftverbund gelöst wurde und andere Verbundmechanismen maßgebend werden. Von Interesse ist in weiterer Folge jene Stelle, an der ein Übergang vom Haftverbund zum Reib- bzw. Formverbund stattfindet. Bei genauer Betrachtung der KRB der eigenen Versuche ist ein entsprechender Steifigkeitsabfall am Ende des ersten sehr steifen Verbundabschnittes erkennbar, der mit einer beginnenden Relativverschiebung zwischen Bewehrung und Beton einhergeht (erkennbar an der Zunahme der Verformungen). Aus Sicht des Autors stellt dieser Bereich den Übergang vom Haftverbund zum Reib- bzw. Formverbund dar. Exemplarisch ist dieser Übergang für einen Versuchskörper der Serie Typ S in Abb 3.27 dargestellt.

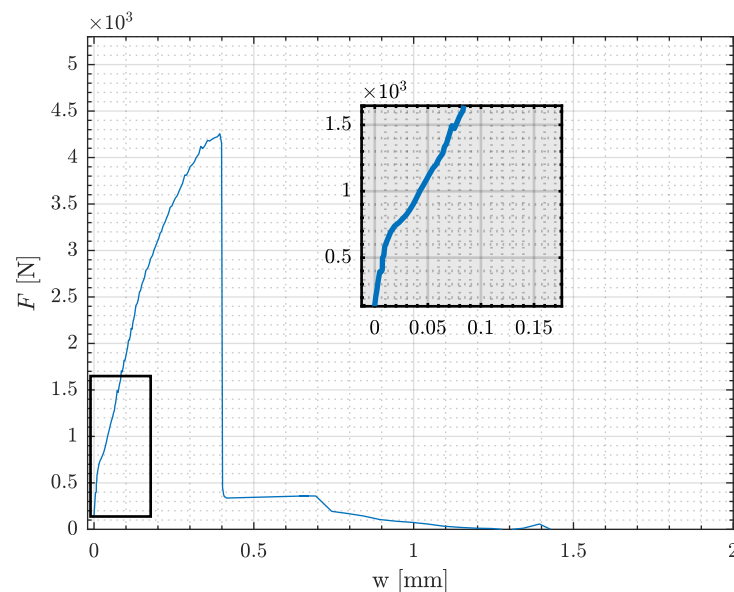
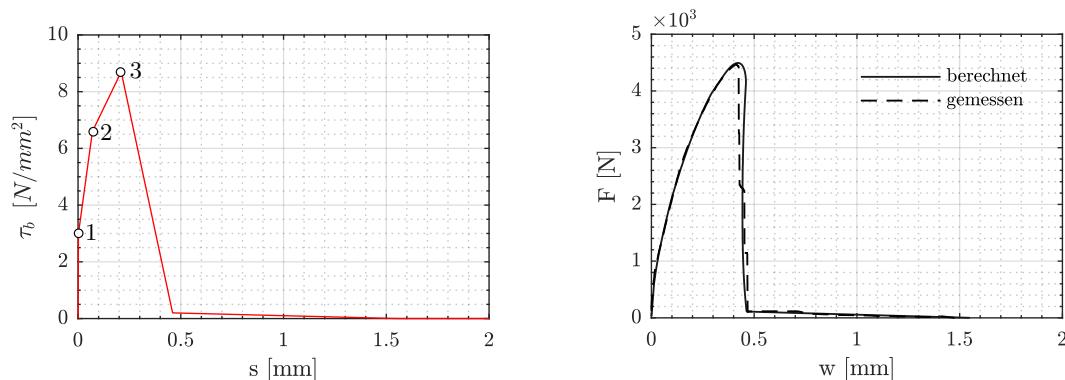


Abb. 3.27: Übergang vom Haft- zum Formverbund für VK Typ S

Mit diesem Wissen wurde versucht, die entsprechenden Verläufe der VSB (siehe Abb. 3.21-Spalte 3) für die unterschiedlichen Versuchsserien zu approximieren. Erkennbar ist, dass der Haftverbund in der Regel bereits bei geringen Laststufen durch eine andere Verbundart abgelöst wird. Bei jenen Faserstrangtypen, welche eine periodische Aufweitung aufweisen (Typ S, K, O, U) dominiert der Formverbund. Für die beiden Faserstrangtypen, welche eine konstante Querschnittsform über die Länge aufweisen

(Typ R und F), wird der Haftverbund durch den Reibverbund als dominante Verbundart abgelöst. Dadurch ergeben sich für diese Konfiguration wesentlich größere Verformungen.



(a) Berechnete Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung (b) Vergleich zwischen gemessener und berechneter Kraft- Rissöffnungsbeziehung

Abb. 3.28: Aktivierte Verbundmechanismen während des Auszugsversuches am Beispiel von Faserstrang Typ S

In Abb. 3.28 ist exemplarisch am Versuchskörper Typ S die ermittelte VSB sowie die daraus berechnete KRB zu sehen. Die Übereinstimmung im ansteigenden Lastpfad ist sehr genau, lediglich nach Überschreiten von $\tau_{b,max}$ kann der darauffolgende Lastabfall nicht exakt, aber mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. Ähnlich wie beim Ansatz von Richter (2005) ist auch hier zur realitätsnahen Abbildung der KRB ein vierteiliger Verlauf der VSB ausreichend. Abweichend zu den Untersuchungen von Richter (2005) und Lorenz (2014) ergeben sich aufgrund der Spaltrissbildung aber Unterschiede im Verlauf der VSB. Diese gliedert sich für vorliegende Untersuchungen in einen ersten Bereich, in dem der Haftverbund die maßgebende Verbundgröße ist. Nach Überschreiten von Punkt ① löst sich der Haftverbund und geht in den Formverbund über. In diesem Bereich nimmt die Steifigkeit gegenüber dem Haftverbund ab, ist aber weiterhin sehr groß. Im folgenden Verlauf nimmt die Belastung weiter zu, bis bei Punkt ② ein neuerlicher Verbundsteifigkeitsabfall ersichtlich ist. Dieser ist aus Sicht des Autors auf eine beginnende Spaltrissbildung zurückzuführen. Die Last kann in weiterer Folge noch geringfügig gesteigert werden, bis die maximal aufnehmbare Verbundspannung $\tau_{b,max}$ bei Punkt ③ überschritten wird. Ab diesem Zeitpunkt nimmt die aufnehmbare Verbundspannung stark ab, bis nur noch eine geringe Verbundspannung zufolge Reibung übertragen werden kann. Es ist hier noch einmal darauf hinzuweisen, dass die Berechnung der VSB nach diesem Prinzip, äquivalent zum Stahlbetonbau, der Grenzfläche zwischen Bewehrung und Beton an jeder Stelle das gleiche Pseudo-Stoffgesetz unterstellt. Das dieses Verhalten die Realität nur näherungsweise widerspiegelt wird in den FE-Berechnungen in den folgenden Abschnitten gezeigt. Dennoch kann mit diesem Verfahren das Verbundverhalten und die einzelnen Verbundabschnitte gut interpretiert werden und so wertvolle Informationen zum Verbundverhalten gesammelt werden.

3.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertung der Versuche in den vorangegangenen Abschnitten förderte einige Aspekte zum Verbundverhalten von Textilien mit einer steifen Tränkung, welche in eine Betonmatrix gebettet sind, zu Tage. So konnte bei allen Versuchskörpern eine Sprengrissbildung zufolge hoher Verbundbeanspruchungen beobachtet werden. Auffällig ist in diesem Zusammenhang, dass die Querschnittsform einen maßgeblichen Einfluss auf die Rissorientierung hat. So konnte bei flachen Formen eine Rissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung festgestellt werden, welche dem vielfach beobachtetem Spalten bei textilbewehrten Bauteilen entspricht. Bei runden Formen stellte sich hingegen eine zufällig verteilte radiale Rissbildung ein.

Die herstellungsbedingte periodische Aufweitung hingegen hat maßgeblichen Einfluss auf die jeweils aktivierten Verbundmechanismen und die daraus resultierende Verbundsteifigkeit. Durch die periodische Aufweitung ist – eine ausreichende Steifigkeit der Tränkung vorausgesetzt – ein Formschluss zwischen Bewehrung und Betonmatrix möglich, mit der ein sehr steifes Verbundverhalten einhergeht. Auf Bauteilebene würde sich dieses Verhalten in kleinen Rissabständen und Rissbreiten manifestieren. Fehlt diese periodische Aufweitung ist der Reibverbund der maßgebende Verbundmechanismus nach Überschreiten des Haftverbundes. Durch die geringe Verbundsteifigkeit des Reibverbundes entstehen große Relativverschiebungen zwischen Bewehrung und Beton, womit große Rissabstände einhergehen. Dennoch konnte auch beim Fehlen eines Formschlusses eine Spaltrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung beobachtet werden.

In Bezug auf den Einfluss der periodischen Aufweitung auf die beginnende Spaltrissbildung konnte zwar festgestellt werden, dass eine Dickenaufweitung die Spaltrissbildung begünstigt, diese aber bei weitem nicht so dominant ist, wie dies oft angenommen wird. Dies lässt darauf schließen, dass die periodische Aufweitung zwar wichtig für die Erzielung eines Formschlusses ist, die Spaltrissbildung aber nicht primär durch einen Formschlussparameter bestimmt wird. Würde ein Formschluss auch ohne periodische Aufweitung möglich sein (z.B. durch eine aufgebrachte Rippung auf den Rovingen) so ist bei flacher Querschnittsform ebenfalls von einer Spaltrissbildung auszugehen. Beim Vergleich von Faserstrang Typ S mit Typ K zeigt sich ein ähnliches Lastniveau bei Einsetzen der Spaltrissbildung, obwohl diese unterschiedliche geometrische Kennwerte k_F , k_A und k_P aufwiesen. Dadurch konnte die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Parametern veranschaulicht werden. Zwar weist Faserstrang Typ S aufgrund der runderen Form eine geringere Spaltrissneigung auf, durch die stärker ausgeprägte Dickenaufweitung wird dieser Aspekt aber wieder aufgewogen.

Auf der Widerstandsseite konnte bei den Untersuchungen festgestellt werden, dass eine Erhöhung der Betongüte nicht zwangsläufig zu einem besseren Verbundverhalten führt. So war bei den Versuchen, bei denen Ultrahochleistungsbeton verwendet wurde, zwar eine geringfügig höhere Kraftübertragung möglich, diese steht aber in keiner Relation zur tatsächlich höheren Spaltzugfestigkeit des Betons. Wie im nächsten Kapitel noch gezeigt wird, weist die Spannungsverteilung im Untersuchungsbereich ein sehr hohes Spannungsgefälle mit einer Spannungsspitze direkt beim Anschluss des Rovings zum Beton auf. Aufgrund der sehr hohen Steifigkeit des Ultrahochleistungsbetons

und der in der Regel geringen spezifischen Bruchenergie, liegt die Vermutung nahe, dass bei dem erstmaligen Erreichen der Betonzugfestigkeit ein sehr sprödes Materialversagen eintritt, wohingegen bei niederfesteren Betonen eine teilweise Plastifizierung mit anschließender weiterer Laststeigerung stattfindet. Zu erkennen ist dies in den Kraft-Rissöffnungsbeziehungen (detailliert zu sehen in Anhang A) der Versuchskörper vom Typ O, wo kurz vor dem Erreichen der Maximallast ein merklicher Kraft- und Steifigkeitsabfall zufolge Rissbildung stattfindet. Ein ähnliches Verhalten konnte in einaxialen Zugversuchen, die am Institut durchgeführt wurden, beobachtet werden. In diesen Untersuchungen zeigte sich zwar ein sehr steifes Verbundverhalten, jedoch setzte auch hier die Spaltrissbildung in Relation zur Betonzugfestigkeit wesentlich früher ein als bei anderen Betonen.

Abschließend ist auf Basis der experimentellen Untersuchungen festzuhalten, dass der Verbund zwischen einer Textilbewehrung und dem Beton sich aus verschiedenen Parametern zusammensetzt, die sich wechselseitig beeinflussen und die lediglich summarisch zusammengefasst in einem Pseudo-Stoffgesetz abgebildet werden können. Um das Verbunderhalten demnach noch besser interpretieren zu können, wird in den folgenden Abschnitten mithilfe von FE-Berechnungen versucht, die Verbundmechanismen und Spannungsverteilungen im Inneren der Versuchskörper nachzuvollziehen.

4 FE-Analyse

4.1 Vorgehensweise

Die vorangegangenen experimentellen Untersuchungen lieferten zahlreiche Erkenntnisse zum Verbundverhalten von Textilien, welche mit einem steifen Tränkungsmedium imprägniert sind. So zeigte sich, dass durch eine periodische Aufweitung ein Formschluss des Rovings mit dem umgebenden Beton erzielt werden kann. Dadurch erhöht sich die Verbundsteifigkeit, bei ungünstiger Ausprägung steigt aber die Gefahr einer Spaltrissbildung. Nebenbei konnten auch bei flachen Rovingen, die in Längsrichtung einen konstanten Querschnitt aufweisen, ausgeprägte Spaltzugspannungen festgestellt werden, die zu einer Längsrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung führen. Beide Parameter (Rovingform und periodische Aufweitung) beeinflussen sich wechselseitig und erzeugen in Abhängigkeit ihrer Ausprägung entsprechende Spaltzugspannungen orthogonal zu der Ebene der textilen Bewehrung. Im folgenden Abschnitt dieser Arbeit wird versucht, das Verbundverhalten mit einer numerischen Untersuchung abzubilden, um die jeweiligen Mechanismen tiefergehend zu untersuchen, damit sie besser interpretiert werden können. Dabei interessieren insbesondere folgende Fragestellungen:

1. Wie setzt sich der Verbund an der Grenzfläche zwischen Bewehrung und Beton zusammen?
2. Wie sieht der Spannungsverlauf im Beton während eines Pull-Out Versuches aus?
3. Wie interagieren die einzelnen Verbundmechanismen in Abhängigkeit der geometrischen und physikalischen Beschaffenheit der Bewehrung und des Betons in Bezug auf die Bildung von Spaltrissen?
4. Wie können konzentrierte Spannungsspitzen, die zu einem Spalten des Bauteils führen, vermieden werden?

Für die Modellierung und die anschließenden FE-Berechnungen wird auf das Programmumgebung ABAQUS/CAE der Firma Dassault Systems (Abaqus 2019) zurückgegriffen. Dieses Programm ist in der Lage auch komplexe Interfaces zwischen Faserstrang und Betonmatrix abzubilden. Die Vorgehensweise bei der Modellierung und Berechnung in diesem Kapitel ist in Abb. 4.1 ersichtlich. Für die Etablierung eines FE-Modells wurden in einem ersten Schritt geometrische und physikalische Modellparameter anhand der bekannten Randbedingungen bestimmt (Kap. 4.2). In

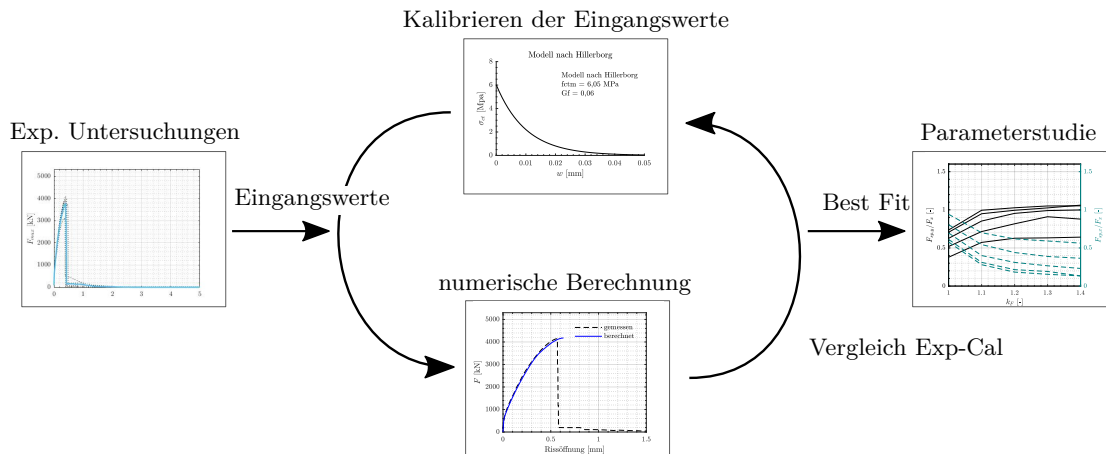


Abb. 4.1: Vorgehensweise für die Finite-Elemente Berechnungen

der weiteren Folge wurden die physikalischen Modellparameter (dies betrifft insbesondere das Interface) an den bestehenden Versuchsdaten kalibriert (Kap. 4.3). Mit den kalibrierten Werten kann das Verbundverhalten während des Auszugsversuchs mit dem FE-Modell gut abgebildet werden. Anhand einer detaillierten Auswertung der FE-Berechnungen können die jeweiligen Mechanismen, die im Interface wirken und eine Spaltrissbildung begünstigen, beurteilt werden. In einem letzten Schritt wird eine Parameterstudie mit verschiedenen Rovinggeometrien, ausgehend von den in Kap. 3.3.1.1 definierten Querschnittscharakterisierungen, und mit unterschiedlichen Betondeckungen im Untersuchungsbereich durchgeführt (Kap. 4.4). Diese soll Aufschluss geben über den Einfluss der einzelnen Parameter auf die Spaltrissbildung bei textilbewehrten Bauteilen.

4.2 Modellierung

4.2.1 Geometrie

Modelliert wird in weiterer Folge der Untersuchungsbereich des Versuchskörpers aus Kap. 3.3 inklusive des oberen Verankerungsbereiches. An diesem Modell wird der Auszug des Rovings simuliert, d.h. der Pull-Out Versuch nachgebildet. Die Modellierung des Betonkörpers erfolgt aufgrund des einfachen Querschnitts direkt in der Programmumgebung von ABAQUS. Die Modellierung des Rovings hingegen erfolgt aufgrund der komplexeren Geometrie in AutoCAD. Die Geometrie des Rovings wird im Vorfeld vereinfacht, in dem der Querschnitt an markanten Stützstellen definiert wird. Der Verlauf zwischen den Stützstellen wird durch eine Spline angenähert. Dadurch werden spitze Umlenkungen an den Stützstellen vermieden, die in weiterer Folge bei der numerischen Berechnung Konvergenzprobleme verursachen können. Typische Stützstellen für den Roving befinden sich jeweils an den Knotenpunkten sowie in Feldmitte zwischen den Knotenpunkten (siehe Abb. 4.2a). Im Anschluss wird der Roving in die Programmumgebung von ABAQUS importiert. An der entsprechenden

Stelle im Betonkörper wird ein Negativ des Rovings ausgeschnitten und der Roving an ebendieser Stelle wieder eingebracht (siehe Abb. 4.2b). Die Außenfläche des Rovings sowie der Gegenpart im Betonkörper werden als Kontaktflächen formuliert, wodurch diese mit geeigneten Kontaktflächenformulierungen in Beziehung gesetzt werden können (siehe dazu Kap. 4.2.3).

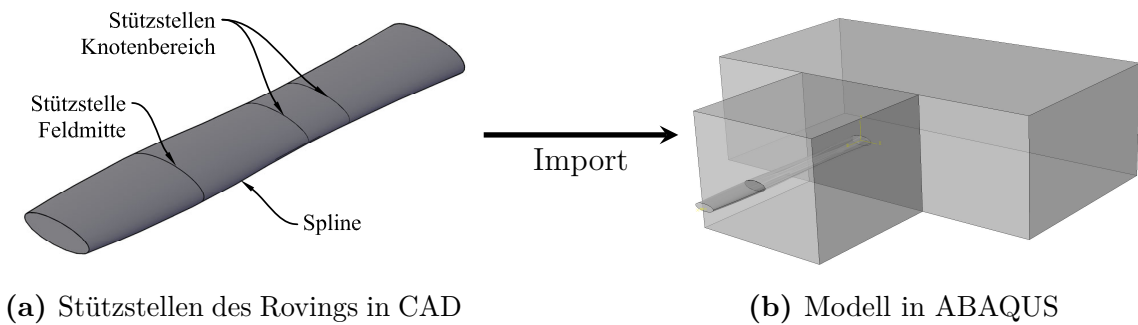


Abb. 4.2: Einbinden des Rovings in die Programmumgebung von ABAQUS

4.2.2 Materialmodelle

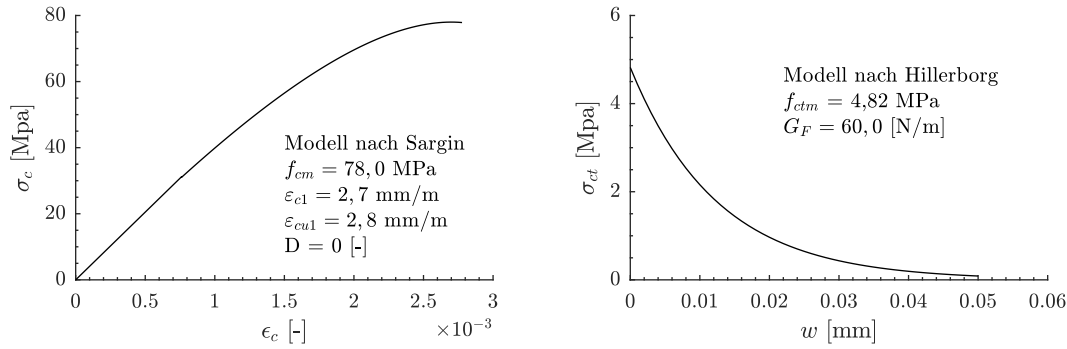
Materialmodell für einaxiales Betontragverhalten: Die Arbeitslinie des Betons ist sowohl im Zug- als auch im Druckbereich sehr stark nichtlinear ausgeprägt. Zur mathematischen Beschreibung des Materialverhaltens sind verschiedene Modelle vorhanden. Für den Druckbereich wird in den folgenden Berechnungen der Ansatz von Sargin (1971) verwendet. Dieser Ansatz ist abhängig von der Festigkeit des Betons f_{cm} und der zugehörigen Dehnung ε_{c1} , dem E-Modul E_{c0} , sowie einem Duktilitätsbeiwert D (siehe Gl. 4.1)

$$\sigma_c = f_{cm} \cdot \frac{k \cdot \eta - (D - 1) \cdot \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta + D \cdot \eta^2} \quad (4.1)$$

mit:

$$\begin{aligned} \eta &= \varepsilon_c / \varepsilon_{c1} \text{ [MPa]} \\ k &= E_{c0} \cdot \varepsilon_{c1} / f_{cm} \text{ [-]} \end{aligned}$$

Wird der Duktilitätsbeiwert zu 0 gesetzt (Annahme eines sehr spröden Materialverhaltens) ergibt sich die mathematische Beschreibung der Arbeitslinie des Betons unter Druck entsprechend ÖNORM EN 1992-1-1 (2015) (vgl. dazu Kueres et al. (2015)). Die gewählten Werte und die daraus resultierende Spannungs-Dehnungsbeziehung ist Abb. 4.3a zu entnehmen. Jene Parameter, die messtechnisch in den experimentellen Untersuchungen nicht erfasst worden sind – dies betrifft ε_{c1} und E_{c0} – wurden ÖNORM EN 1992-1-1 (2015) entnommen. Der Beton wurde dazu entsprechend seiner Festigkeit der Betonklasse C70/85 zugeordnet.



(a) Spannungs-Dehnungsbeziehung Druck (b) Zugspannungs-Rissöffnungsbeziehung

Abb. 4.3: Materialmodelle Beton

Das einaxiale Zugtragverhalten wird in der vorliegenden Arbeit durch das Fictitious Crack Model nach Hillerborg et al. (1976) modelliert. Plastische Verformungen treten hier erstmals bei Überschreiten der Zugfestigkeit des Betons auf. Bis zu diesem Zeitpunkt liegt linear elastisches Materialverhalten vor. Das nicht-lineare Nachbruchverhalten wird durch eine Spannungs-Rissöffnungsbeziehung simuliert. Die Zugspannung nimmt bei steigender Rissöffnung exponentiell ab, wobei dieses Verhalten von der Bruchenergie G_F und der Betonzugfestigkeit f_{ctm} abhängig ist (siehe Gl. 4.2).

$$\sigma_{ct} = f_{ctm} \cdot e^{-w/w_1} \quad (4.2)$$

mit:

$$w_1 = \frac{G_F}{f_{ctm}} \text{ [mm]}$$

Treten plastische Verformungen auf (lokale Schädigung), werden diese als ein fiktiver Riss interpretiert. Es kommt zu einem lokalen Entfestigungsverhalten in der sogenannten Bruchprozesszone. Erst ab dem Zeitpunkt, wo keine Spannungen über den fiktiven Riss mehr übertragen werden können, ist ein realer Riss vorhanden. Die Bruchenergie wird in dieser Arbeit analog zu der Vorgehensweise in Herbrand et al. (2016) mit 60 N/m gering angesetzt, da der Beton sehr feinkörnig ist und einen hohen Bindemittelanteil aufweist. Die daraus resultierende Spannungs-Rissöffnungsbeziehung ist in Abb. 4.3b dargestellt. Die Betonzugfestigkeit wird für die vorliegenden Berechnungen nach Kalibrierung der Werte mit $f_{ctm} = 4,82 \text{ MPa}$ festgelegt ($\hat{=} 0,8 \cdot f_{ctm,sp}$).

Bruchhypothese für Beton: Zur Abbildung der Schädigung der Betonmatrix wird auf das Concrete-Damage-Plasticity (CDP) Modell zurückgegriffen. Die Rissbildung, von der das nichtlineare Materialverhalten von Beton maßgeblich abhängt, wird bei dieser Art von Modell nicht diskret abgebildet, sondern über

eine verschmierte Rissbildung berücksichtigt¹. Dabei wird bei Überschreiten der Zugfestigkeit an einem Integrationspunkt, im Einzugsgebiet dieses Integrationspunktes ein gleichmäßiges Rissband angenommen (Keuser 1985). Das CDP Modell wurde erstmals von Lubliner et al. (1989) vorgestellt und erlaubt eine Beschreibung des nichtlinearen Materialverhaltens von Beton auf Basis der Plastizitätstheorie. Der Grenzspannungszustand, ab dem ein Plastifizieren eintritt, wird durch eine Bruchhypothese bestimmt. Zur Beschreibung dieser Bruchhypothese ist einerseits ein Formfaktor K_c , sowie das Verhältnis von zweiaxialer zu einaxialer Betonfestigkeit σ_{b0}/σ_{c0} anzugeben (siehe Abb. 4.4).

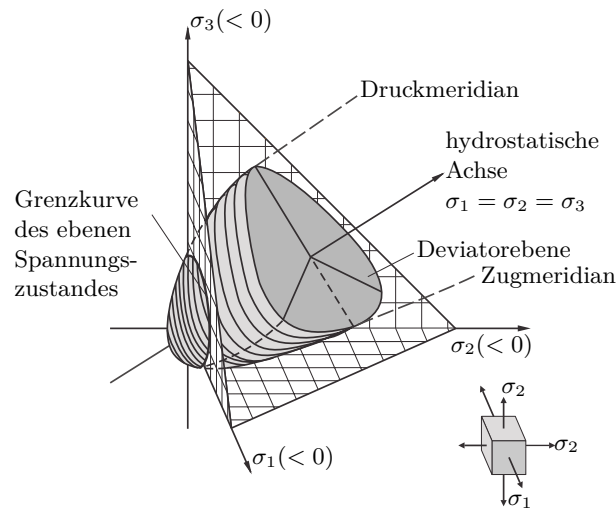


Abb. 4.4: Bruchhypothese für Beton mit $K_c = 0,67$ ²

Wird der elastische Bereich verlassen, erfolgt die Beschreibung des Materialverhaltens über ein nicht assoziiertes Fließgesetz³. Der Winkel ψ beschreibt dabei das Verhältnis der Volumendehnung zur Scherdehnung und wird als Dilatanzwinkel bezeichnet. Eine Abweichung des Dilatanzwinkels speziell bei kleinem hydrostatischem Druckzustand kann durch den Exzentrizitätsparameter ε angegeben werden. Die gewählten Parameter für die nachfolgenden Berechnungen sind in Tab. 4.1 angeführt und sind großteils den Empfehlungen aus Herbrand et al. (2016) entnommen.

Die Größe der Fließfläche bei mehrmaliger Be- und Entlastung im plastischen Bereich wird über Verfestigungsparameter sowohl im Zugbereich (d_t), als auch im Druckbereich (d_c) festgelegt. Diese beschreiben anschaulich die Steifigkeitsreduzierung zufolge Rissbildung. Tendieren die Schädigungsparameter gegen einen kleinen Wert, so ist von einer geringen Schädigung auszugehen. Tendiert

¹Die Rissbildung in FE-Berechnungen kann entweder verschmiert, wie bei dem hier vorgestellten und verwendeten CDP Modell abgebildet werden, oder diskret über Modelle auf Basis der Bruchmechanik. Letztere sind in der Modellierung und Berechnung aufwendig.

²Auszug aus Zilch und Zehetmaier (2010)

³Anders als bei metallischen Werkstoffen steht bei Beton der Vektor der plastischen Verzerrungen nicht orthogonal auf die Fließfläche (Smith et al. 1989)

Tab. 4.1: Bruchhypothese Beton - gewählte Modellparameter

ψ	ε	σ_{b0}/σ_{c0}	K_c	d_t	d_c
[°]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
35,0	0,1	1,16	0,67	1,0	1,0

der Wert gegen 1 so liegt hingegen eine volle Schädigung vor. Aufgrund der monotonen Belastungsgeschichte sind diese Parameter im vorliegenden Fall nicht von Relevanz und werden von vornherein auf den Wert 1 (volle Schädigung) gesetzt (siehe Tab 4.1).

Textilbewehrung: Die Beschreibung der Materialeigenschaften der Textilbewehrung erfolgt unter der Annahme eines linear elastischen Materialverhaltens. Aus dem inhomogenen Aufbau der Faserstränge (zahlreichen Filamente sind in einer Matrix aus Epoxidharz gebettet) und der stark anisotropen Materialeigenschaften der Carbonfasern resultiert aber ein anisotropes Materialverhalten der Bewehrung. Dieses Verhalten wird in weiterer Folge durch ein transversal isotropes Materialgesetz, welches ein Spezialfall des orthotropen Materialverhaltens ist, beschrieben. Transversale Isotropie liegt vor, wenn in einem Schnitt orthogonal zu einer Vorzugsrichtung die Materialeigenschaften richtungsunabhängig sind. Bei Textilbewehrungen ist die Vorzugsrichtung (x-Richtung) durch die Faserorientierung gegeben. Dieser spezielle Fall ist durch folgende Bedingungen gekennzeichnet:

$$E_{\parallel} = E_{11} \quad (4.3)$$

$$E_{\perp} = E_{22} = E_{33} \quad (4.4)$$

sowie

$$\nu_{\parallel} = \nu_{12} = \nu_{13} \quad (4.5)$$

$$\nu_{\perp} = \nu_{23} \quad (4.6)$$

Außerdem ergibt sich durch die Isotropieannahme

$$G_{\parallel} = G_{12} = G_{13} \quad (4.7)$$

$$G_{\perp} = G_{23} = \frac{E_{33}}{1 + \nu_{23}} \quad (4.8)$$

Dadurch reduzieren sich die unabhängigen Kenngrößen auf fünf. Der Elastizitätstensor ergibt sich demnach zu Gl. 4.9

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{\parallel}} & \frac{-\nu_{\parallel}}{E_{\perp}} & \frac{-\nu_{\parallel}}{E_{\perp}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{\parallel}}{E_{\parallel}} & \frac{1}{E_{\perp}} & \frac{-\nu_{\parallel}}{E_{\perp}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{\parallel}}{E_{\parallel}} & \frac{-\nu_{\parallel}}{E_{\perp}} & \frac{1}{E_{\perp}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{\perp}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{\parallel}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{\parallel}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ 2\sigma_{12} \\ 2\sigma_{23} \\ 2\sigma_{31} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Die Wahl des E-Moduls in Längsrichtung E_{\parallel} erfolgte anhand des Produktdatenblattes des Herstellers. Für die Wahl der Kennwerte in Querrichtung wurde auf Kennwerte aus der Literatur zurückgegriffen. Prinzipiell ist festzustellen, dass in dieser Hinsicht sehr wenig abgesicherte Versuchsdaten (dies betrifft im speziellen getränkte Textilbewehrungen) vorhanden sind. Für vorliegende Untersuchungen wurde auf Kennwerte aus Misra et al. (2014) und Ng et al. (1998) zurückgegriffen, die Untersuchungen zum Scherverhalten von gewebten, getränkten Carbontextilien durchgeführt haben. Die Textilien unterscheiden sich zwar in den geometrischen Abmessungen und der Herstellungsmethode von den hier verwendeten Textilien, die mechanischen Kennwerte geben trotzdem plausible Anhaltswerte für die eigenen Untersuchungen. Die gewählten Parameter sind in Tab. 4.2 zusammengefasst.

Tab. 4.2: Gewählte Materialparameter für das Textil

E_{\parallel} [GPa]	E_{\perp} [GPa]	ν_{\parallel} [-]	ν_{\perp} [-]	G_{\parallel} [GPa]
205,00	13,79	0,2	0,25	8,97

4.2.3 Interface

Für die Modellierung des Verbundverhaltens sind in der Programmumgebung von ABAQUS mehrere Möglichkeiten vorhanden. Für die eigenen Berechnungen wird eine diskrete Modellierung des Rovings als fester, homogener Körper (ABAQUS - solid, homogeneous section), der in direktem Kontakt zur umgebenden Matrix steht, vorgenommen. Die reale Rovingform ist durch eine sehr weit gestreckte periodische Dicken- und Breitenaufweitung gekennzeichnet. Um den Formverbund realitätsnah zu simulieren, wird der reale Roving, in seiner Geometrie entsprechend der Vorgehensweise in Kap. 4.2.1 angenähert, diskret im Programm implementiert. In der Kontaktfläche selbst wird eine Interaktion formuliert, die im wesentlichen auf Kohäsion und Reibung beruht. Alternativ wäre es möglich, den Roving als geraden Stab zu idealisieren und die Interaktion zwischen Roving und Beton mit Federn zu simulieren. Da in diesem Fall aber keine lokalen Spannungsverteilungen, welche aus der geometrisch in

Längsrichtung nicht konstanten Rovingform resultieren, abgebildet werden können, wird diese Möglichkeit nicht weiter verfolgt. Die Interaktion in der Verbundfläche, in Form von Kohäsion und Reibung, kann in unterschiedlichen Komplexitätsgraden abgebildet werden. Die gewählten Parameter für die eigenen Berechnungen werden nachfolgend angeführt und kurz erläutert.

Kohäsion: Die Beschreibung des Haftverbundes erfolgt mit der Festlegung einer Kontaktsteifigkeit in der Grenzschicht zwischen Roving und Betonmatrix. Diese Modellbildung wurde ursprünglich für die Abbildung von kohäsiven Materialien in ABAQUS eingeführt, eignet sich aber auch für die Modellierung des Haftverbundes zwischen zwei Materialien. Die Grenzschicht reduziert sich dabei auf eine Fläche mit vernachlässigbarer Dicke. Die Zerstörung des Haftverbundes bei fortschreitender Belastung kann durch Festlegen eines Grenzwertes, entweder der Verschiebung oder der Spannung, abgebildet werden. Bis zum Erreichen dieses Grenzwertes verhält sich der Haftverbund in der Verbundfuge linear elastisch. Die Zerstörung des Haftverbundes kann entweder prompt oder durch eine Funktion (linear bzw. exponentiell) beschrieben werden. Für vorliegende Berechnungen wurde eine exponentielle Schädigung des Verbundes (Der Funktionsverlauf wird durch den dimensionslosen Modellparameter α festgelegt) bei Überschreiten eines festgelegten Schlupfes in der Verbundfuge angenommen (siehe Abb. 4.5a). Die Startwerte vor einer allfälligen Kalibrierung wurden den Berechnungen aus Kap. 3.3.3.4 entnommen. Die nach der Kalibrierung gewählten Eingangswerte sind in Tab. 4.3 angeführt.

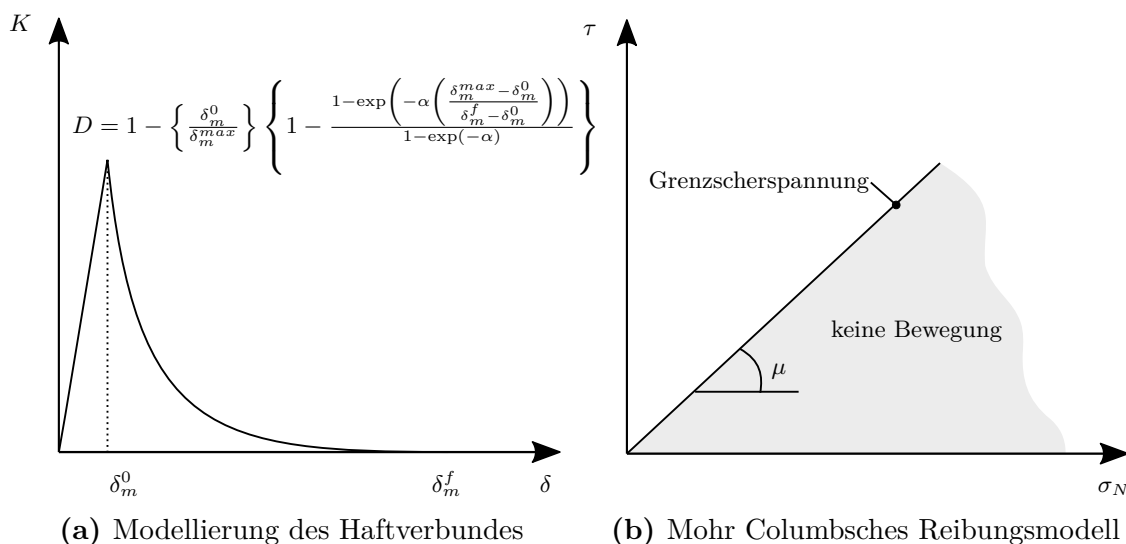


Abb. 4.5: Interfacemodellierung in ABAQUS⁴

Reibung: Für die Beschreibung des Reibverbundes wird die Mohr-Coloumbsche Reibungshypothese verwendet. Die Grenzscherspannung ergibt sich zufolge dieser Hypothese aus der wirkenden Normalspannung in der Verbundfuge multipliziert

⁴adaptiert nach Abaqus (2019) - Kap. 37.1.5

mit dem Reibbeiwert. Dieser Beiwert ist von der Rauigkeit der Oberfläche abhängig. Wird die Grenzscherspannung überschritten treten dauerhafte Verformungen auf. In diesem Fall kommt es zu einem Schlupfen des Rovings innerhalb des Betonkörpers. In der Standardimplementierung dieser Reibungshypothese in ABAQUS wird von einem konstanten Reibbeiwert ausgegangen. Daraus ergibt sich die Grenzscherspannung als lineare Funktion (siehe Abb. 4.5b). Um eine Schädigung der Verbundoberfläche durch, z.B. ein Glattscheren des Rovings während des Ausziehens zu simulieren, kann in weiterer Folge auch ein von der Normalspannung abhängiger Reibbeiwert implementiert werden. Zum Teil konnte ein ebensolches Glattscheren auch in den eigenen Untersuchungen beobachtet werden. Da diese Vorgehensweise aber einige Unsicherheiten beinhaltet, wird davon Abstand genommen und stattdessen auf Basis von Ergebnissen aus der Literatur ein konstanter Reibbeiwert von $\nu = 0,50$ (dieser Beiwert wurde von Krüger (2004) für epoxidharzgetränkte Carbontextilien ermittelt) gewählt. Im weiteren Verlauf wurde dieser Wert anhand der eigenen Messkurven kalibriert. Der kalibrierte Wert ist ebenfalls in Tab. 4.3 angeführt. Dabei lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den Werten aus der Literatur feststellen, weshalb keine Anpassung notwendig war.

Tritt eine Schädigung des Haftverbundes ein, reduziert sich dessen Anteil an den Verbundspannungen in der Verbundfuge. Im Folgenden werden allmählich Verbundspannungen zufolge Reibverbund an den geschädigten Stellen des Haftverbundes aktiviert. In den eigenen Versuchen hat sich gezeigt, dass der Haftverbund bereits bei relativ geringen Belastungen geschädigt wird und bei Erreichen der Maximallast keinen Anteil an der Verbundtragfähigkeit mehr hat. Dasselbe Verhalten ist bei korrekter Modellierung auch bei den FE-Berechnungen zu erwarten, weshalb die gewählten Parameter des Haftverbundes zwar Einfluss auf das Steifigkeitsverhalten und die Spannungsverteilung am Belastungsbeginn haben, bei Erreichen der maximalen Verbundkraft aber keine Rolle mehr spielen.

Tab. 4.3: Gewählte Parameter zur Modellierung des Interfaces

K_{TT} [N/mm ³]	δ_m^0 [mm]	δ_m^f [mm]	α [-]	ν [-]
1000	0,004	0,4	0,05	0,5

Abschließend zum Verbundverhalten ist anzumerken, dass die gewählten Parameter in Tab. 4.3 mit Unsicherheiten behaftet sind, da sie im wesentlichen nur an den Versuchen kalibriert wurden. Eine Sensitivitätsanalyse hat aber gezeigt, dass die gewählten Werte zwar Einfluss auf das Verformungsverhalten in der Verbundfuge haben, die Spannungsverteilung im Betonkörper davon aber weitestgehend unbeeinflusst bleibt (vorausgesetzt die selben Verbundmechanismen sind aktiv).

4.2.4 FE-Netz

Die Generierung des FE-Netzes erfolgte mit Hex Elementen vom Typ C3D8R (8-knotige Elemente mit linearem Interpolationsansatz), sowohl für den Roving als auch für den Betonkörper. Für den Roving wurde in Umfangsrichtung eine Netzbreite von 0,50 mm, sowie eine Netzlänge von 1,00 mm gewählt (siehe Abb. 4.6a). Für den Betonkörper wurde eine prinzipielle Kantenlänge von 5,0 mm gewählt. Die Netz-Kantenlängen im Untersuchungsbereich des Betonkörpers wurden entsprechend der Netzteilung des Rovings an den Anschlussstellen verfeinert. Dadurch ergibt sich das in Abb. 4.6b ersichtliche FE-Netz für den Betonkörper.

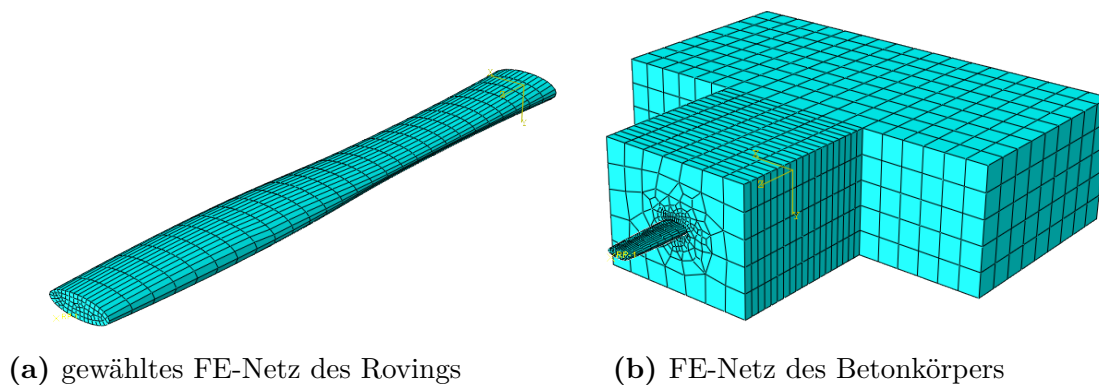


Abb. 4.6: FE-Netz des Gesamtmodells

4.2.5 Randbedingungen

Die Randbedingungen für das Modell wurden entsprechend den realen Bedingungen während der Versuchsdurchführung gewählt. Die Last wird direkt am Roving angebracht. Dazu wird ein Referenzpunkt erstellt, der mit dem Roving in den jeweiligen Freiheitsgraden gekoppelt ist.

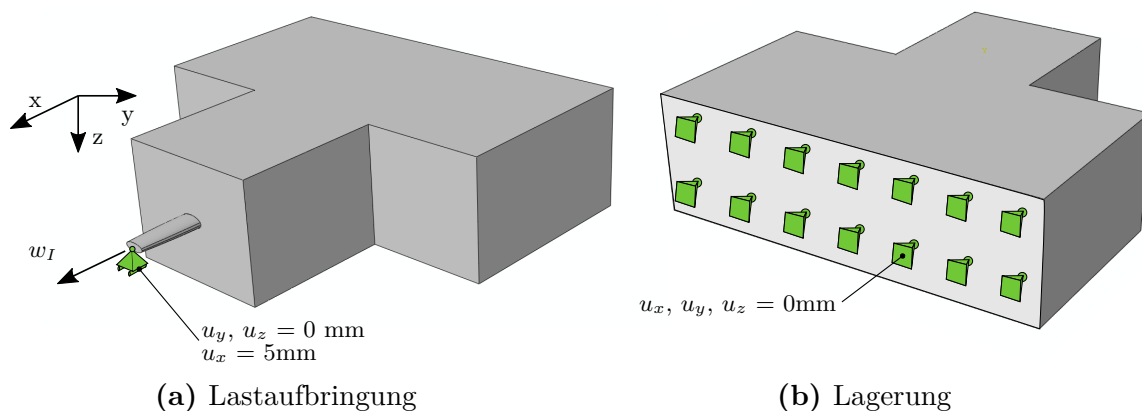


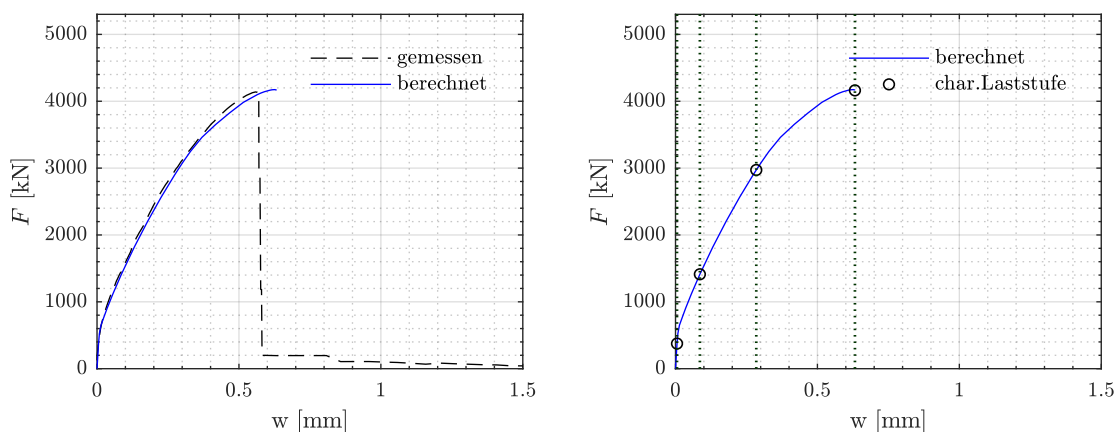
Abb. 4.7: Randbedingungen des Modells zur Simulation der Versuchsdurchführung

Die Lastaufbringung erfolgt weggesteuert, bis zu einer maximalen Verformung von $u_x = 5\text{mm}$, in einer Zeitspanne von 1000 sec. Zusätzlich zur Lastaufbringung ist eine Randbedingung am Referenzpunkt definiert ($u_y, u_z = 0\text{mm}$), die ein seitliches Ausweichen des Rovings verhindert und eine zentrische Lastaufbringung gewährleistet (siehe Abb. 4.7a). Die Klemmung an der Oberseite des Versuchskörpers wurde als flächige Lagerung ($u_x, u_y, u_z = 0$) angenommen (siehe Abb. 4.7b).

4.3 Numerische Ergebnisse

4.3.1 Allgemeines zur Auswertung

Die numerische Berechnung des im vorigen Kapitel dargelegten Modells wird nach dem Standard Newton-Rapson-Verfahren durchgeführt. Die Lastaufbringung erfolgt inkrementell in mehreren Zeitschritten. Die Gegenüberstellung der gemessenen mit der berechneten Versuchskurve ist in Abb. 4.8a dargestellt. Das Verhalten kann prinzipiell sehr gut abgebildet werden. Die FE-Berechnung liegt über weite Strecken nah an den gemessenen Ergebnissen. Ein Defizit ergibt sich bei Erreichen der Bruchlast. Das Nachbruchverhalten in Form des Lastabfalls und dem anschließenden Reibbereich, welches in den Versuchen beobachtet wurde, kann mit dem vorgestellten Modell nicht abgebildet werden. Dies ist insofern vernachlässigbar, da dieser Aspekt für die Beurteilung der Entstehung von Spaltrissen nicht relevant ist. Das Versagen im FE-Modell ist durch eine weitestgehende Plastifizierung der Spaltfläche gekennzeichnet. Entsprechend dem Fictitious Cracking Model tritt ein realer Riss auf, wenn keine Zugspannungen mehr über die plastifizierten Bereiche übertragen werden können. Dies ist im vorliegenden Fall bei Erreichen der maximalen Belastung gegeben. Diese Versagensform kann deshalb sehr gut mit dem realen Versagen verglichen werden.



(a) Vergleich des Auszugwiderstandes gemessen/berechnet für Faserstrang Typ O (b) Charakteristische Laststufen im Verbundverhalten

Abb. 4.8: Kraft-Rissöffnungsbeziehung als Ergebnis der numerischen Berechnung

Vor dem eigentlichen Versagen ist insbesondere das Verbund- und das Verformungsverhalten und die daraus resultierende Spannungsverteilung im Untersuchungsbereich von Interesse. Das jeweilige Verhalten unterscheidet sich diesbezüglich in Abhängigkeit der aufgetragenen Last. Für vorliegende Untersuchungen konnten vier charakteristische Lastbereiche identifiziert werden, in denen sich das Verhalten unterscheidet. Diese sind in Abb. 4.8b markiert und werden nachfolgend kurz beschrieben:

1. Haftverbund: In dieser Phase der Belastung ist der Haftverbund der dominante Verbundmechanismus. Die Verschiebungen sind dementsprechend sehr klein. Bei Überschreitung dieser Laststufe geht der Haftverbund zunehmend verloren und wird durch den Reib- und Formverbund abgelöst.
2. Reib- und Formverbund: In dieser Phase dominieren der Reib- und der Formverbund an der Grenzfläche zwischen Bewehrung und Beton. Die Spannungsverteilung innerhalb des Bauteils ändert sich im Vergleich zur vorigen Laststufe, wobei es noch zu keiner Schädigung der Betonmatrix kommt.
3. Beginnende Schädigung: bei weiterer Laststeigerung kommt es zu einer ersten Schädigung der Betonmatrix durch lokales Überschreiten der Betonzugfestigkeit. Mikrorissbildung entsteht, die durch plastische Dehnungen ersichtlich wird.
4. Versagen des Bauteils: Werden die plastischen Dehnungen größer, wird das Potential zu Lastumlagerungen zunehmend ausgeschöpft, bis schließlich keine weitere Laststeigerung mehr möglich ist. Diese Stufe ist gleichbedeutend mit der Entstehung eines Spaltrisses, der zum Versagen des Versuchskörpers führt.

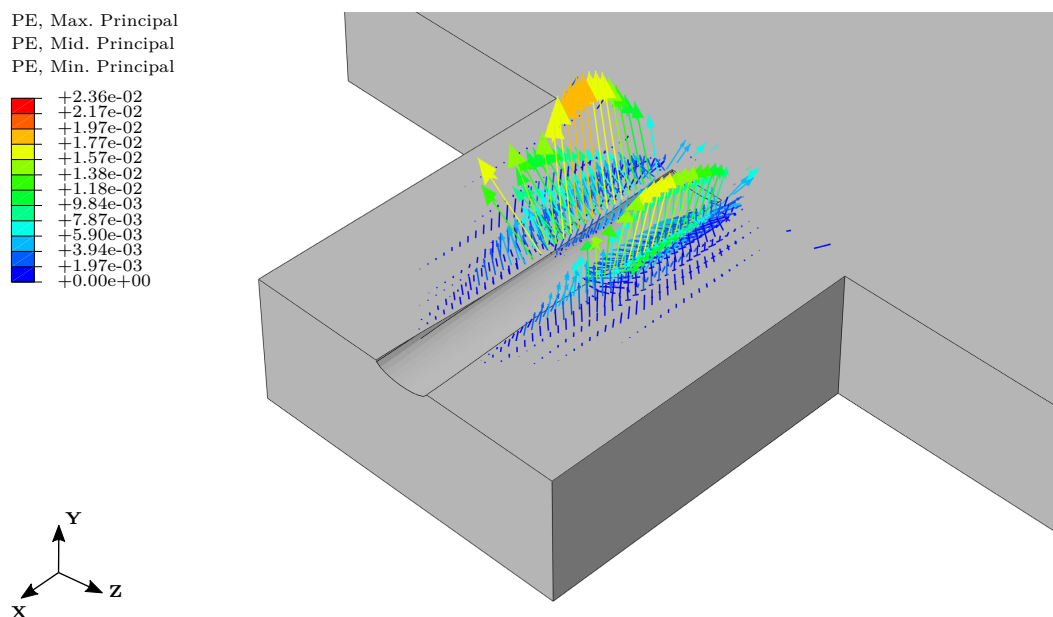


Abb. 4.9: Vektorielle Darstellung der plastischen Dehnungen in Hauptrichtung als Indikator für eine Rissbildung

Tritt Rissbildung zufolge Überschreitungen der Betonfestigkeit auf, können die Rissflächen mit dem hier verwendeten CDP Modell über die plastischen Dehnungen angezeigt werden. Die Darstellung der plastischen Dehnungen in Hauptrichtung (PE - max. principal) in vektorieller Ansicht gibt einen Überblick über die Orientierung der Rissfläche. Die Vektoren bilden dabei die Normalvektoren auf die Rissfläche. Die entsprechenden Normalvektoren bei Erreichen der Bruchlast für vorliegendes Bsp. sind in Abb. 4.9 dargestellt. Gut zu sehen ist, dass die plastischen Dehnungen bei Überschreiten der Betonzugfestigkeit primär orthogonal zur Ebene des Textils auftreten. Dies deutet eine Rissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung an, die der klassischen Spaltrissbildung bei textilbewehrten Bauteilen entspricht.

4.3.2 Orientierung und Größe der Hauptspannungen

Die Darstellung der Hauptspannungen in Größe und Orientierung gibt anschaulich den Kraftfluss innerhalb eines Bauteils wieder. In Abb. 4.10 sind die Hauptspannungen σ_{min} , σ_{mid} und σ_{max} für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand abgebildet.

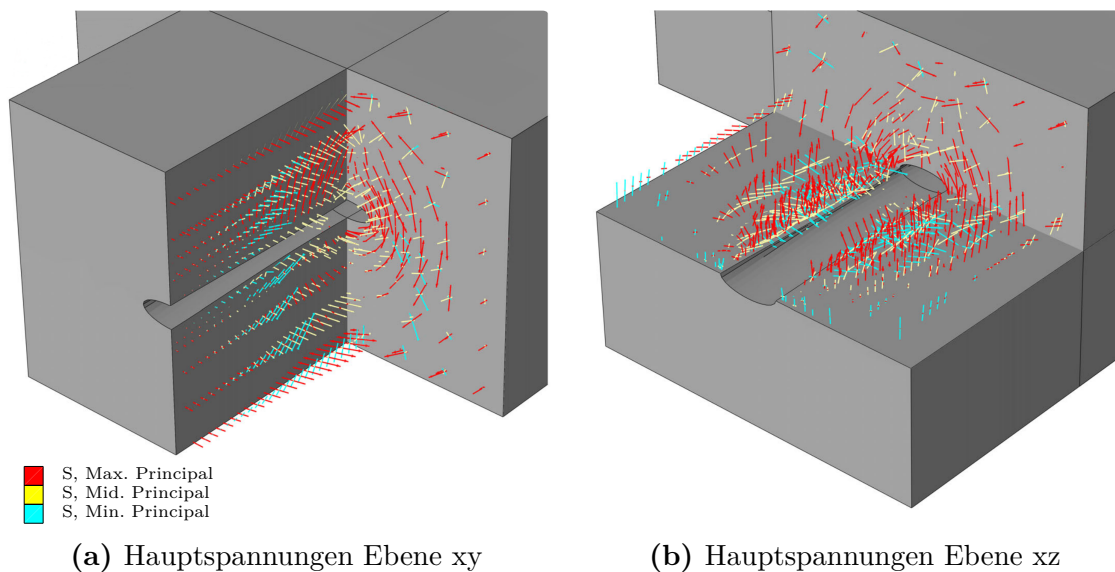


Abb. 4.10: Darstellung der Hauptspannungen σ_{min} , σ_{mid} und σ_{max}

Zu sehen ist, dass im hinteren Abschnitt des Rovings hohe Druckspannungen entstehen, die auf ein Abstützen des Rovings auf den umgebenden Beton zurückgeführt werden können. Wie bereits von Bielak et al. (2018) geäußert, fungiert die periodische Aufweitung als langgestreckte Rippe, die einen Formschluss des Rovings mit dem umgebenden Beton ermöglicht. Ausgehend von der resultierenden Betondruckstrebe, die auf diese Weise erzeugt wird, entstehen hohe Querkzugbeanspruchungen, ähnlich dem bereits genannten Ringzugbandmodell nach Tepfers (1979). Im vorliegenden Fall ergibt sich aber kein radialsymmetrischer Zustand, wie dies im konventionellen Stahlbetonbau der Fall ist. Auffallend ist, dass bei dieser Textilkonfiguration die Hauptzugspannungen in ihrer Ausprägung am größten orthogonal zur Ebene der textilen Bewehrung ausfallen. Es entstehen zwar auch Querkzugbeanspruchungen in

der Ebene der textilen Bewehrung, diese sind in ihrer Größenordnung aber wesentlich geringer (mehr dazu wird im nächsten Abschnitt angeführt).

4.3.3 Dehnungen und Spannungen

Im folgenden Abschnitt werden relevante Dehnungen und Spannungen innerhalb des Bauteils an charakteristischen Laststufen dargestellt. Dazu werden zwei Schnitte definiert und die jeweilige Spannungs- bzw. Dehnungskomponente, welche orthogonal auf diesen Schnitt wirkt, abgebildet. Die Schnittebene verläuft einmal in der Ebene der textilen Bewehrung und einmal orthogonal dazu (siehe Abb. 4.11).

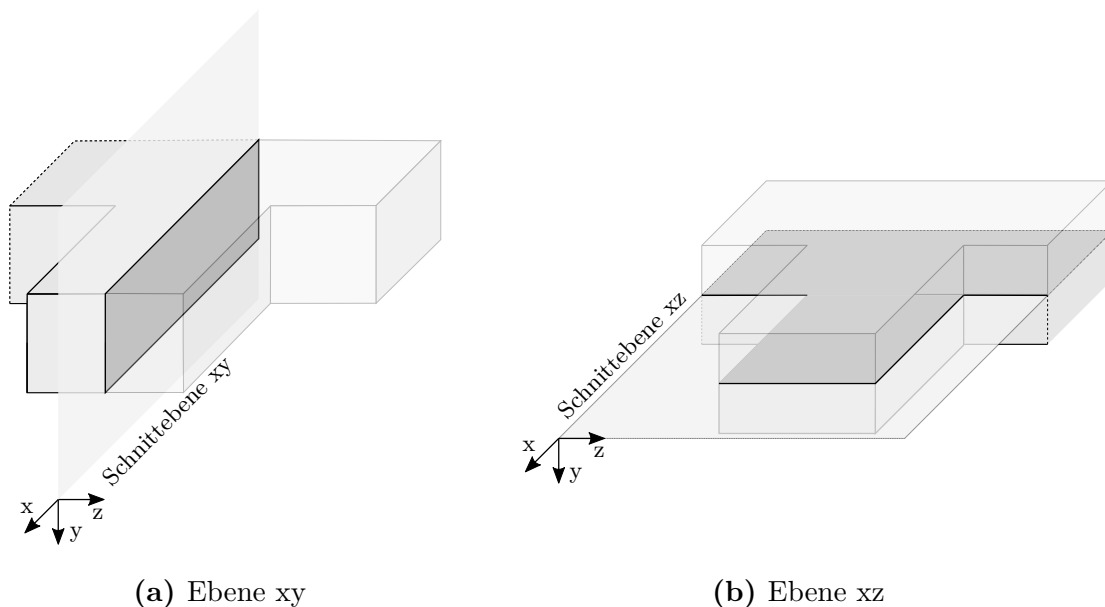
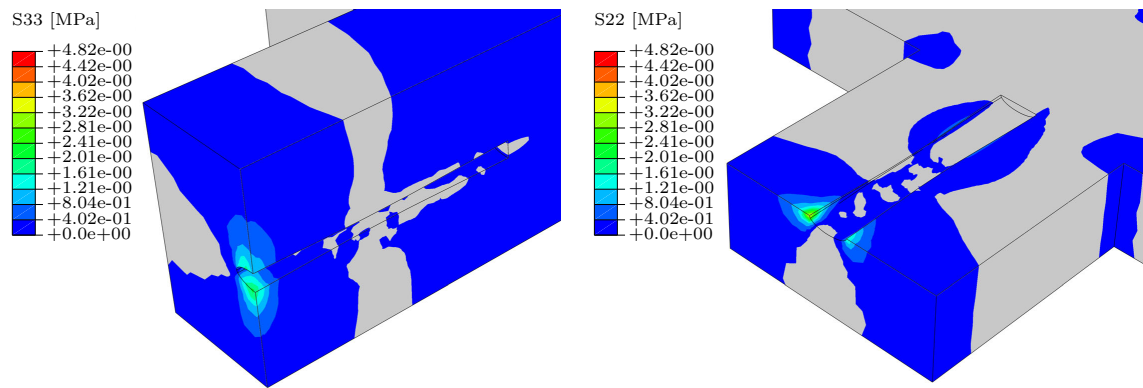


Abb. 4.11: Schnittführung entlang des Versuchskörpers für die Auswertung

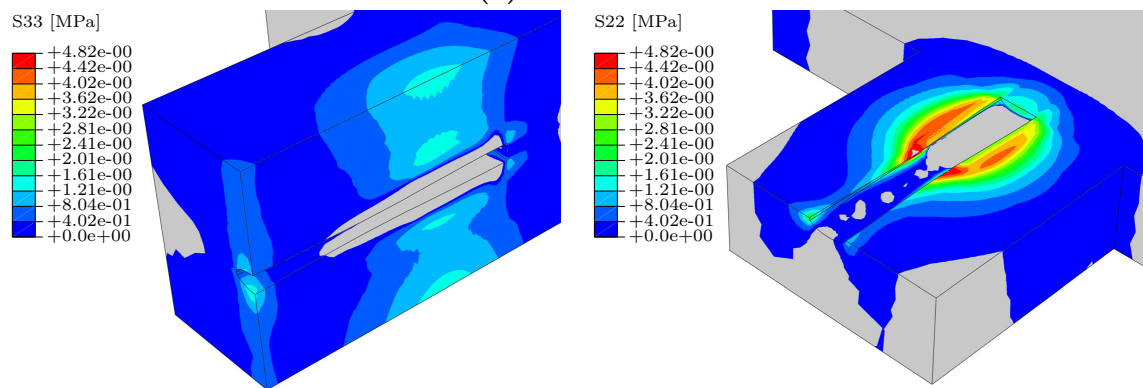
In einem ersten Schritt soll die Darstellung der Spannungen einen zusätzlichen Überblick über den Kraftfluss innerhalb des Bauteils geben und die Größenordnung der spaltrissbildenden Spannungen wiedergeben (siehe Abb. 4.12). In einem zweiten Schritt wiederum soll durch die Darstellung der Gesamtdehnungen und separat dazu der Anteil der plastischen Dehnungen daran, auf eine Rissbildung im Untersuchungsbereich geschlossen werden. Wie in weiterer Folge gezeigt werden kann, finden plastische Dehnungen hauptsächlich in der Ebene der textilen Bewehrung statt. Aus diesem Grund wird die Darstellung und Gegenüberstellung der Gesamtdehnungen mit den plastischen Dehnungen nur im Schnitt xz angeführt.

In Abb. 4.12 gut zu erkennen ist der Übergang vom Haftverbund zum Reib- und Formverbund. Während in Abb. 4.12a, in der die Spannungsverteilung innerhalb der Laststufe 1 dargestellt ist, die Spannungen sich weitestgehend an der Rissflanke, aufgrund des dort auftretenden Schlupfes, konzentrieren, wird der Verbund nach Überschreiten der maximalen Weggröße für den Haftverbund (Schädigung des Haftverbundes setzt ein – siehe Kap. 4.2.3) allmählich über einen Formschluss der

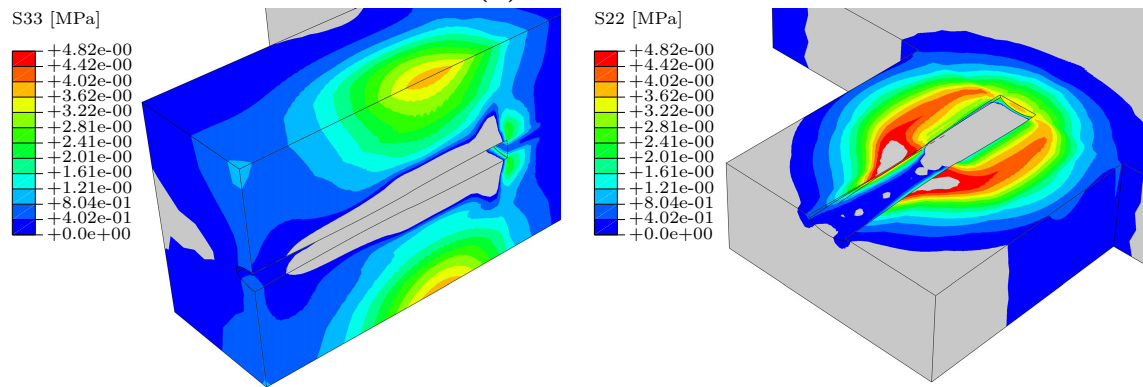
4.3 Numerische Ergebnisse



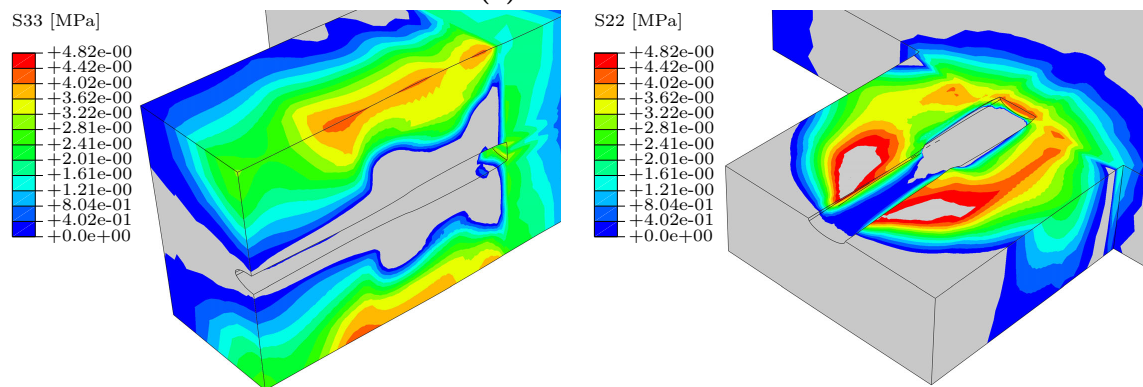
(a) Laststufe 1



(b) Laststufe 2

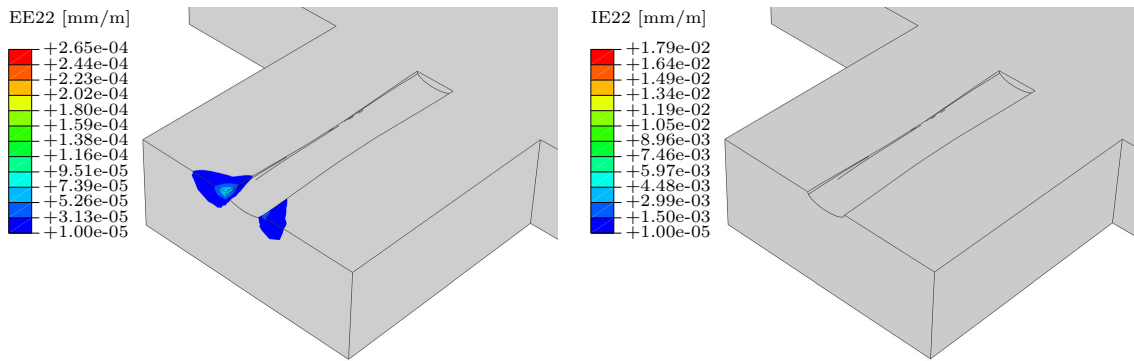


(c) Laststufe 3

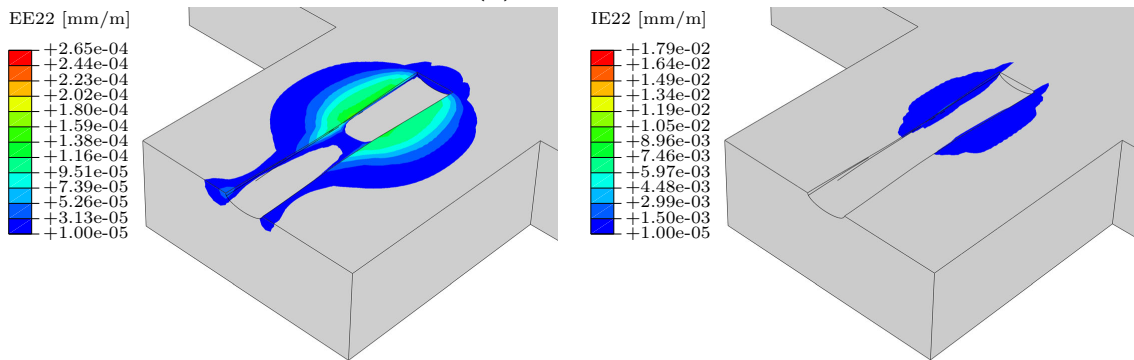


(d) Laststufe 4

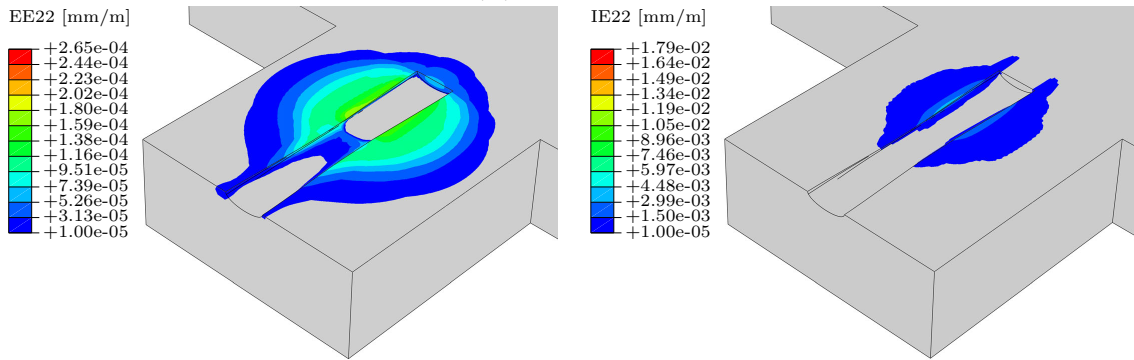
Abb. 4.12: Spannungsverteilung (links) σ_{11} (rechts) σ_{22}



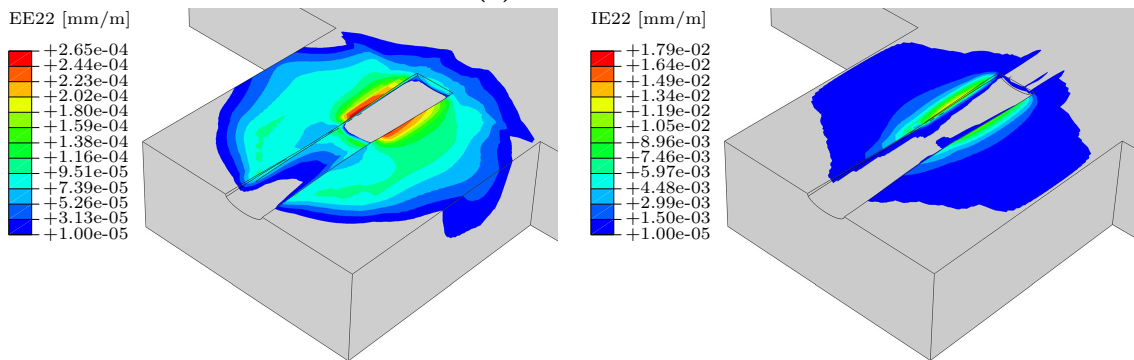
(a) Laststufe 1



(b) Laststufe 2



(c) Laststufe 3



(d) Laststufe 4

Abb. 4.13: Dehnungen (links) Gesamt $\varepsilon_{e,22}$ (rechts) plastisch $\varepsilon_{p,22}$

Bewehrung mit dem umgebenden Beton erzeugt (siehe Abb.4.12b). Der Roving stützt sich beim Auszug an der Betonmatrix ab und erzeugt hohe örtliche Pressungen. Aus diesen örtlichen Pressungen resultieren hohe Querkzugbeanspruchungen. Die Spannungen konzentrieren sich dabei im Wesentlichen auf den hinter dem Knotenbereich liegenden Rovingabschnitt. In diesem Bereich wird die Aufweitung des Rovings durch einen engeren Auszugskanal im Beton gezogen. Im vorderen Bereich entstehen keine Kontaktpressungen, da hier umgekehrt ein kleinerer Rovingquerschnitt durch einen größeren Auszugskanal gezogen wird (siehe Abb. 4.14).

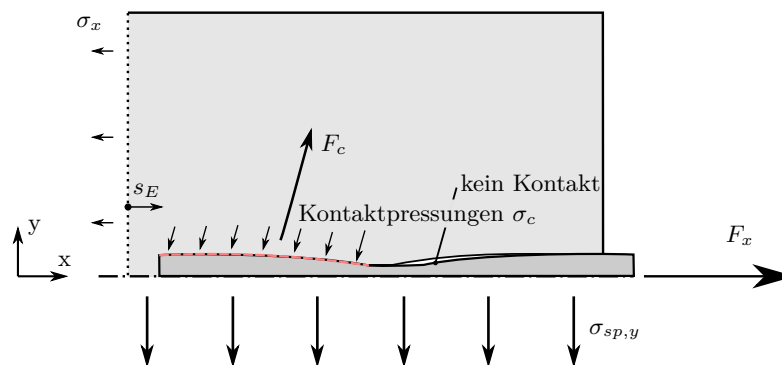


Abb. 4.14: Auszugskanal des Rovings und die daraus resultierenden Kontaktpressungen

Die resultierende Betondruckstrebe, die durch die örtlichen Pressungen entsteht, erzeugt Querkzugbeanspruchungen sowohl in der Ebene der textilen Bewehrung als auch orthogonal dazu. Dabei ist zu beobachten, dass die Querkzugbeanspruchung orthogonal zur Ebene der textilen Bewehrung in ihrer Größenordnung wesentlich höher ist als die resultierende Querkzugbeanspruchung in der Ebene der textilen Bewehrung. Wie eingangs erwähnt ist der Querschnitt in Laststufe 2 aber weiterhin ungeschädigt. Es treten keine bzw. rechnerisch nur minimale plastische Verformungen auf ($\varepsilon_{p,22} < 2e^{-5}$) (siehe Abb. 4.13b). Wird die Belastung weiter gesteigert, wird die Zugfestigkeit des Betons erstmals großflächiger überschritten (siehe Abb.4.12c). Dies führt zu plastischen Zugdehnungen im Betonkörper, die orthogonal auf die Ebene der textilen Bewehrung gerichtet sind (siehe Abb. 4.13c). Diese plastischen Dehnungen können als beginnende Mikrorissbildung interpretiert werden. Infolge der plastischen Verformungen kommt es zu Lastumlagerungen und zu einem Steifigkeitsverlust in diesem Bereich. In weiterer Folge wird die Druckstrebe bei höher werdender Belastung flacher und die resultierenden Querkzugbeanspruchungen verlagern sich in den vorderen, ungeschädigten Bereich des Betonkörpers, bis es auch hier zu einer vollständigen Schädigung des Untersuchungsbereiches kommt (siehe Abb. 4.12d). Dabei ist zu beobachten, dass für vorliegende Textilkonfiguration die einaxiale Zugfestigkeit in der xy-Ebene an keiner Stelle überschritten wird. Die Rissbildung, die schlussendlich zum Versagen führt, findet demnach hauptsächlich in der Ebene der textilen Bewehrung statt.

4.3.4 Erkenntnisse aus der FE-Berechnung

Mit den vorangegangenen FE-Berechnungen konnte anschaulich der Kraftfluss während eines Pull-Out Versuches, innerhalb des Untersuchungsbereiches dargestellt werden. Die Wirkungsweise textiler Bewehrungselemente, welche mit einer steifen Tränkung imprägniert sind, ähnelt dem Verbundverhalten konventioneller Betonstahlbewehrung. Wesentlicher Verbundmechanismus ist der Formverbund. Dieser wird durch eine aus dem Herstellungsprozess resultierende periodische Aufweitung, welche durch die steife Tränkung in ihrer Form konserviert wird, erzeugt. Diese Aufweitung tritt in verhältnismäßig sehr großen Abständen auf, wodurch sich aus Sicht des Autors Nachteile im Verbundverhalten ergeben. Der Verbund wird primär in jenem Bereich sichergestellt, in dem ein größerer Rovingquerschnitt durch einen kleineren Bewehrungskanal gezogen wird. Dies entspricht im Regelfall genau der Hälfte des Querovingabstandes (siehe Abb. 4.14). Demzufolge bilden sich Bereiche im Bauteil aus, die sehr hoch beansprucht sind, wohingegen auf der anderen Seite Bereiche vorhanden sind, die entsprechend wenig beansprucht sind.

In Bezug auf die Spaltrissbildung konnten die bisherigen Erfahrungen mit den FE-Berechnungen gestützt werden. Bei Belastung entstehen hohe Querkzugbeanspruchungen orthogonal auf die Ebene der textilen Bewehrung, die für vorliegende Textilkonfiguration zu einem Spalten in ebendieser Ebene führt. Die Vermutung liegt nahe, dass dies primär auf die Querschnittsform (gestützt auch durch die eigenen experimentellen Untersuchungen in Kap. 3.3) und die periodische Dickenaufweitung zurückzuführen ist. Die im nachfolgenden Abschnitt beschriebene Parameterstudie soll weiterführend Klarheit zu diesem Thema schaffen. In Abb. 4.15 sind exemplarisch für eine Laststufe von 3500 N die resultierenden Spaltzugkräfte, welche aus den Spannungen die orthogonal auf die Schnittführung wirken aufintegriert wurden, einmal orthogonal zur Ebene der textilen Bewehrung (Abb. 4.15a) und einmal in der Ebene der textilen Bewehrung (Abb. 4.15b) dargestellt. Ersichtlich ist, dass die resultierende Spaltzugkraft orthogonal zur Ebene der textilen Bewehrung $F_{sp,y}$ gegenüber jener in der Ebene der textilen Bewehrung $F_{sp,z}$ bei weitem überwiegt. In Tab. 4.4 sind die entsprechenden Spaltzugkräfte bei ebendieser Auszugslast $F=3500$ N zusammengefasst. Bei Gegenüberstellung ergibt sich eine um den Faktor 2,10 höhere Spaltzugkraft in der Ebene der textilen Bewehrung.

Tab. 4.4: Spaltzugkräfte innerhalb des Untersuchungsbereiches

Laststufe	F_x	$F_{sp,y}$	$F_{sp,z}$	$F_{sp,y}/F_{sp,z}$
[-]	[N]	[N]	[N]	[-]
27	3500	3136	1495	2,10

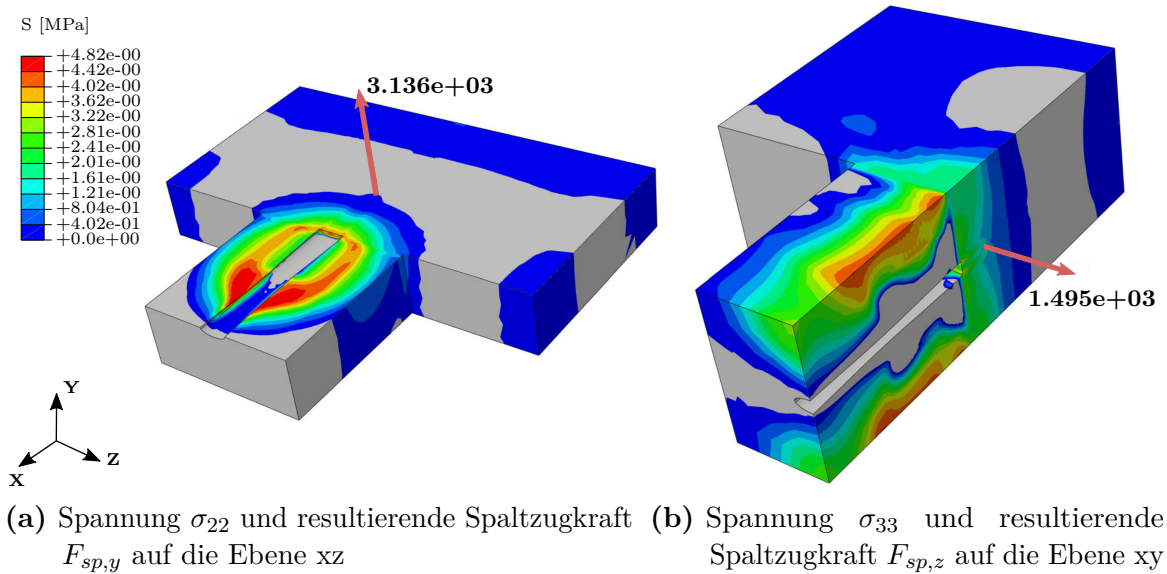


Abb. 4.15: Berechnung der resultierenden Spaltzugkräfte

4.4 Parameterstudie

4.4.1 Untersuchungsparameter

In den bisherigen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass für Textilien, welche mit einer steifen Tränkung versehen sind, im Wesentlichen geometrische Eigenschaften die Spaltrissbildung begünstigen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird in diesem Abschnitt eine Parameterstudie durchgeführt, um die geometrischen Einflüsse auf die Spaltrissbildung in textilbewehrten Bauteilen genauer zu bewerten. Dabei wird vor allem auf die in Kap. 3.3.1.1 eingeführten geometrischen Kennwerte zurückgegriffen und folgende Textilbewehrungsparameter variiert:

1. Garnform: Variation von k_F
2. Größenordnung der Aufweitung: Variation von k_A
3. Dominanz der Aufweitung: Variation von k_P

Zusätzlich wird der Betonkörper in folgender Form variiert:

4. Betondeckung: Variation von c

Für die Durchführung der Parameterstudie wird das Modell parametrisiert, welches in Kap. 4.2 vorgestellt wurde. Die jeweiligen Parameter für das Modell sind in Abb. 4.16 dargestellt. Die Variation von k_F , k_A und k_P erfolgt im wesentlichen durch Parametervariation von a_1 und b_1 (Ellipsenparameter im Knotenbereich), sowie a_2 und b_2 (Ellipsenparameter im Feldbereich) (siehe Abb. 4.16a). Die Variation des Betonkörpers erfolgt durch Variation des Parameters c (halbe Dicke des Untersuchungsgebietes - entspricht näherungsweise der Betondeckung) (siehe Abb. 4.16b).

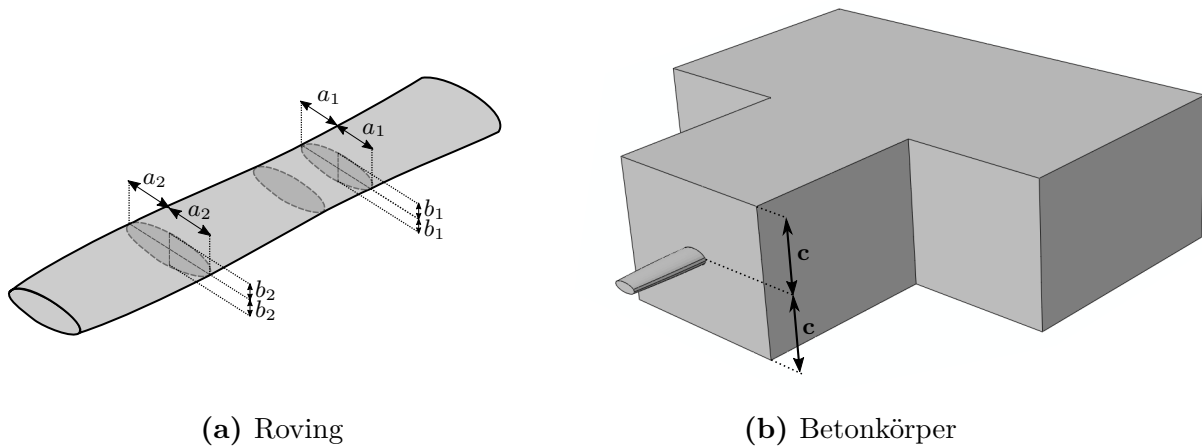


Abb. 4.16: Parameter, die im Zuge der Studie variiert wurden

Um den Modellierungsaufwand in ABAQUS zu reduzieren wird die Eingabe des Modells, mit sämtlichen Eingabeparametern wie in Kap. 4.2 beschrieben, in einem Python-Script programmiert. Durch Variation der vorher beschriebenen geometrischen Parameter a_1 , b_1 , a_2 , b_2 und c kann die Erstellung des jeweilig gewünschten Modells schnell und zielsicher erfolgen. Das Python-Script für die Erstellung des Modells ist Anhang B angefügt. Der Roving wird in diesem Fall auch weiterhin in AutoCAD modelliert und im Zuge des Scripts in ABAQUS importiert. Aufgrund des relativ großen Umfangs der Parametervariation wurde auch hier ein Script zur automatisierten Modellierung des Rovings geschrieben. Dies erfolgte mit VBA, welches in die Programmumgebung von AutoCAD integriert ist. Die jeweiligen Parameter selbst wurden mithilfe einer Zielwertsuche in Excel ermittelt. Die Zielwerte für die Parameter k_F , k_P und k_A wurden vorgegeben und die Parameter a_1 , b_1 , a_2 , b_2 und c solange variiert, bis die Abweichung des Sollwertes vom Istwert möglichst gering wurde. Auch in diesem Fall wurde zur automatisierten Berechnung für alle Parameter ein VBA-Script erstellt.

Das Schema für die Parameterstudie ist in Tab. 4.5 zu sehen. Variiert wurde in gegenseitiger Abhängigkeit der Parameter k_F im Bereich von $1,0 : 0,10 : 1,4$ (Startwert : Schrittgröße : Endwert) und Parameter k_P im Bereich von $-1,0 : 0,50 : 1,0$. Dadurch ergeben sich $5^2 = 25$ Berechnungen. Zusätzlich wurde dieses Schema innerhalb einer Variation des Flächenparameter k_A im Bereich von $1,2 : 0,3 : 1,8$ wiederholt. Dadurch erhöht sich die Parameteranzahl auf $3 \cdot 25 = 75$ Berechnungen. Unabhängig von dieser geometrischen Parametervariation am Roving, wurde eine Parametervariation der Betondeckung im Bereich von $5 : 5 : 25$ mm durchgeführt. Die Rovinggeometrie wurde in diesem Fall mit den geometrischen Kennwerten von $k_F = 1,2$; $k_P = -0,5$ und $k_A = 1,5$ (entspricht in der Ausführung etwa dem Schussroving des Ausgangstextils) konstant gehalten. Dadurch ergeben sich 5 weitere Berechnungen, wodurch die Gesamtanzahl der durchgeführten Berechnungen bei 80 liegt.

Tab. 4.5: Untersuchungsschema der Parameterstudie

k_A [-]	k_P [-]	k_F [-]					c [mm]
		1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	
1,2	-1,0	•	•	•	•	•	1,5
	-0,5	•	•	•	•	•	
	0,0	•	•	•	•	•	
	0,5	•	•	•	•	•	
	1,0	•	•	•	•	•	
1,5	-1,0	•	•	•	•	•	15
	-0,5	•	•	•	•	•	
	0,0	•	•	•	•	•	
	0,5	•	•	•	•	•	
	1,0	•	•	•	•	•	
1,8	-1,0	•	•	•	•	•	15
	-0,5	•	•	•	•	•	
	0,0	•	•	•	•	•	
	0,5	•	•	•	•	•	
	1,0	•	•	•	•	•	
1,5	-0,5			•			5
				•			10
				•			15
				•			20
				•			25

Um etwaige Größeneffekte außen vor zu lassen, wurde bei allen Versuchskonfigurationen der mittlere Umfang konstant gehalten. Dieser wurde mit 13,97 mm gewählt. Dies entspricht dem mittleren Umfang des Schussrovings des Ausgangstextils, welches in den experimentellen Untersuchungen verwendet wurde. Die jeweiligen Parameter der einzelnen Versuchskonfigurationen dieser Studie sind in Anhang C ersichtlich.

Nach erfolgter Berechnung werden als Ausgabewerte einerseits die resultierende Belastung F_x aus der weggesteuerten Verschiebung am Roving sowie die zugehörige Verschiebung u_x am Anschnitt des Rovings mit dem Untersuchungsbereich (entspricht weitestgehend der Rissöffnung w aus den Versuchen, die sich aus dem Schlupf und einer elastischen Dehnung des Rovings zusammensetzt) erhalten. Zusätzlich von Interesse sind die resultierenden Spaltzugkräfte $F_{sp,y}$ (entspricht einer Spaltzugkraft orthogonal auf die Ebene der textile Bewehrung) und $F_{sp,z}$ (entspricht einer Spaltzugkraft in der Ebene der textilen Bewehrung), die ebenfalls als Ausgabewerte erhalten werden (siehe Abb. 4.17). Dazu werden die jeweiligen Spannungen in einem entsprechenden Schnitt (Schnitt xy bzw. xz) entlang des Untersuchungsbereiches analog zu der Vorgehensweise in Kap. 4.3.4 aufintegriert (in Abb. 4.17 exemplarisch dargestellt für die Schnittebene xz - analoge Vorgehensweise für die Schnittebene xy).

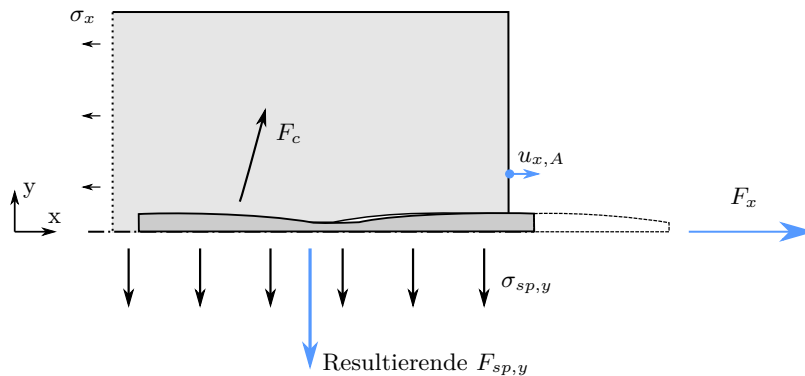
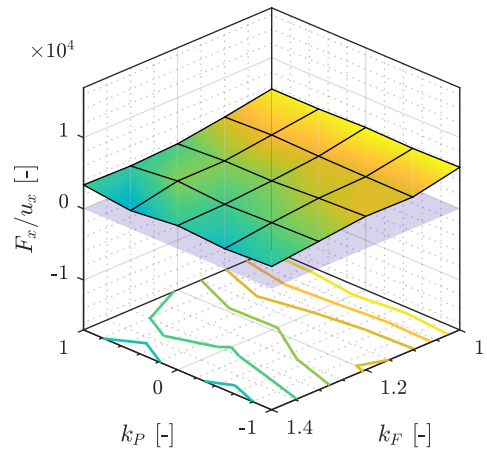
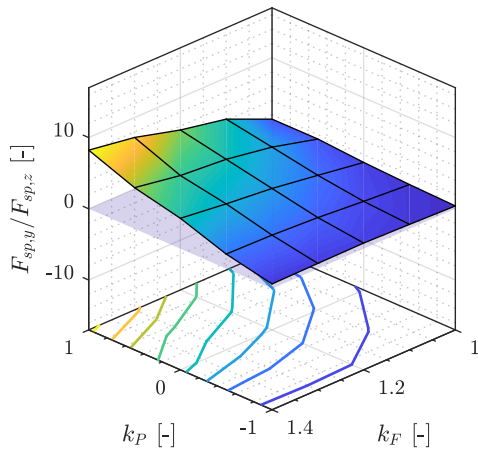


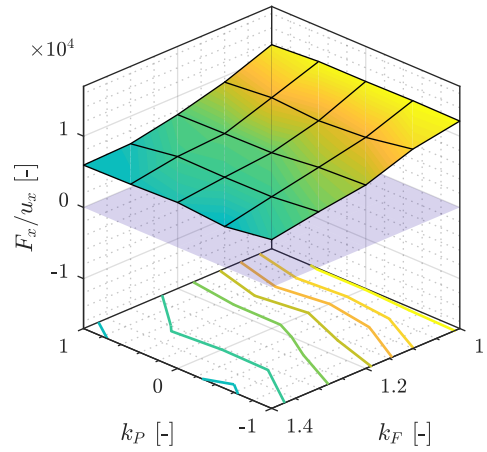
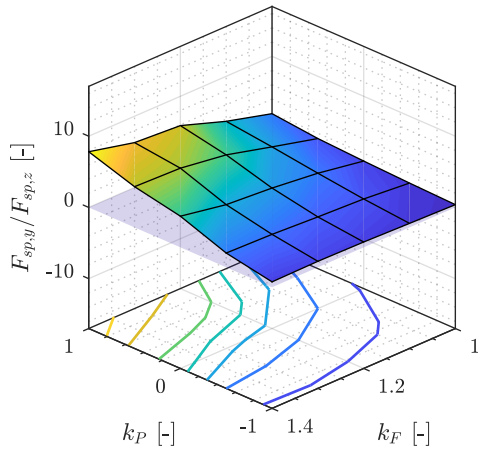
Abb. 4.17: Ausgabewerte aus ABAQUS nach erfolgter Berechnung

4.4.2 Ergebnisse

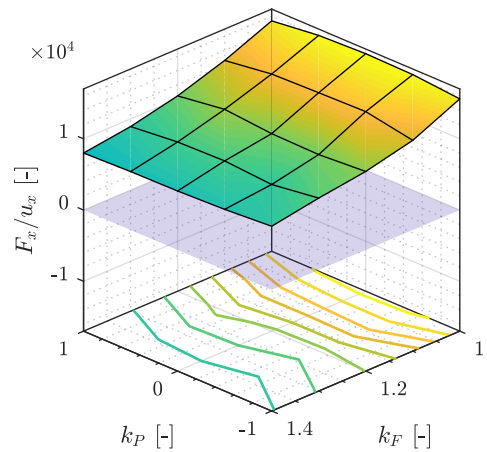
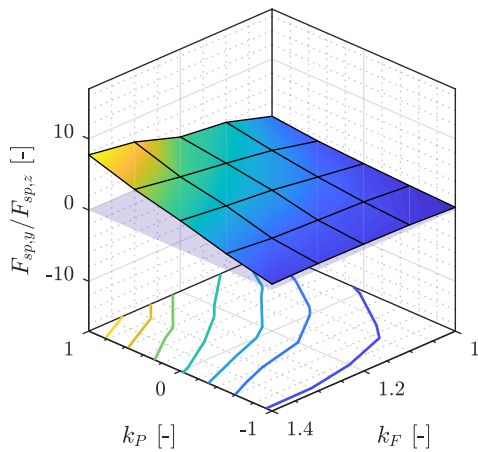
Allgemeines Die Ergebnisse der geometrischen Parameterstudie am Roving werden nachfolgend in 3-Plots dargestellt. Für die Auswertung wird eine Laststufe gewählt, in welcher der Beton sich noch im linear elastischen Bereich befindet und daher noch keine Lastumlagerungen stattgefunden haben. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der einzelnen Konfigurationen gewährleistet. Auf der x-Koordinate wird der Parameter k_F und auf der y-Achse der Parameter k_P , in ihren jeweiligen Parametergrenzen aufgetragen. Für die z-Koordinate wird in einem ersten Plot das Verhältnis $F_{sp,y}/F_{sp,z}$ aufgetragen. Dieses Verhältnis soll Aufschluss geben über die Verteilung der jeweiligen Spaltzugkräfte in Abhängigkeit der Geometrie des Rovings. In einem zweiten Plot wird auf der z-Achse das Verhältnis von F_x/u_x aufgetragen, um den auftretenden Schlupf in Abhängigkeit der Kraft zu verdeutlichen. Die jeweiligen Plots werden mit einer Oberfläche umhüllt, wobei zwischen den einzelnen Messpunkten eine lineare Approximation stattfindet. In Abb. 4.18 sind die entsprechenden 3-d Plots, jeweils separat in Abhängigkeit des Flächenfaktor k_A , abgebildet. Dabei können einige Aspekte beobachtet werden, die die Erkenntnisse aus den vorausgegangenen experimentellen und numerischen Untersuchungen ergänzen. Prinzipiell ist festzustellen, dass das Verhältnis von $F_{sp,y}/F_{sp,z}$ mit steigendem Formbeiwert k_F , als auch mit steigendem Dominanzbeiwert k_P zunimmt. Beide Parameter beeinflussen sich wechselseitig und vergrößern überproportional (wenn beide Parameter einen großen Wert einnehmen) bzw. unterproportional (wenn die Parameter in ihrer Ausprägung entgegengesetzt sind) das entsprechende Verhältnis der Spaltzugkräfte zueinander. In Hinblick auf den Größenparameter k_A ist kein wesentlicher Einfluss auf das Verhältnis der auftretenden Spaltzugkräfte $F_{sp,y}/F_{sp,z}$ erkennbar. Für das Verhältnis von F_x/u_x sind weitere wesentliche Charakteristika ersichtlich. So nimmt das Verhältnis in umgekehrter Richtung mit zunehmendem Beiwert k_F ab (d.h. wird die Querschnittsform flacher geht damit ein weiches Verbundverhalten einher), wohingegen kein ersichtlicher Einfluss der jeweiligen Richtungsdominanz in Abhängigkeit des Parameters k_P vorhanden ist. Im Vergleich zum Verhältnis der auftretenden Spaltzug-



(a) $k_A = 1,2$



(b) $k_A = 1,5$



(c) $k_A = 1,8$

Abb. 4.18: Darstellung von (links) $F_{sp,y}/F_{sp,z}$ (rechts) F_x/u_x in Abhängigkeit von k_F , k_P und k_A

kräfte $F_{sp,y}/F_{sp,z}$ ist beim Verhältnis F_x/u_x jedoch eine starke Abhängigkeit vom Aufweitungsparemeter k_A ersichtlich. In diesem Fall geht mit zunehmender Flächenaufweitung k_A ein steiferes Verbundverhalten einher.

Weiterführend werden in den folgenden Abschnitten die 3-d Plots, zur genauen Untersuchungen der Einflüsse der geometrischen Parameter, jeweils gesondert in eine zweidimensionalen Ansicht aufgelöst. Die Auswertung der Parameterstudie zum Einfluss der geometrischen Variation des Untersuchungsbereiches hingegen erfolgt, aufgrund der Tatsache, dass nur ein Modellparameter variiert wird, zweidimensional. Jedenfalls wird aber auch hier das Verhältnis der auftretenden Spaltzugkräfte $F_{sp,y}/F_{sp,z}$ sowie das Verhältnis von F_x/u_x in in Abhängigkeit der Betondeckung aufgetragen. Die jeweiligen Erkenntnisse werden gesondert unter dem Abschnitt Einfluss der Betondeckung diskutiert.

Einfluss der Garnform: In Abb. 4.19 sind die in ein 2-d Diagramm aufgelösten Plots aus dem vorherigen Abschnitt exemplarisch jeweils für einen Flächenparameter von $k_A = 1,5$ dargestellt. Um die Größenordnung der in y, bzw. z-Richtung auftretenden Spaltzugkräfte abzubilden, erfolgt eine gesonderte Darstellung der Spaltzugkräfte $F_{sp,y}$ bzw. $F_{sp,z}$ in diesem Diagramm, jeweils in Relation gesetzt zur aufgetragten Belastung F_x . Eindeutig ersichtlich ist das, ausgehend von einem runden Faserstrangquerschnitt, ansteigende Verhältnis von $F_{sp,y}/F_x$ bzw. abfallende Verhältnis von $F_{sp,z}/F_x$ in Abhängigkeit des Beiwertes k_F . Dieser Effekt verstärkt sich in Kombination mit einem ansteigenden Beiwert k_P . Die Spaltzugkräfte orthogonal auf die Ebene der textilen Bewehrung überwiegen weitestgehend gegenüber jenen in der Ebene der textilen Bewehrung.

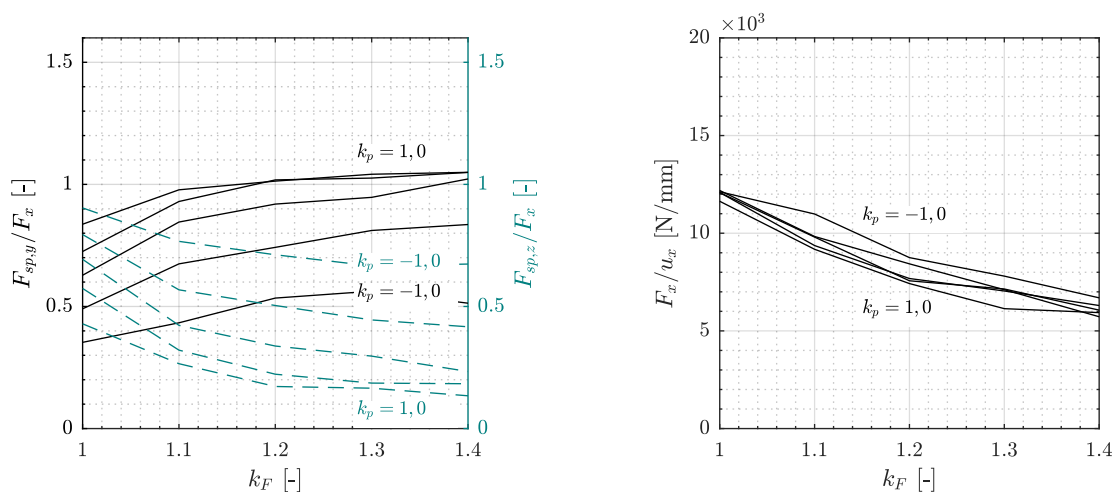


Abb. 4.19: Einfluss der Garnform ($k_A = 1,5$)

Lediglich für eine sehr stark ausgeprägte Breitenaufweitung ($k_P = -1,0$) kehrt sich dieser Trend um, wodurch in diesem Fall die Spaltzugkräfte in der Ebene des Textils dominieren. Für das in den eigenen experimentellen Untersuchungen verwendete Ausgangstextil ergibt sich für das Verhältnis $F_{sp,y}/F_x$, aufgrund

der Wechselwirkung der Parameter k_P und k_F , sowohl in Kett- als auch in Schussrichtung eine ähnliche Größenordnung der auftretenden Spaltzugkräfte. Dadurch kann die in etwa bei gleicher Laststufe beginnende Spalttrissbildung erklärt werden, obwohl beide Stränge eine unterschiedliche Form und Aufweitung aufweisen. Im umgekehrten Maße ist, ausgehend von der runden Rovingform, eine Abnahme des Verhältnisses F_x/u_x ersichtlich. Das bedeutet, dass mit zunehmender Größe des Parameters k_F (Querschnitt wird flacher) eine Abnahme der Verbundsteifigkeit einhergeht (in Anbetracht dessen, dass der gemittelte Garnumfang in dieser Parameterstudie für alle Konfigurationen konstant gehalten wurde). Im Vergleich zum Verhältnis der entstehenden Spaltzugkräfte ist hier der Einfluss des Parameters k_P als gering zu bewerten. Alle Kurven verlaufen in etwa parallel in geringem Abstand zueinander.

Einfluss der Dominanz der Aufweitung Abb. 4.20 verdeutlicht den Einfluss der periodischen Aufweitung auf das Verhältnis der resultierenden Spaltzugkräfte F_{sp}/F_x . Dabei ist ähnlich dem Einfluss der Garnform eine Erhöhung des Verhältnisses $F_{sp,y}/F_x$ bzw. eine Verminderung des Verhältnisses $F_{sp,z}/F_x$, bei Erhöhung des Parameters k_P ersichtlich. Betrachtet man einen runden Faserstrang ($k_F = 1,0$), sind in Abhängigkeit der Aufweitungsdominanz k_P erhebliche Reduzierungen bzw. Steigerungen der Spaltzugkräfte ersichtlich, während sich für einen Faserstrang ohne dominante Aufweitung $k_P = 0,0$ in etwa radialsymmetrische Spaltkräfte ausbilden.

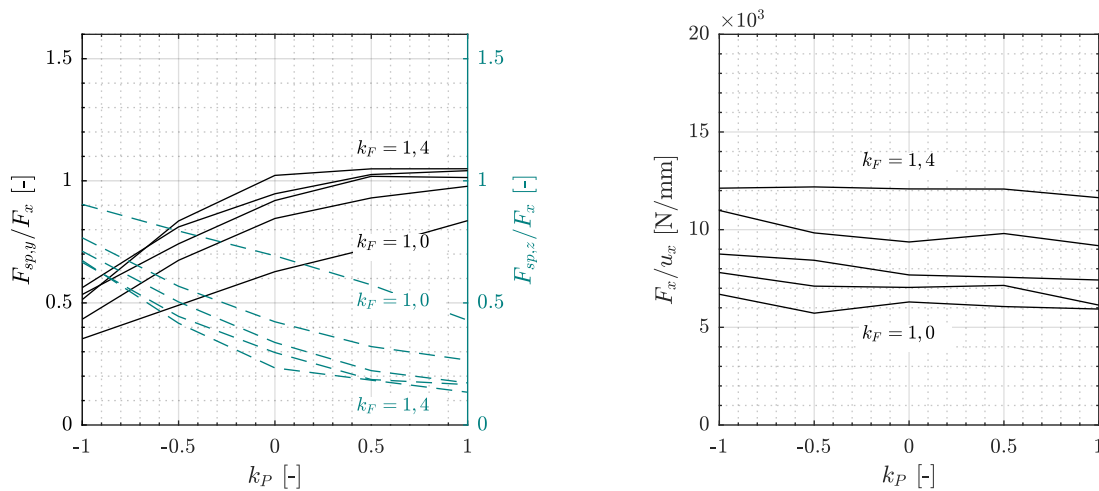


Abb. 4.20: Einfluss der Dominanz der Aufweitung ($k_A = 1,5$)

Ein bereits erwähnter Aspekt ist bei Betrachtung des Verhältnisses von F_x/u_x sehr gut ersichtlich. In Gegensatz zum ausgeprägten Einfluss der Garnform k_F auf diese Verhältniszahl, ist kein Einfluss der Aufweitungsdominanz k_P auf die Verbundsteifigkeit ersichtlich. Die Kurven verlaufen weitestgehend gerade. Dieser Aspekt ist insofern interessant, da sich hier zeigt, dass sobald ein Formschluss erzielt werden kann, unabhängig in welche Richtung die Aufweitung dominiert, eine konstante Verbundsteifigkeit erzielt wird.

Einfluss der Größenordnung der Aufweitung In den folgenden Abb. 4.22 - 4.23 werden die jeweiligen Verhältnisse von F_{sp}/F_x und F_x/u_x für alle geometrischen Garnparameter abgebildet. Zusätzlich zu den in den vorigen Abschnitten bereits diskutierten Parametern k_F und k_P anhand einer Flächenaufweitung $k_A = 1,5$ werden jetzt zusätzlich diese Diagramme auch für eine Flächenaufweitung $k_A = 1,2$ und $1,8$ aufgetragen. Dabei sind weitere wesentliche Charakteristika erkennbar. So zeigt sich, dass mit zunehmender Aufweitung k_A der Widerstand gegenüber einem Auszug zunimmt. Der Verbundwiderstand steigt, ausgehend von einer sehr geringen Flächenaufweitung $k_A = 1,2$, bei einem Flächenfaktor von $k_A = 1,5$ auf das doppelte, bzw. bei einem Flächenfaktor von $k_A = 1,8$ auf das dreifache des ursprünglichen Wertes an. Aufgrund der hohen örtlichen Pressungen, die durch den Formverbund der Bewehrung mit dem Beton entstehen, wird die Bewehrung lokal deformiert. Bei sehr flachen „Rippenformen“ ergeben sich aufgrund dieser Deformationen größere Verschiebungen. Die Verbundsteifigkeit sinkt infolge dessen. Bei größer werdender Flächenaufweitung hingegen wird der Formverbund durch die lokale Deformation wenig beeinflusst. Abb. 4.21 soll diesen Sachverhalt veranschaulichen.

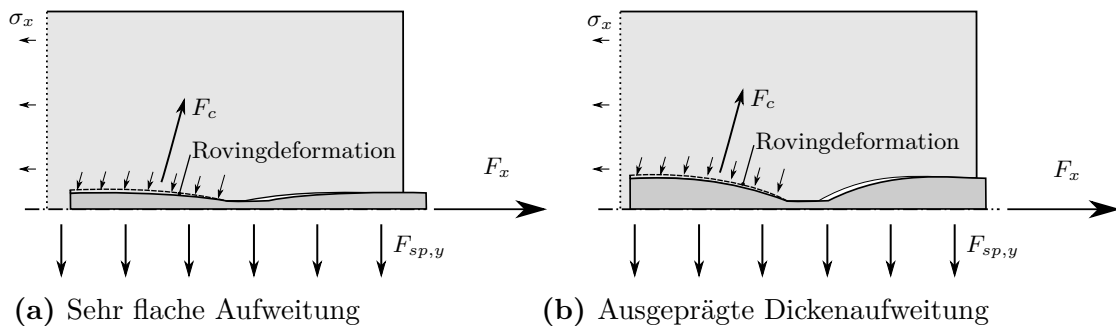


Abb. 4.21: Deformation des Rovings aufgrund hoher örtlicher Pressungen

Für das Verhältnis von F_{sp}/F_x in Abhängigkeit des Beiwertes k_P ist in der Bandbreite der durchgeführten Parametervariation kein erkennbarer Einfluss der Flächenaufweitung k_A ersichtlich. Die jeweiligen Kurven verlaufen weitestgehend identisch. Selbiger Sachverhalt konnte für den Formfaktor k_F festgestellt werden. Der Einfluss des Formbeiwertes auf die auftretenden Spaltzugkräfte bleibt unabhängig von der Flächenaufweitung konstant.

Einfluss der Betondeckung: In Abb. 4.24 sind die jeweiligen Verhältnisse F_{sp}/F_x , sowie F_x/u_x in Abhängigkeit der Betondeckung aufgetragen. Da sich aufgrund der unterschiedlichen Betonfläche Abweichungen in der Betontragfähigkeit ergeben, werden in diesem Fall nicht die Ausgabewerte bei einer identischen Belastung herangezogen, sondern repräsentativ vergleichbare Werte je Versuchskörper ermittelt. Im Speziellen wird auch hier darauf geachtet, dass der Betonkörper ungeschädigt ist (Dehnungen sich im elastischen Bereich befinden), da es ansonsten zu großen Lastumlagerungen und unterschiedlichen Spannungsverteilungen kommen kann. In den Auswertungen ist prinzipiell ein geringer Einfluss der

4.4 Parameterstudie

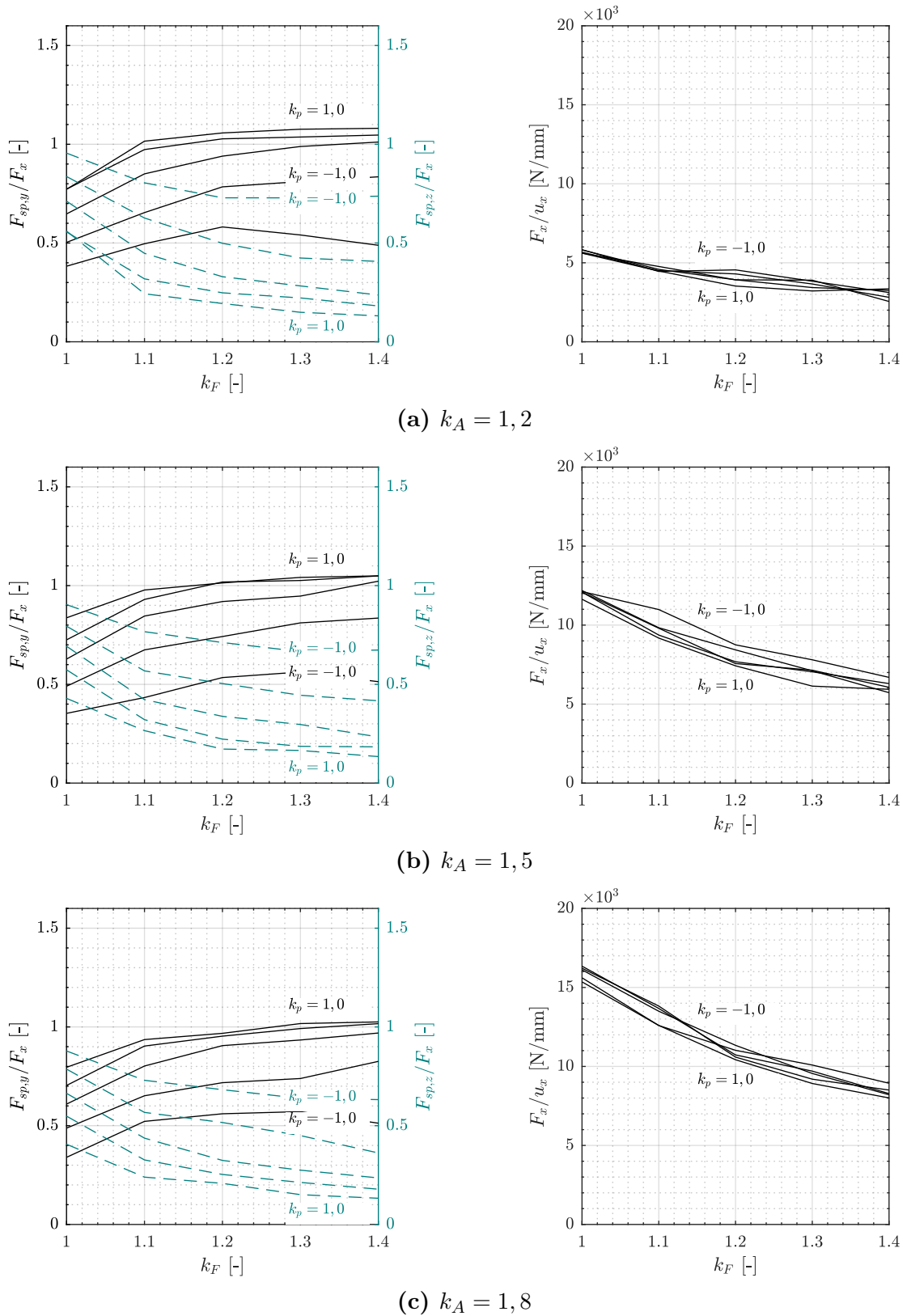


Abb. 4.22: Darstellung von (links) F_{sp}/F_x (rechts) F_x/u_x in Abhängigkeit von k_F , k_p und k_A

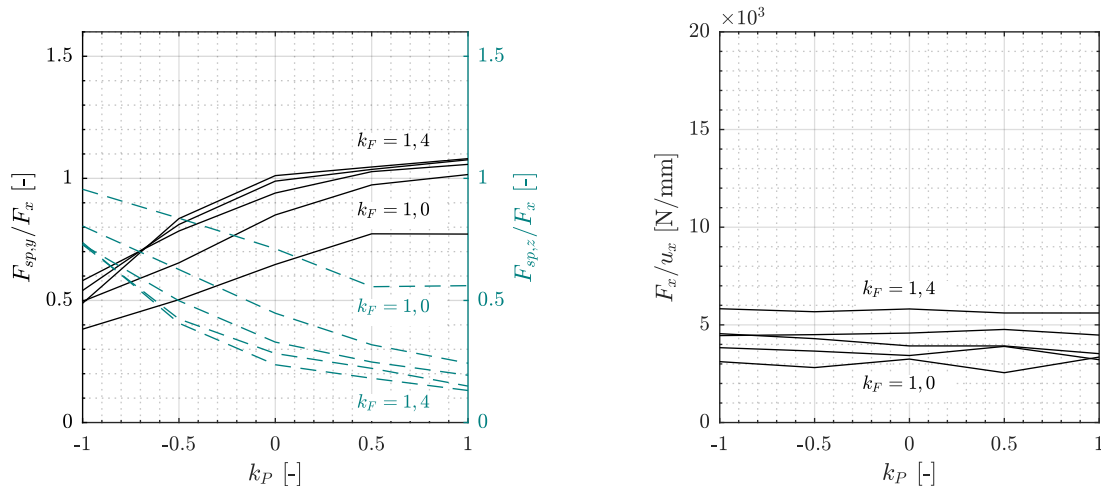
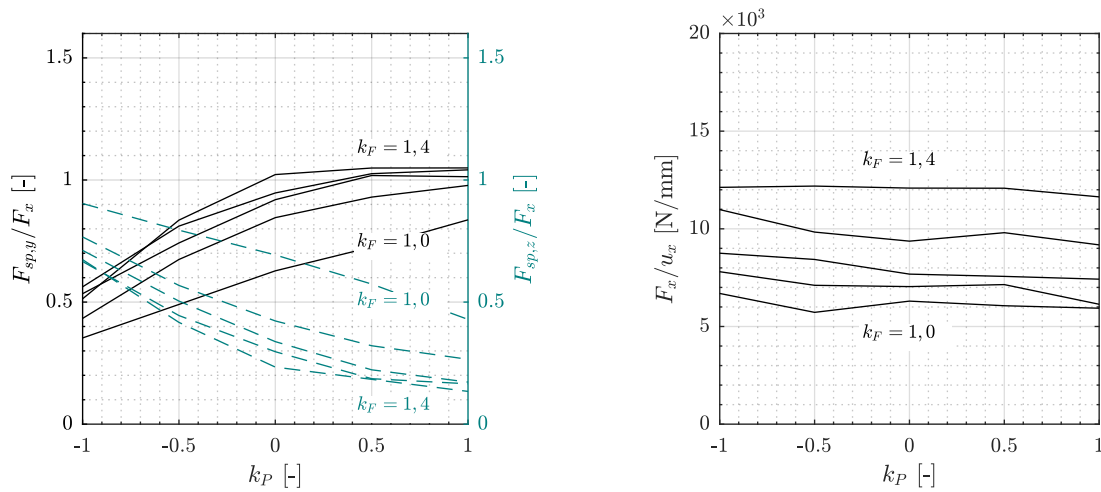
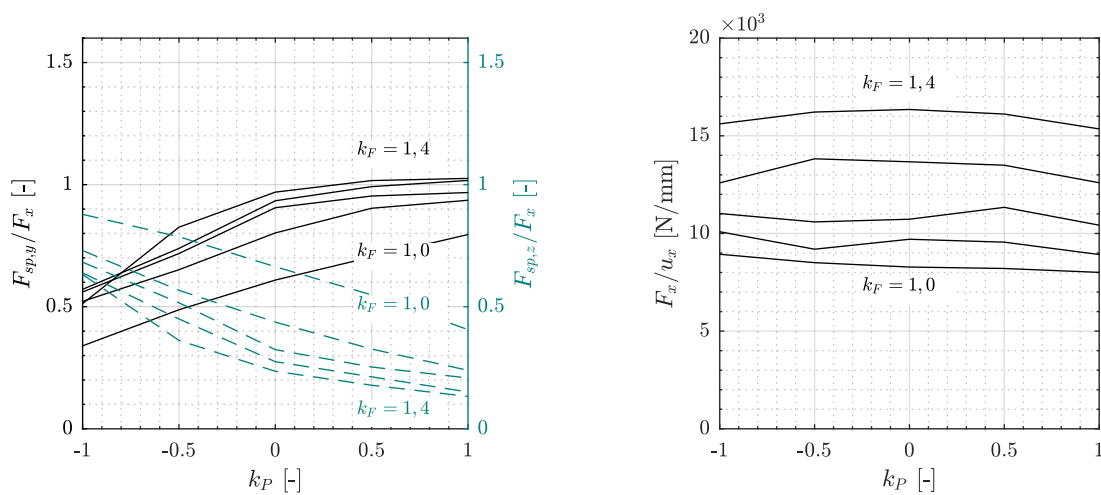
(a) $k_A = 1, 2$ (b) $k_A = 1, 5$ (c) $k_A = 1, 8$

Abb. 4.23: Darstellung von (links) $F_{sp,y}/F_x$ (rechts) F_x/u_x in Abhängigkeit von k_P , k_F und k_A

Betondeckung ersichtlich. Für das Verhältnis von F_{sp}/F_x ist dieser Unterschied so gering, dass davon ausgegangen werden kann, dass die Orientierung der auftretenden Spaltzugkräfte von der Betondeckung unabhängig ist.

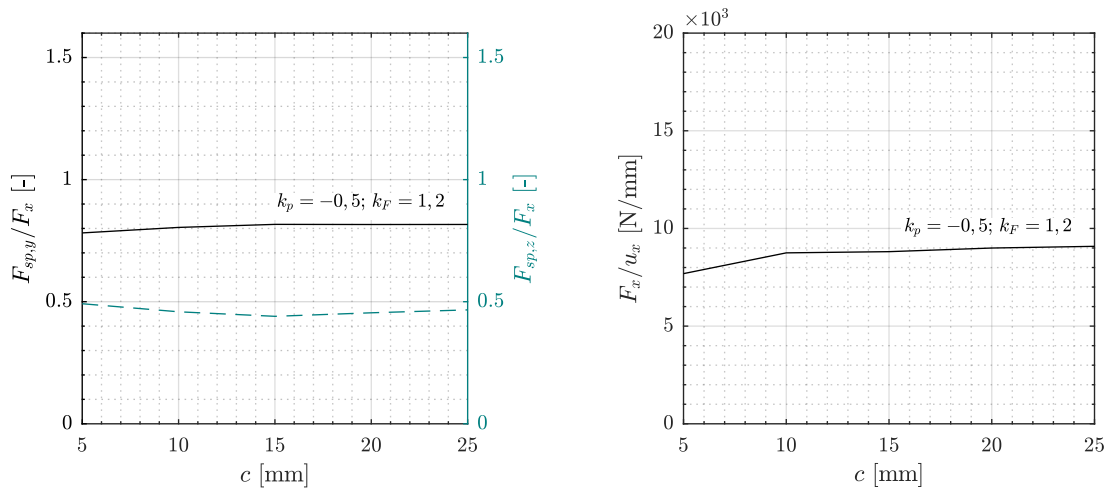


Abb. 4.24: Einfluss der Betondeckung ($k_A = 1,5$)

In Bezug auf das Verhältnis F_x/u_x kann eine geringe Erhöhung der Verbundsteifigkeit mit zunehmender Betondeckung beobachtet werden. Ausgehend von einem Verhältnis F_x/u_x von $\sim 8,0$ erhöht sich dieser Wert bei einer Betondeckung von 15 mm auf $\sim 10,0$ und pendelt sich auch hier auf konstantem Niveau ein. Die höhere Verbundsteifigkeit in Relation zu einer Erhöhung der Betondeckung lässt sich aus der höheren Steifigkeit des Untersuchungsbereiches und die damit einhergehende Querdehnungsbehinderung erklären.

Bei genauer Betrachtung der FE-Berechnungen ergeben sich aber weitere, wesentlich einflussreichere Aspekte in Bezug auf die Betondeckung. So beeinflusst die Betondeckung in hohem Ausmaß die Rissbildung, einerseits in Bezug auf die Erstrisslast und andererseits auch in der Orientierung der Risse. Es konnte vor allem für geringe Betondeckungen eine Rissindikation abweichend von der Ebene der textilen Bewehrung festgestellt werden. Bei einer Betondeckung von 5 mm bilden sich in den FE-Berechnungen erstmals plastische Dehnungen aus, die orthogonal auf eine von der Rovingmitte zu den Ecken des Untersuchungsbereiches verlaufenden Ebene (deutet auf eine in dieser Ebene beginnenden Rissbildung hin) gerichtet sind. Dies ist insofern plausibel, da aufgrund der geringen Betondeckung der Betonwiderstand in Dickenrichtung geringer ausfällt als in Breitenrichtung. In Kombination mit den höheren Spaltzugbeanspruchungen orthogonal auf die Ebene des Textils ergibt sich die ebene beschriebene Rissindikation. Eine Spaltrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung entsteht in den FE-Berechnungen erst ab einer Betondeckung von 15 mm.

Ein weiterer wichtiger Aspekt betrifft die Rissabstände in Belastungsrichtung. Das Versagen beim Versuchskörper mit einer Betondeckung von 5 mm setzte schlussendlich ein, nachdem die Zugfestigkeit im Beton direkt am Anschnitt des

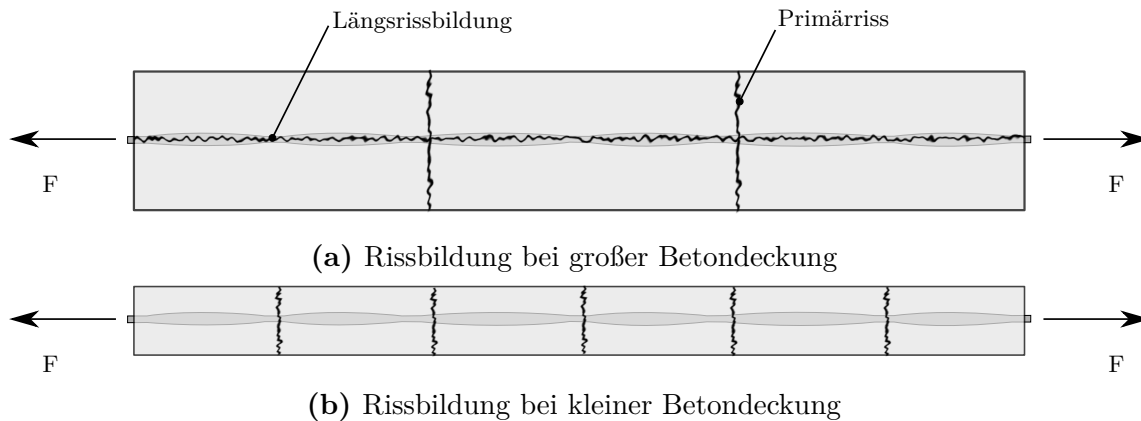


Abb. 4.25: Rissbildung in Abhängigkeit der Betondeckung

Untersuchungsbereiches mit dem oberen Modellbereich überschritten wurde. In einem Bauteil würde dies bedeuten, dass durch den Verbund Kräfte auf den Beton soweit wieder übertragen wurden, dass die Betonzugfestigkeit überschritten wird und eine erneute Primärrissbildung in Belastungsrichtung stattfindet. Bei sehr dünnen Bauteilen ergeben sich, aufgrund des daraus resultierenden höheren Bewehrungsgrades, kleinere Rissabstände in Belastungsrichtung. Die Verbundbeanspruchung wird in diesem Fall geringer, wodurch sich im Umkehrschluss auch wesentlich geringere Spaltzugkräfte ausbilden. Dadurch kann sich die ungewöhnliche Situation ergeben, dass bei geringer Betondeckung eben keine Spaltrissbildung auftritt, wohingegen mit Zunahme der Betondeckung die Neigung des Betonkörpers zur Spaltrissbildung sich erhöht. Abb. 4.25 verdeutlicht diesen Effekt. In Schütze und Curbach (2019) konnte dieser Effekt erst kürzlich auch experimentell abgebildet werden.

4.4.3 Erkenntnisse aus der Parameterstudie

Die durchgeführte Parameterstudie erweitert den Kenntnisstand zum Thema der Spaltrissbildung in textilbewehrten Bauteilen. So zeigte sich, dass die auftretenden Spaltkräfte wechselseitig abhängig sind von der Garnform und der Richtungsdominanz der periodischen Aufweitung der Garne. Die Spaltkräfte orthogonal auf die Ebene der textilen Bewehrung nehmen mit zunehmend flacherer Form des Rovings zu. Für die periodische Aufweitung hingegen gilt, dass diese bei einer ausgeprägten Aufweitung in Dickenrichtung Spaltzugkräfte orthogonal auf die Ebene der textilen Bewehrung erzeugt. Wirken beide Parameter ungünstig steigern sich die Spaltzugspannungen überproportional, während bei einer gegensätzlichen Ausprägung der Parameter eine unterproportionale Steigerung der Spaltkräfte erfolgt. Durch die gegenseitige Beeinflussung dieser Parameter kann sich die Situation ergeben, dass zwei eigentlich unterschiedliche Rovinge Spaltzugbeanspruchungen auf ähnlichem Lastniveau erzeugen. Ob dieses Verhalten auch in der Realität in der Form zu tragen kommt muss noch in Versuchen bestätigt werden. Für die Modellbildung wurde ein transversal isotropes Materialverhalten für den Roving angenommen. Herstellungs-

bedingt ist es aber auch durchaus denkbar, dass die transversale Steifigkeit nicht rotationssymmetrisch ist und sich dadurch Unterschiede ergeben können.

In Bezug auf die Verbundsteifigkeit können mehrere Erkenntnisse aus der Parameterstudie gewonnen werden. So ist die Verbundsteifigkeit bei Vorliegen eines Formverbundes sehr stark von der Rovingform abhängig. Wird der Roving zunehmend flacher, sinkt im selben Ausmaße die Verbundsteifigkeit. Dieser Effekt ist, in Bezug auf die Flächenaufweitung, bei zunehmender Größe dieser Aufweitung tendenziell noch stärker ausgeprägt, wobei generell eine höhere Verbundsteifigkeit mit zunehmenden Aufweitungsbeiwert festgestellt werden kann. In Hinblick auf eine Dominanz der Aufweitung ergibt sich in Bezug auf die Verbundsteifigkeit keine wesentliche Richtungsabhängigkeit. Unabhängig davon, ob eine dominante Breiten- oder Dickenaufweitung vorliegt, tritt in etwa die selbe Verbundsteifigkeit auf. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass ein Formverbund vorhanden ist.

Weitere Aspekte konnten bei der Variation der Betondeckung beobachtet werden. So zeigte sich, dass eine Erhöhung der Betondeckung nicht zwangsläufig mit einer Reduzierung der Spaltrissneigung einhergeht. Speziell für sehr dünne Bauteile, wie dies im Textilbetonbau oft der Fall ist, ergibt sich bei geringen Betondeckungen der gegenteilige Fall. Durch den, aus der geringen Betondeckung resultierenden, höheren Bewehrungsgrad, ergeben sich sehr kurze Lasteinleitungslängen bis die Betonspannung durch den Verbund wieder soweit angestiegen ist, dass die Betonzugfestigkeit überschritten wird. Die Primärrisse liegen in kleinen Rissabständen vor. Als Folge entstehen geringere Spaltzugkräfte, da die Verbundbeanspruchungen geringer ausfallen. Steigt die Betondeckung hingegen an, erhöht sich die Verbundbeanspruchung an der Grenzfläche Bewehrung und Beton, wodurch auch höhere Spaltzugkräfte induziert werden. In diesem Fall geht eine Zunahme der Betondeckung mit einer Zunahme der Spaltrissneigung einher.

4.5 Modell zur Berechnung der Spaltzugkräfte

In den vorigen Abschnitten hat sich gezeigt, dass die Entstehung von Spaltkräften hauptsächlich von den geometrischen Charakteristika abhängig ist. In diesem Abschnitt wird ein Modell zur überschlägigen Berechnung der Spaltzugkräfte in Abhängigkeit der geometrischen Form vorgestellt.

$$F_{sp,y} = \alpha_F \cdot \sin \varphi \cdot \tan \theta \cdot F_x \quad (4.10)$$

$$F_{sp,z} = (1 - \alpha_F) \cdot \cos \varphi \cdot \tan \theta \cdot F_x \quad (4.11)$$

mit:

α_F = Einflussfaktor auf die Verteilung der entstehenden Spaltzugkräfte in Abhängigkeit der Querschnittsform des Rovings

φ = Neigung der Betondruckstrebe quer zur Längsrichtung

θ = Neigung der Betondruckstrebe zur Längsachse des Textils

Die jeweilige Größe der Variablen in Gl. 4.10 ergibt sich in Abhängigkeit der Beiwerte k_F , k_P , k_A . Die Modellannahmen zu den einzelnen Parametern und deren Einfluss auf die Größenordnung der auftretenden Spaltkräfte werden nachfolgend erläutert.

Einfluss der Rovingform: Die resultierenden Spaltzugkräfte sind aufgrund der mit größer werdendem Beiwert k_F zunehmend elliptischeren Form des Rovings wesentlicher ausgeprägter in Richtung der Nebenachse. Abb. 4.26 verdeutlicht diesen Effekt.

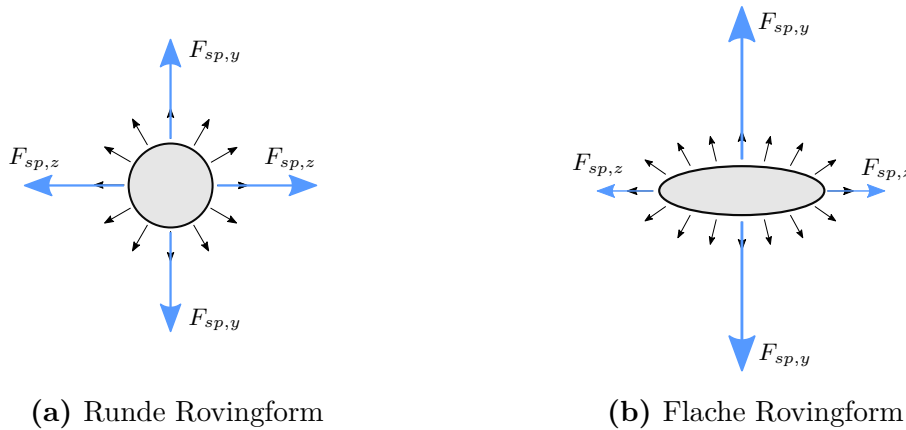


Abb. 4.26: Resultierende Spaltzugkräfte in Abhängigkeit der Rovingform

Zur Bestimmung der Größenordnung der auftretenden Spaltzugkräfte in Abhängigkeit des Formbeiwertes k_F ist das Verhältnis der Halbachsen zueinander von Interesse. Mit zunehmender Größe der Hauptachse steigen die Spaltzugkräfte orthogonal auf die Ebene der textilen Bewehrung. Ausgangspunkt für die Bestimmung der auftretenden Spaltzugkräfte ist Gl. 4.12, welche eine Näherung des Umfangs für den Roving darstellt:

$$U_r \sim \pi \cdot \left(3 \cdot \frac{a+b}{2} - \sqrt{ab} \right) \quad (4.12)$$

Gleichsetzen der Flächeninhalte eines Kreises und einer Ellipse $A_{r,m} = A_{kr}$ und berechnen des Kreisumfangs U_{kr} ergibt:

$$a \cdot b \cdot \pi = r^2 \cdot \pi \quad (4.13)$$

$$r = \sqrt{a \cdot b} \quad (4.14)$$

$$U_{kr} = 2 \cdot r \cdot \pi = 2 \cdot \sqrt{a \cdot b} \cdot \pi \quad (4.15)$$

Einsetzen von Gl. 3.3 und Gl. 4.12 in Gl. 4.15 liefert:

$$k_F \cdot 2 \cdot \sqrt{a \cdot b} \cdot \pi = \pi \cdot \left(3 \cdot \frac{a+b}{2} - \sqrt{a \cdot b} \right) \quad (4.16)$$

bzw:

$$\sqrt{a \cdot b} \cdot (2 \cdot k_F + 1) = 3 \cdot \frac{a + b}{2} \quad (4.17)$$

Substitution mit:

$$\lambda = 2 \cdot k_F + 1 \quad (4.18)$$

und umformen liefert eine quadratische Gleichung in der Form:

$$a^2 - 2 \cdot a \cdot b \cdot \left(\frac{2}{9} \cdot \lambda^2 - 1\right) + b^2 = 0 \quad (4.19)$$

Die Lösung dieser quadratische Gleichung ergibt:

$$a = b \cdot \left(\frac{2}{9} \cdot \lambda^2 + \frac{2}{3} \cdot \lambda \sqrt{\frac{1}{9} \lambda^2 - 1}\right) \quad (4.20)$$

In Abb. 4.27 ist das Verhältnis der Ellipsenachsen zueinander in Abhängigkeit des Formparameters k_F aufgetragen. Die erhaltene Kurve gibt gut die Tendenz des Verhältnisses von F_{sp}/F_x aus den numerischen Ergebnissen wieder (vergleiche dazu Abb. 4.22).

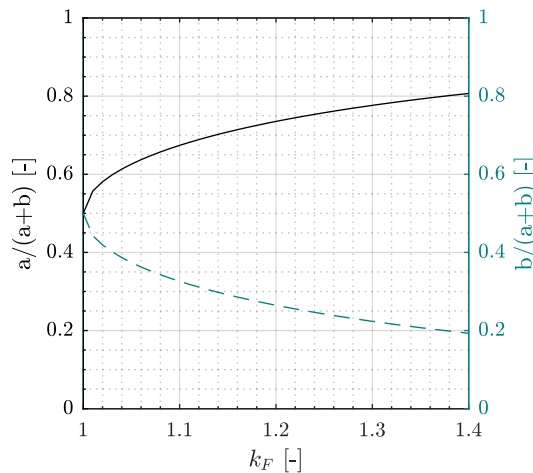


Abb. 4.27: Verhältnis der Ellipsenachsen in Abhängigkeit des Formparameters k_F

Der Beiwert zur Bestimmung der Größenordnung der Spaltzugkräfte orthogonal auf die Ebene der textilen Bewehrung $F_{sp,y}$ ergibt sich nachfolgend zu $\alpha_F = \frac{a}{a+b}$, wobei a bzw. b in Abhängigkeit des Formbeiwertes k_F nach Gl. 4.20 ermittelt werden kann. Die Größenordnung der resultierenden Spaltzugkraft in z-Richtung kann umgekehrt durch den Faktor $(1 - \alpha_F)$ berechnet werden.

Einfluss der Ausprägung der Aufweitung: In den numerischen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Ausprägung der Aufweitung Einfluss auf das Verhältnis der auftretenden Spaltzugkräfte hat. So ist bei einer ausgeprägten Breitenaufweitung die entstehende Betondruckstrebe sehr stark in der Ebene der textilen Bewehrung orientiert, wohingegen bei einer ausgeprägten Dickenaufweitung die resultierende Betondruckstrebe orthogonal zur Bewehrungsebene orientiert ist (siehe Abb. 4.28).

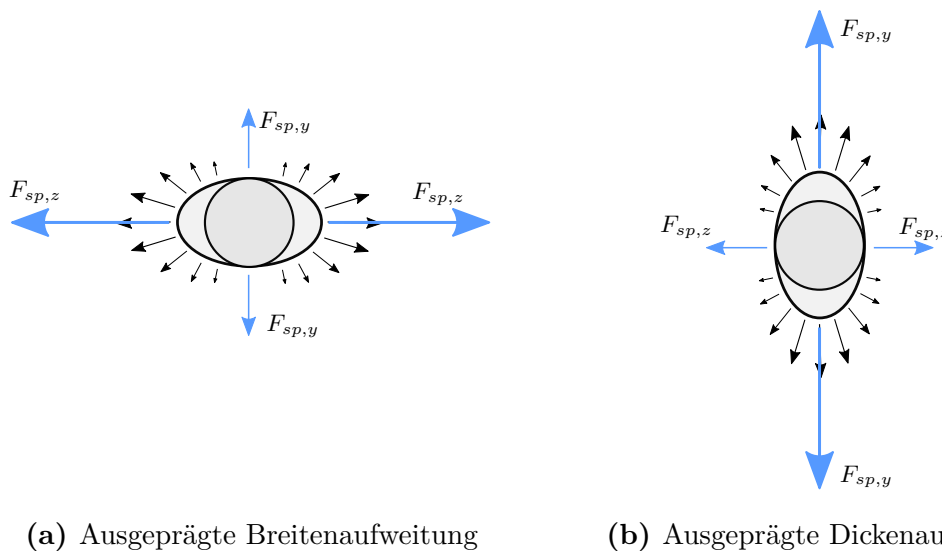


Abb. 4.28: Ausprägung der Spaltzugkräfte in Abhängigkeit der Aufweitung

Zur Bestimmung des Verhältnisses der auftretenden Spaltzugkräfte wird in Abbildung 4.29 ein Rovingsegment im Abschnitt $\pi/2 - \pi$ betrachtet. Ausgehend von einem runden Rovingquerschnitt findet die jeweilige Aufweitung statt. Es wird angenommen, dass die resultierende Spaltzugkraft durch den Flächenschwerpunkt der Aufweitung verläuft (dunkelgrau schraffierter Bereich in Abb. 4.29). Dadurch kann der Neigungswinkel φ der Betondruckstrebe ermittelt werden. In der nachfolgenden Gegenüberstellung der Ergebnisse wird gezeigt, dass diese Annahme mit guter Genauigkeit zutrifft. Eine zusätzliche Stauchung des Rovings in Abhängigkeit des Formparameters k_F wird bereits über den Beiwert α_F berücksichtigt, und ist in dieser Betrachtung nicht mehr erforderlich.

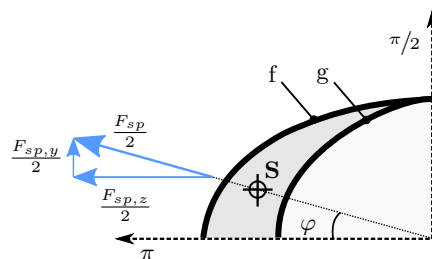


Abb. 4.29: Neigung der resultierenden Betondruckstrebe quer zur Längsachse

4.5 Modell zur Berechnung der Spaltzugkräfte

Der Schwerpunkt der Fläche zwischen den beiden Funktionen aus Abb. 4.29 kann berechnet werden durch:

$$S_x = \frac{\int_a^b x \cdot [f(x) - g(x)] dx}{\int_a^b [f(x) - g(x)] dx} \quad (4.21)$$

$$S_y = \frac{\int_a^b y \cdot [f(x) - g(x)] dx}{\int_a^b [f(x) - g(x)] dx} \quad (4.22)$$

Für die Berechnung des Flächenschwerpunktes wird von einem Polarkoordinatensystem Gebrauch gemacht. Transformation ergibt:

$$x = r \cdot a \cdot \cos \varphi \quad (4.23)$$

$$y = r \cdot b \cdot \sin \varphi \quad (4.24)$$

mit dem infinitesimalen Flächenelement

$$dA = r \cdot a \cdot b \cdot dr \cdot d\varphi \quad (4.25)$$

Lösung des Integrals im Bereich $\frac{\pi}{2}$ bis π ergibt für die Schwerpunktkoordinaten:

$$x_s = \frac{4 \cdot (a_2 \cdot b_2^2 - a_1 \cdot b_1^2)}{3 \cdot \pi (a_2 \cdot b_2 - a_1 \cdot b_1)} \quad (4.26)$$

$$y_s = \frac{4 \cdot (a_2^2 \cdot b_2 - a_1^2 \cdot b_1)}{3 \cdot \pi (a_2 \cdot b_2 - a_1 \cdot b_1)} \quad (4.27)$$

Der Neigungswinkel φ der Betondruckstrebe ergibt sich demnach zu:

$$\varphi = \cot \frac{a_2^2 \cdot b_2 - a_1^2 \cdot b_1}{a_2 \cdot b_2^2 - a_1 \cdot b_1^2} \quad (4.28)$$

Die jeweiligen Komponenten der Spaltzugkräfte, $F_{sp,y}$ und $F_{sp,z}$ berechnen sich mit dem Betondruckstrebenwinkel φ zu:

$$F_{sp,y} = F_{sp} \cdot \sin \varphi \quad (4.29)$$

$$F_{sp,z} = F_{sp} \cdot \cos \varphi \quad (4.30)$$

Für vorliegende Textilkonfiguration wurde die Auswertung des Winkels φ ausgehend von einem weitestgehend runden Roving $k_F = 1,00$ durchgeführt. Die berechneten Werte der Spaltzugkräfte in Abhängigkeit des Ausprägungsparameters k_P sind in Abb. 4.30 dargestellt.

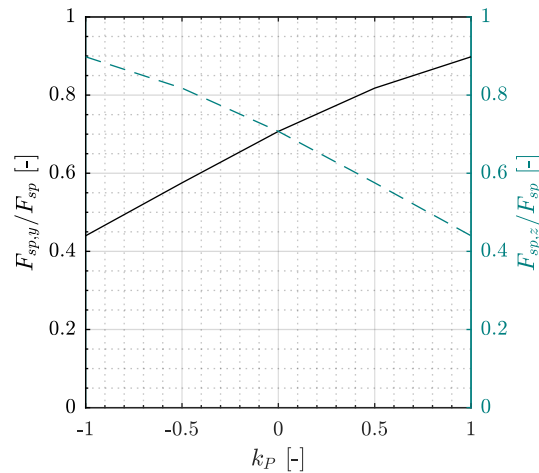


Abb. 4.30: Verhältnis der Spaltzugkräfte in Abhängigkeit des Formparameters k_P

Geringe Abweichungen zu den Ergebnissen der numerischen Berechnungen in Abhängigkeit des Dominanzparameters (siehe dazu vergleichend Abb. 4.23) sind erkennbar, dennoch scheint die Annahme, dass die resultierende Spaltkraft quer zur Längsachse durch den Flächenschwerpunkt der Aufweitung verläuft gerechtfertigt.

Einfluss der Aufweitung: Die Größenordnung der auftretenden Spaltzugkräfte ist bei Vorliegen eines Formschlusses abhängig von der Neigung der Betondruckstrebe zur Längsachse der Bewehrung (siehe Abb. 4.31).

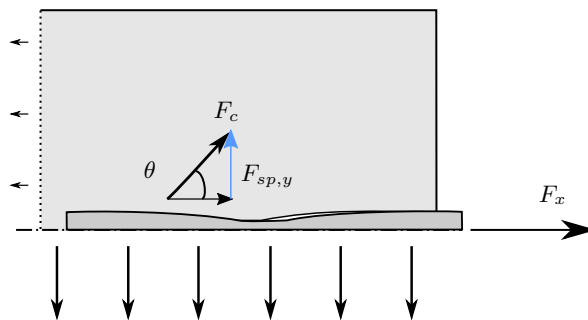


Abb. 4.31: Neigung der resultierenden Betondruckstrebe zur Längsachse

Für vorliegende Textilkonfiguration wurde der Betondruckstrebenwinkel θ für einen weitestgehend geraden Roving ($k_F = 1,0$) ohne ausgeprägte Dominanz der Aufweitung in eine Richtung ($k_P = 0,0$) ausgewertet. Dabei konnte ein Betondruckstrebenwinkel von $\theta = 60^\circ$ ermittelt werden. Der Betondruckstrebenwinkel

4.5 Modell zur Berechnung der Spaltzugkräfte

ist entsprechend der schwach ausgeprägten Rippenform des Rovings relativ steil. In weiterer Folge konnte ein nur geringfügiger Einfluss des Flächenparameter k_A auf die Neigung der Betondruckstrebe zur Längsachse festgestellt werden. Dieser Wert wird demnach für die hier untersuchten Aufweitungsparameter $k_A = 1,2-1,8$ als konstant mit $\theta = 60^\circ$ angenommen.

Ein Vergleich der mit dem hier vorgestellten Modell berechneten Spaltzugkräfte mit den numerisch ermittelten Spaltzugkräften in Kap. 4.4 ist in Abb. 4.32 dargestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Die zunehmende Abweichung bei sehr hohen Spaltzugkräften ist auf den zunehmenden Fehler bei der Ermittlung des Rovingumfangs mit der vorgestellten Näherungsformel in Gl. 4.12 bei zunehmender Flachheit des Rovings zurückzuführen.

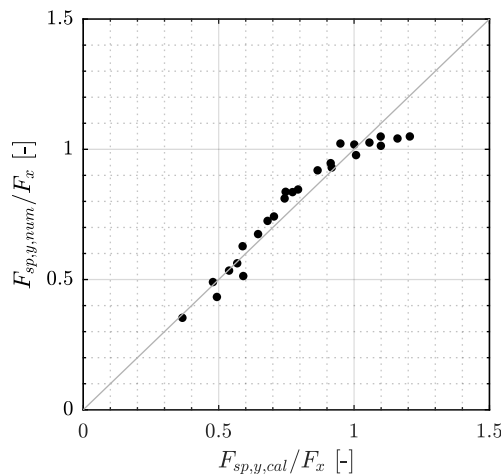


Abb. 4.32: Vergleich der nach dem vorgestellten Modell berechneten Spaltzugkräfte mit den numerisch ermittelten Spaltzugkräften ($k_A = 1,5$)

Für die Berechnung einer beginnenden Spaltrissbildung ist die Einwirkungsseite gleich der Widerstandsseite zu setzen:

$$F_{sp,E} = F_{sp,R} \quad (4.31)$$

Die dem Spalten entgegenwirkende Betonkraft ergibt sich aus dem Betonwiderstand (Fläche mal Betonfestigkeit), die dem Roving zuordenbar ist. Für die Bestimmung der anrechenbaren Betonfläche wird die Fläche in der Ebene der textilen Bewehrung abzüglich einer Abdeckung durch den Roving ermittelt (siehe Anhang A). Für die Betonfestigkeit wird analog zu Tefers (1979) die Spaltzugfestigkeit herangezogen. In den FE-Berechnungen hat sich diesbezüglich aber gezeigt, dass durch hohe örtliche Beanspruchungen ein steiler Spannungsgradient in der Ebene der textilen Bewehrung vorliegt. Bevor es zu einer Spaltrissbildung im Beton kommt, tritt eine lokale Plastifizierung im Nahbereich des Rovings auf, die die Zugfestigkeit vermindert (siehe Abb. 4.33).

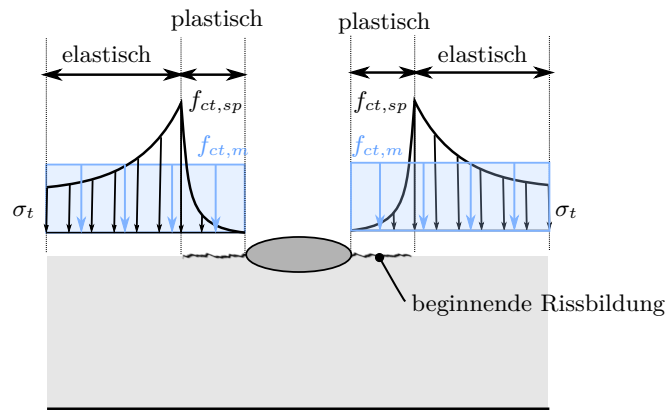


Abb. 4.33: Betonzugbeanspruchung in der Ebene der textilen Bewehrung

Für die Berechnung des Betonwiderstandes wird deshalb eine gemittelte Betonfestigkeit entlang der Ebene der textilen Bewehrung angenommen.

$$F_{sp,R} = A_{sp} \cdot f_{ct,sp} \cdot \alpha_{ct,sp} \quad (4.32)$$

mit:

A_{sp} = Die dem Roving effektiv zuzuordnende Betonfläche

$f_{ct,sp}$ = Spaltzugfestigkeit

$\alpha_{ct,sp}$ = Abminderungsfaktor der Betonzugfestigkeit zur Berücksichtigung hoher örtlicher Beanspruchungen. Dieser ergibt sich für vorliegend

Versuchskonfiguration zu: $\alpha_{ct,sp} = \frac{2}{3}$

Das vorgestellte Modell ermöglicht eine erste Abschätzung der auftretenden Spaltzugkräfte und erlaubt darüber hinaus weiterführend eine Beurteilung, ob das Bauteil entsprechend spaltrissgefährdet ist.

5 Zusammenfassung

5.1 Problemstellung

Textilbewehrung ist eine vielversprechende Entwicklung, die den konventionellen Stahlbetonbau sinnvoll ergänzt. Im Speziellen Textilien bestehend aus Carbonfasern weisen zahlreiche Vorteile in Bezug auf die Festigkeit und Dauerhaftigkeit gegenüber Stahlbewehrung auf. Dadurch ist es möglich schlanke und trotzdem hochtragfähige Bauteile zu errichten. Im Zuge des Forschungsprojektes *Sustainable Building with TRUHPC* an der TU Wien wurden schlanke Bauteile aus UHPC, welche mit Car-bontextilien bewehrt sind, entworfen. Bei der Konzeptionierung wurde auf einen effizienten Materialeinsatz besonderes Augenmerk gelegt. Im Zuge der Untersuchungen konnte zwar nachgewiesen werden, dass die Bauteile eine hohe Effizienz in Bezug auf den verwendeten Materialeinsatz aufweisen, in Anbetracht der hohen Festigkeiten der Ausgangsstoffe dennoch ein rechnerisches Defizit in Bezug auf die Tragfähigkeit vorhanden ist. Während der Versuchsdurchführung konnte eine ausgeprägte Spaltrissbildung (entspricht einer Längsrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung) sowohl im Zuggurt der Bauteile als auch im Steg beobachtet werden. Aufgrund der damit einhergehenden Betonabplatzungen kam es zu einem frühzeitigen Versagen der Bauteile.

Die Tendenz, dass textilbewehrte Bauteile zu einer Spaltrissbildung neigen, konnte zwar schon seit längerem beobachtet werden, diese Problematik hat sich in den letzten Jahren aber verschärft. Im Wesentlichen ist dies auf 2 Entwicklungsschritte zurückzuführen:

- Ein wichtiger Entwicklungsschritt auf dem Weg zu effizienten Textilbewehrungen bestand darin, die Textilien im Anschluss an ihre Herstellung zu imprägnieren. Dadurch kann der innere Verbund der Fasern zueinander verbessert und eine höhere Materialausnutzung erzielt werden. Durch den Imprägniervorgang ändert sich auch der Verbund der Bewehrung zum umgebenden Beton.
- Textilien aus Hochleistungsfasern sind teuer in der Herstellung. Um die Textilien kostengünstiger und effizienter herzustellen, ist man bestrebt möglichst große Rovingquerschnitte zu erzeugen. Für Carbonrovinge spricht man ab einer Filamentanzahl von 24.000 von Heavy Tows. Manchmal sind auch mehrere Rovinge zu einem sehr großen Faserstrang zusammengefügt. Dadurch ergeben sich sehr hohe Tragfähigkeiten, gleichzeitig steigt aber auch die Beanspruchung im Beton.

Wird ein Textil mit einer steifen Tränkung imprägniert, kann mitunter ein Formschluss der Bewehrung mit dem Beton erzielt werden (in Abhängig der Geometrie der

Rovinge). Dadurch ergibt sich sein sehr steifes Verbundverhalten, wodurch prinzipiell die Rissabstände und Rissbreiten gering ausfallen. Speziell für Rovinge mit einer hohen Filamentanzahl wird dieser positive Effekt durch die Entstehung von Spaltrissen in der Ebene der textilen Bewehrung aufgehoben, da in diesem Fall die Verbundtragfähigkeit vorzeitig gestört wird. Die Hintergründe, warum Textilien zu einer Spaltrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung neigen, werden in der Literatur unterschiedlich beantwortet. Eine systematische Auseinandersetzung mit dem Thema hat bis dato aber noch nicht stattgefunden. Diese Wissenslücke wird versucht mit dieser Arbeit zu schließen. Dazu werden die Fragestellungen aus Kap. 1.1 nochmal in Erinnerung gerufen:

- Welche Verbundmechanismen wirken an der Grenzfläche zwischen Beton und Textil
- Welche Mechanismen sind für die Längsrissbildung, die zu einem Abspalten der Betondeckung führt, verantwortlich?
- Wie kann ein Abspalten der Betondeckung in Zukunft bei textilbewehrten Betonbauteilen vermieden werden?

Im Zuge dieser Arbeit wurde versucht diese Fragen mithilfe wissenschaftlicher Methoden zu bearbeiten, um daraus geeignete Schlussfolgerungen formulieren zu können. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden im nachfolgenden Abschnitt zusammengefasst.

5.2 Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen

Das Verbundverhalten von Textilbewehrungen in Beton ist von vielen Einflussparametern abhängig. Diese habe sich im Laufe der einzelnen Entwicklungsschritte der Textilbewehrung immer wieder in ihrer Größenordnung geändert. Zahlreiche Untersuchungen und deren unterschiedliche Ergebnisse belegen diesen Entwicklungsprozess. Einflussparameter auf den Verbund zwischen Bewehrung und Beton, die in der Literatur zu finden sind, können unter anderem (a) die Querschnittsform und der Garnumfang (b) periodische Aufweitung des Rovingquerschnittes (c) Welligkeit des Faserstrangs (d) Faser- und Tränkungsmaterial (e) Wirkfaden und Bindungsart (f) Knotenwiderstand (g) Betongüte und (h) Querbeanspruchung sein. Eine gegenseitige Beeinflussung dieser Parameter ist stark ausgeprägt. Prinzipiell ist in diesem Zusammenhang nach dem verwendeten Tränkungsmaterial und der Herstellungsmethode zu unterscheiden (vorausgesetzt wird, dass die Textilien getränkt werden). Je nach Steifigkeit des Tränkungsmaterials und Geometrie des Rovings ergeben sich grundlegende Unterschiede im Verbundtragverhalten. Für steife Tränkungsmaterialien wurde in diesem Zusammenhang immer wieder die bereits beschriebene Spaltrissbildung beobachtet. Um die Hintergründe zu den entstehenden Spaltzugkräften zu eruieren, wurden im Zuge dieser Arbeit experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt. In den experimentellen Untersuchungen wurde versucht einzelne Einflussparameter auf den Verbund zwischen Textilbewehrung und Beton zu separieren

und deren Einfluss auf eine Spaltrissbildung zu quantifizieren. Um die Geometrie der Rovinge zu bestimmen wurden vorab Laserscans der verwendeten Textilien erstellt, mit denen die geometrischen Charakteristika genau erfasst werden können. Im Anschluss an diese Untersuchungen wurden numerische Berechnungen durchgeführt, um das Verbundverhalten und die Spaltrissbildung zwischen Textilbewehrung und Beton besser beurteilen zu können und die experimentellen Untersuchungen zu validieren. Eine Parameterstudie indes gibt Aufschluss über den Einfluss der geometrischen Charakteristika von Bewehrung und Beton auf die Spaltrissbildung in textilbewehrten Bauteilen. Alle Untersuchungen wurden an Textilien, welche mit einer steifen Tränkung versehen sind, durchgeführt. Folgende Schlüsse können aus den Untersuchungen gezogen werden:

- Herstellungsbedingt weisen diese Textilien eine spezielle Form auf. So ergibt sich eine flache Querschnittsform des Rovings, die zusätzlich in Längsrichtung nicht konstant ist. In Abhängigkeit des Wirkfadendrucks und der Wirkfadenspannung ergeben sich Deformationen an den Kreuzungspunkten der Kett- und Schussrovinge die eine periodische Dicken- bzw. Breitenaufweitung in Längsrichtung bewirken. Diese Effekte werden durch ein Abquetschen des Rovings im Imprägnierprozess – dieser Prozessschritt ist erforderlich um ein vollständiges Durchdringen des Rovings mit dem Tränkungsmaterial zu erzielen – weiter verstärkt. werden die Filamente hingegen nicht vollständig gestreckt in der Wirkanlage abgelegt, ergibt sich zusätzlich eine Welligkeit des Rovings in Längsrichtung. Mithilfe der Laserscans wurden die in den Untersuchungen verwendeten Rovinge genau vermessen und vier geometrische Parameter eingeführt (k_F , k_P , k_A und k_W) mit deren Hilfe die eben beschriebenen geometrischen Charakteristika der Textilien eindeutig bestimmt werden können. Für die in den Untersuchungen verwendeten Textilien konnten sehr flache Querschnittsformen festgestellt werden, die eine gegenüber der Dickenaufweitung dominante Breitenaufweitung aufweisen.
- Für Querschnittsformen mit einer periodischen Aufweitung konnte in den durchgeführten Versuchen ein Formverbund der Bewehrung mit dem Beton beobachtet werden. Im Vergleich zu Fasersträngen mit einem über die Länge konstanten Querschnitt ergibt sich dadurch ein sehr steifes Verbundverhalten. Die Vermutung von Bielak et al. (2018), dass die herstellungsbedingte periodische Aufweitung des Faserstrangs einer langgestreckten Rippe gleichkommt, konnte diesbezüglich bestätigt werden. Voraussetzung hierfür ist ein ausreichend steifes Tränkungsmaterial, das die Querschnittsgeometrie in ihrer Form konserviert. Unterschiede in der Verbundsteifigkeit können sich dennoch ergeben. So konnte in der FE-Parameterstudie eine Abnahme der Verbundsteifigkeit festgestellt werden je flacher der Querschnitt des Faserstrangs wird. Die Ausprägung der periodischen Aufweitung hingegen zeigte keinen wesentlichen Einfluss auf die Verbundsteifigkeit.
- Die Entstehung von Spaltrissen ist nicht abhängig vom Vorliegen eines Formverbundes. Durch den Formverbund wird zwar ein steiferes Verbundverhalten

erzielt, so konnte in den experimentellen Untersuchungen aber auch eine Spaltrissbildung bei geraden Fasersträngen beobachtet werden.

- Ein Einfluss des Knotenwiderstands auf die Entstehung von Spaltrissen konnte nur in sehr geringem Maße festgestellt werden und wird für derartige Textilkonfigurationen (Heavy Tow + steife Tränkung) als vernachlässigbar beurteilt.
- Die Entstehung von Spaltzugbeanspruchungen ist hauptsächlich geometrisch bedingt und ergibt sich aus einer gegenseitigen Beeinflussung der Querschnittsform und der periodischen Aufweitung. Je flacher der Rovingquerschnitt wird, desto gerichteter sind die entstehenden Querspannungen orthogonal auf die Ebene der textilen Bewehrung. Resultierend aus diesem Zusammenhang konnte in den experimentellen Untersuchungen, in Abhängigkeit der Querschnittsform des Rovings, für runde Querschnitte eine zufällig verteilte radiale Rissbildung (ähnlich der Sprengrissbildung im konventionellen Stahlbetonbau), bzw. bei flachen Querschnittsformen eine Rissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung (entspricht der hier beschriebenen Spaltrissbildung) beobachtet werden. Ein ähnlicher Effekt ergibt sich in Abhängigkeit der Richtungsdominanz der periodischen Aufweitung. Je dominanter die Dickenaufweitung gegenüber der Breitenaufweitung wird, desto höher fallen die resultierenden Spaltzugkräfte orthogonal zu der Ebene der textilen Bewehrung aus, wodurch sich die Neigung zu einer Spaltrissbildung erhöht. Liegen zudem beide geometrischen Charakteristika in ungünstiger Form vor, steigern sich die resultierenden Querspannungen, die zu einer Spaltrissbildung führen, überproportional.
- Zur Vermeidung einer Spaltrissbildung ist es sinnvoll eine runde Querschnittsform der Faserstränge anzustreben. So können die resultierenden Spaltzugkräfte orthogonal zur Ebene der textilen Bewehrung effektiv reduziert werden. Liegt gleichzeitig eine periodische Aufweitung vor, kann dennoch ein steifes Verbundverhalten erzielt werden, das sich positiv auf die Rissabstände und die Rissbreiten auswirkt.
- Die Betondeckung hat maßgeblichen Einfluss auf die Spaltrissbildung in textilbewehrten Bauteilen. Bei einer geringen Betondeckung nimmt der Betonwiderstand in Dickenrichtung soweit ab, dass die Rissbildung in diesem Fall in Dicken- und nicht in Breitenrichtung orientiert ist.
- Auf Bauteilebene hat die Betondeckung wesentlichen Einfluss auf die Primärrissbildung. Wird die Betondeckung reduziert, erhöht sich im Umkehrschluss der Bewehrungsgrad. Je höher dieser wird, desto geringer wird die erforderliche Lasteinleitungslänge bis zur Entstehung neuer Primärrisse. Die Verbundbeanspruchung an der Grenzfläche der Bewehrung zum Textil nimmt ab, wodurch sich auch geringere Spaltzugkräfte im Bauteil selbst ausbilden. Dadurch kann sich die Situation ergeben, dass bei geringen Betondeckungen keine Spaltrissbildung auftritt, wohingegen bei größeren Betondeckungen aufgrund der höheren Verbundbeanspruchungen eine ebensolche Längsrissbildung erst entstehen kann.

5.3 Überlegungen zur Berücksichtigung der Spaltrissbildung in der Beurteilung des Verbundverhaltens

Textilbewehrung unterliegt einem laufenden Entwicklungsprozess. Zur Untersuchung des Verbundverhaltens wurden in der Vergangenheit Versuchsaufbauten entwickelt, die eine bauteilgerechte Prüfung des Verbunderhaltens ermöglichen. Speziell für Faserstränge mit einer hohen Feinheit, welche mit einem steifen Tränkungsmedium imprägniert sind, ergeben sich Nachteile in ebendieser Versuchsdurchführung. So kann es zu unterschiedlichen Versagensformen – zu unterscheiden ist zwischen einem Pull-Out Versagen, einem Garnriss und einem Versagen zufolge Spalten – kommen, wodurch eine Übertragbarkeit der Versuche auf andere Bauteilkonfigurationen schwer möglich ist. Ein Pull-Out Versagen ist gekennzeichnet durch ein Verbundversagen an der Grenzfläche zwischen Bewehrung und Beton durch Überschreiten der maximalen Verbundtragfähigkeit. Da dieses Versagen weitestgehend unabhängig von der Bauteilgeometrie ist, wäre es einfach möglich das Verbundverhalten und die Verbundtragfähigkeit für eine Textilkonfiguration zu bestimmen, welches dann für unterschiedliche Bauteilgeometrien ihre Gültigkeit behält. Ein Versagen durch Spaltrissbildung hingegen ist gekennzeichnet durch eine Sprenggrissbildung im Beton aufgrund hoher Querkraftbeanspruchungen aus dem Verbundverhalten. Dieses Versagen wird maßgeblich beeinflusst von der Bauteilgeometrie.

Für die Beurteilung des Verbundverhaltens und der Verbundtragfähigkeit ist aus Sicht des Autors stark zu unterscheiden zwischen Textilkonfigurationen, welche mit einer steifen Tränkung und jene die mit einer weichen Tränkung imprägniert sind.

Für Textilkonfigurationen, welche mit einer weichen Tränkung versehen sind, bleibt der maßgebende Versagensmechanismus ein Pull-Out Versagen des Faserstranges. Die derzeit gängigen Versuchsdurchführungen und Bewertungen des Verbundverhaltens bleiben aufrecht und eine einfache Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bauteile und Bauteilgeometrien ist möglich.

Für Textilkonfigurationen, welche mit einer steifen Tränkung versehen sind, kommt hingegen die Gefahr eine Spaltrissbildung hinzu. Da dieses Verhalten sehr stark von der Bauteilgeometrie abhängig ist, kann eine einfache Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Bauteile nicht mehr gewährleistet werden. Da es bisher nicht möglich war, die Entstehung von Spaltzugkräften in Abhängigkeit der Textilkonfiguration zu quantifizieren, war jeweils eine aufwändige Versuchsdurchführung zur Bestimmung des Verbundverhaltens und der Verbundtragfähigkeit in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie nötig, bzw. wurde die Anwendung in Form von Zulassungen auf wenige Möglichkeiten beschränkt.

Um die Akzeptanz von textilbewehrten Bauteilen in der Baubranche zu erhöhen, ist langfristig anzustreben den Aufwand für die Bestimmung der Verbundtragfähigkeit möglichst zu reduzieren. Aus Sicht des Autors scheint es demnach sinnvoll das Pull-Out Versagen und das Spaltzugversagen gesondert zu untersuchen. Mithilfe adaptierter Versuchsaufbauten, bei denen darauf geachtet wird, dass es zu keinem

vorzeitigem Versagen zufolge Spaltrissbildung kommt (ähnlich den Pull-Out Versuchen nach RILEM aus dem konventionellen Stahlbetonbau), können das ideale Verbundverhalten und die Verbundtragfähigkeit bestimmt werden. Die Berechnung einer möglichen Spaltrissbildung erfolgt entkoppelt auf Basis von Modellen, die die auftretenden Spaltzugkräfte quantifizieren. Eine überschlägige Berechnung der auftretenden Spaltzugkräfte für eine bestimmte Textilkonfiguration ist z.B. in dieser Arbeit angeführt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die auftretenden Spaltzugkräfte in ihrer Größenordnung im Wesentlichen geometrisch abhängig sind. Dadurch ist es möglich auch bei unterschiedlichen Bauteilgeometrien das Verbundverhalten und die Verbundtragfähigkeit zu bestimmen, ohne für jede Konfiguration neue Versuche durchführen zu müssen.

5.4 Offene Fragestellungen/weitere Vorgehensweise

Die Untersuchungen, die in dieser Arbeit durchgeführt wurden, erfolgten auf Basis einer Textilkonfiguration, die eine hohe Feinheit aufweist und mit einem steifen Tränkungsmaterial imprägniert ist. Bei der Parametervariation wurden die physikalischen Eigenschaften des Textils konstant gehalten und eine ausschließlich geometrische Variation durchgeführt. In weiterführenden Untersuchungen sollte untersucht werden, inwieweit die Materialeigenschaften Einfluss auf die Spaltrissbildung haben (ein steifes Tränkungsmaterial wird vorausgesetzt). Dazu sollten Untersuchungen zur transversalen Steifigkeit der Textilien durchgeführt werden, da zu diesem Thema bisher sehr wenig Literatur vorhanden ist. Im Zuge der Parameterstudie wurde eine erste Sensitivitätsanalyse in Bezug auf die transversale Steifigkeit durchgeführt. Dabei konnte ein gewisser Einfluss festgestellt werden.

Die Kalibrierung der Modellparameter aus Kap. 4.5 erfolgte anhand der numerischen Parameterstudie. Zur Validierung der Modellparameter sind experimentelle Untersuchungen durchzuführen. Da an zahlreichen Universitäten regelmäßig Dehnkörperversuche an unterschiedlichsten Textilkonfigurationen durchgeführt werden, würde eine gemeinsame Datenbank hier sicher einen wertvollen Beitrag leisten, um bestehende Modelle an realen Versuchsergebnissen zu kalibrieren.

Literaturverzeichnis

- Abaqus/CAE (März 2019). *Manual*. Dassault Systems. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/abaquscae/>.
- Abrishami, H. H. und D. Mitchell (1996). „Analysis of bond stress distributions in pullout specimens“. In: *Journal of Structural Engineering* 122.3, S. 255–261.
- Banholzer, B. (2004). „Bond Behaviour of a multi-filament yarn embedded in a cementitious matrix“. Diss. RWTH Aachen.
- BASF Construction Polymers GmbH (2008). *Technisches Merkblatt - Wirkung von Fließmitteln in zementgebundenen Baustoffen*.
- Benedix, R. (2006). *Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure*. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag.
- 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. DOI: 10.1002/best.201800013.
- Böder, H., D. Gölden, P. Rose und H. Würmseher (1980). „Kohlenstoffasern – Herstellung, Eigenschaften, Verwendung“. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 11.8, S. 275–281. DOI: 10.1002/mawe.19800110805.
- Brameshuber, W., T. Brockmann, M. Curbach, C. Meyer, G. Vilkner, B. Mobasher, A. Peled, H. Reinhardt, M. Krüger und J. Wastiels (2006). *Textile Reinforced Concrete-State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC*. Techn. Ber. RILEM Publications SARL.
- Brameshuber, W., R. Mott, J. Hegger, S. Voss, T. Gries, M. Barlé, S. Böhm und I. Hartung (2008). „Serielle Stückfertigung von Bauteilen aus textilbewehrtem Beton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 103.2, S. 64–72. DOI: 10.1002/best.200700597.
- Butler, M. (2009). „Zur Dauerhaftigkeit von Verbundwerkstoffen aus zementgebundenen Matrices und alkaliresistenten Glasfaser-Multifilamentgarnen“. Diss. TU Dresden.
- Butler, M., S. Hempel und V. Mechterine (2009). „Zeitliche Entwicklung des Verbundes von AR-Glas- und Kohlenstofffaser-Multifilamentgarnen in zementgebundenen Matrices“. In: *Textilbeton - Theorie und Praxis: Tagungsband zum 4. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden*. Hrsg. von M. Curbach. Technische Universität Dresden, S. 213–226.
- Cherif, C. (2011). *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. DOI: 10.1007/978-3-642-17992-1.
- Curbach, M. und F. Jesse (2009). „Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 104.1, S. 9–16. DOI: 10.1002/best.200800653.
- Curbach, M. und R. Ortlepp (2011). *Sonderforschungsbereich 528 - Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung: Abschlussbericht*. Techn. Ber. TU Dresden.

- Diestel, O. und J. Hausding (2011). „Vorimprägnierte textile Halbzeuge (Prepregs)“. In: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Hrsg. von C. Cherif. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 381–401. DOI: 10.1007/978-3-642-17992-1.
- Domininghaus, H. (2012). *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Egger, M. und J. Feix (2017). „Textilbeton im Ingenieurbau“. In: *Innsbrucker Bautage*. Hrsg. von J. Feix und J. Berger, S. 88–108.
- Egger, M. und C. Walzl (Apr. 2019). *concreteX - Gestickte Textile Bewehrungen für Betonbauteile im Ingenieurwesen*. Universität Innsbruck. URL: https://www.ffg.at/sites/default/files/allgemeine_downloads/strukturprogramme/factsheet_concretex_fellowship_1dl_.pdf.
- Ehrenstein, G. W. (2006). *Faserverbundkunststoffe: Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften*. Carl Hanser Verlag.
- Eligehausen, R., E. P. Popov und V. V. Bertero (1983). *Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars under Generalized Excitations*. Techn. Ber. Report No. UCB/EERC-83/23. Earthquake Engineering Center, University of California, Berkeley.
- Erhard, E., S. Weiland, E. Lorenz, F. Schladitz, B. Beckmann und M. Curbach (2015). „Anwendungsbeispiele für Textilbetonverstärkung“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110.S1, S. 74–82. DOI: 10.1002/best.201400124.
- Faulstich, H. und A. Mally (1993). „Mechanische Eigenschaften“. In: *Textile Faserstoffe: Beschaffenheit und Eigenschaften*. Hrsg. von W. Bobeth. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 157–230.
- Fib - Fédération Internationale du Béton (Oktober 2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Ernst & Sohn.
- Flemming, M., G. Ziegmann und S. Roth (1995). *Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Franke, L. (1976). *Einfluss der Belastungsdauer auf das Verbundverhalten von Stahl in Beton (Verbundkriechen)*. DAfStb-Heft 268. Berlin: Ernst & Sohn.
- Freudenberg, C. (2011). „Textile Faserstoffe“. In: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Hrsg. von C. Cherif. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 39–109. DOI: 10.1007/978-3-642-17992-1.
- GOM GmbH (März 2019). *Auswertesoftware Gom Correlate*. URL: <https://www.gom.com/de/3d-software/gom-correlate.html>.
- Hahn, L. (2018). „Innovative Fertigungstechnologie zur Herstellung von vorgeformten textilen Bewehrungen“. In: *10. Carbon- und Textilbetontage*. Hrsg. von M. Curbach.
- Hahn, L., S. Rittner, D. Nuss, M. Ashir und C. Cherif (2019). „Development of Methods to Improve the Mechanical Performance of Coated Grid-Like Non-Crimp Fabrics for Construction Applications“. In: *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 27.1, S. 51–58.
- Hausding, J. und J. Martin (2011). „Gewirkte Halbzeuge und Wirktechniken“. In: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Hrsg. von C. Cherif. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 265–366. DOI: 10.1007/978-3-642-17992-1.

- Hausding, J. (2010). „Multiaxiale Gelege auf Basis der Kettenwirktechnik - Technologie für Mehrschichtverbunde mit variabler Lagenanordnung“. Diss. TU Dresden.
- Hegger, J. (2012). *Sonderforschungsbereich 532 - Textilbewehrter Beton - Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie: Abschlussbericht*. Techn. Ber. RWTH Aachen.
- Hegger, J., M. Curbach, A. Stark, S. Wilhelm und K. Farwig (2018). „Innovative design concepts: Application of textile reinforced concrete to shell structures“. In: *Structural Concrete* 19.3, S. 637–646. DOI: 10.1002/suco.201700157.
- 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. DOI: 10.1002/best.201000082.
- Hegger, J., N. Will, H. N. Schneider und P. Kölzer (2004). „Neue Bauteile aus textilbewehrtem Beton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 99.6, S. 482–487. DOI: 10.1002/best.200490121.
- Herbrand, M., D. Kueres, A. Stark und M. Claßen (2016). „Numerische Simulation von balken- und plattenförmigen Bauteilen aus Stahlbeton und UHPC mit einem plastischen Schädigungsmodell“. In: *Bauingenieur* 91. Februar, S. 45–56.
- Hillerborg, A., M. Modéer und P.-E. Petersson (1976). „Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements“. In: *Cement and Concrete Research* 6.6, S. 773–781. ISSN: 0008-8846. DOI: 10.1016/0008-8846(76)90007-7.
- Hinzen, M. (2017). „Prüfmethode zur Ermittlung des Zugtragverhaltens von textiler Bewehrung für Beton“. In: *Bauingenieur* 92. Juni, S. 289–291.
- Hund, H. und R. D. Hund (2011). „Textile Ausrüstung und Ausrüstungstechniken“. In: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Hrsg. von C. Cherif. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 453–507. DOI: 10.1007/978-3-642-17992-1.
- ISO 3341 (Mai 2000). *Textilglas - Garne - Bestimmung der Reißkraft und Bruchdehnung*. Standard. Geneva, CH: (ISO).
- Janetzko, S. (2013). „Methodik zur Gestaltung von Bewehrungssystemen für textilbewehrten Beton“. Diss. RWTH Aachen.
- Jesse, F. (2004). „Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix“. Diss. TU Dresden.
- Keuser, M. (1985). „Verbundmodelle für nichtlineare Finite-Element-Berechnungen von Stahlbetonkonstruktionen“. Diss. Technische Hochschule Darmstadt.
- Kromoser, B., P. Huber und P. Preinstorfer (2018). „Experimental Study of the shear behaviour of thin walled CFRP reinforced UHPC structures“. In: *fib congress 2018 - better, smarter, stronger*. Melbourne, S. 1744–1750.
- Kromoser, B. und M. Ritt (2016). „Optimierte Formen aus Textilbeton am Beispiel der Grillmöbel Donauwelle“. In: *Bauingenieur* 91. Oktober, S. 425–433.
- Kromoser, B., P. Preinstorfer und J. Kollegger (2019). „Building lightweight structures with carbon-fiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components“. In: *Structural Concrete* 20.2, S. 730–744. DOI: 10.1002/suco.201700225.

- Krüger, M. (2004). „Vorgespannter textilbewehrter Beton“. Diss. Universität Stuttgart.
- Kueres, D., A. Stark, M. Herbrand und M. Claßen (2015). „Numerische Abbildung von Beton mit einem plastischen Schädigungsmodell - Grundlegende Untersuchungen zu Normalbeton und UHPC“. In: *Bauingenieur* 90. Juni, S. 252–264.
- Kulas, C. (2013). „Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile“. Diss. RWTH Aachen.
- Larrard, F. de und T. Sedran (1994). „Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model“. In: *Cement and Concrete Research* 24.6, S. 997–1009.
- Lehmann, B. und C. Herzberg (2011). „Garnkonstruktionen und Garnbildungstechniken“. In: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Hrsg. von C. Cherif. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 111–169. DOI: 10.1007/978-3-642-17992-1.
- Lieboldt, M., M. Tietze und F. Schladitz (Juli 2018). „C³-Projekt - Erfolgreiche Partnerschaft für Innovation im Bauwesen“. In: *Bauingenieur* 93. Juli/August, S. 265–273.
- Lieboldt, M. (2015). „Feinbetonmatrix für Textilbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110.S1, S. 22–28. DOI: 10.1002/best.201400100.
- Lorenz, E. (2014). „Endverankerung und Übergreifung textiler Bewehrungen in Betonmatrices“. Diss. TU Dresden.
- Lorenz, E., R. Ortlepp, J. Hausding und C. Cherif (2011). „Effizienzsteigerung von Textilbeton durch Einsatz textiler Bewehrungen nach dem erweiterten Nähwerkverfahren“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106.1, S. 21–30.
- Lublinter, J., J. Oliver, S. Oller und E. Oñate (1989). „A plastic-damage model for concrete“. In: *International Journal of Solids and Structures* 25.3, S. 299–326. ISSN: 0020-7683. DOI: 10.1016/0020-7683(89)90050-4.
- Michaeli, W. und M. Wegener (1989). *Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe*. Carl Hanser Verlag.
- Misra, R., A. Dixit und H. S. Mali (2014). „Finite Element (FE) Shear Modeling of Woven Fabric Textile Composite“. In: *Procedia Materials Science* 6. 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC 2014), S. 1344–1350. ISSN: 2211-8128. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.113.
- Muttoni, A. und M. Fernández (2017). *Building in a lighter and more sustainable manner: textile reinforced concrete for thin structural elements*. Techn. Ber. EPFL Lausanne.
- Naaman, A. E., G. G. Namur, J. M. Alwan und H. S. Najm (1991). „Fiber pullout and bond slip I: Analytical study“. In: *Journal of Structural Engineering* 117.9, S. 2769–2790.
- Neitzel, M. und P. Mitschang (2004). *Handbuch der Verbundwerkstoffe*. Carl Hanser Verlag.
- Ng, S.-P., P.-C. Tse und K.-J. Lau (1998). „Numerical and experimental determination of in-plane elastic properties of 2/2 twill weave fabric composites“. In: *Composites Part B: Engineering* 29.6, S. 735–744. ISSN: 1359-8368. DOI: 10.1016/S1359-8368(98)00025-0.

- Niederwald, M. (2017). „Zum Einfluss der viskoelastischen Eigenschaften des beschichteten Bewehrungsmaterials auf das Zugtragverhalten von carbonbewehrtem Beton“. Diss. Universität der Bundeswehr München.
- Offermann, P., A. Abdkader, T. Engler und M. Schierz (2001). „Grundlagen textiler Bewehrungsstrukturen zur Verstärkung bestehender Bauwerke“. In: *Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung: Arbeits- und Ergebnisbericht für die Periode II/1999-I/2002*. Hrsg. von T. Dresden. Bd. Sonderforschungsbereich 528, S. 25–74.
- ÖNORM EN 196-1 (Okt. 2016). *Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM EN 1992-1-1 (Feb. 2015). *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (konsolidierte Fassung)*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- Ortlepp, R. (2007). „Untersuchungen zur Verbundverankerung textilbewehrter Feinbetonverstärkungsschichten für Betonbauteile“. Diss. TU Dresden.
- Portal, N. W., K. Lundgren, H. Wallbaum und K. Malaga (2015). „Sustainable Potential of Textile-Reinforced Concrete“. In: *Journal of Materials in Civil Engineering* 27.7, S. 04014207. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001160.
- Preinstorfer, P. und J. Kollegger (2017). „Doppelwand aus Ultrahochleistungsbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 112.6, S. 346–354. DOI: 10.1002/best.201700017.
- Preinstorfer, P., B. Kromoser und J. Kollegger (2018). „Einflussparameter auf die Spaltrissbildung in Textilbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 113.12, S. 877–885. DOI: 10.1002/best.201800071.
- Preinstorfer, P., B. Kromoser und J. Kollegger (2019). „Flexural behaviour of filigree slab elements made of carbon reinforced UHPC“. In: *Construction and Building Materials* 199, S. 416–423. ISSN: 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.027.
- Rehm, G. (1961). *Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton*. Hrsg. von Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. Bd. Heft 138. Wilhelm Ernst & Sohn.
- Rempel, S. (2018). „Zur Zuverlässigkeit der Bemessung von biegebeanspruchten Betonbauteilen mit textiler Bewehrung“. Diss. RWTH Aachen.
- Rempel, S. und M. Ricker (Juni 2017). „Ermittlung der Materialkennwerte der Bewehrung für die Bemessung von textilbewehrten Bauteilen“. In: *Bauingenieur* 92. Juni, S. 280–288.
- Rempel, S., N. Will, J. Hegger und P. Beul (2015). „Filigrane Bauwerke aus Textilbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110.S1, S. 83–93. DOI: 10.1002/best.201400111.
- Richard, P. und M. Cheyrezy (1995). „Composition of reactive powder concretes“. In: *Cement and Concrete Research* 25.11, S. 1501–1511.
- Richter, M. (2005). „Entwicklung mechanischer Modelle zur analytischen Beschreibung der Materialeigenschaften von textilbewehrtem Feinbeton“. Diss. TU Dresden.

- RILEM (1994). *Recommendations for the testing and use of constructions materials*. Techn. Ber. London: RILEM Technical Committee.
- Sargin, M. (1971). „Stress-strain relationships for concrete and the analysis of structural concrete sections“. Diss. University of Waterloo.
- Schade, M. (2011). „Gestickte Halbzeuge und Sticketechniken“. In: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Hrsg. von C. Cherif. Springer Verlag, S. 367–379.
- Schleser, M. (2008). „Einsatz polymerimprägnierter, alkaliresistenter Glastextilien zur Bewehrung zementgebundener Matrices“. Diss. RWTH Aachen.
- Schneider, K., M. Butler und V. Mechtcherine (2017). „Carbon Concrete Composites C3 – Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 112.12, S. 784–794. DOI: 10.1002/best.201700058.
- Schoene, J., U. Reisingen, M. Schleser und J. Jeřábek (2011). „Theoretische und experimentelle Untersuchung des spaltungsinduzierten Versagens von TRC Prüfkörpern“. In: *6th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS6)*. Hrsg. von M. Curbach, S. 73–84.
- Scholzen, A., R. Chudoba und J. Hegger (2015). „Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete“. In: *Structural Concrete* 16.1, S. 115–124. DOI: 10.1002/suco.201400046.
- Schütze, E. und M. Curbach (2019). „Zur experimentellen Charakterisierung des Verbundverhaltens von Carbonbeton mit Spalten als maßgeblichen Versagensmechanismus“. In: *Bauingenieur* 94. April, S. 133–141.
- Schütze, E., J. Bielak, S. Scheerer, J. Hegger und M. Curbach (2018). „Einaxialer Zugversuch für Carbonbeton mit textiler Bewehrung“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 113.1, S. 33–47.
- Sigrist, V. (1995). *Zum Verformungsvermögen von Stahlbetonträgern*. Techn. Ber. ETH Zürich.
- Smith, S. S., K. J. Willam, K. H. Gerstle und S. Sture (1989). „Concrete Over the Top–Or, is there Life After Peak?“. In: *Materials Journal* 86.5, S. 491–497.
- solidian GmbH (März 2019). *solidian GRID Q95/95-CCE-38*. URL: <https://www.solidian.com/produkte/ebene-bewehrung/>.
- Tepfers, R. (1979). „Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars“. In: *Magazine of Concrete Research* 31.106, S. 3–12.
- Wulfhorst, B. und G. Becker (1989). „Faserstofftabelle nach P.-A. Koch: Carbonfasern“. In: *Chemiefasern/Textilindustrie* 39.91, S. 1277–1284.
- Wulfhorst, B., R. Kaldenhof und K. Hörsting (1993). „Faserstofftabelle nach P.-A. Koch: Glasfasern“. In: *Technische Textilien* 36, T68–T86.
- Younes, A., A. Seidel, S. Rittner, C. Cherif und R. Thyroff (2015). „Innovative textile Bewehrungen für hochbelastbare Betonbauteile“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110.S1, S. 16–21. DOI: 10.1002/best.201400101.
- Zilch, K. und G. Zehetmaier (2010). *Bemessung im konstruktiven Betonbau*. Springer Verlag.

A Experimentelle Untersuchungen

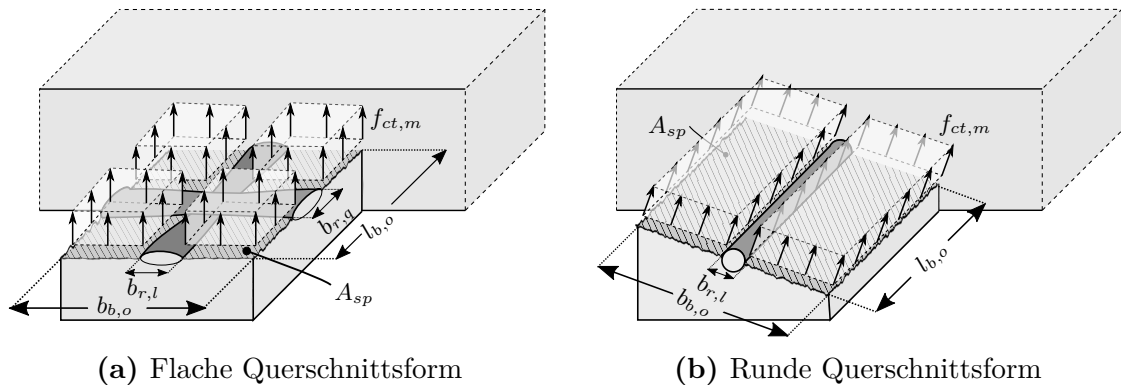


Abb. A.1: Bestimmung des resultierenden Spaltwiderstandes

Tab. A.1: Größe des Untersuchungsbereiches und des Spaltwiderstandes

	Untersuchungsbereich			Abgedeckte Fläche			Spaltwiderstand			
	$l_{b,o}$ [mm]	$b_{b,o}$ [mm]	$A_{b,o}$ mm ²	$b_{r,l}$ [mm]	$b_{r,q}$ [mm]	$\Delta_{A,r}$ [mm ²]	A_{sp} [mm ²]	$f_{ct,m}$ [MPa]	$F_{sp,R}$ [N]	
Typ S	1	42,3	40,7	1721,6	6,2	6,4	483,3	1238,3	4,59	5688,1
	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	3	39,0	36,9	1439,1	6,2	6,4	438,5	1000,6	4,59	4596,1
	4	38,8	34,0	1319,2	6,2	6,4	418,8	900,4	4,59	4136,0
	5	36,0	34,4	1238,4	6,2	6,4	403,9	834,5	4,59	3833,3
Typ O	1	38,3	37,7	1443,9	6,2	0,0	238,6	1205,3	4,02	4845,3
	2	36,6	34,4	1259,0	6,2	0,0	228,0	1031,0	4,02	4144,7
	3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	4	39,3	36,6	1438,4	6,2	0,0	244,8	1193,5	4,02	4798,0
	5	40,5	39,4	1595,7	6,2	0,0	252,3	1343,4	4,02	5400,4
Typ F	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	2	37,8	34,4	1300,3	6,0	0,0	226,8	1073,5	4,02	4315,6
	3	37,8	37,6	1421,3	6,0	0,0	226,8	1194,5	4,02	4801,8
	4	37,8	35,4	1338,1	6,0	0,0	226,8	1111,3	4,02	4467,5
	5	39,5	38,3	1512,9	6,0	0,0	237,0	1275,9	4,02	5128,9

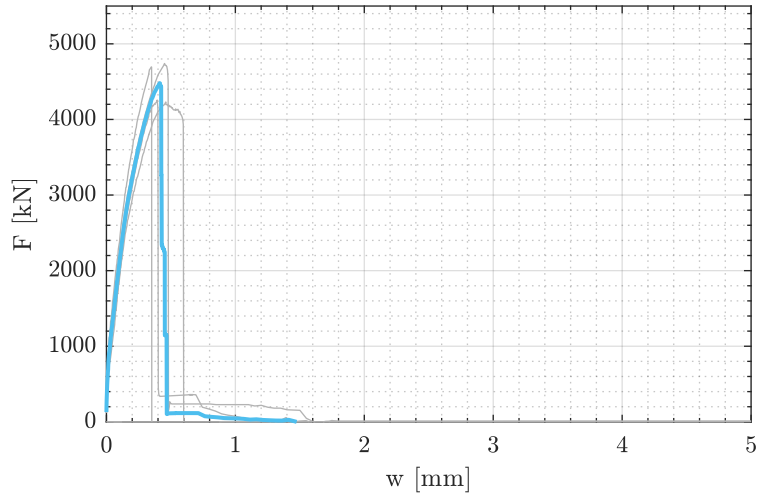
Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. A.1: Größe des Untersuchungsbereiches und des Spaltwiderstandes (Fortsetzung)

	Untersuchungsbereich			Abgedeckte Fläche			Spaltwiderstand			
	$l_{b,o}$ [mm]	$b_{b,o}$ [mm]	$A_{b,o}$ mm ²	$b_{r,l}$ [mm]	$b_{r,q}$ [mm]	$\Delta_{A,r}$ [mm ²]	A_{sp} [mm ²]	$f_{sp,m}$ [MPa]	$F_{sp,R}$ [N]	
Typ R	1	–	–	–	–	–	–	–	–	
	2	38,3	36,6	1401,8	3,8	0,0	145,5	1301,2	4,02	5230,9
	3	40,0	36,1	1444,0	3,8	0,0	152,0	1374,5	4,02	5525,5
	4	44,9	34,4	1544,6	3,8	0,0	170,6	1423,5	4,02	5722,5
	5	40,0	32,7	1308,0	3,8	0,0	152,0	1156,0	4,02	4647,1
Typ K	1	38,8	35,9	1392,9	6,4	6,2	431,3	961,6	4,02	3865,7
	2	35,9	36,1	1296,0	6,4	6,2	414,0	881,9	4,02	3545,4
	3	37,2	36,6	1361,5	6,4	6,2	425,5	936,1	4,02	3763,0
	4	37,7	36,1	1361,0	6,4	6,2	425,5	935,4	4,02	3760,5
	5	36,6	34,9	1277,3	6,4	6,2	411,0	866,3	4,02	3482,5
Typ U	1	39,6	36,6	1449,4	6,2	6,4	440,3	1009,0	6,47	6531,9
	2	40,2	38,1	1531,6	6,2	6,4	453,6	1078,0	6,47	6978,3
	3	43,2	39,5	1706,4	6,2	6,4	481,2	1225,2	6,47	7930,9
	4	39,3	37,9	1489,5	6,2	6,4	446,7	1042,7	6,47	6750,0
	5	41,3	38,0	1569,4	6,2	6,4	459,8	1109,6	6,47	7182,6

A.1 Versuchsserie Typ S

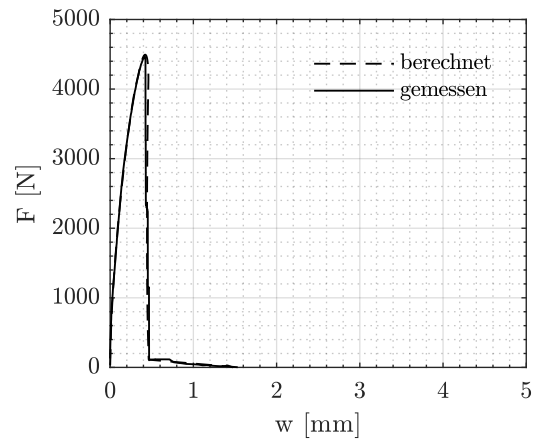
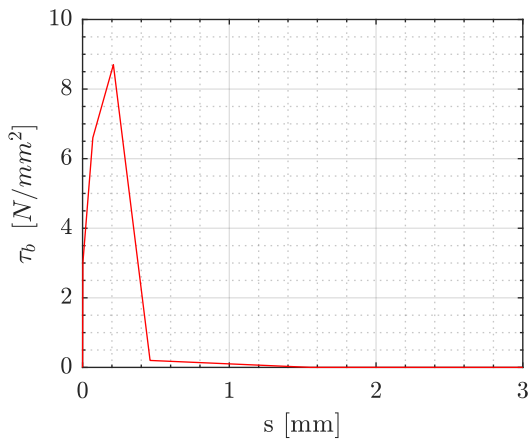
Kraft-Rissöffnungsbeziehung



	F_{max} [MPa]	w [mm]
01	4740,3	0,451
02	–	–
03	4231,1	0,461
04	4695,5	0,348
05	4256,2	0,394
m	4480,7	0,331
s	274,6	0,190

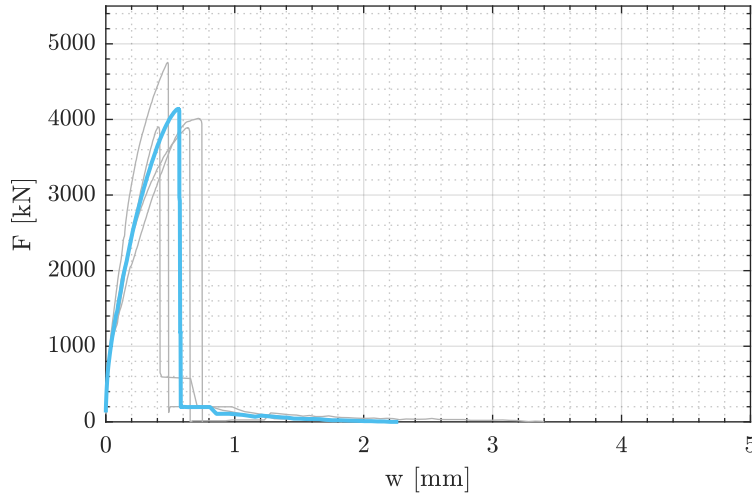
Verbundspannungs-Schlupf Beziehung

	1	2	3	4	5	6
τ_b [MPa]	0.001	3.0	6.6	8.7	0.20	0.001
s [mm]	0	0.002	0.07	0.21	0.46	1.55



A.2 Versuchsserie Typ O

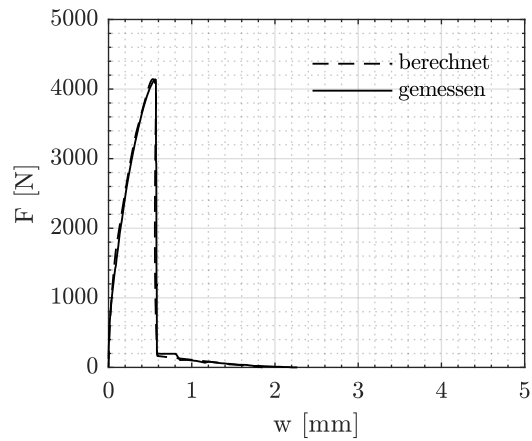
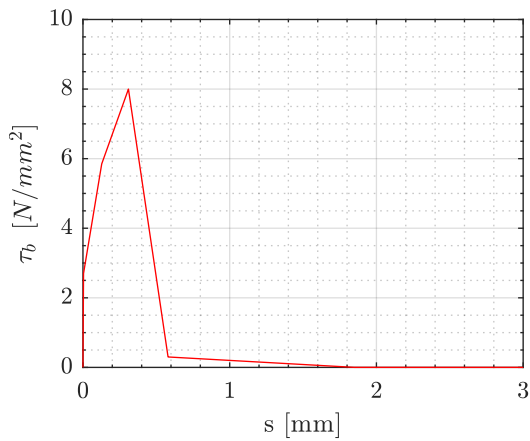
Kraft-Rissöffnungsbeziehung



	F_{max} [MPa]	w [mm]
01	3899,6	0,407
02	3889,0	0,629
03	–	–
04	4014,5	0,718
05	4753,3	0,479
m	4139,1	0,447
s	413,4	0,278

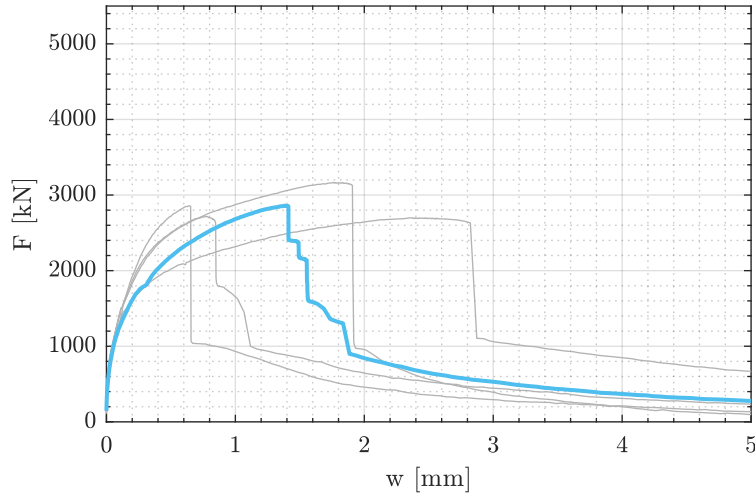
Verbundspannungs-Schlupf Beziehung

	1	2	3	4	5	6
τ_b [MPa]	0.001	2.7	5.85	8.0	0.30	0.001
s [mm]	0	0.004	0.128	0.31	0.58	1.85



A.3 Versuchsserie Typ F

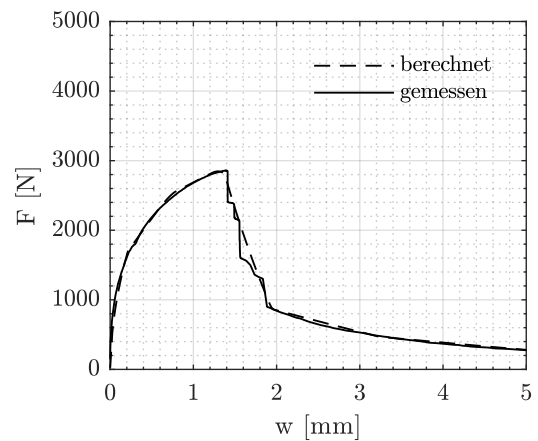
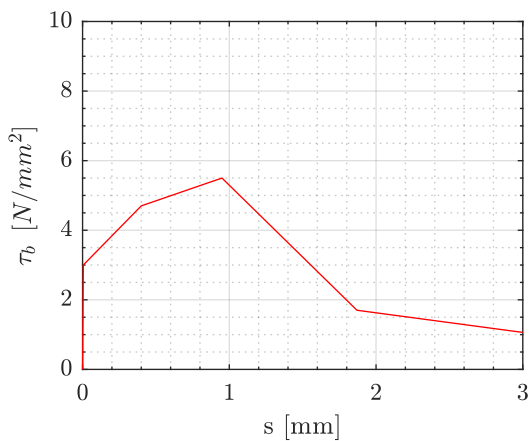
Kraft-Rissöffnungsbeziehung



	F_{max} [MPa]	w [mm]
01	–	–
02	3166,4	1,762
03	2718,1	0,767
04	2858,0	0,639
05	2698,5	2,373
m	2860,2	1,108
s	216,1	0,948

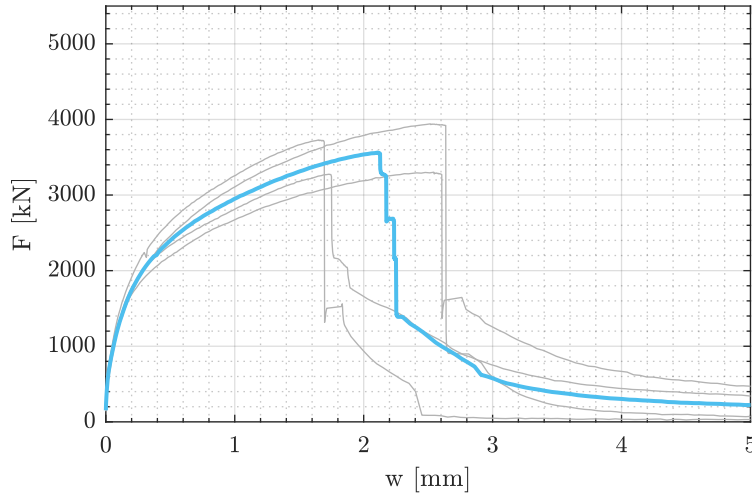
Verbundspannungs-Schlupf Beziehung

	1	2	3	4	5	6	7
τ_b [MPa]	0.001	3.0	4.70	5.5	1.7	0.95	0.2
s [mm]	0	0.005	0.4	0.95	1.87	3.20	7.00001



A.4 Versuchsserie Typ R

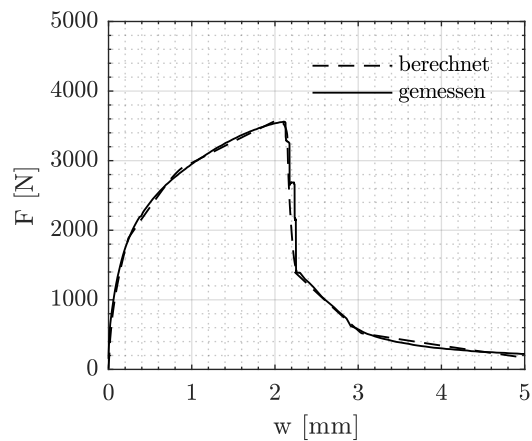
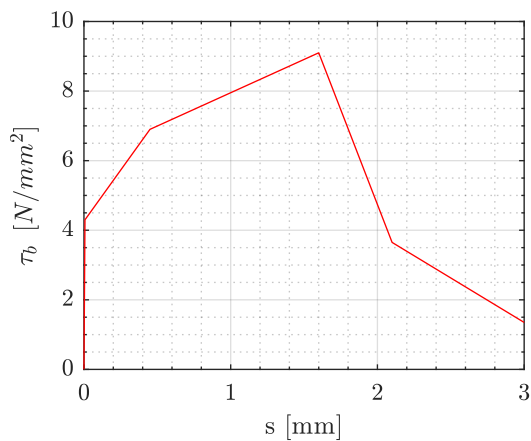
Kraft-Rissöffnungsbeziehung



	F_{max} [MPa]	w [mm]
01	–	–
02	3302,2	2,544
03	3940,5	2,513
04	3275,4	1,732
05	3729,1	1,652
m	3561,8	1,688
s	327,0	1,033

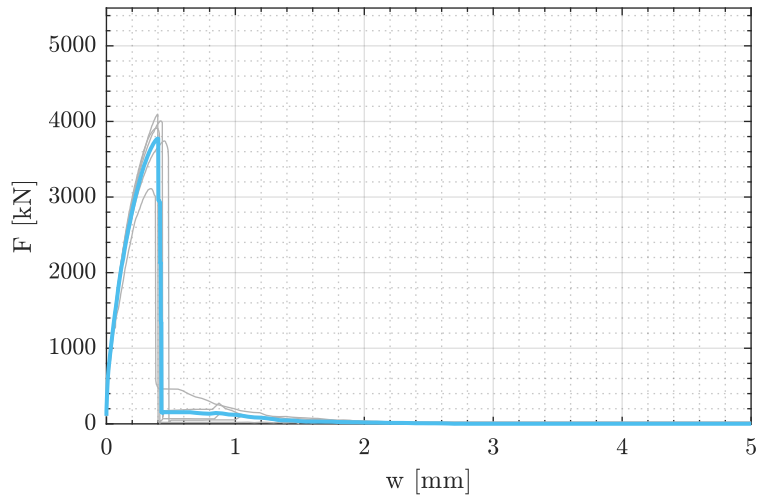
Verbundspannungs-Schlupf Beziehung

	1	2	3	4	5	6	7
τ_b [MPa]	0.001	4.3	6.9	9.1	3.65	1.35	0.01
s [mm]	0	0.007	0.45	1.60	2.10	3.00	6.00001



A.5 Versuchsserie Typ K

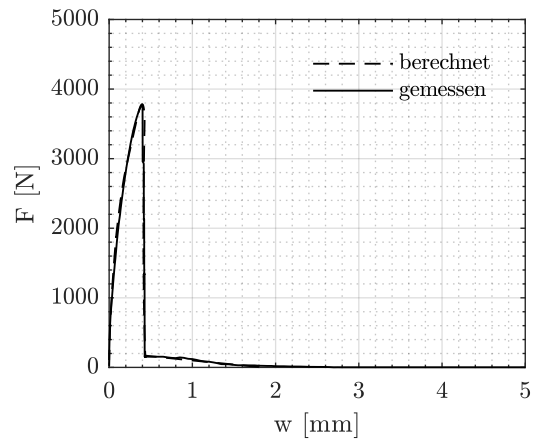
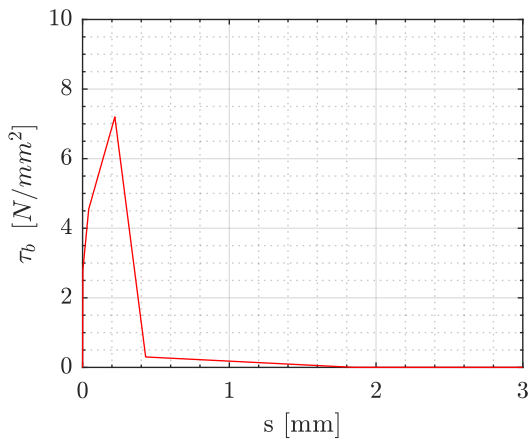
Kraft-Rissöffnungsbeziehung



	F_{max} [MPa]	w [mm]
01	3915,4	0,387
02	3110,5	0,340
03	4096,6	0,398
04	4007,1	0,422
05	3741,8	0,447
m	3774,3	0,399
s	393,588	0,040

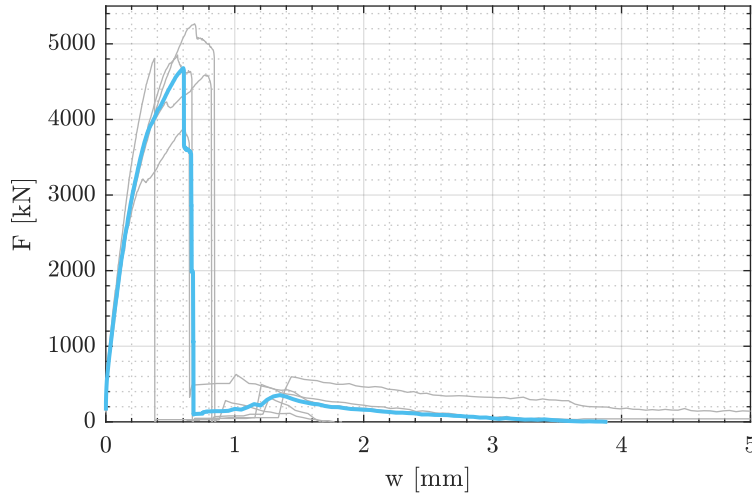
Verbundspannungs-Schlupf Beziehung

	1	2	3	4	5	6
τ_b [MPa]	0.001	2.8	4.55	7.20	0.30	0.001
s [mm]	0	0.002	0.042	0.22	0.43	1.85



A.6 Versuchsserie Typ U

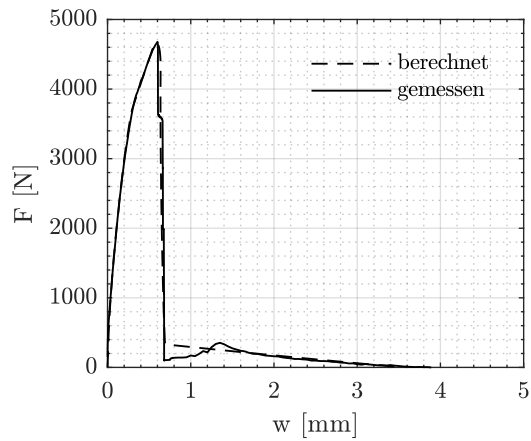
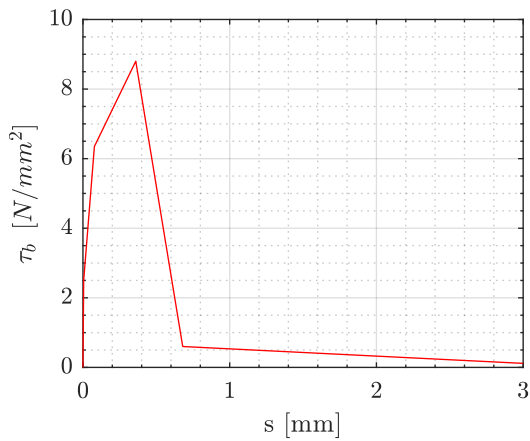
Kraft-Rissöffnungsbeziehung



	F_{max} [MPa]	w [mm]
01	3883,1	0,610
02	4808,0	0,378
03	4587,5	0,768
04	5265,1	0,689
05	4853,0	0,556
m	4679,3	0,600
s	508,0	0,148

Verbundspannungs-Schlupf Beziehung

	1	2	3	4	5	6
τ_b [MPa]	0.001	2.5	6.35	8.80	0.60	0.001
s [mm]	0	0.005	0.078	0.36	0.68	3.55



B Python-Code

```
1
2 # -*- coding: mbc3 -*-
3 # Do not delete the following import lines
4 from abaqus import *
5 from abaqusConstants import *
6 import __main__
7
8 par = 'kc'
9 numpar = 12
10 cc = 10
11
12 import section
13 import regionToolset
14 import displayGroupMdbToolset as dgm
15 import part
16 import material
17 import assembly
18 import step
19 import interaction
20 import load
21 import mesh
22 import optimization
23 import job
24 import sketch
25 import visualization
26 import xyPlot
27 import displayGroupOdbToolset as dgo
28 import connectorBehavior
29
30 #Modellierung des Betonkoerpers
31
32 s1 = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__
33     ',
34     sheetSize=200.0)
35 g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.
36     constraints
37 s1.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
38 s1.rectangle(point1=(-19.0, -cc), point2=(19.0, cc))
39 p = mdb.models['Model-1'].Part(name='Untersuchungsbereich',
40     dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
41 p = mdb.models['Model-1'].parts['Untersuchungsbereich']
42 p.BaseSolidExtrude(sketch=s1, depth=38.0)
43 s1.unsetPrimaryObject()
44 p = mdb.models['Model-1'].parts['Untersuchungsbereich']
```

```

43 session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
44 del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']
45 s = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__',
46 sheetSize=200.0)
47 g, v, d, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.
    constraints
48 s.setPrimaryObject(option=STANDALONE)
49 s.rectangle(point1=(-50.0, -cc), point2=(50.0, cc))
50 p = mdb.models['Model-1'].Part(name='Verankerungsbereich',
51 dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
52 p = mdb.models['Model-1'].parts['Verankerungsbereich']
53 p.BaseSolidExtrude(sketch=s, depth=50.0)
54 s.unsetPrimaryObject()
55 p = mdb.models['Model-1'].parts['Verankerungsbereich']
56 session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
57 del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']
58
59 #Materialmodelle
60
61 mdb.models['Model-1'].Material(name='HPC')
62 mdb.models['Model-1'].materials['HPC'].Density(table=((2.4e-06,
    ), ))
63 mdb.models['Model-1'].materials['HPC'].Elastic(table=((41000.0,
    0.2), ))
64 mdb.models['Model-1'].materials['HPC'].
    ConcreteDamagedPlasticity(table=((35.0,
65 0.1, 1.16, 0.67, 0.0), ))
66 mdb.models['Model-1'].materials['HPC'].
    concreteDamagedPlasticity.ConcreteCompressionHardening(
67 table=((30.98419362, 0.0), (39.88056702, 0.00024),
    (56.50449645,
68 0.00074), (69.57600264, 0.00124), (77.18935732, 0.00174),
    (78.0,
69 0.00194), (77.77298219, 0.00204)))
70 mdb.models['Model-1'].materials['HPC'].
    concreteDamagedPlasticity.ConcreteTensionStiffening(
71 table=((4.824, 0.0), (3.227163117, 0.005), (2.158909989, 0.01),
    (
72 1.444269214, 0.015), (0.966188296, 0.02), (0.646361367, 0.025),
    (
73 0.43240331, 0.03), (0.28926949, 0.035), (0.0, 0.04)),
74 type=DISPLACEMENT)
75 mdb.models['Model-1'].materials['HPC'].
    concreteDamagedPlasticity.ConcreteCompressionDamage(
76 table=((0.0, 0.0), ))
77 mdb.models['Model-1'].materials['HPC'].
    concreteDamagedPlasticity.ConcreteTensionDamage(
78 table=((0.0, 0.0), ), type=DISPLACEMENT)
79 mdb.models['Model-1'].Material(name='CFRP')
80 mdb.models['Model-1'].materials['CFRP'].Density(table=((1.7e
    -06, ), ))
81 mdb.models['Model-1'].materials['CFRP'].Elastic(type=
    ENGINEERING_CONSTANTS,

```

```

82 table=((205000.0, 13790.0, 13790.0, 0.2, 0.2, 0.2, 9860.0,
83         9860.0,
84         17580.0), ))
85 #Zuweisung Material
86
87 mdb.models['Model-1'].HomogeneousSolidSection(name='concrete',
88         material='HPC',
89         thickness=None)
90 mdb.models['Model-1'].HomogeneousSolidSection(name='roving',
91         material='CFRP',
92         thickness=None)
93 p = mdb.models['Model-1'].parts['Verankerungsbereich']
94 c = p.cells
95 cells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
96 region = p.Set(cells=cells, name='Set-1')
97 p = mdb.models['Model-1'].parts['Verankerungsbereich']
98 p.SectionAssignment(region=region, sectionName='concrete',
99         offset=0.0,
100        offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField='',
101        thicknessAssignment=FROM_SECTION)
102 p = mdb.models['Model-1'].parts['Untersuchungsbereich']
103 session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
104 p = mdb.models['Model-1'].parts['Untersuchungsbereich']
105 c = p.cells
106 cells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
107 region = p.Set(cells=cells, name='Set-1')
108 p = mdb.models['Model-1'].parts['Untersuchungsbereich']
109 p.SectionAssignment(region=region, sectionName='concrete',
110        offset=0.0,
111        offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField='',
112        thicknessAssignment=FROM_SECTION)
113 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
114 session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)
115
116 #Koordinatensystem festlegen
117
118 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(
119 optimizationTasks=OFF, geometricRestrictions=OFF,
120 stopConditions=OFF)
121 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
122 a.DatumCsysByDefault(CARTESIAN)
123
124 # Bereiche zusammenfuegen
125
126 p = mdb.models['Model-1'].parts['Untersuchungsbereich']
127 a.Instance(name='Untersuchungsbereich-1', part=p, dependent=OFF
128 )
129 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
130 p = mdb.models['Model-1'].parts['Verankerungsbereich']
131 a.Instance(name='Verankerungsbereich-1', part=p, dependent=OFF)
132 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
133 a.translate(instanceList=('Verankerungsbereich-1', ), vector
134         =(0.0, 0.0, -50.0))

```

```

128 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
129 a.InstanceFromBooleanMerge(name='Part-1', instances=(
130 a.instances['Untersuchungsbereich-1'],
131 a.instances['Verankerungsbereich-1']), keepIntersections=ON,
132 originalInstances=SUPPRESS, domain=GEOMETRY)
133
134 # Belastungsschritte
135
136 mdb.models['Model-1'].StaticStep(name='Load', previous='Initial
137 ',
138 timePeriod=1000.0, maxNumInc=35, initialInc=0.05, minInc=1e-06,
139 maxInc=10.0)
140 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step
141 = 'Load')
142
143 #Kontakteigenschaften
144
145 mdb.models['Model-1'].ContactProperty('contact')
146 mdb.models['Model-1'].interactionProperties['contact'].
147     NormalBehavior(
148     pressureOverclosure=HARD, allowSeparation=ON,
149     constraintEnforcementMethod=DEFAULT)
150 mdb.models['Model-1'].interactionProperties['contact'].
151     TangentialBehavior(
152     formulation=PENALTY, directionality=ISOTROPIC,
153     slipRateDependency=OFF,
154     pressureDependency=OFF, temperatureDependency=OFF, dependencies
155     =0,
156     table=((0.5, ), ), shearStressLimit=None, maximumElasticSlip=
157     FRACTION,
158     fraction=0.005, elasticSlipStiffness=None)
159 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step
160 = 'Initial')
161
162 #Import Roving
163
164 acis = mdb.openAcis(
165 'filedirectory/file'.sat',
166 scaleFromFile=OFF)
167 mdb.models['Model-1'].PartFromGeometryFile(name='sketch_Schuss
168 ',
169 geometryFile=acis, combine=False, dimensionality=THREE_D,
170 type=DEFORMABLE_BODY)
171 p = mdb.models['Model-1'].parts['sketch_Schuss']
172 session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
173 p = mdb.models['Model-1'].parts['sketch_Schuss']
174 c = p.cells
175 cells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
176 region = regionToolset.Region(cells=cells)
177 orientation=None
178 mdb.models['Model-1'].parts['sketch_Schuss'].
179     MaterialOrientation(region=region,
180 orientationType=SYSTEM, axis=AXIS_2, localCsys=orientation,
181 fieldName='', additionalRotationType=ROTATION_ANGLE,

```

```

172 additionalRotationField='', angle=-90.0, stackDirection=STACK_3
    )
173 p = mdb.models['Model-1'].parts['sketch_Schuss']
174 c = p.cells
175 cells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
176 region = p.Set(cells=cells, name='Roving')
177 p = mdb.models['Model-1'].parts['sketch_Schuss']
178 p.SectionAssignment(region=region, sectionName='roving', offset
    =0.0,
179 offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField='',
180 thicknessAssignment=FROM_SECTION)
181 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
182 session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=a)
183 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
184 p = mdb.models['Model-1'].parts['sketch_Schuss']
185 a.Instance(name='sketch_Schuss-1', part=p, dependent=OFF)
186 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
187 a.InstanceFromBooleanCut(name='Part-2',
188 instanceToBeCut=mdb.models['Model-1'].rootAssembly.instances['
    Part-1-1'],
189 cuttingInstances=(a.instances['sketch_Schuss-1'], ),
190 originalInstances=SUPPRESS)
191 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
192 a.features['sketch_Schuss-1'].resume()
193 a1 = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
194 a1.makeIndependent(instances=(a1.instances['Part-2-1'], ))
195 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
196 c1 = a.instances['sketch_Schuss-1'].cells
197 pickedCells = c1.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
198 v1 = a.instances['Part-2-1'].vertices
199 e1 = a.instances['Part-2-1'].edges
200 a.PartitionCellByPlanePointNormal(point=v1[0], normal=e1[25],
201 cells=pickedCells)
202 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
203 s1 = a.instances['Part-2-1'].faces
204 side1Faces1 = s1.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
205 region1=a.Surface(side1Faces=side1Faces1, name='m_Surf-1')
206 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
207 s1 = a.instances['sketch_Schuss-1'].faces
208 side1Faces1 = s1.getSequenceFromMask(mask=('[#10 ]', ), )
209 region2=a.Surface(side1Faces=side1Faces1, name='s_Surf-1')
210
211 # Kontaktflächen definieren
212
213 mdb.models['Model-1'].SurfaceToSurfaceContactStd(name='Int-1',
214 createStepName='Initial', master=region1, slave=region2,
    sliding=SMALL,
215 thickness=ON, interactionProperty='contact',
216 surfaceSmoothing=AUTOMATIC, adjustMethod=OVERCLOSED,
217 initialClearance=OMIT, datumAxis=None, clearanceRegion=None,
    tied=OFF)
218 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
219 e11 = a.instances['sketch_Schuss-1'].edges
220

```

```

221 # Referenzpunkt festlegen
222
223 a.ReferencePoint(point=a.instances['sketch_Schuss-1'].
    InterestingPoint(
224 edge=e11[2], rule=CENTER))
225 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
226 r1 = a.referencePoints
227 refPoints1=(r1[15], )
228 region1=a.Set(referencePoints=refPoints1, name='m_Set-1')
229 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
230 s1 = a.instances['sketch_Schuss-1'].faces
231 side1Faces1 = s1.getSequenceFromMask(mask=('[#4 ]', ), )
232 region2=a.Surface(side1Faces=side1Faces1, name='s_Surf-3')
233 mdb.models['Model-1'].Coupling(name='Constraint-1',
    controlPoint=region1,
234 surface=region2, influenceRadius=WHOLE_SURFACE, couplingType=
    KINEMATIC,
235 localCsys=None, u1=ON, u2=ON, u3=ON, ur1=ON, ur2=ON, ur3=ON)
236 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
237 r1 = a.referencePoints
238 refPoints1=(r1[15], )
239 region = a.Set(referencePoints=refPoints1, name='Set-2')
240
241 # Randbedingungen
242
243 mdb.models['Model-1'].DisplacementBC(name='BC-1',
    createStepName='Initial',
244 region=region, u1=SET, u2=SET, u3=UNSET, ur1=UNSET, ur2=UNSET,
245 ur3=UNSET, amplitude=UNSET, distributionType=UNIFORM, fieldName
   ='',
246 localCsys=None)
247 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step
    ='Load')
248 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
249 r1 = a.referencePoints
250 refPoints1=(r1[15], )
251 region = a.Set(referencePoints=refPoints1, name='Set-3')
252 mdb.models['Model-1'].DisplacementBC(name='BC-2',
    createStepName='Load',
253 region=region, u1=UNSET, u2=UNSET, u3=5.0, ur1=UNSET, ur2=UNSET
    ,
254 ur3=UNSET, amplitude=UNSET, fixed=OFF, distributionType=UNIFORM
    ,
255 fieldName='', localCsys=None)
256 session.viewports['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(step
    ='Initial')
257 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
258 f1 = a.instances['Part-2-1'].faces
259 faces1 = f1.getSequenceFromMask(mask=('[#100 ]', ), )
260 region = a.Set(faces=faces1, name='Set-4')
261 mdb.models['Model-1'].DisplacementBC(name='BC-3',
    createStepName='Initial',
262 region=region, u1=SET, u2=SET, u3=SET, ur1=UNSET, ur2=UNSET,
    ur3=UNSET,

```

```

263 amplitude=UNSET, distributionType=UNIFORM, fieldName='',
264 localCsys=None)
265
266 # FE-Netz festlegen
267
268 elemType1 = mesh.ElemType(elemCode=C3D8R, elemLibrary=STANDARD,
269 kinematicSplit=AVERAGE_STRAIN, secondOrderAccuracy=OFF,
270 hourglassControl=DEFAULT, distortionControl=DEFAULT)
271 elemType2 = mesh.ElemType(elemCode=C3D6, elemLibrary=STANDARD)
272 elemType3 = mesh.ElemType(elemCode=C3D4, elemLibrary=STANDARD)
273 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
274 c1 = a.instances['sketch_Schuss-1'].cells
275 cells1 = c1.getSequenceFromMask(mask=('[#3 ]', ), )
276 c2 = a.instances['Part-2-1'].cells
277 cells2 = c2.getSequenceFromMask(mask=('[#3 ]', ), )
278 pickedRegions =((cells1+cells2), )
279 a.setElementType(regions=pickedRegions, elemTypes=(elemType1,
280 elemType2,
281 elemType3))
282 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
283 partInstances =(a.instances['Part-2-1'], )
284 a.seedPartInstance(regions=partInstances, size=5.5,
285 deviationFactor=0.1,
286 minSizeFactor=0.1)
287 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
288 partInstances =(a.instances['sketch_Schuss-1'], )
289 a.seedPartInstance(regions=partInstances, size=1.0,
290 deviationFactor=0.1,
291 minSizeFactor=0.1)
292 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
293 e1 = a.instances['sketch_Schuss-1'].edges
294 pickedEdges = e1.getSequenceFromMask(mask=('[#d ]', ), )
295 a.seedEdgeBySize(edges=pickedEdges, size=0.6, deviationFactor
296 =0.1,
297 minSizeFactor=0.1, constraint=FINER)
298 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
299 e1 = a.instances['Part-2-1'].edges
300 pickedEdges = e1.getSequenceFromMask(mask=('[#5 ]', ), )
301 a.seedEdgeBySize(edges=pickedEdges, size=0.6, deviationFactor
302 =0.1,
303 minSizeFactor=0.1, constraint=FINER)
304 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
305 e1 = a.instances['Part-2-1'].edges
306 pickedEdges = e1.getSequenceFromMask(mask=('[#ac00000 ]', ), )
307 a.seedEdgeBySize(edges=pickedEdges, size=1.0, deviationFactor
308 =0.1,
309 minSizeFactor=0.1, constraint=FINER)
310 a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly

```



```
310 partInstances =(a.instances ['sketch_Schuss-1'], a.instances ['  
    Part-2-1'], )  
311 a.generateMesh(regions=partInstances)  
312 session.viewports ['Viewport: 1'].assemblyDisplay.setValues(mesh  
    =OFF)  
313  
314 # Berechnungsauftrag  
315  
316 mdb.Job(name= par + '_Job-' + str(numpar), model='Model-1',  
    description='', type=ANALYSIS,  
317 atTime=None, waitMinutes=0, waitHours=0, queue=None, memory=90,  
318 memoryUnits=PERCENTAGE, getMemoryFromAnalysis=True,  
319 explicitPrecision=SINGLE, nodalOutputPrecision=SINGLE,  
    echoPrint=OFF,  
320 modelPrint=OFF, contactPrint=OFF, historyPrint=OFF,  
    userSubroutine='',  
321 scratch='', resultsFormat=ODB, multiprocessingMode=DEFAULT,  
    numCpus=1,  
322 numGPUs=0)
```

C Rovingparameter

Tab. C.1: Rovingparameter und geometrische Kennwerte

a_1 [mm]	b_1 [mm]	a_2 [mm]	b_2 [mm]	A_1 [mm ²]	A_2 [mm ²]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	u_m [mm]	k_F [-]	k_A [-]	k_P [-]
2,02	2,22	2,43	2,22	14,10	16,92	13,33	14,61	13,97	1,00	1,20	-1,00
2,08	2,17	2,38	2,27	14,14	16,96	13,33	14,61	13,97	1,00	1,20	-0,50
2,12	2,12	2,32	2,32	14,15	16,98	13,33	14,61	13,97	1,00	1,20	0,00
2,17	2,08	2,27	2,38	14,14	16,96	13,33	14,61	13,97	1,00	1,20	0,50
2,22	2,02	2,22	2,43	14,10	16,92	13,33	14,61	13,97	1,00	1,20	1,00
2,64	1,40	3,17	1,40	11,67	14,00	13,02	14,92	13,97	1,10	1,20	-1,00
2,75	1,35	3,07	1,46	11,69	14,03	13,28	14,66	13,97	1,10	1,20	-0,50
2,82	1,32	3,00	1,49	11,70	14,04	13,44	14,50	13,97	1,10	1,20	0,00
2,87	1,30	2,94	1,52	11,71	14,05	13,56	14,38	13,97	1,10	1,20	0,50
2,90	1,29	2,90	1,54	11,72	14,06	13,65	14,29	13,97	1,10	1,20	1,00
2,82	1,11	3,38	1,11	9,80	11,76	12,92	15,02	13,97	1,20	1,20	-1,00
2,95	1,06	3,25	1,16	9,82	11,79	13,32	14,62	13,97	1,20	1,20	-0,50
3,02	1,04	3,17	1,18	9,84	11,80	13,53	14,41	13,97	1,20	1,20	0,00
3,07	1,02	3,13	1,20	9,85	11,81	13,66	14,28	13,97	1,20	1,20	0,50
3,09	1,01	3,09	1,22	9,85	11,82	13,75	14,19	13,97	1,20	1,20	1,00
2,92	0,91	3,50	0,91	8,35	10,01	12,86	15,08	13,97	1,30	1,20	-1,00
3,07	0,87	3,34	0,96	8,37	10,05	13,37	14,57	13,97	1,30	1,20	-0,50
3,14	0,85	3,27	0,98	8,39	10,06	13,60	14,34	13,97	1,30	1,20	0,00
3,18	0,84	3,23	0,99	8,39	10,07	13,72	14,22	13,97	1,30	1,20	0,50
3,20	0,83	3,20	1,00	8,40	10,08	13,81	14,13	13,97	1,30	1,20	1,00
2,98	0,77	3,58	0,77	7,19	8,63	12,83	15,11	13,97	1,40	1,20	-1,00
3,15	0,73	3,40	0,81	7,22	8,67	13,42	14,52	13,97	1,40	1,20	-0,50
3,22	0,72	3,33	0,83	7,23	8,68	13,65	14,29	13,97	1,40	1,20	0,00
3,25	0,71	3,30	0,84	7,24	8,69	13,77	14,17	13,97	1,40	1,20	0,50
3,28	0,70	3,28	0,84	7,24	8,69	13,84	14,10	13,97	1,40	1,20	1,00
1,79	2,20	2,69	2,20	12,36	18,54	12,56	15,38	13,97	1,01	1,50	-1,00
1,90	2,09	2,58	2,31	12,50	18,75	12,55	15,39	13,97	1,00	1,50	-0,50
1,99	2,00	2,44	2,45	12,55	18,83	12,56	15,38	13,97	1,00	1,50	0,00
2,09	1,90	2,31	2,58	12,50	18,75	12,55	15,39	13,97	1,00	1,50	0,50

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. C.1: Rovingparameter und geometrische Kennwerte (Fortsetzung)

a_1 [mm]	b_1 [mm]	a_2 [mm]	b_2 [mm]	A_1 [mm ²]	A_2 [mm ²]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	u_m [mm]	k_F [-]	k_A [-]	k_P [-]
2,20	1,79	2,20	2,69	12,36	18,54	12,56	15,38	13,97	1,01	1,50	1,00
2,32	1,41	3,48	1,41	10,27	15,41	11,89	16,05	13,97	1,10	1,50	-1,00
2,57	1,29	3,26	1,52	10,37	15,55	12,44	15,52	13,98	1,10	1,50	-0,50
2,71	1,22	3,09	1,61	10,41	15,61	12,80	15,14	13,97	1,10	1,50	0,00
2,81	1,19	2,97	1,68	10,46	15,69	13,06	14,90	13,98	1,10	1,50	0,50
2,87	1,16	2,87	1,75	10,49	15,74	13,24	14,72	13,98	1,10	1,50	1,00
2,48	1,11	3,71	1,11	8,60	12,90	11,67	16,27	13,97	1,20	1,50	-1,00
2,78	1,00	3,43	1,22	8,72	13,09	12,54	15,42	13,98	1,20	1,50	-0,50
2,93	0,96	3,26	1,29	8,78	13,18	13,00	14,96	13,98	1,20	1,50	0,00
3,02	0,93	3,15	1,34	8,82	13,23	13,28	14,68	13,98	1,20	1,50	0,50
3,07	0,92	3,07	1,37	8,84	13,27	13,47	14,49	13,98	1,20	1,50	1,00
2,57	0,91	3,85	0,91	7,33	10,99	11,55	16,41	13,98	1,30	1,50	-1,00
2,91	0,81	3,51	1,01	7,44	11,15	12,64	15,30	13,97	1,30	1,50	-0,50
3,06	0,78	3,35	1,07	7,50	11,25	13,15	14,81	13,98	1,30	1,50	0,00
3,14	0,76	3,25	1,10	7,52	11,28	13,41	14,53	13,97	1,30	1,50	0,50
3,19	0,75	3,19	1,13	7,55	11,33	13,60	14,36	13,98	1,30	1,50	1,00
2,62	0,77	3,93	0,77	6,30	9,45	11,45	16,49	13,97	1,40	1,50	-1,00
3,00	0,68	3,55	0,86	6,42	9,63	12,75	15,19	13,97	1,40	1,50	-0,50
3,14	0,65	3,40	0,91	6,47	9,70	13,25	14,69	13,97	1,40	1,50	0,00
3,22	0,64	3,32	0,94	6,49	9,74	13,52	14,42	13,97	1,40	1,50	0,50
3,26	0,63	3,26	0,95	6,51	9,76	13,68	14,26	13,97	1,40	1,50	1,00
1,61	2,16	2,90	2,16	10,97	19,75	11,93	16,01	13,97	1,02	1,80	-1,00
1,77	2,02	2,75	2,34	11,24	20,23	11,92	16,02	13,97	1,00	1,80	-0,50
1,90	1,90	2,55	2,55	11,33	20,39	11,93	16,01	13,97	1,00	1,80	0,00
2,02	1,77	2,34	2,75	11,24	20,23	11,92	16,02	13,97	1,00	1,80	0,50
2,16	1,61	2,16	2,90	10,97	19,75	11,93	16,01	13,97	1,02	1,80	1,00
2,06	1,42	3,71	1,42	9,18	16,53	11,02	16,92	13,97	1,10	1,80	-1,00
2,41	1,23	3,42	1,56	9,33	16,79	11,75	16,19	13,97	1,10	1,80	-0,50
2,61	1,15	3,17	1,70	9,43	16,98	12,28	15,66	13,97	1,10	1,80	0,00
2,74	1,10	2,98	1,83	9,50	17,10	12,62	15,32	13,97	1,10	1,80	0,50
2,82	1,08	2,82	1,94	9,55	17,19	12,86	15,08	13,97	1,10	1,80	1,00
2,21	1,11	3,97	1,11	7,67	13,81	10,70	17,26	13,98	1,20	1,80	-1,00
2,63	0,95	3,57	1,26	7,87	14,17	11,90	16,06	13,98	1,20	1,80	-0,50
2,84	0,89	3,32	1,38	7,98	14,37	12,55	15,41	13,98	1,20	1,80	0,00
2,96	0,86	3,16	1,46	8,04	14,47	12,94	15,00	13,97	1,20	1,80	0,50
3,04	0,85	3,04	1,52	8,08	14,55	13,20	14,74	13,97	1,20	1,80	1,00

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tab. C.1: Rovingparameter und geometrische Kennwerte (Fortsetzung)

a_1 [mm]	b_1 [mm]	a_2 [mm]	b_2 [mm]	A_1 [mm ²]	A_2 [mm ²]	u_1 [mm]	u_2 [mm]	u_m [mm]	k_F [-]	k_A [-]	k_P [-]
2,29	0,91	4,12	0,91	6,51	11,72	10,51	17,45	13,98	1,30	1,80	-1,00
2,78	0,77	3,64	1,06	6,72	12,10	12,05	15,89	13,97	1,30	1,80	-0,50
2,98	0,73	3,40	1,15	6,83	12,30	12,76	15,20	13,98	1,30	1,80	0,00
3,09	0,71	3,26	1,21	6,88	12,38	13,15	14,79	13,97	1,30	1,80	0,50
3,17	0,70	3,17	1,25	6,92	12,45	13,40	14,54	13,97	1,30	1,80	1,00
2,34	0,76	4,21	0,76	5,60	10,08	10,39	17,57	13,98	1,40	1,80	-1,00
2,88	0,64	3,67	0,91	5,81	10,47	12,21	15,73	13,97	1,40	1,80	-0,50
3,08	0,61	3,45	0,98	5,91	10,64	12,93	15,03	13,98	1,40	1,80	0,00
3,18	0,60	3,32	1,03	5,95	10,71	13,30	14,64	13,97	1,40	1,80	0,50
3,25	0,59	3,25	1,06	5,98	10,76	13,54	14,40	13,97	1,40	1,80	1,00

Philipp Preinstorfer

Date of Birth 10th September 1989
Nationality Austria

Contact Information

Address	TU Wien Institute for Structural Engineering Department of Structural Concrete Karlsplatz 13 - E212-2 A-1040 Vienna	Phone	+43 1 58801-21254
		E-mail	philipp.preinstorfer@tuwien.ac.at
		URL	https://www.betonbau.tuwien.ac.at
		Orcid	0000-0001-5189-5375

Education

2008-2012 BSc in Civil Engineering - TU Wien, Vienna

2012-2014 MSc in Civil Engineering - TU Wien, Vienna

Diploma thesis - innovative concrete expansion joints

awarded with the FCP price for 'sustainable developments in Civil Engineering'

Pass with distinction

2014-2019 Ph.D. studies in Structural Concrete - TU Wien, Vienna

Doctoral thesis - On the splitting behaviour of textile reinforced concrete

Employment History

Sep 2008 - NowyZorn ZT GmbH, Porzellangasse 22/1/11, 1090 Vienna, Austria

Nov. 2014 *Technical Engineer/ Project leader*

Working in various projects, with a main focus on industrial buildings:

Area of Expertise: Concrete Structures, especially prestressed and post-tensioned concrete, FE-modelling of structures

Nov 2014 - TU Wien, Karlsplatz 13/E212-2, 1040 Vienna, Austria

Present *Predoctoral student, research associate*

Working on various projects with a focus on high performance materials in structural concrete:

- **aws-project P1405077:** Development of double wall elements made of HPC/UHPC
Working as project leader
- **FFG-project 851270:** Sustainable building with textile reinforced UHPC
Working as a research fellow

Selected Publications

1. **Preinstorfer, P. and Kollegger, J.**, (2017). *Doppelwand aus Ultrahochleistungsbeton*. Beton- und Stahlbetonbau, 112(6), pp. 346-354. 10.1002/best.201700017
2. **Preinstorfer, P., Kromoser, B. and Kollegger, J.**, (2018). *Einflussparameter auf die Spaltrissbildung in Textilbeton*. 113(12), pp. 877-885. doi:10.1002/best.201800071
3. **Kromoser, B., Preinstorfer, P. and Kollegger, J.**, (2018). *Building lightweight structures with carbon-fiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components*. Structural Concrete 20.2, S. 730–744. doi: 10 . 1002 / suco . 201700225
4. **Preinstorfer, P., Kromoser, B. and Kollegger, J.**, (2019). *Flexural behaviour of filigree slab elements made of carbon reinforced UHPC*. Construction and Building Materials, 199, pp. 416-423. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.027>

Patents

1. **Kollegger, J. and Preinstorfer, P.**, *Double wall made of high-strength or ultra-high-strength reinforced concrete*. Patent: Europäisches Patent, Nr. Ep 3 191 657 B1; submitted: 28.08.2015, granted: 08.06.2018.
2. **Kollegger, J., Wolfger, H. and Preinstorfer, P.**, *Stützen-Deckenknotten für eine Stahlbetondecke und zwei Betonstützen im Geschossbau*. Patent: Austrian Patent, Nr. AT 520529 B1; submitted: 22.12.2017, granted: 15.05.2019.
3. **Kollegger, J., Wolfger, H. and Preinstorfer, P.**, *Stützen-Deckenknotten für eine Stahlbetondecke und zwei Betonstützen im Geschossbau*. Patent: Austrian Patent, Nr. AT 520519 B1; submitted: 06.06.2018, granted: 15.05.2019.

Working Groups

- **ÖBV Guideline: Ultra-High Performance Concrete (UHPC)**
Development of a guideline for the design with ultra-high performance concrete
- **Austrian Standards: Committee 010 – concrete-, reinforced concrete and prestressed concrete**
Calculation, design and execution of structures and building components made of concrete, reinforced concrete and prestressed concrete. New constructions, maintenance and deconstructions are included
- **Austrian Standards: Task Group 010.01 – Eurocode 2**
Development of a national annex for Eurocode 2

Additional Expertise

- **Language**

German	<i>Mother tongue</i>
English	<i>Fluent</i>
- **IT skills**

Word processing	<i>LateX, Word</i>
Mathematical	<i>MatLab, Excel</i>
Finite Elemente	<i>Dlubal (RFEM, RSTAB), ABAQUS, ATENA</i>
CAD	<i>AutoCad, SofiCad, REVIT</i>
Image processing	<i>GIMP, Inkscape, Adobe Design, Aobe Lightroom</i>