

Philipp Preinstorfer

ZUR SPALTRISSBILDUNG VON TEXTILBEWEHRTEM BETON



Academic Press

Philipp Preinstorfer

ZUR SPALTRISSBILDUNG VON TEXTILBEWEHRTEM BETON

Diese Publikation entstand mit finanzieller Unterstützung von:
Fakultät für Bauingenieurwesen, TU Wien
Institut für Tragkonstruktionen
Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau

Philipp Preinstorfer

ZUR SPALTRISSBILDUNG VON TEXTILBEWEHRTEM BETON



Academic Press

Zitiervorschlag:

Preinstorfer, P. (2020). *Zur Spaltrissbildung von textilbewehrtem Beton*. TU Wien Academic Press. <https://doi.org/10.34727/2020/isbn.978-3-85448-034-1>

TU Wien Academic Press 2020

c/o TU Wien Bibliothek
TU Wien
Resselgasse 4, 1040 Wien
academicpress@tuwien.ac.at
www.tuwien.at/academicpress



This work is licensed under a Creative Commons attribution 4.0 international license (CC BY 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

ISBN (Printversion): 978-3-85448-034-1
ISBN (Onlineversion): 978-3-85448-035-8

Online verfügbar: <https://doi.org/10.34727/2020/isbn.978-3-85448-034-1>

Medieninhaber: TU Wien, Karlsplatz 13, 1040 Wien
Verleger: TU Wien Academic Press
Autor (für den Inhalt verantwortlich): Philipp Preinstorfer
Herstellung: Ferdinand Berger & Söhne GmbH

Korrekturat: Bettina Algieri

Diese Publikation ist eine überarbeitete Fassung der an der TU Wien am 11. Juli 2019 vom Autor verteidigten Dissertationsschrift „Zur Spaltrissbildung von textilbewehrtem Beton“. Die Dissertation wurde im Repositorium der TU Wien veröffentlicht: <http://katalog.ub.tuwien.ac.at/AC15424243>.

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

Danksagung

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 mir die Mitarbeit an diesem spannenden Projekt ermöglicht hat. Der Firma solidian 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 Forschungsteam während meiner Zeit an der TU Wien gedankt.

Dank gebührt auch 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 geht an meine Diplomanden, mit denen ich zahlreiche fachliche Diskussionen führen konnte und so immer wieder meine eigenen Gedanken zur 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 Arbeit 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.

Kurzfassung

Der innovative Verbundwerkstoff Textilbeton 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. Eine Übertragung der Modelle aus dem Stahlbetonbau zur Beschreibung des Tragverhaltens von textilbewehrten Bauteilen ist aufgrund geänderter Randbedingungen nur bedingt möglich. Ein wesentlicher Aspekt diesbezüglich ist das Verbundverhalten. In zahlreichen Untersuchungen am Institut für Tragkonstruktionen der TU Wien konnte ein Abspalten der Betondeckung zufolge hoher Verbundbeanspruchungen beobachtet werden. Die Hintergründe, warum es zu einer Spaltrissbildung 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 diese Rissbildung im Wesentlichen von der Geometrie der Faserstränge abhängig ist. Zur Charakterisierung der geometrischen Eigenschaften der jeweiligen Faserstränge wurden geometrische Parameter eingeführt, mit deren Hilfe eine genaue Beschreibung der Form möglich ist. In darauffolgenden numerischen Untersuchungen konnten die Ergebnisse aus den Experimenten validiert werden. Auf Basis der experimentellen und numerischen Untersuchungen wird ein Modell vorgestellt, das im Wesentlichen auf geometrischen Annahmen beruht und eine Berechnung der auftretenden Spaltzugkräfte ermöglicht.

Mit den Erkenntnissen dieser Arbeit ist erstmalig eine quantitative Beurteilung der Spaltzugbeanspruchung in textilbewehrten Bauteilen möglich, wodurch ein weiterer Schritt hin zu einem ressourceneffizienteren und nachhaltigeren Umgang mit Baumaterialien gesetzt wird.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	VII
Kurzfassung	IX
Inhaltsverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XV
Abbildungsverzeichnis	XIX
Tabellenverzeichnis	XXIII
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 Fasern	6
2.2.3 Einfachgarn	10
2.2.4 Textile Halbzeuge	11
2.2.5 Textile Bewehrung	13
2.2.6 Charakterisierung der textilen Bewehrung	17
2.3 Feinbetonmatrix	21
2.3.1 Allgemeines	21
2.3.2 Zusammensetzung und Eigenschaften	22
2.3.3 Gängige Betonierverfahren	24
2.4 Verbund zwischen Textilbewehrung und umgebender Matrix	25
2.4.1 Allgemeines	25
2.4.2 Charakterisierung des Verbundes	27
2.4.3 Bestimmung der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung	29
2.4.4 Einflussparameter auf den Verbund zwischen Textilbewehrung und Betonmatrix	33

3	Zur Spaltrissbildung in textilbewehrtem Beton	37
3.1	Bauteilversuche des Institutes	37
3.2	Ursachen für die Spaltrissbildung	39
3.3	Experimentelle Untersuchungen zur Spaltrissbildung	43
3.3.1	Beschreibung der Versuchskörper	45
3.3.2	Versuchsaufbau	52
3.3.3	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	54
3.4	Diskussion der Ergebnisse	66
4	Finite-Elemente-Analyse	69
4.1	Allgemeines zur Vorgehensweise	69
4.2	Modellierung	70
4.2.1	Geometrie des Modells	70
4.2.2	Materialmodelle	71
4.2.3	Modellierung des Interfaces	75
4.2.4	Gewähltes FE-Netz	78
4.2.5	Randbedingungen des Modells	78
4.3	Numerische Ergebnisse	79
4.3.1	Allgemeines zur Auswertung	79
4.3.2	Orientierung und Größe der Hauptspannungen	81
4.3.3	Dehnungen und Spannungen im Betonkörper	82
4.3.4	Erkenntnisse aus der FE-Berechnung	86
4.4	Parameterstudie	87
4.4.1	Untersuchte Parameter	87
4.4.2	Ergebnisse der Parameterstudie	90
4.4.3	Einordnung der eigenen Versuche	99
4.4.4	Erkenntnisse aus der Parameterstudie	99
4.5	Modell zur Berechnung der Spaltzugkräfte	101
4.5.1	Modellannahmen	101
4.5.2	Vergleich mit den numerischen Berechnungen	107
4.5.3	Berechnung des Betonwiderstandes	108
5	Zusammenfassung	111
5.1	Problemstellung	111
5.2	Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen	112
5.3	Berücksichtigung der Spaltrissbildung in der Beurteilung des Verbund- verhaltens	115
5.4	Offene Fragestellungen	116
	Literaturverzeichnis	119
A	Experimentelle Untersuchungen	127
A.1	Versuchsserie Typ S	129
A.2	Versuchsserie Typ O	130
A.3	Versuchsserie Typ F	131

A.4	Versuchsserie Typ R	132
A.5	Versuchsserie Typ K	133
A.6	Versuchsserie Typ U	134
B	Python-Code	135
C	Rovingparameter	143

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymer
CDP	Concrete-Damage-Plasticity
FE	Finite-Elemente
FFG	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
KRB	Kraft-Rissöffnungsbeziehung
SBR	Styrol-Butadien-Copolymer
SFB	Sonderforschungsbereich
TFP	Tailored Fibre Placement
TRUHPC	Textile reinforced ultra-high performance concrete/Textilbewehrter Ultrahochleistungsbeton
UHPC	Ultra-high performance concrete/Ultrahochleistungsbeton
VBA	Visual Basic for Applications
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

E	Einwirkung
F	Feldbereich (definiert als Mitte zwischen zwei Knotenbereichen)
gem	gemessen
K	Knotenbereich (Kreuzungspunkt Kett- und Schussroving)
kr	Kreis
U	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]
δ_0	Verschiebung, ab der eine Schädigung der Kohäsion eintritt [mm]
δ_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 zur 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 Sprenggrissbildung [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 demselben 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 Untersuchungsbereiches [mm]
$b_{r,F}$	Breite des Rovings in der Feldmitte [mm]
$b_{r,K}$	Breite des Rovings im Knotenbereich [mm]
d_c	Verfestigungsparameter im Druckbereich [-]
$d_{r,F}$	Dicke des Rovings in der 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]

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beispiele für eine Spaltrissbildung bei textilbewehrten Betonbauteilen	2
1.2	Methodik in dieser wissenschaftlichen Arbeit	4
2.1	Prozesskette Textilbewehrung	7
2.2	Einteilung textiler Bewehrungsstrukturen anhand der räumlichen Ausdehnung der Verstärkungsfasern	17
2.3	Einfluss der Tränkung und Fertigung auf die Festigkeit und Steifigkeit	20
2.4	Verbundeigenschaften zwischen Bewehrung und Beton	26
2.5	Verbund zwischen Bewehrung und Beton	27
2.6	Verbundmodelle für Stahlbeton/Textilbeton	29
2.7	Bestimmung der VSB für Bewehrungsstahl bzw. Textilbeton	30
2.8	Versuchskonfigurationen zur Bestimmung der VSB bei Textilbeton . .	32
2.9	Einflüsse auf den Verbund bei textilbewehrten Bauteilen	33
3.1	Auftreten von Betonabplatzungen zufolge Spaltzugspannungen	38
3.2	Verbundversagen im Stahlbetonbau zufolge Sprenggrissbildung	39
3.3	Rissbildung in Abhängigkeit der Rovingquerschnittsform	40
3.4	Periodische Aufweitung der Rovings	41
3.5	Resultierende Druckstrebe zufolge des Formschlusses der Bewehrung mit dem Beton	41
3.6	Querzugspannungen als Folge einer hohen Knotensteifigkeit	42
3.7	Umlenkkräfte zufolge einer globalen Textilwelligkeit	43
3.8	Versuchsprogramm zur quantitativen Bestimmung der Einflussgröße einzelner Parameter auf die Spaltrissbildung	44
3.9	Vermessung und Digitalisierung der Textilien	46
3.10	Querschnittsformen der verschiedenen Faserstrangtypen	47
3.11	Querschnittsabmessungen der einzelnen Faserstrangtypen	48
3.12	Darstellung der verschiedenen Faserstrangtypen in Längsrichtung . .	49
3.13	Längsschnitt in Dickenrichtung und Breitenrichtung	50
3.14	Versuchsaufbau und Messtechnik der experimentellen Untersuchungen	53
3.15	Rissbildung in Abhängigkeit der Querschnittsform	55
3.16	Charakteristische Kraft-Rissöffnungsbeziehung in den vorliegenden Untersuchungen	55
3.17	Bestimmung der gemittelten Kraft-Rissöffnungsbeziehung je Versuchsserie	56
3.18	Bestimmung des Spaltwiderstandes	57
3.19	Verhältnis der Verbundbeanspruchung F_{max} zum Spaltwiderstand $F_{sp,R}$	58

3.20	Inverse Bestimmung der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung	58
3.21	Versuchsergebnisse: Kraft-Rissöffnungsbeziehung, Kraft-Rissöffnungsbeziehung normiert, Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung	59
3.22	Vergleich zum Einfluss des Knotenwiderstandes	60
3.23	Vergleich zum Einfluss der periodischen Aufweitung	61
3.24	Vergleich zum Einfluss der Querschnittsform	62
3.25	Vergleich zum Einfluss der Wirkrichtung	62
3.26	Vergleich zum Einfluss der Betongüte	63
3.27	Übergang vom Haft- zum Formverbund für Versuchskörper Typ S	64
3.28	Aktivierte Verbundmechanismen während des Auszugsversuches am Beispiel von Faserstrang Typ S	65
4.1	Vorgehensweise für die FE-Berechnungen	70
4.2	Einbinden des Rovings in die Programmumgebung von ABAQUS	71
4.3	Materialmodelle Beton	72
4.4	Bruchhypothese für Beton mit $K_c = 0,67$	73
4.5	Interfacemodellierung in ABAQUS	76
4.6	FE-Netz des Gesamtmodells	78
4.7	Randbedingungen des Modells zur Simulation der Versuchsdurchführung	78
4.8	Kraft-Rissöffnungsbeziehung als Ergebnis der numerischen Berechnung	79
4.9	Vektorielle Darstellung der plastischen Dehnungen in Hauptrichtung unmittelbar vor dem Versagen als Indikator für eine Rissbildung	80
4.10	Darstellung der Hauptspannungen σ_{min} , σ_{mid} und σ_{max}	81
4.11	Schnittführung entlang des Versuchskörpers für die Auswertung	82
4.12	Spannungsverteilung σ_{33} , σ_{22}	83
4.13	Dehnungen gesamt $\varepsilon_{e,22}$, plastisch $\varepsilon_{p,22}$	84
4.14	Auszugskanal des Rovings und die daraus resultierenden Kontaktpressungen	85
4.15	Berechnung der resultierenden Spaltzugkräfte	86
4.16	Parameter, die im Zuge der Studie variiert wurden	88
4.17	Ausgabewerte aus ABAQUS nach erfolgter Berechnung	90
4.18	Darstellung von $F_{sp,y}/F_{sp,z}$ und F_x/u_x , jeweils in Abhängigkeit von k_F , k_P und k_A	91
4.19	Einfluss der Garnform ($k_A = 1,5$)	92
4.20	Einfluss der Dominanz der Aufweitung ($k_A = 1,5$)	93
4.21	Deformation des Rovings aufgrund hoher örtlicher Pressungen	94
4.22	Darstellung von F_{sp}/F_x und F_x/u_x , jeweils in Abhängigkeit von k_F , k_P und k_A	95
4.23	Darstellung von F_{sp}/F_x und F_x/u_x , jeweils in Abhängigkeit von k_P , k_F und k_A	96
4.24	Einfluss der Betondeckung ($k_A = 1,5$)	97
4.25	Spannungsverteilung σ_{22} in der Spaltfläche direkt vor Versagen, für eine Betondeckung $c = 15\text{mm}$ und $c = 25\text{mm}$	98
4.26	Rissbildung in Abhängigkeit der Betondeckung	98

4.27	Einordnung der experimentellen Untersuchungen in die Ergebnisse der Parameterstudie	100
4.28	Resultierende Spaltzugkräfte in Abhängigkeit der Rovingform	102
4.29	Verhältnis der Ellipsenachsen in Abhängigkeit des Formparameters k_F	103
4.30	Modellannahme zur Bestimmung des Parameters α_F	104
4.31	Ausprägung der Spaltzugkräfte in Abhängigkeit der Aufweitung . . .	104
4.32	Neigung der resultierenden Betondruckstrebe quer zur Längsachse . .	105
4.33	Verhältnis der Spaltzugkräfte in Abhängigkeit des Formparameters k_P	106
4.34	Neigung der resultierenden Betondruckstrebe zur Längsachse	107
4.35	Vergleich der nach dem vorgestellten Modell berechneten Spaltzugkräfte mit den numerisch ermittelten Spaltzugkräften ($k_A = 1,5$) . . .	107
4.36	Betonzugbeanspruchung in der Ebene der textilen Bewehrung	108
A.1	Bestimmung des resultierenden Spaltwiderstandes	127

Tabellenverzeichnis

2.1	Mechanische Eigenschaften verschiedener Fasermaterialien	8
2.2	Auswirkung der Zirkoniumoxidzugabe auf die Kennwerte der Glasfasern	9
2.3	Mechanische Eigenschaften unterschiedlicher Carbonfasertypen	9
2.4	Eigenschaften gängiger Tränkungsmaterialien	14
2.5	Textilbetonrezepturen und zugehörige Druckfestigkeit nach 28d	23
3.1	Kennwerte der Textilbewehrung gemäß Herstellerangaben	45
3.2	Geometrische Kennwerte der verschiedenen Faserstrangtypen	51
3.3	Verwendete Betonrezepturen im Versuchsprogramm	52
3.4	Auszugswiderstand und Betonwiderstand gegen Spalten	57
4.1	Bruchhypothese Beton – gewählte Modellparameter	74
4.2	Gewählte Materialparameter für das Textil	75
4.3	Gewählte Parameter zur Modellierung des Interfaces	77
4.4	Spaltzugkräfte innerhalb des Untersuchungsbereiches	87
4.5	Untersuchungsschema der Parameterstudie	89
4.6	Geometrische Kennwerte von Faserstrangtyp S und K	99
A.1	Größe des Untersuchungsbereiches und des Spaltwiderstandes	127
C.1	Rovingparameter und geometrische Kennwerte	143

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Textilbeton ist ein innovativer Verbundwerkstoff, der dem Ingenieur sowohl in ästhetischer als auch statisch konstruktiver Weise neue Möglichkeiten eröffnet. Die Ausgangsmaterialien dieses Verbundwerkstoffes zeichnen sich durch eine sehr hohe Festigkeit und eine hervorragende Dauerhaftigkeit aus. Durch die hohe Korrosionsbeständigkeit der nichtmetallischen Bewehrung – besonders erwähnenswert in diesem Zusammenhang ist Carbon – wird eine Minimierung der Betondeckung möglich, wodurch filigrane und in weiterer Folge auch leichte Bauteile und Tragwerke errichtet werden können (Hegger, Will et al. 2004). Vor dem Hintergrund der Vorteile dieses Verbundwerkstoffes wurde in den Jahren 2016–2017 vom Institut für Tragkonstruktionen – Forschungsbereich Betonbau der TU Wien das Forschungsprojekt *Sustainable Building with Textile reinforced ultra-high performance concrete (TRUHPC)* mit finanzieller Unterstützung der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) realisiert. 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 zurzeit 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 Rovings verwendet, sind heute unter anderem sogenannte Heavy Tows, welche zusätzlich mit einem steifen Tränkungsmedium 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 Rissbreiten reichen. Speziell für diese Art der Bewehrung konnte aber bei fortgeschrittenen Laststufen eine Längsrissbildung¹ im Bauteil, die

¹ Eine 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

zu einem Abspalten der Betondeckung führt, beobachtet werden. Diese Rissbildung kann in weiterer Folge zum vorzeitigen Versagen der textilbewehrten Bauteile führen. In Abbildung 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. Dabei führte die Spaltrissbildung zu einem Abplatzen der Betondeckung und in weiterer Folge zu einem vorzeitigen Versagen des Bauteils in Form eines Verankerungsversagens am Auflager (Abbildung 1.1b). Das Auftreten dieser Schadensformen hat 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 bei textilbewehrten Betonbauteilen in Zukunft 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 teils ein Abplatzen der Betondeckung beobachtet werden, diese Schädigung kann aber im Wesentlichen auf die Garnwelligkeit zurückgeführt werden. Im Zuge 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 für Textilhersteller auf Basis der verwendeten Materialien die optimale Geometrie 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 epoxidharzgetränkten 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, deren Inhalt in dieser Dissertation abgebildet wird.

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 eruiern 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 Rovings mit einem Laserscan vermessen, um die Geometrien der einzelnen Faserstränge genau zu dokumentieren.

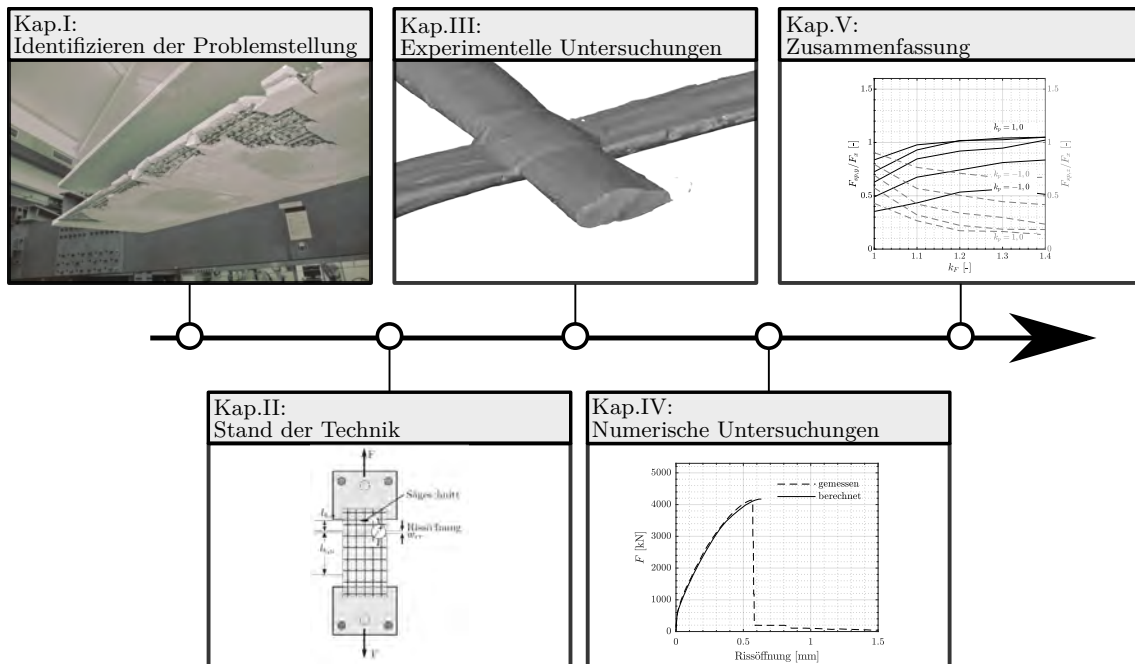


Abb. 1.2: Methodik in dieser wissenschaftlichen Arbeit

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

Zurzeit 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 Wissenschaftlern 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 befindet sich noch weiter 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 wie Fußgängerbrücken, Fassadenplatten, Tragelemente für den Hochbau (Hegger, Kulas et al. 2011; Rempel, Will et al. 2015)
- Herstellung freigeformter Konstruktionen wie Dachschaalen (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 umfangreichen Forschungsprojekt C^3 ² die notwendigen wissenschaftlichen Voraussetzungen geschaffen, um einen breiten Markteintritt des Werkstoffes zu ermöglichen (Lieboldt et al. 2018).

¹ Während 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.

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 folgend, bis hin zum fertigen Textil – die wesentlichen Prozessschritte angeführt. Dabei ist festzustellen, dass in der Literatur zum Teil unterschiedliche Begrifflichkeiten für denselben 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

Abbildung 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 verarbeitet 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 Fasern

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

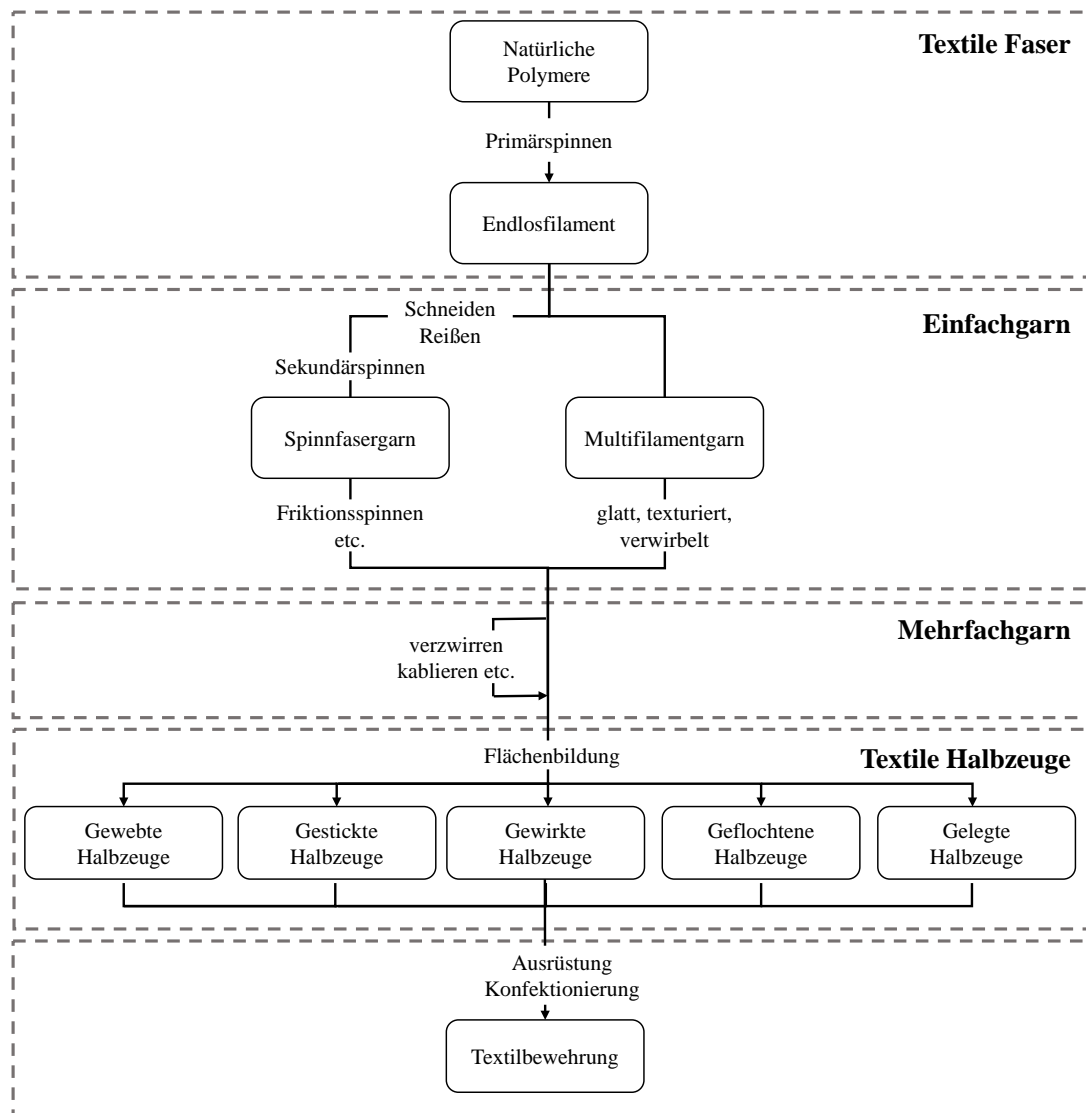


Abb. 2.1: Prozesskette Textilbewehrung

- hohe Bruchdehnung für eine gute Versagensankündigung
- textile Bearbeitbarkeit
- hohe Ermüdungsfestigkeit

Freudenberg (2011) gibt einen Überblick über die Eigenschaften und Materialkennwerte verschiedener Fasermaterialien. In Tabelle 2.1 sind darauf bezugnehmend Materialien aufgelistet, die auf Basis der zuvor 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 Kapitel 2.2.2.1 bzw. 2.2.2.2 genauer beschrieben werden.

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

Die Herstellung der Fasern erfolgt im Primärspinnungsprozess, der sich je nach verwendetem Material unterscheidet. Im Anschluss an den Primärspinnungsprozess wird vor der Weiterverarbeitung der Fasern zu Garnen eine Schlichte aufgetragen, die ein entsprechendes Verarbeiten der Fasern gewährleisten soll (Reduzierung von Filament-Schädigungen, 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 sie 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 mit der Zugabe von Zirconiumoxid ZrO₂ im Herstellprozess partiell ausgeglichen werden, wodurch alkaliresistentes (AR) Glas entsteht. Entgegen der Bezeichnung wird zwar keine vollständige Beständigkeit erzielt, jedoch kann eine wesentliche Verbesserung derer erreicht 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 Tabelle 2.2

³ Zusammengefasst aus Freudenberg (2011).

ersichtlich, geht die höhere Beständigkeit allerdings mit einer Verschlechterung der mechanischen Kennwerte einher.

Tab. 2.2: Auswirkung der Zirkoniumoxidzugabe auf die Kennwerte der Glasfasern⁴

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

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 Precursor⁵ ersponnen. Im weiteren Verfahren werden 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 Tabelle 2.3 gegeben.

Tab. 2.3: Mechanische Eigenschaften unterschiedlicher Carbonfasertypen⁶

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

⁴ Zusammengefasst aus Freudenberg (ebd.), auf Basis von (Wulfhorst, Kaldenhof et al. 1993; Faulstich und Mally 1993; Butler et al. 2009).

⁵ Als Precursor bezeichnet man in der Chemie den Ausgangsstoff zur Bildung von Kettenmolekülen.

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

Querrichtung durch schwach wirkende Van-der-Waals-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. ein Viertel von Stahl) verfügt Carbon über zahlreiche weitere Vorteile, allen voran ist es 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 Bruchdehnungen 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 das 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 Rovings 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 (hier eignen sich gedrehte Filamente), andererseits aber eine gute Imprägnierbarkeit gewährleisten müssen (hier haben gerade, ungedrehte Direktrovings ihre Vorteile; 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 der Orientierung und Anordnung der Verstärkungsfasern zueinander. Neben den Gelegen wird weiters noch kurz auf gestickte Halbzeuge eingegangen (Kap. 2.2.4.2), 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, wo die Wirkfadensysteme zum Fügen der Fadenscharen aus Verstärkungsfasern zu einer flächigen Struktur dienen (im Falle von Textilbewehrung vorzugsweise Fadenscharen bestehend aus Rovings).

Beim Kettenwirken werden dazu die Rovings vorab auf einer Verlegestation eingebracht (gelegt). Die Orientierung der Rovingscharen kann dabei in beliebigen Grenzen variiert werden. Von Kettrovings spricht man, wenn ihre Orientierung in Produktionsrichtung der Maschine verläuft. Die quer dazu liegenden Rovings werden als Schussrovings bezeichnet. Es können bis zu sieben Lagen an Rovings, die in unterschiedlichen Richtungen zueinander orientiert sind, in den vollautomatisierten Anlagen abgelegt werden. Das entstehende Gelege wird im nächsten Prozessschritt

⁷ Gewirke 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 Martin 2011).

durch die eingangs beschriebenen Wirkfadensysteme zu einem flächigen Gebilde gefügt. Bei Vorhandensein von zwei Rovingscharen spricht man von biaxialen Gelegen (üblicherweise sind die Rovings 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 Rovings aufweist. Die geringere Verschiebesteifigkeit der Bindung 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 ausführlich in Kapitel 2.4 diskutiert. Weiters ist darauf zu achten, dass die Rovings in gestreckter Form vorliegen, damit gute mechanische Eigenschaften erzielt werden können (hohe Steifigkeit, hohe Festigkeit).

2.2.4.2 Gestickte Halbzeuge

Rovings, 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 Rovings auf dem Stickgrund kann nach Fertigstellung und Abtrennung des Stickgrundes die räumliche Struktur aus der zweidimensional gestickten Struktur einfach entwickelt werden (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 zum Beispiel von biaxialen Gelegen mit der Sticktechnik ein interessantes Einsatzgebiet darstellen. Das biaxiale Gelege wird vorab mit hoher Produktivität hergestellt, um anschließend die einzelnen Rovings 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

⁸ Vorarlberg 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 Billiglohnländer hat eine sehr starke Spezialisierung auf technische Textilien stattgefunden (Egger und Feix 2017).

einem Forschungsprojekt an der Markteinführung von gestickten Textilien gearbeitet (Egger und Walzl 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 C^3 wird derzeit an einem automatisierten Prozess gearbeitet⁹, der all diese Schritte beinhaltet.

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. Die Tränkung hat weiters auch wesentlichen Einfluss auf die Biegesteifigkeit und die transversale Steifigkeit der

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

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

¹¹ Als 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 mit 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 Imprägnierung verwendet und von einer Verwendung des Terminus Sekundärbeschichtung Abstand genommen.

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, d. h. 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 bei Schleser (ebd.) werden diese in reaktive Harze und Dispersionen eingeteilt. Je ein Vertreter dieser Kategorien ist mit den entsprechenden mechanischen und physikalischen Eigenschaften in Tabelle 2.4 angeführt.

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

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 bei Raumtemperatur (Kalthärtung) oder bei erhöhten Temperaturen (Warmhärtung). Für die Herstellung von Textilbewehrungen wird in vielen Fällen 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

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

¹³ Bei einer Polyaddition reagieren Monomere miteinander zu Polymeren. Es entstehen keine Reaktionsnebenprodukte.

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 Polymerpartikeln 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, der 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, im Vergleich zu ungetränkten Textilien ist jedoch 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-Copolymer (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

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

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 die Formgebung wird das Prepreg-Textil in Form gebracht. Dies geschieht zum Beispiel 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 Rovings in einer gestreckten Lage vor. Dadurch ergibt sich eine unterschiedliche Materialbeanspruchung in den Rovings. 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.

¹⁵ Abkürzung für den englischen Begriff "preimpregnated fibers".

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 (Rovings) 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).

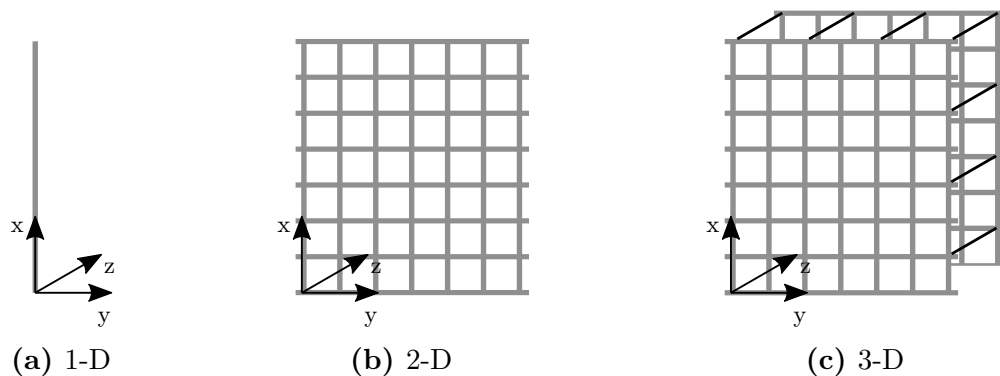


Abb. 2.2: Einteilung textiler Bewehrungsstrukturen anhand der räumlichen Ausdehnung der Verstärkungsfasern

Je nach Dimension der räumlichen Erstreckung der Verstärkungsfasern unterscheidet man zwischen eindimensionalen (einzelner Faserstrang), zweidimensionalen (bi- oder multiaxiale Gelege) und dreidimensionalen (multiaxiale Gelege mit Verstärkung in z-Richtung) Strukturen. Abbildung 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 für die Bestimmung der Materialkennwerte (Spannung, Dehnung etc.) benötigt wird, 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:

T_t	Feinheit des Garns [tex]
m	Gewicht des Garns [g]
l	Länge des Garns [km]

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, indem die Garnfeinheit durch die Rohdichte des Fasermaterials dividiert wird (Gl. 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:

A_F	Faserquerschnittsfläche (Nettoquerschnittsfläche) des Garns [mm ²]
ρ	Dichte des Fasermaterials [g/cm ³]

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:

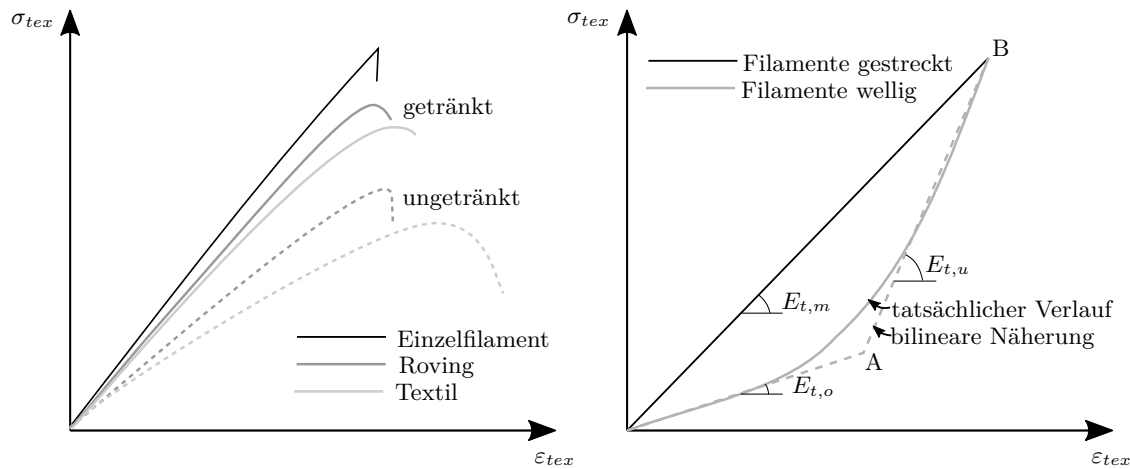
u_r	Umfang des Rovings
a, b	Ellipsenhalbachsen ($a > b$)
λ	$(a - b)/a + b$

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 Kapitel 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 Tränkungsmedium 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 σ - ε -Beziehung ergibt, aus dem vor allem bei geringen Laststufen eine größere Dehnung resultiert (siehe Abb. 2.3b).

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 zum Beispiel 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



(a) Einfluss des Bearbeitungsgrades und der Tränkung¹⁶ (b) Einfluss der Filamentwelligkeit¹⁷ (überhöht dargestellt)

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

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.

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:

$f_{tex,u}$	Bruchfestigkeit des Garns [MPa]
F_u	Bruchkraft [N]
A_F	Faserquerschnittsfläche (Nettoquerschnittsfläche) des Garns [mm ²]

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

¹⁷ Bild erstellt in Anlehnung an Kulas (2013).

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:

E_{tex}	E-Modul [MPa]
σ_{tex}	Textilspannung [MPa]
ε_{tex}	Textildehnung [mm/m]

Rempel und Ricker (2017) konnten in ihren Untersuchungen zeigen, dass für epoxidharzgetränkte Textilien die Verteilungsfunktion der mechanischen Kennwerte einer Standardnormalverteilung 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; 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-Komponentensystem, 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 ein Fünftel des Rovingabstandes oder ein Drittel der lichten Öffnungsweite zwischen den Rovings 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 zum Beispiel entlang einer Fuller-Parabel¹⁸ 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.

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

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

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 führen zwangsläufig zu einer Abnahme der Verarbeitbarkeit des Betons. Der Frischbeton weist eine sehr hohe Viskosität auf. Durch Zugabe von Hochleistungsfließmitteln aus Polycarboxylatether kann dem 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, von Schneider et al. (2017) angeführt (siehe Tab. 2.5). Diese wurden im Zuge eines Optimierungsprozesses innerhalb des Projektes C^3 entwickelt.

Tab. 2.5: Textilbetonrezepturen und zugehörige Druckfestigkeit nach 28d²⁰

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	

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 kommt 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,

²⁰ Zusammengefasst nach Schneider et al. (ebd.).

entsprechend den Anforderungen aus der optimalen Korngrößenverteilung, zugegeben. Im Vergleich dazu wurden beim Beton mit der Bezeichnung HF-2-145-5 dem Kompositzement zusätzlich reaktive Mikrofüller in Form von hüttensandhaltigen Mikrozeementen 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 und erreicht im ausgehärteten Zustand eine Festigkeit von 136,7 MPa.

Die hier vorgestellten Betone aus Schneider et al. (2017) weisen neben den bereits genannten Eigenschaften gegenüber Normalbetonen eine bessere Ökobilanz auf. Möglich ist dies aufgrund des geringen Klinkeranteils und der Verwendung von großteils 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 Gängige 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 Fertigungsmethoden nach Brameshuber, Mott et al. (2008) angeführt.

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, dadurch dass Beton und Bewehrung lagenweise und abwechselnd übereinandergelegt werden.

Gießen: Das Gießverfahren entspricht dem konventionellen Betonieren im Stahlbetonbau. Dabei wird die Textilbewehrung (oftmals bereits der fertige Bewehrungskorb) in die Schalung eingebracht, welche anschließend mit Beton verfüllt wird. Der Abstand der Bewehrung zur Schalung wird mit Abstandhaltern sichergestellt. Gab es hierzu aufgrund mangelhafter Abstandhalter anfangs Probleme in der Herstellung, sind mittlerweile passende Abstandhalter 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 Rohre, aber auch Masten und hohe Stützen sehr gut 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

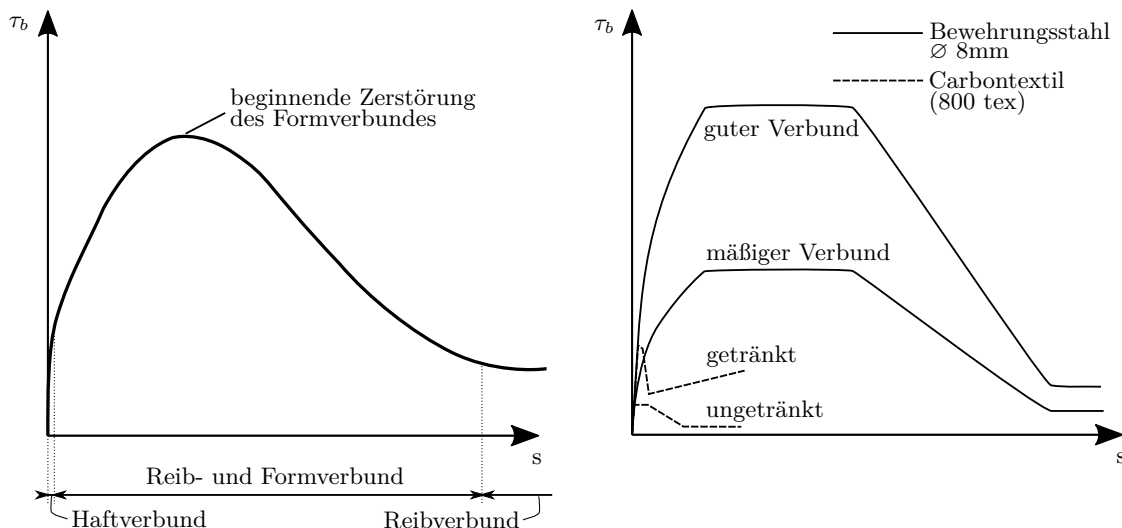
2.4.1 Allgemeines

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

- Haftverbund
- Reibverbund
- mechanische Verzahnung²¹

²¹ Auch als Scherverbund bzw. formschlüssiger Verbund bezeichnet.

Die Abhängigkeit der Mechanismen von der auftretenden Relativverschiebung ist in Abbildung 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.



(a) Verbund in Abhängigkeit des Schlupfes²² (b) Vergleich Bewehrungsstahl/Textil²³

Abb. 2.4: Verbundeigenschaften zwischen Bewehrung und Beton

Ein Vergleich der Verbundeigenschaften von konventioneller Stahlbewehrung und Textilbewehrung ist in Abbildung 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 konventionellen Stahlbetonbau ergeben sich dadurch wesentliche Unterschiede in der Verbundkraftübertragung, wobei auch hier zwischen getränkten und ungetränkten Textilien zu unterscheiden ist. Eine Imprägnierung der Rovings 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 Steigerung der Verbundsteifigkeit und -festigkeit beobachten. Da getränkte Textilien derzeit den Stand der Technik in der Herstellung von Textilbewehrungen sind, wird auf ungetränkte Textilien in der weiteren Arbeit nicht eingegangen.

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

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

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).

Betrachtet man das differentielle Element der Länge d_x in Abbildung 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.

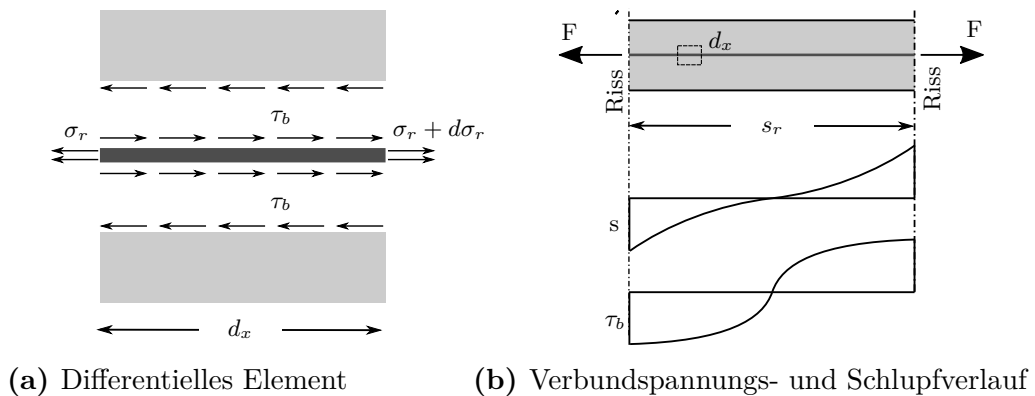


Abb. 2.5: Verbundverlauf zwischen Bewehrung und Beton²⁴

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

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

²⁴ In Anlehnung an Sigrist (1995) und Zilch und Zehetmaier (2010).

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 VSB (RILEM 1994). Der qualitative Verlauf einer solchen Beziehung für einen einbetonierten Bewehrungsstab in Beton wurde bereits in Abbildung 2.4a gezeigt.

Die große Herausforderung besteht in der Modellierung geeigneter VSB 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 (siehe Abb. 2.6a). Dieser Modellansatz hat Einzug in den *fib Model Code* gefunden (Fib 2013).

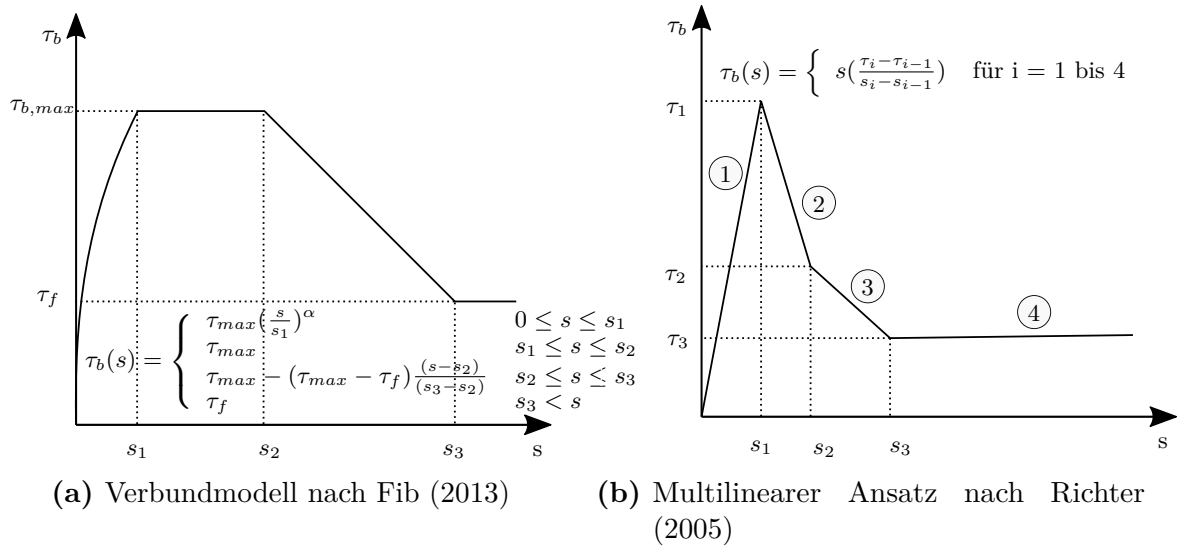
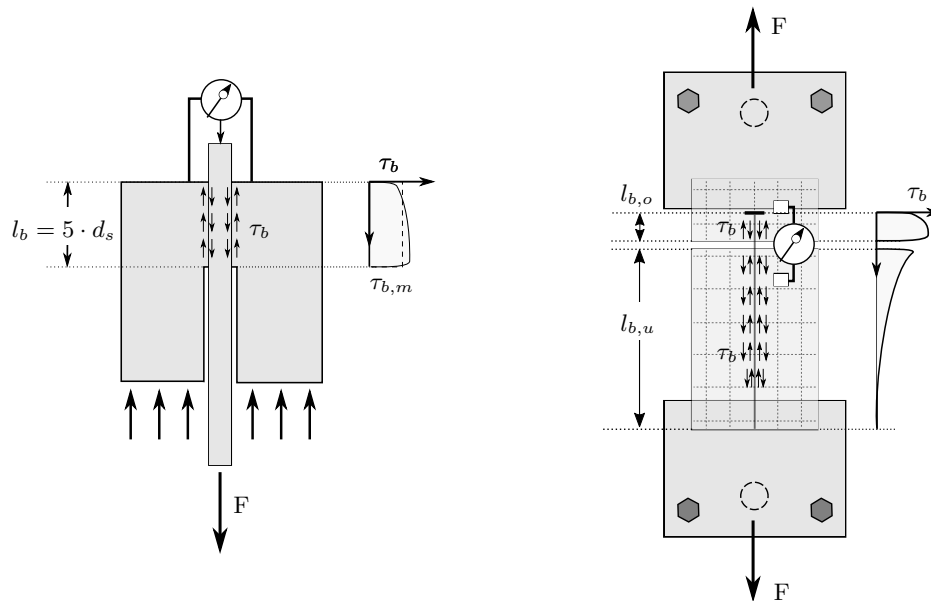


Abb. 2.6: Verbundmodelle für Stahlbeton/Textilbeton

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 wurden. 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 (siehe Abb. 2.6).

2.4.3 Bestimmung der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung

Im Stahlbetonbau wird die VSB anhand von Auszugsversuchen nach RILEM (1994) bestimmt (siehe Abb. 2.7a). Gemessen wird in diesem 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 VSB (siehe Abb. 2.7a).



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

Abb. 2.7: Bestimmung der VSB 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 Abbildung 2.7b ersichtlich können je nach verwendeter Bewehrung mehrere Bereiche der VSB aktiviert werden.

Zur Bestimmung des Schlupfverlaufes entlang des Messbereiches ist es erforderlich, von der VSB Kenntnis zu haben. Für den Ansatz einer multilinearen Beziehung wurden von Richter (2005) analytische Lösungen für linear ansteigende, linear abfallende und konstante Abschnitte der VSB hergeleitet. Dadurch kann die gesuchte Beziehung iterativ ermittelt werden. Der Aufwand zur Bestimmung der VSB 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 zum Beispiel für zahlreiche Textilien, unter anderem mit unterschiedlichen Imprägnierungsgraden und Tränkungsmaterialien, die VSB berechnet.

2.4.3.1 Auszugversuche

Aufgrund der laufenden Entwicklungen im Textilbetonbau existiert bis dato kein einheitlicher Versuchsaufbau zur Durchführung von Auszugversuchen. Erste Un-

tersuchungen von Banholzer (2004) erfolgten sowohl an einzelnen Glasfilamenten als auch an ungetränkten Glasrovings. Dazu wurden die Filamente bzw. Rovings 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) als auch 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 Auszugsversuche an textilbewehrten Scheiben und 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 des Auszugs aus beiden Enden kommt. Krüger (2004) adaptierte den Versuch insofern, als dass in seinen Untersuchungen die Verankerungslänge auf einer Seite gegenüber der anderen klein 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 Querrovings definiert und nur ein Roving getestet. Zwar wird auch hier eine Textilbetonscheibe wie bei Krüger (ebd.) hergestellt, in der Sollbruchstelle werden aber alle Rovings, 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 Versuchsaufbau hat sich prinzipiell als sehr praxistauglich für Rovings mit Feinheiten < 3300 tex erwiesen, 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 Rovings im Untersuchungsbereich auszugehen. Bielak et al. (2018) stellen in ihren Untersuchungen eine Weiterentwicklung dieses

Versuchsaufbaus vor, der einen Einfluss der benachbarten Rovings 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 x 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).

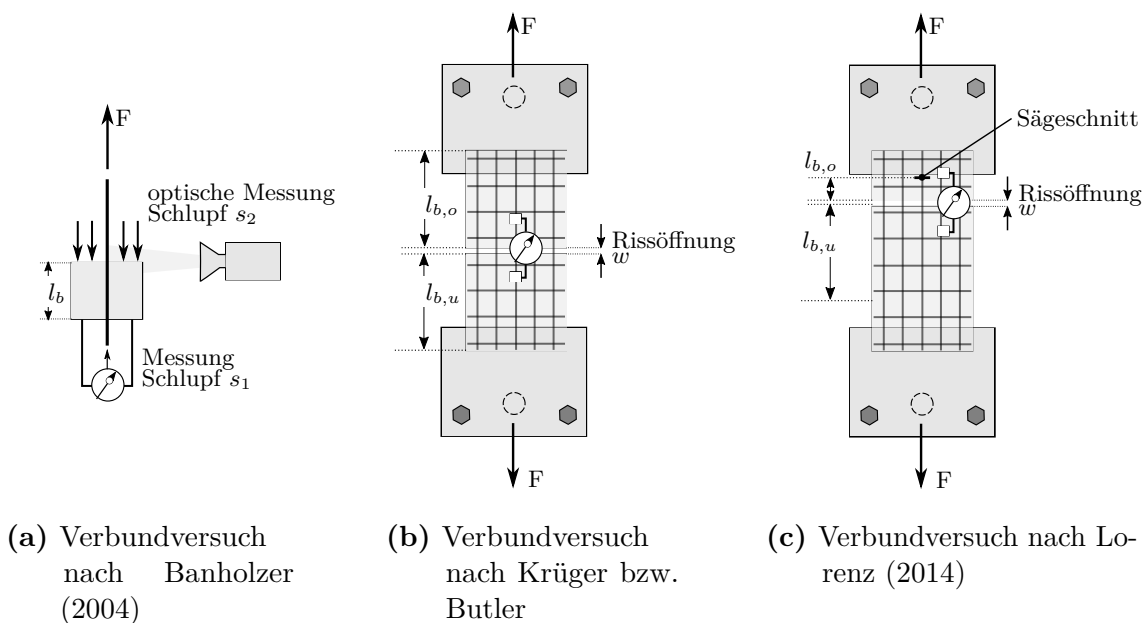


Abb. 2.8: Versuchskonfigurationen zur Bestimmung der VSB bei Textilbeton²⁵

Bei den vorgestellten Versuchen nach Abbildung 2.8b und Abbildung 2.8c ist keine direkte Schlupfmessung möglich. Die gesuchte VSB wird hingegen invers aus der gemessenen Kraft-Rissöffnungsbeziehung (KRB) berechnet. Lösungen für dieses Problem wurden zum Beispiel von Richter (2005) auf semianalytischer Basis und von Li et al. (2018) auf numerischer Basis bereitgestellt.

²⁵ In 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.

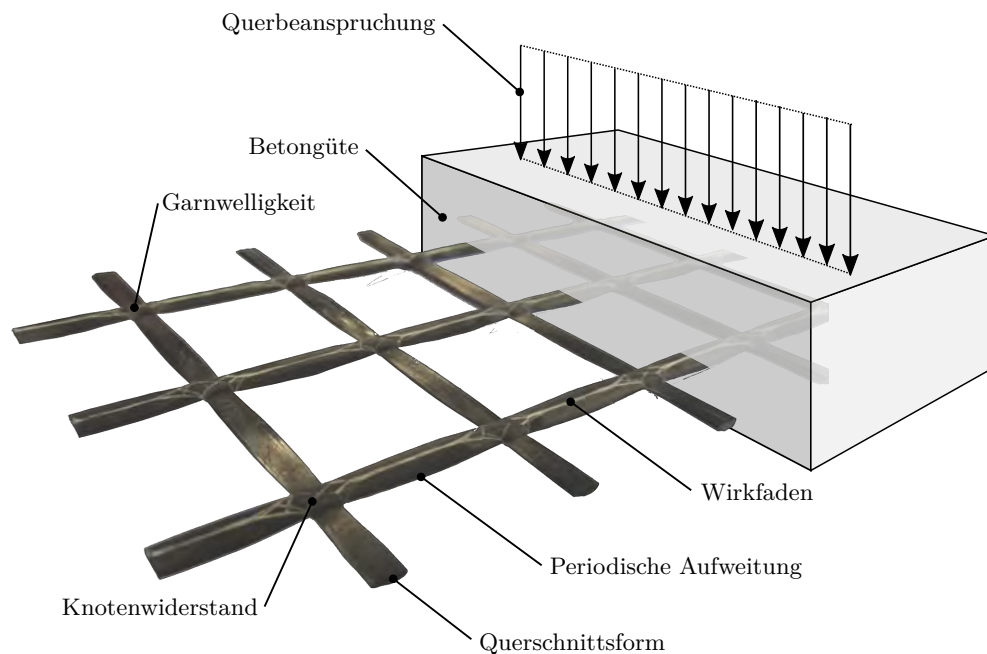


Abb. 2.9: Einflüsse auf den Verbund bei textilbewehrten Bauteilen

Einfluss der Querschnittsform und des Garnumfangs: Das Verhältnis vom Umfang zur 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 gedrunge-
nen, elliptischen Querschnitt (in Abhängigkeit des Wirkfadendrucks und des
Rollendrucks 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 Rovings zwischen den Kreuzungspunkten der Kett- und Schussrovings
Aufweitungen des Querschnitts auf, die bei entsprechender Ausprägung und bei
einer ausreichenden Steifigkeit des Tränkungsmaterials wie Rippen wirken (Bie-
lak et al. 2018). Maßgeblichen Einfluss hierauf hat der Herstellungsprozess. Die
Wirkfadenspannung beim Herstellen erzeugt eine, je nach Größe der Spannung,
mehr oder minder stark ausgeprägte Kompression in den Kreuzungspunkten.
Zusätzlich erfolgt im anschließenden Tränkungsprozess ein Abquetschen des
Tränkungsmaterials (siehe Kap. 2.2.5.1), wodurch es zwischen den Kreuzungs-
punkten zu einer periodischen Aufweitung des Rovings in Breitenrichtung
kommt.

Einfluss der Garnwelligkeit: Textilbewehrungen weisen oftmals eine herstellungs-
bedingte Welligkeit in Garnlängsrichtung auf. Lorenz (2014) zeigte in seinen
Untersuchungen, dass diese Welligkeit bei getränkten Textilien die Verbund-
festigkeit steigern kann. Voraussetzung ist eine ausreichende Steifigkeit des
Tränkungsmaterials. Da diese Welligkeit an den jeweiligen Wendepunkten Um-
lenkkräfte 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
Rovings auf. Nähere Untersuchungen dazu sind in Kapitel 3.3 ersichtlich.

Einfluss des Tränkungsmaterials: Eine Imprägnierung der Rovings hat maßgeb-
lichen 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 ein verbundsteigernder Ein-
fluss nachgewiesen werden. So zeigte Lorenz (2014), dass bei imprägnierten
Rovings, 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 Querschnitts, 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 Schussrovings 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 teils widersprüchlich beantwortet. Während zum Beispiel Bielak et al. (2018) von keinem ausgeprägtem Knotenwiderstand ausgehen, wird von Ortlepp (2007) eine verbundsteigernde Wirkung angenommen.

Einfluss der Betonzusammensetzung und Betonherstellung: Aus dem Stahlbetonbau ist ein großer Einfluss der Betonfestigkeitsklasse 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 Druckfestigkeit eingesetzt werden, ist hier von keiner großen Bandbreite in der Verwendung unterschiedlicher Betonfestigkeitsklassen auszugehen. Ein allfälliger Einfluss der Betondruckfestigkeit kommt demnach wenig zum Tragen. 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 vermehrt an horizontal liegender Bewehrung sammeln, je weiter sie im Bauteil vom Schalboden entfernt liegt. Dadurch ist eine erhöhte Porosität im Bereich der Bewehrung feststellbar, die die Verbundtragfähigkeit beeinträchtigt (Martin und Noakowski 1981). Da im Textilbetonbau in der Regel sehr fließfähige bzw. zum Teil selbstverdichtende Betone eingesetzt werden, ist der Einfluss der Lage der Bewehrung im Betonkörper (im Stahlbetonbau Unterscheidung zwischen guten und mäßigen Verbundbedingungen) auch aus diesem Blickwinkel geringer zu beurteilen. Die vorrangig für ungetränkte Textilien beobachtete Verbesserung der mechanischen Verzahnung, durch Eindringen der feinen Betonmatrix in das Rovingginnere, 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 Rovings haben hierauf Einfluss (Lorenz et al. 2011).

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 2016–2017 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 vorzeitigen 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 zum Beispiel 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 Bauteilversuche des Institutes

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

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

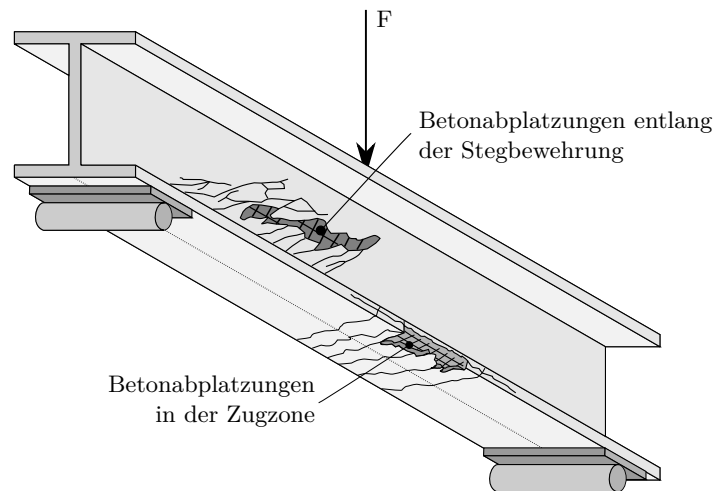


Abb. 3.1: Auftreten von Betonabplatzungen zufolge Spaltrisszugspannungen

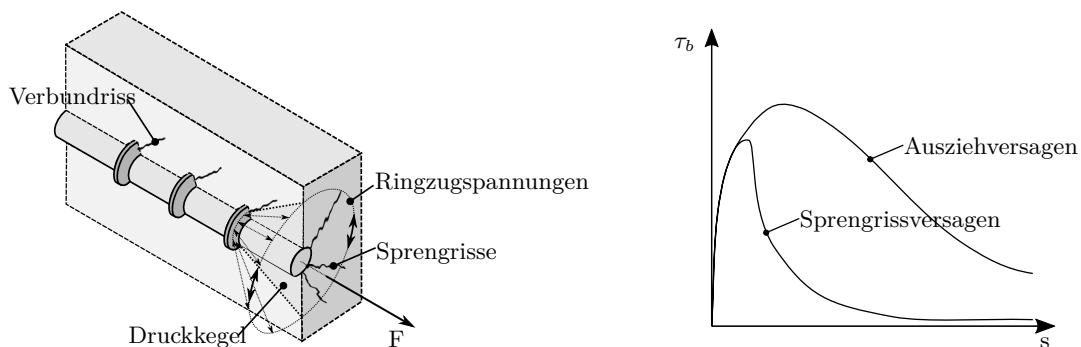
eine Längsrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung induziert, die bei weiterer Laststeigerung von der Mitte des Tragwerks bis zu den Auflagern fortgeschritten war. Durch die verbundlösende Wirkung fand ein kontinuierlicher Steifigkeitsverlust des Bauteils statt. Das tatsächliche Versagen des Bauteils erfolgte anschließend durch ein Verankerungsversagen der Bewehrung am Auflager. Ein Vergleich der rechnerisch ermittelten Bruchlast, unter Annahme einer vollen Materialausnutzung und der Gültigkeit der Bernoulli-Hypothese, mit der experimentell ermittelten Bruchlast zeigt ein Defizit der experimentell ermittelten Bruchlast gegenüber der theoretisch möglichen. Preinstorfer, Kromoser et al. (2019) 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 Trängung 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 Schubrisen 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, Schubrisen etc.) ausgehend induziert wird, ist sie mit dem dort auftretenden Schlupf und dem daraus resultierenden 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 wie im 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. 3.2). Wird die Betonzugfestigkeit überschritten, entsteht eine Sprengrissbildung im Beton (Tepfers 1979).



(a) Rissbildung zufolge Ringzugspannungen (b) VSB Auszug- bzw. Sprengrissversagen

Abb. 3.2: Verbundversagen im Stahlbetonbau zufolge Sprengrissbildung²

² Abbildung erstellt in Anlehnung an Zilch und Zehetmaier (2010).

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 schlagartigen 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 Sprenggrissbildung aufgrund von Ringzugspannungen, ähnlich wie im 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.

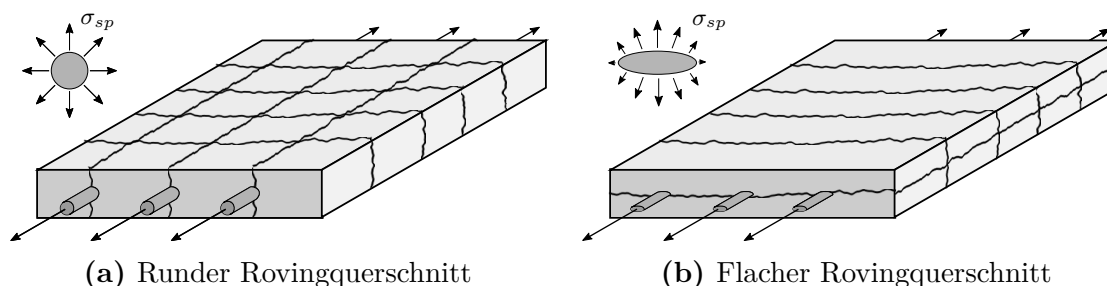


Abb. 3.3: Rissbildung in Abhängigkeit der Rovingquerschnittsform

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 Rovings 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 Rovings durch. Dabei konnte er diesen Effekt auch experimentell nachweisen (siehe Abb. 3.3).

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 Kreuzungspunkten lokal deformiert. In Längsrichtung entsteht so ein periodisches

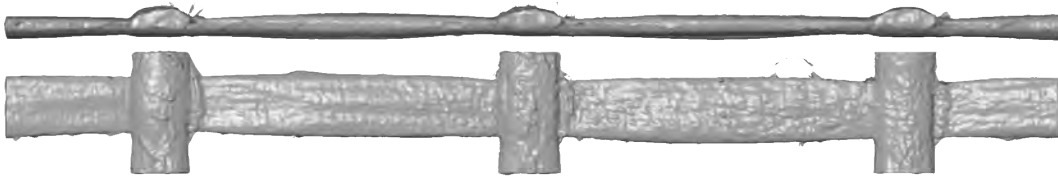


Abb. 3.4: Periodische Aufweitung der Rovings (Näheres dazu siehe Kap. 3.3.1.1)

Wellenmuster, welches ein lokales Minimum an den Kreuzungspunkten und ein lokales Maximum im halben Querovingabstand 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 Abbildung 3.4 zu sehen. Es zeigt sich, dass in der Draufsicht eine symmetrische Breitenaufweitung, dagegen 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 Kapitel 3.3.1.1 eingegangen.

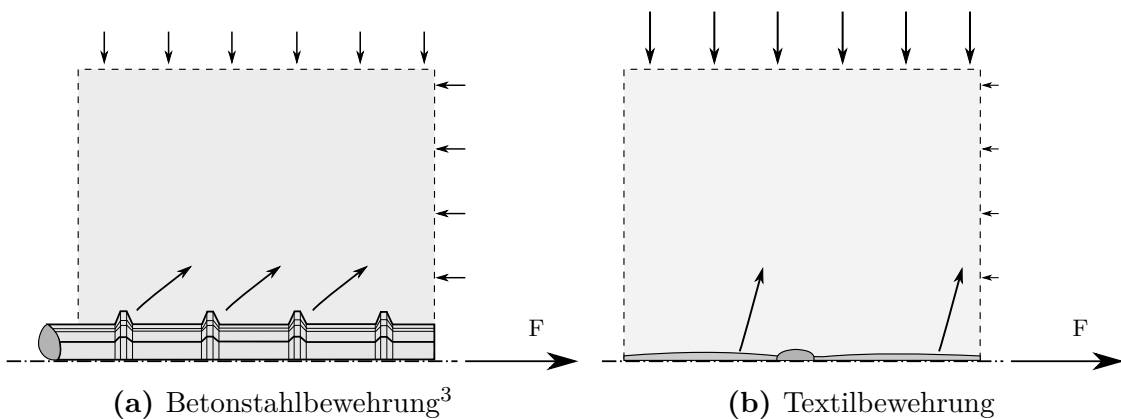


Abb. 3.5: Resultierende Druckstrebe zufolge des Formschlusses der Bewehrung mit dem Beton

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,

³ Abbildung 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 aufgebrauchte 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 Querrovingings.

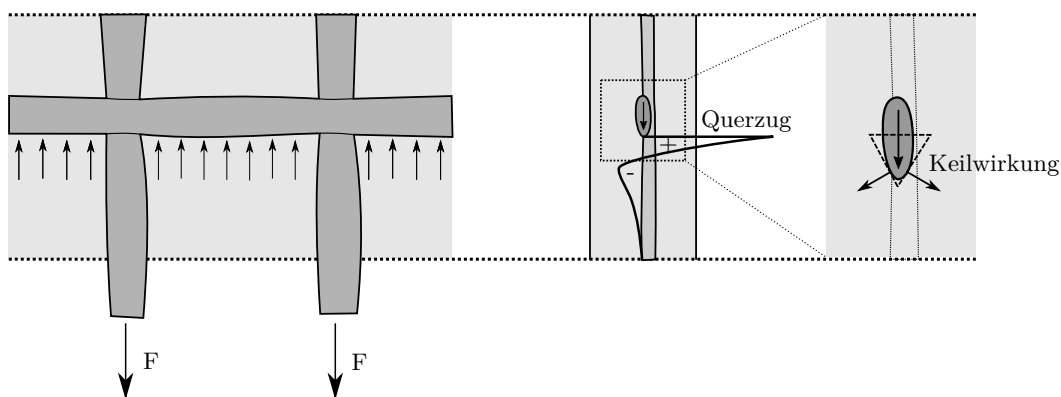


Abb. 3.6: Querkzugspannungen als Folge einer hohen Knotensteifigkeit⁴

Ähnliche Querkzugbeanspruchungen sind aus dem Stahlbetonbau bekannt, wenn etwa ein Querstab angeschweißt wird und so eine steife Knotenverbindung erzeugt wird oder bei Umlenkpressungen zufolge Stabkrümmungen. Voraussetzung für diese Pressungen im Textilbetonbau ist ein entsprechender Knotenwiderstand, um diese lokale Pressung unterhalb des Querstabes zu erzeugen. Verstärkt wird dieser Effekt durch die elliptische Form des Querrovingings. Dadurch kommt es zu einer Keilwirkung und einer ausgeprägten Kraftumlenkung orthogonal zur Ebene der textilen Bewehrung (siehe Abb. 3.6). Die entstehenden Spaltzugspannungen im Betonkörper führen bei Überschreiten der Betonzugfestigkeit zu der bereits beschriebenen 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 Rovings in der Textilmaschine abgelegt und anschließend verwirkt. Liegen die Filamente nicht in völlig gestreckter Lage vor, weisen die Rovings eine entsprechende Welligkeit auf. Lorenz et al. (2011) zeigten in ihren Untersuchungen, dass an den Wendepunkten Umlenkkräfte entstehen (siehe Abb. 3.7), die Betonabplatzungen begünstigen.

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

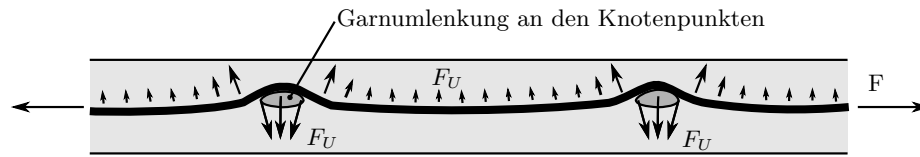


Abb. 3.7: Umlenkkräfte zufolge einer globalen Textilwelligkeit⁵

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 Rovings, 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, die der bereits beschriebenen Welligkeit gleichzusetzen ist. Detailliert behandelt wird diese Thematik in Kapitel 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 Versuchskonfigurationen zulässt. Dadurch können die unterschiedlichen Parameter und deren Einfluss auf die Spaltrissbildung isoliert betrachtet werden. Das entsprechende Versuchsprogramm ist in Abbildung 3.8 ersichtlich.

⁵ Abbildung erstellt in Anlehnung an Lorenz (2014).

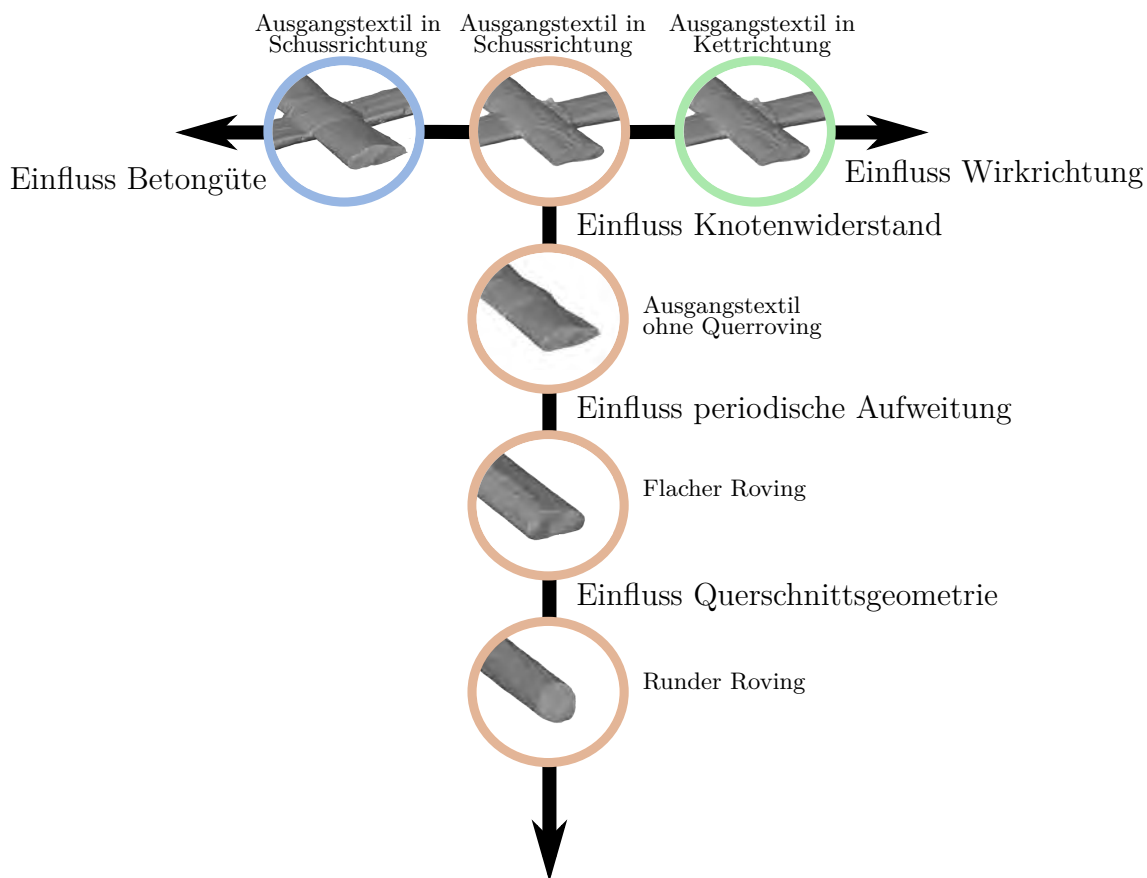


Abb. 3.8: Versuchsprogramm zur quantitativen Bestimmung der Einflussgröße einzelner Parameter auf die Spaltrissbildung

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 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 beim 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 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 wird. 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 das 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 Beschreibung der 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 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 Rovings zusammengefügt (schematisch erkennbar z. B. in Abb. 3.10b). Bei vorliegendem Textil wurden die einzelnen Faserstränge in Kett- und Schussrichtung aus zwei Rovings 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. Tabelle 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

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 ist die geometrische Beschaffenheit 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 und einem aufgebrauchten 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 $7\ \mu\text{m}$.

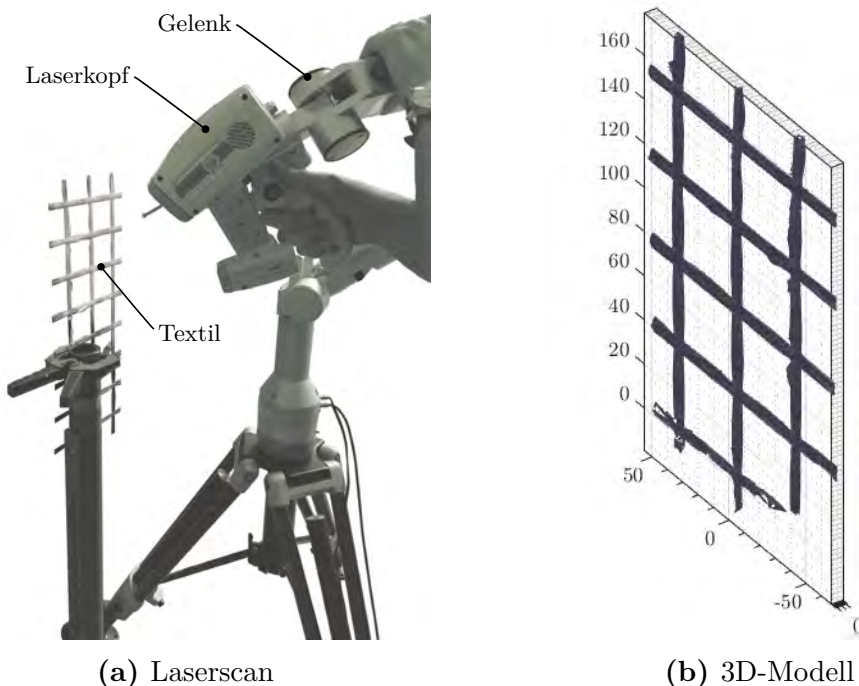


Abb. 3.9: Vermessung und Digitalisierung der Textilien

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 Untersuchung verwendet wurde, ist zum Beispiel GOM Correlate der Firma Gom 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 Abbildung 3.11 ersichtlich. Dabei wird jeweils ein Querschnitt im Knotenbereich und ein Querschnitt im Abstand $x = 19 \text{ mm}$ abgebildet (entspricht bei Faserstrang Typ S und K dem halben Querovingabstand). Typ R weist eine, wie in Abbildung 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 der Abbildung, dass dieser Faserstrang aus zwei Einzelrovings mit jeweils 3200 tex zusammengefügt wurde. Dadurch ergeben sich auch geringe Abweichungen von einer idealelliptischen Form. In beiden Fällen ergeben sich herstellungsbedingte Ungenauigkeiten, die jedoch auf die kurze Messstrecke bezogen gering ausfallen. In Abbildung 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 Abbildung 3.11d. Durch die Umschnürung mit dem Wirkfaden ergibt sich hier sogar eine noch flachere Form als beim Schussroving. Für die Bestimmung des mittleren Umfangs $U_{r,m}$ wird die gemessene Mantelfläche

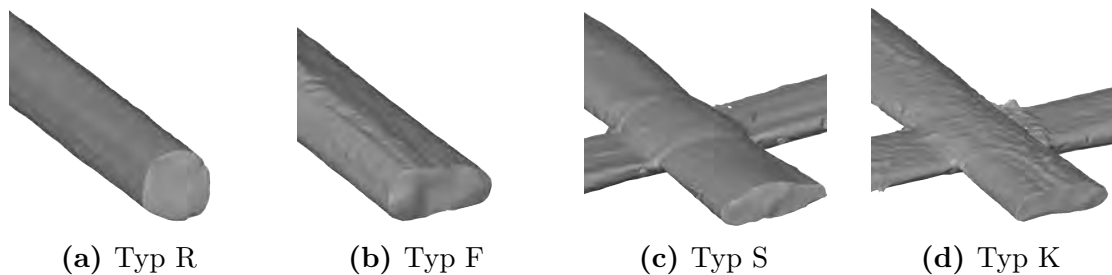


Abb. 3.10: Querschnittsformen der verschiedenen Faserstrangtypen

$A_{r,m}$ 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 VSB (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).

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

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

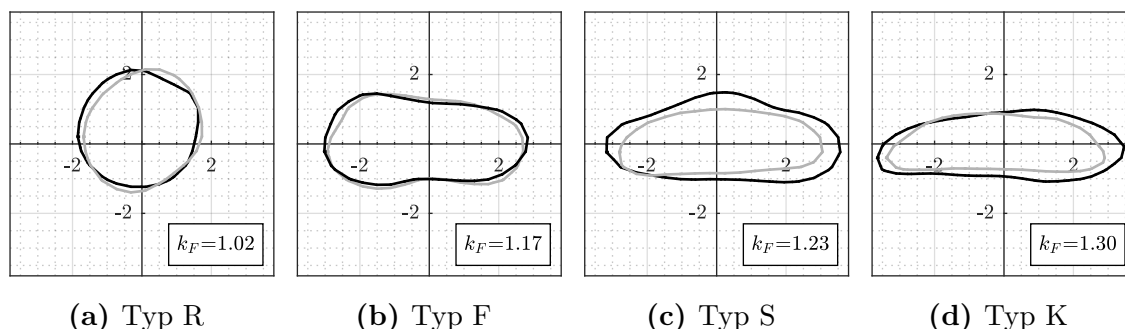


Abb. 3.11: Querschnittsabmessungen der einzelnen Faserstrangtypen; grau – Querschnitt im Knotenbereich ($x = 0,0$ mm), schwarz – Querschnitt in der Feldmitte ($x = 19,0$ mm)

Für die Beschreibung der Querschnittsform wird 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 denselben 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 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 der Feldmitte des Rovings⁷ im Vergleich zum Kreuzungsbereich des Rovings beschreibt.

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

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

⁷ Die Feldmitte bezeichnet im Folgenden die Stelle im halben Querrovingsabstand vom Knotenbereich.

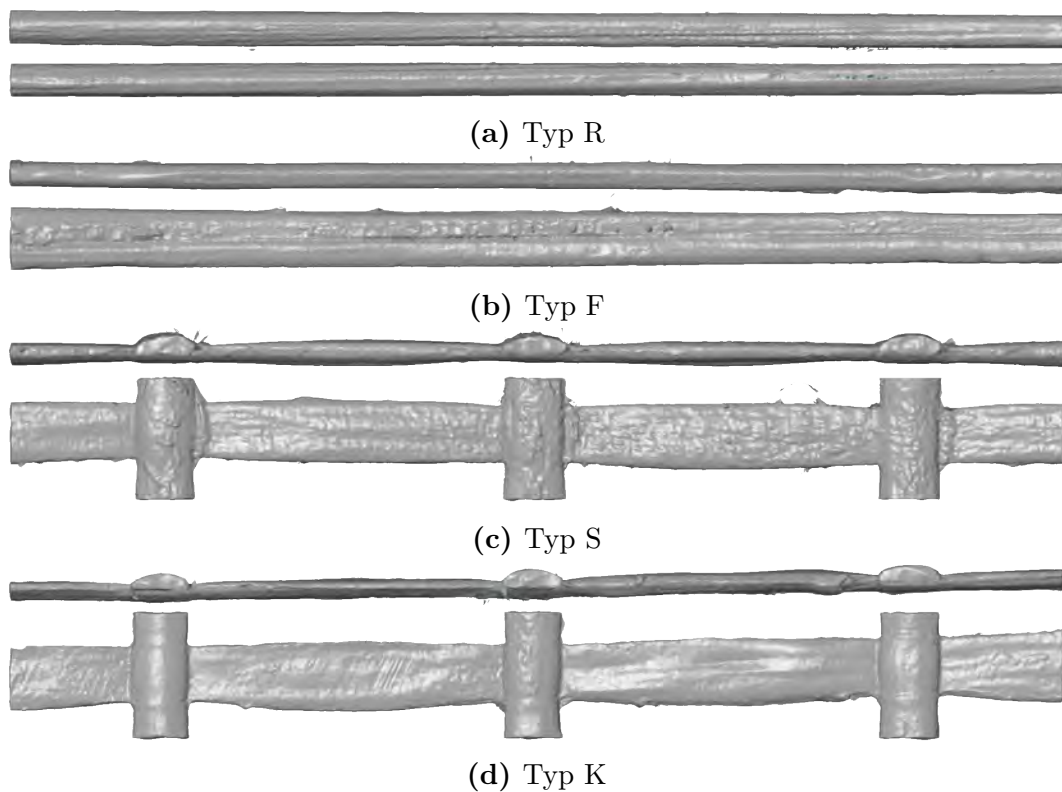


Abb. 3.12: Darstellung der verschiedenen Faserstrangtypen in Längsrichtung

mit:

- $A_{r,F}$ Flächeninhalt in der Feldmitte des Rovings [mm^2]
- $A_{r,K}$ Flächeninhalt im Kreuzungsbereich des Rovings [mm^2]

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 entsteht einerseits, wenn die Faserstränge nicht in gestreckter Form vorliegen, andererseits kann eine asymmetrische Dickenaufweitung vorliegen, die zu einer Exzentrizität der Faserstrangachse führt und so in weiterer Folge eine Garnwelligkeit erzeugt. Zur Beschreibung dieser Garnwelligkeit wird ein 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 Abbildung 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. Die zusammengefassten geometrischen Kennwerte sind in Tabelle 3.2 ersichtlich. Die unterschiedlichen Kennwerte für den Schussroving (Typ S) bzw. den Kettroving (Typ K) des Ausgangstextils lassen sich durch die Herstellungsmethode

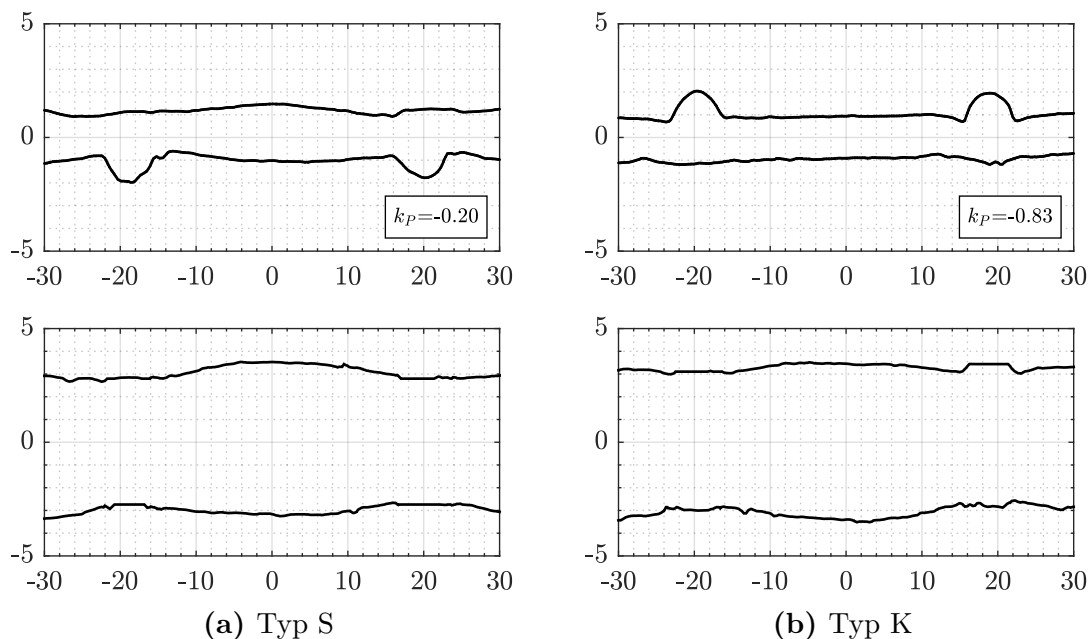


Abb. 3.13: Längsschnitt in Dickenrichtung (oben) und Breitenrichtung (unten)

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 Tränkungsprozess 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 der 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 bezüglich der Verarbeitbarkeit angepasst. Die Betonzusammensetzung ist durch einen hohen Bindemittelgehalt und ein Größtkorn $\leq 0,5$ mm gekennzeichnet. Bei den Untersuchungen zum Einfluss

⁸Die geometrischen Kennwerte wurden mit MatLab ermittelt.

der Betongüte wurde für die Betonmatrix der Versuchskonfiguration Typ O eine Betonfestigkeitsklasse 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 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 sie aber einen wesentlich geringeren w-B-Wert auf. Um dennoch eine gute Verarbeitbarkeit zu gewährleisten, ist ein Zusatz von ca. 60 kg/m³ an Fließmitteln notwendig. Die jeweiligen genauen Betonzusammensetzungen sind in Tabelle 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 Abbildung 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, 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

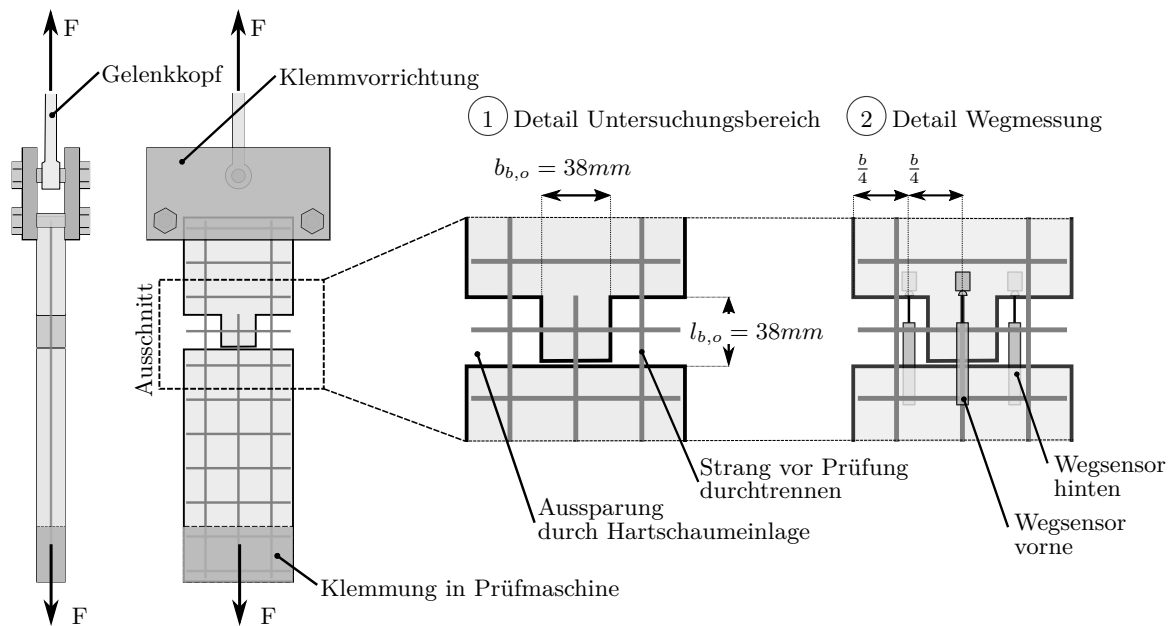


Abb. 3.14: Versuchsaufbau und Messtechnik der experimentellen Untersuchungen

Aspekt ist bei der Versuchskörperkonzeptionierung unbedingt Acht zu geben. Für die hier beschriebenen Untersuchungen lagen die zu erwartenden Prüfkkräfte, und die daraus resultierenden Betonzugspannungen an dieser Stelle, deutlich unterhalb der Betonzugfestigkeit, wodurch ein frühzeitiges Versagen ausgeschlossen werden konnte.

Versuchskörper: Für die Herstellung der eigenen Versuche wurde die Verschmälerung im Untersuchungsbereich mit einer Aussparung aus PE-Hartschaum, welche direkt in die Schalung platziert wurde, erzielt. Die Einbindelänge des zu testenden Faserstrangs 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 Quersfaserstrang 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 Quersfaserstrangs genau in der Mitte des Untersuchungsbereiches zu liegen kam. Durch Einlegen einer PE-Folie wurde zudem ein vordefinierter Sollriss hergestellt, an dem die einzelnen Faserstränge ausgezogen wurden. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 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 siebten Tag in einem Wasserbecken gelagert. In einem letzten Schritt wurden die Prüfkörper aus dem Wasserbad genommen und bis zum Prüfbeginn in einer Klimakammer bei 20° C und 60 % Luftfeuchtigkeit gelagert. Insgesamt wurden für jede Versuchskonfiguration fünf Versuchskörper hergestellt. Die Dicke der Versuchs-

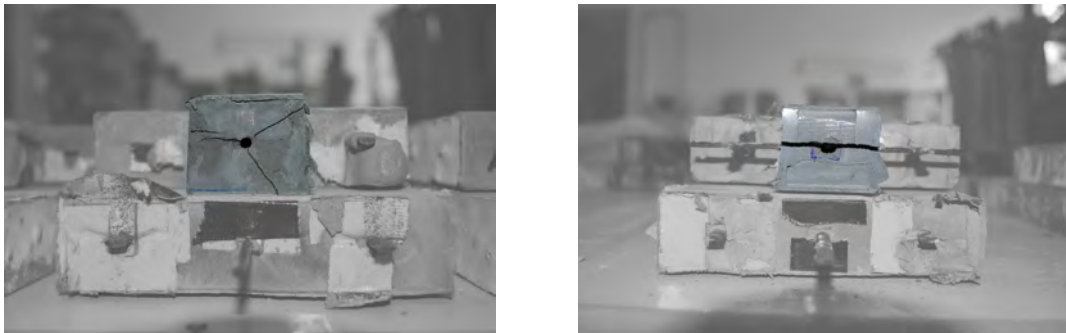
körper wurde für alle Konfigurationen mit 30 mm gewählt. Dies entspricht einer Betondeckung von ca. 15 mm. Zusätzlich wurden für jede Betonage Prüfkörper zur Messung der Betoneigenschaften angefertigt, welche gemeinsam mit den eigentlichen Versuchskörpern nachbehandelt wurden. Diese bestanden einerseits aus Prismen (40/40/160 mm) nach ÖNORM EN 196-1 (2016) zur Messung der Biegezug- und der Spaltzugfestigkeit, andererseits aus Würfeln (100/100/100 mm) zur Messung der Betondruckfestigkeit. Die ermittelten Kennwerte für die einzelnen Versuchskörper sind in Tabelle 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 Rissöffnung wurde über drei auf dem Versuchskörper applizierten induktiven Wegaufnehmer aufgezeichnet, 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 der experimentellen Untersuchungen

3.3.3.1 Rissbildung im Betonkörper

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; Preinstorfer, Kromoser et al. 2018). Für runde Rovinge wurden radiale Längsrisse festgestellt, wobei diese Risse je Versuchskörper zufällig entlang des Umfangs der Bewehrung verteilt waren (siehe Abb. 3.15a). Bei allen anderen Faserstrangtypen – gemeinsam ist ihnen die flache Form des zu testenden Rovings – konnte eine Längsrissbildung ausschließlich in der Ebene der textilen Bewehrung festgestellt werden (siehe Abb. 3.15b). Dies entspricht der in dieser Arbeit definierten Spaltrissbildung.



(a) Versuchskörper Typ R

(b) Versuchskörper Typ F

Abb. 3.15: Rissbildung in Abhängigkeit der Querschnittsform

3.3.3.2 Allgemeines zur Auswertung

Die erhaltenen Messgrößen aus dem Auszugversuch, F und w , werden in den folgenden Abschnitten in einer Kraft-Rissöffnungsbeziehung (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 vor (Rissflanke stützt sich gegenseitig ab), wird der Versuchskörper nicht in die Auswertung miteinbezogen. Abbildung 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 abrupten Abfall der Verbundkraft auf den Wert F_f (Bereich b). Die anschließend übertragbare Verbundkraft ergibt sich aus der Reibung zwischen Textilbewehrung und umgebender Matrix

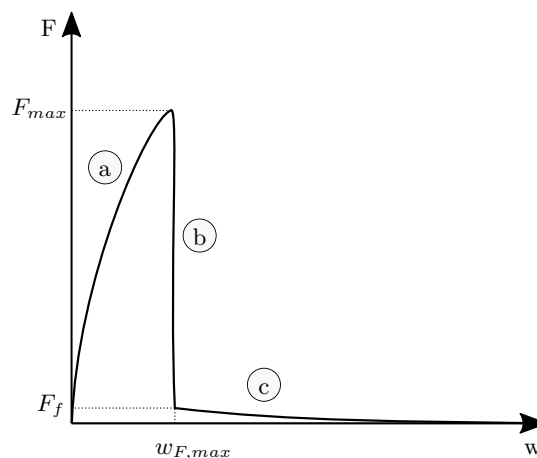


Abb. 3.16: Charakteristische KRB in den vorliegenden Untersuchungen

und nimmt mit fortlaufendem Auszug aufgrund der größer werdenden Rissbreite kontinuierlich ab, bis keine Kraft mehr übertragen werden kann (Bereich c). Die weitere Auswertung gliedert sich in die folgenden drei Schritte:

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 jeweils in j -Intervalle unterteilt (für vorliegende Untersuchungen wurde $j = 100$ gewählt) und die zugehörigen Messwerte je Intervall gemittelt. Der weiterführende Verlauf in Abschnitt c wird in festen Intervallen mit einer Länge von 0,01 mm gemittelt. Die Auswertung für alle Versuchskonfigurationen ist in Abbildung 3.21 (Spalte 1) bzw. detaillierter in Anhang A ersichtlich.

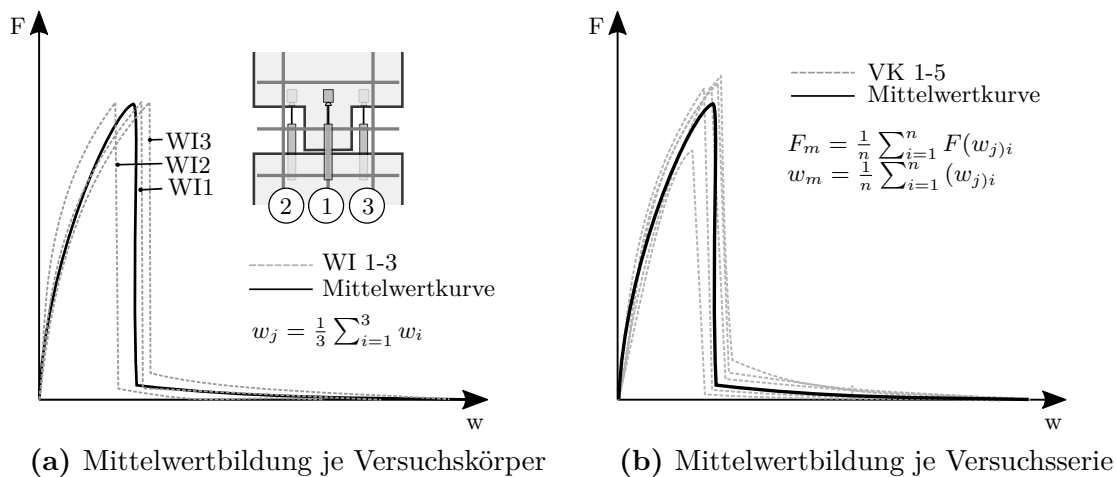


Abb. 3.17: Bestimmung der gemittelten KRB je Versuchsserie

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 Untersuchungsbereiches, 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 Abbildung 3.18 ersichtlich.

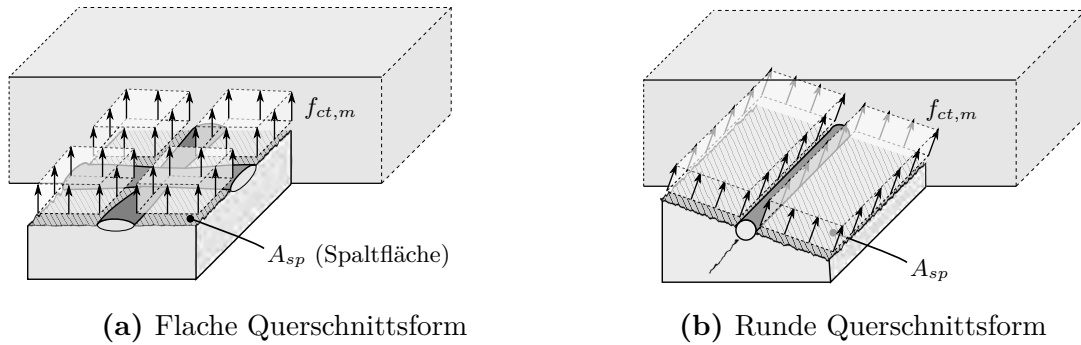


Abb. 3.18: Bestimmung des Spaltwiderstandes⁹

Das Verhältnis von der Prüfkraft zum Betonwiderstand gibt Auskunft über das Belastungsniveau bei beginnender Längsrissbildung im Versuchskörper (Abb. 3.21; Spalte 2). Die gemittelten Messwerte und der zugehörige gemittelte Widerstand sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst. Die ersten beiden Spalten geben die gemittelte Auszugskraft F_{max} und die zugehörige Rissöffnung $w_{F,max}$ wieder. Spalte drei bis fünf betreffen die Spaltfläche A_{sp} bzw. die Spaltzugfestigkeit $f_{ctm,sp}$ und die gemittelte Betonzugfestigkeit in der Spaltfläche $f_{ct,m}$. Daraus wird der in Spalte sechs angegebene Widerstand $F_{sp,R}$ ermittelt. Die Gegenüberstellung der Einwirkung mit dem Widerstand erfolgt in Spalte sieben.

Tab. 3.4: Auszugswiderstand 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	0,982
Typ O	4139,1	0,5582	1193,3	6,03	4,02	4797,1	0,863
Typ F	2860,2	1,3853	1163,8	6,03	4,02	4678,4	0,611
Typ R	3561,8	2,1102	1313,8	6,03	4,02	5281,5	0,674
Typ K	3774,3	0,3989	916,3	6,03	4,02	3683,4	1,025
Typ U	4679,3	0,6004	1092,9	9,71	6,47	7074,7	0,661

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 Abbildung 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.

⁹ Der 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 Ermittlung des Betonwiderstandes in der Spaltfläche $F_{sp,R}$ wird entsprechend den Ergebnissen in Kapitel 4.5 eine gemittelte Betonzugfestigkeit $f_{ct,m}$, die zwei Drittel der Spaltzugfestigkeit $f_{ctm,sp}$ beträgt, angenommen.

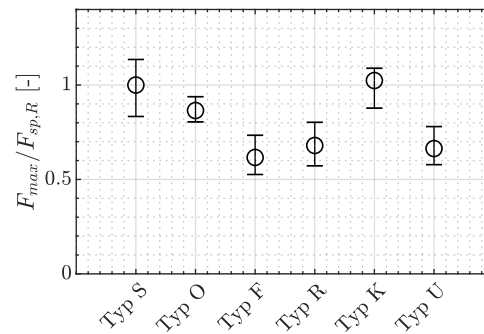


Abb. 3.19: Verhältnis der Verbundbeanspruchung F_{max} zum Spaltwiderstand $F_{sp,R}$

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 bedeutet 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 Abbildung 3.21 (Spalte 3) bzw. detaillierter in Anhang A ersichtlich.

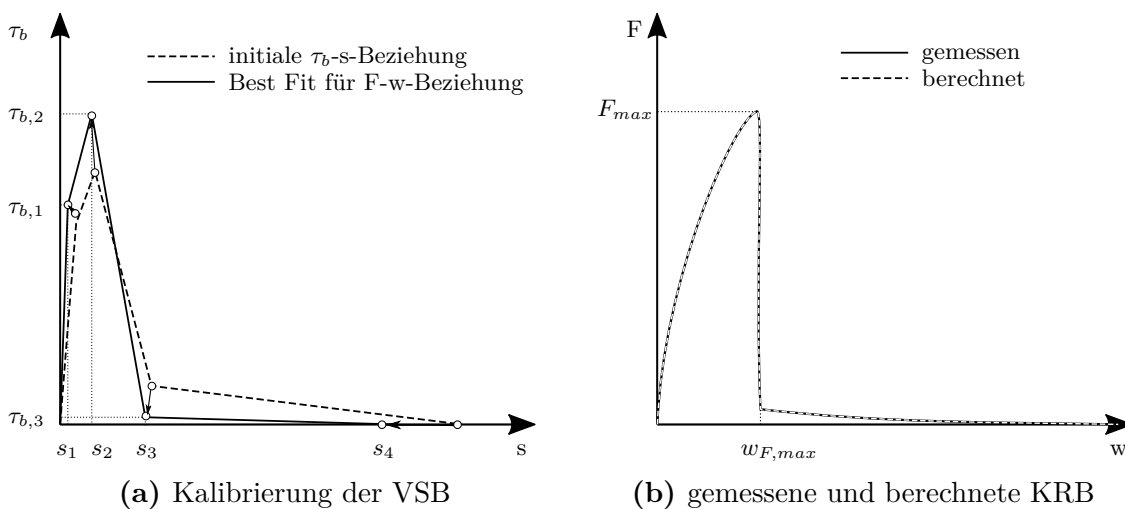


Abb. 3.20: Inverse Bestimmung der VSB

3.3 Experimentelle Untersuchungen zur Spaltrissbildung

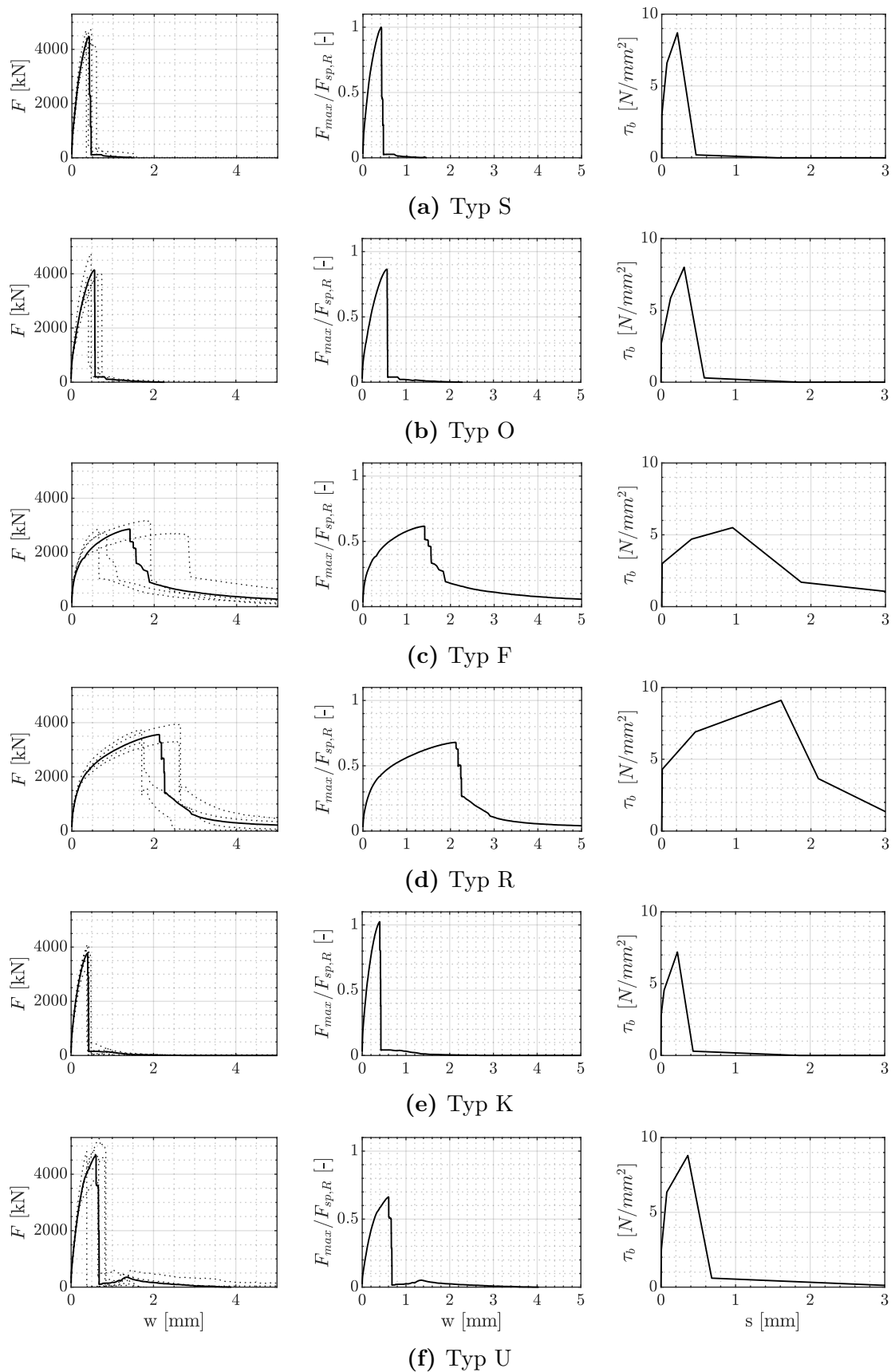


Abb. 3.21: Versuchsergebnisse: KRB (links), KRB normiert (Mitte), VSB (rechts)

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 noch einmal detaillierter angeführt und um weitere Untersuchungen ergänzt. Dabei wird auf das vorgestellte Versuchskonzept in Abbildung 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 $F_{max}/F_{sp,R}$ verwendet.

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 Querverstränge 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).

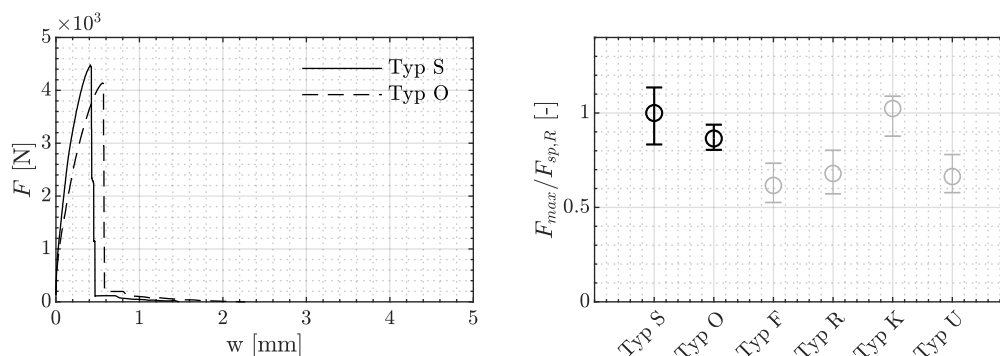


Abb. 3.22: Vergleich zum Einfluss des Knotenwiderstandes

Der Knotenwiderstand ist im Allgemeinen vom Wirkfadensystem, dem Wirkfadendruck sowie der Steifigkeit und Festigkeit des Tränkungsmaterials abhängig. Diese Parameter sind zwar veränderbar, im vorliegenden Fall liegt aber ein Textil mit einem vergleichsweise sehr hohen 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 der Versuchskörper Typ O (Ausgangstextil in Schussrichtung, ohne Querroving) und Typ F (flache

Rovingform ohne periodische Aufweitung) können weitreichende Unterschiede im Verbundverhalten festgestellt werden (siehe Abb. 3.23 links). 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.

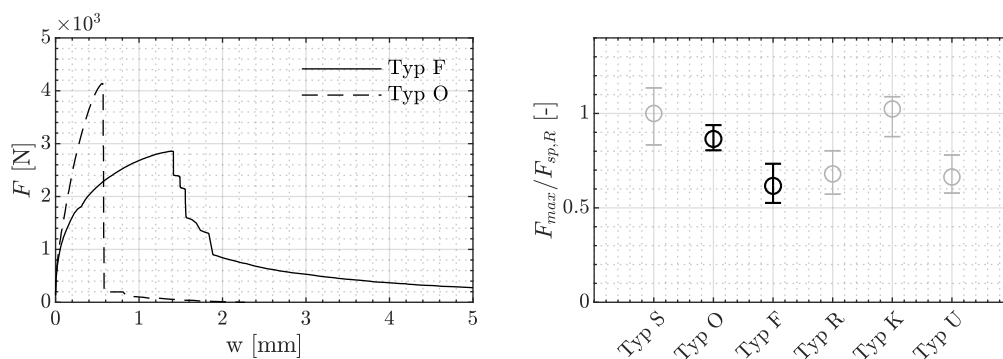


Abb. 3.23: Vergleich zum Einfluss der periodischen Aufweitung

Beim Betrachten des Belastungsniveaus bei Spaltbeginn stellte sich heraus, dass Faserstrang Typ O in der Lage war, höhere Verbundkräfte zu übertragen als Typ F (siehe Abb. 3.23 rechts). 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 (siehe Abb. 3.24). Beide Versuchskonfigurationen versagten durch eine Sprenggrissbildung. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale konnten hierbei in der Rissorientierung festgehalten

werden. Wie bereits in Kapitel 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 Sprenggrissbildung, 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.

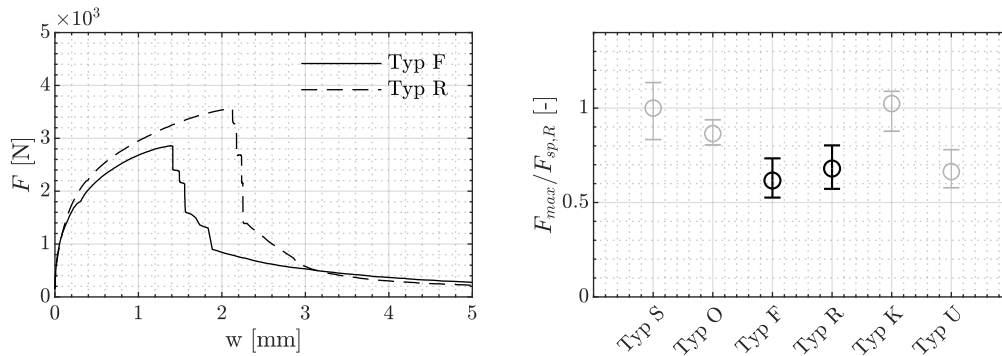


Abb. 3.24: Vergleich zum Einfluss der Querschnittsform

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 auf die fehlende Aufweitung in Dickenrichtung zurückgeführt wird. Das Belastungsniveau bei Spaltbeginn hingegen ist für beide Versuchskörper annähernd gleich (siehe Abb. 3.25).

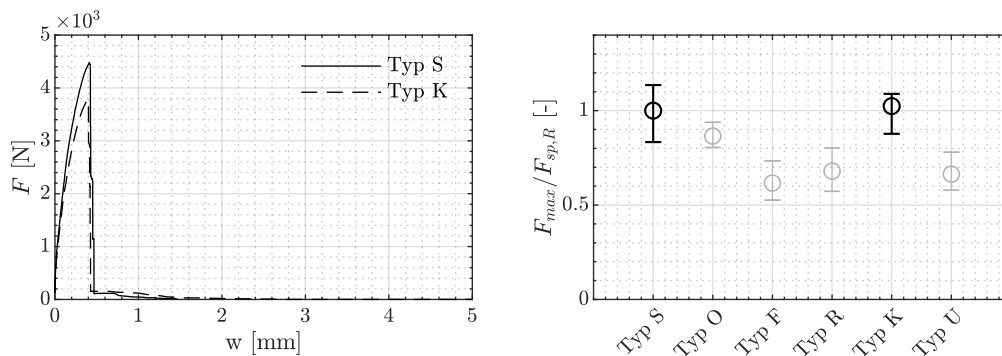


Abb. 3.25: Vergleich zum Einfluss der Wirkrichtung

Bei der numerischen Parameterstudie in Kapitel 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 ein 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 die Versuchskörper Typ S (Ausgangstextil in Schussrichtung) und Typ U (Ausgangstextil in Schussrichtung, Betongüte UHPC) verglichen. Beide Typen weisen denselben Faserstrang und die 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 sich die höhere Festigkeit nicht merklich in den Ergebnissen widerspiegelt. Zwar ist eine geringe Laststeigerung möglich, diese fällt im Vergleich zur höheren Festigkeit aber sehr gering aus (siehe Abb. 3.26 rechts). 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 (siehe Abb. 3.26 links).

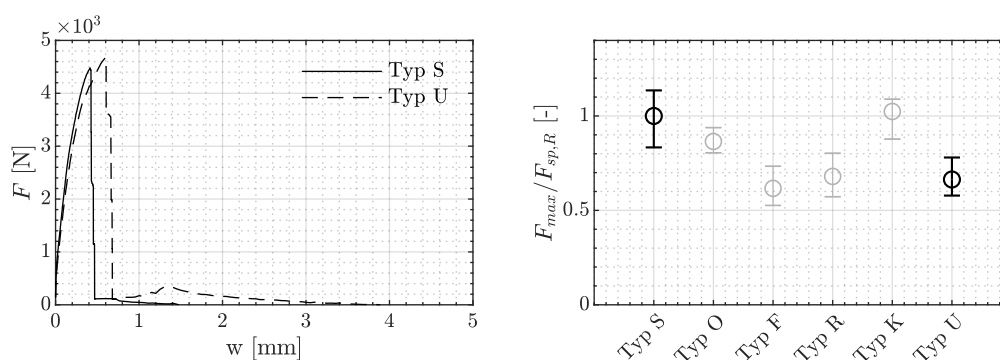


Abb. 3.26: Vergleich zum Einfluss der Betongüte

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 Aktivierte 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.

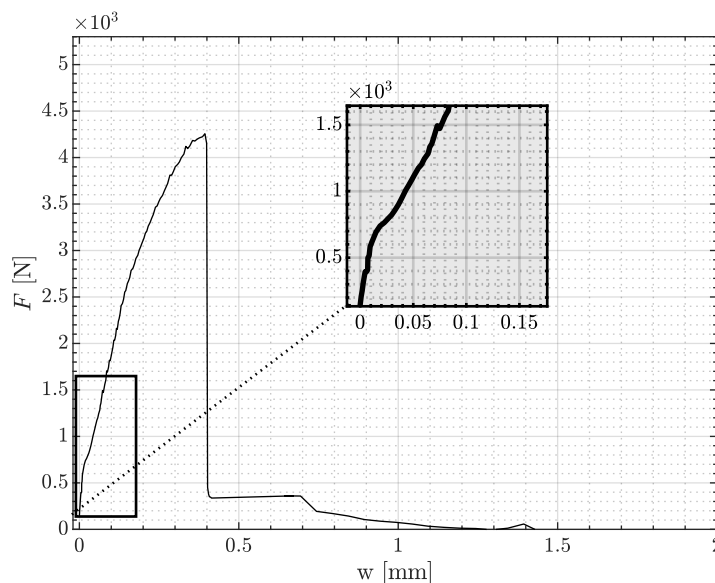
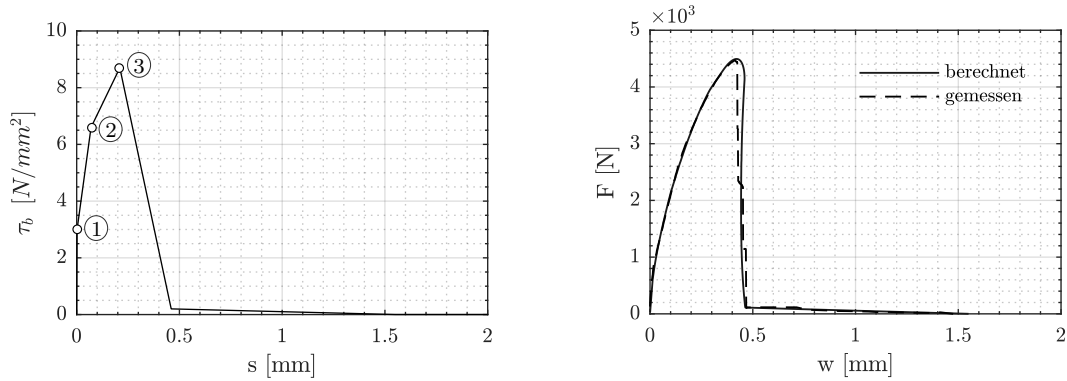


Abb. 3.27: Übergang vom Haft- zum Formverbund für VK Typ S

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- (b) Vergleich zwischen gemessener und berechneter Kraft- Rissöffnungsbeziehung Beziehung

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

In Abbildung 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 sie 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. Da dieses Verhalten die Realität nur näherungsweise widerspiegelt, wird in den FE-Berechnungen in den folgenden Abschnitten gezeigt. Dennoch können 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 Sprenggrissbildung 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 beobachteten 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, 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 Rovings), 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 niederfesten 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, bei denen 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 sich der Verbund zwischen einer Textilbewehrung und dem Beton 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 Finite-Elemente (FE)-Berechnungen versucht, die Verbundmechanismen und Spannungsverteilungen im Inneren der Versuchskörper nachzuvollziehen.

4 Finite-Elemente-Analyse

4.1 Allgemeines zur 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 Rovings, 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 und in Folge besser interpretieren zu 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 Programm ABAQUS/CAE von 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 ist in Abbildung 4.1 ersichtlich.

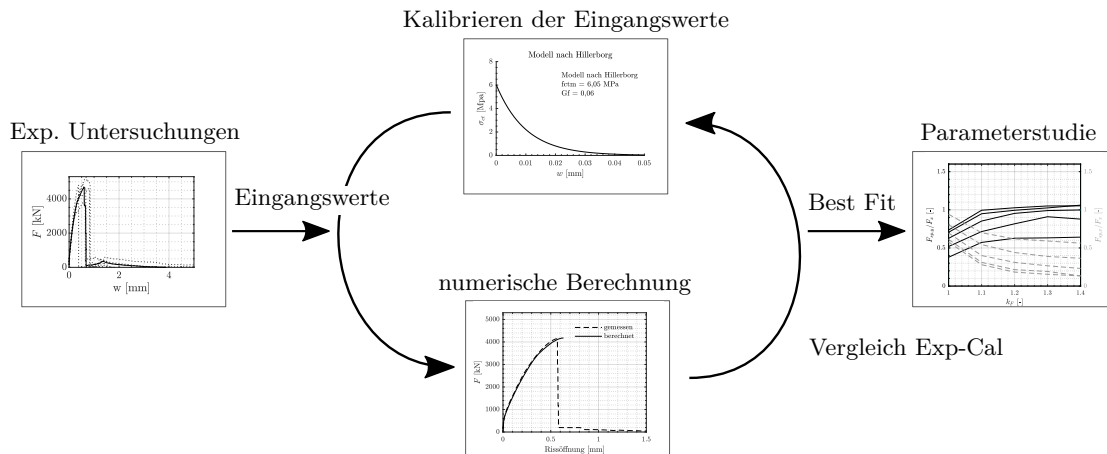


Abb. 4.1: Vorgehensweise für die FE-Berechnungen

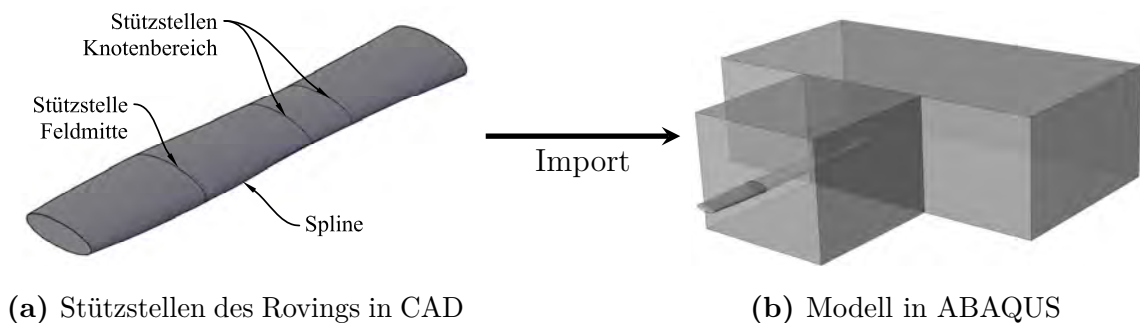
Für die Etablierung eines FE-Modells wurden in einem ersten Schritt geometrische und physikalische Modellparameter anhand der bekannten Randbedingungen bestimmt (Kap. 4.2). In der weiteren Folge wurden die physikalischen Modellparameter (dies betrifft insbesondere das Interface) an den bestehenden Versuchsdaten 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 Kapitel 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 textildbewehrten Bauteilen.

4.2 Modellierung

4.2.1 Geometrie des Modells

Modelliert wird in weiterer Folge der Untersuchungsbereich des Versuchskörpers aus Kapitel 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, indem der Querschnitt an markanten Stützstellen definiert wird. Der Verlauf zwischen den Stützstellen wird durch einen 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 Lage des Rovings im Betonkörper ist äquivalent zu den experimentellen Untersuchungen so definiert, dass der Knotenbereich in der Mitte des Verbundbereichs zu liegen kommt und der Roving in Feldmitte aus dem Betonkörper austritt. 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).



(a) Stützstellen des Rovings in CAD

(b) Modell in ABAQUS

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} , von dem E-Modul E_{c0} , sowie einem Duktilitätsbeiwert D (siehe Gl. 4.1)

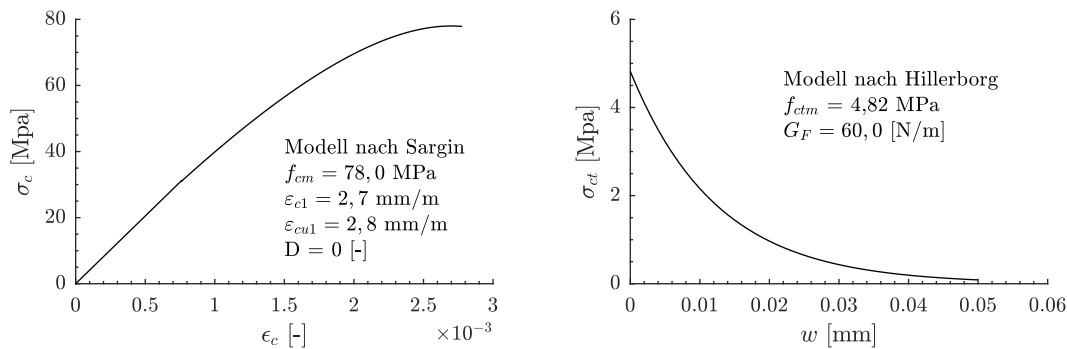
$$\sigma_c = f_{cm} \cdot \frac{k \cdot \eta - (D - 1) \cdot \eta^2}{1 + (k - 2) \cdot \eta + D \cdot \eta^2} \quad (4.1)$$

mit:

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

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 Abbildung 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 Abbildung 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 ein Formfaktor K_c sowie das Verhältnis von zweiachsigem zu einachsigem Betonfestigkeit σ_{b0}/σ_{c0} anzugeben (siehe Abb. 4.4).

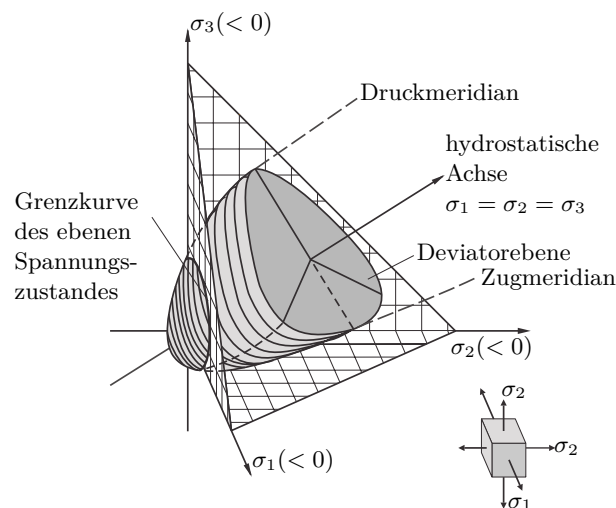


Abb. 4.4: Bruchhypothese für Beton mit $K_c = 0,67^2$

Wird der elastische Bereich verlassen, erfolgt die Beschreibung des Materialverhaltens über ein nichtassoziertes 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

¹ Die 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.

² Auszug aus Zilch und Zehetmaier (2010).

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

Berechnungen sind in Tabelle 4.1 angeführt und größtenteils den Empfehlungen aus Herbrand et al. (2016) entnommen.

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

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 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 Gleichung 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 von 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 Tabelle 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 Modellierung des Interfaces

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 Kapitel 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 K (K_{tt}, K_{ss}, K_{nn}) 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 bestimmt) bei Überschreiten eines festgelegten Schlupfes in der Verbundfuge angenommen (siehe Abb. 4.5a). Die Startwerte vor einer allfälligen Kalibrierung wurden den Berechnungen aus Kapitel 3.3.3.4 entnommen. Die nach der Kalibrierung gewählten Eingangswerte sind in Tabelle 4.3 angeführt.

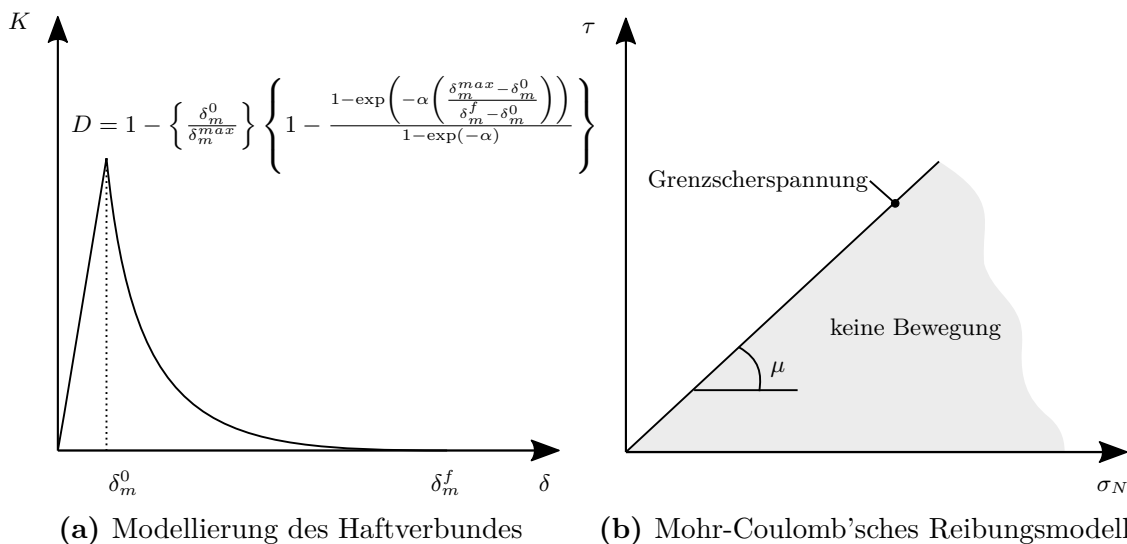


Abb. 4.5: Interfacemodellierung in ABAQUS⁴

Reibung: Für die Beschreibung des Reibverbundes wird die Mohr-Coulomb'sche Reibungshypothese verwendet. Die Grenzscherspannung ergibt sich zufolge

⁴ Adaptiert nach Abaqus (2019), Kapitel 37.1.5.

dieser Hypothese aus der wirkenden Normalspannung in der Verbundfuge multipliziert 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 beispielsweise 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 $\nu = 0,50$ gewählt (dieser Beiwert wurde von Krüger 2004 für epoxidharzgetränkte Carbontextilien ermittelt). Im weiteren Verlauf wurde dieser Wert anhand der eigenen Messkurven kalibriert. Der kalibrierte Wert ist ebenfalls in Tabelle 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.

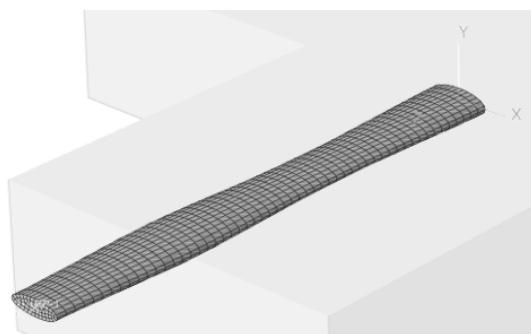
Tab. 4.3: Gewählte Parameter zur Modellierung des Interfaces

K [N/mm ³]	δ_m^0 [mm]	δ_m^f [mm]	α [-]	ν [-]
1000	0,004	0,4	0,05	0,5

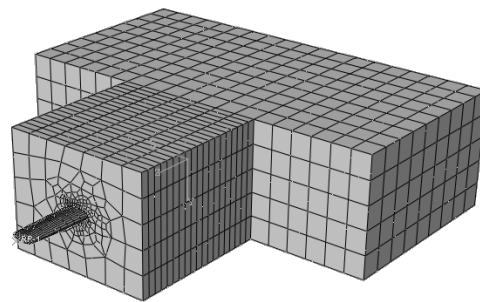
Abschließend zum Verbundverhalten ist anzumerken, dass die gewählten Parameter in Tabelle 4.3 mit Unsicherheiten behaftet sind, da sie im Wesentlichen nur an den Versuchen kalibriert wurden. Eine Sensitivitätsanalyse hat aber gezeigt, dass die gewählten Werte zwar Einfluss auf das Verformungsverhalten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

4.2.4 Gewähltes 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 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 5,00 mm gewählt. Die Netzkantenlängen im Untersuchungsbereich des Betonkörpers wurden entsprechend der Netzteilung des Rovings an den Anschlussstellen verfeinert. Dadurch ergibt sich das in Abbildung 4.6b ersichtliche FE-Netz für den Betonkörper.



(a) Gewähltes FE-Netz des Rovings

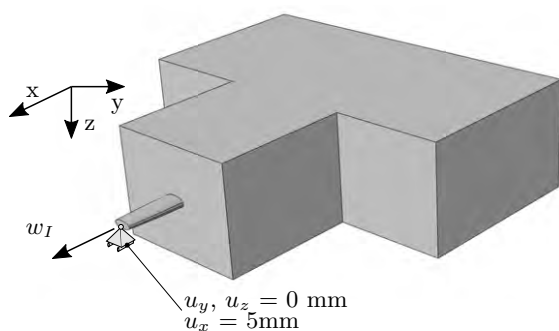


(b) FE-Netz des Betonkörpers

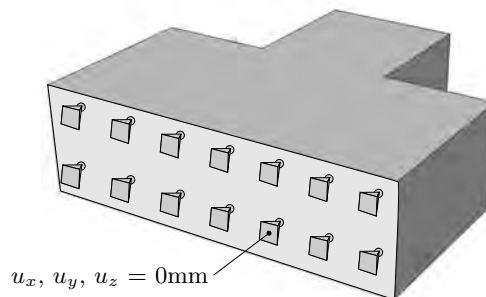
Abb. 4.6: FE-Netz des Gesamtmodells

4.2.5 Randbedingungen des Modells

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. Die Lastaufbringung erfolgt weggesteuert, bis zu einer



(a) Lastaufbringung



(b) Lagerung

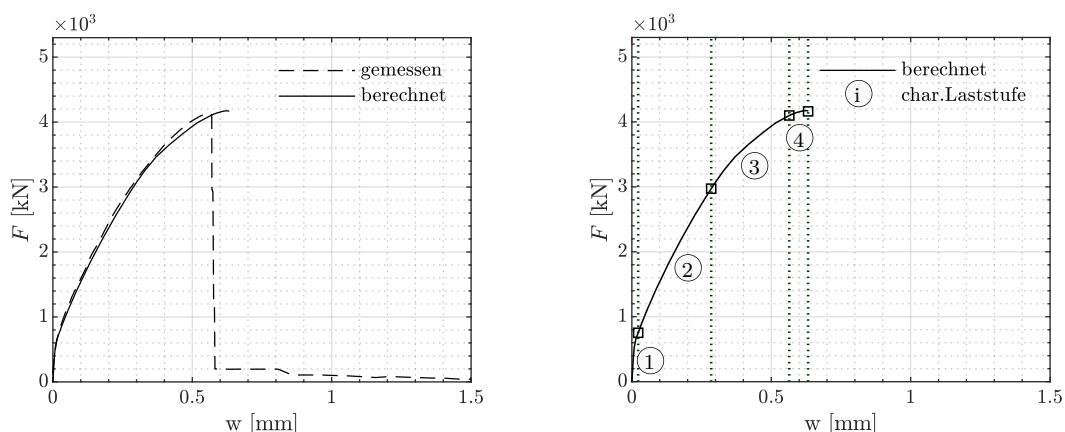
Abb. 4.7: Randbedingungen des Modells zur Simulation der Versuchsdurchführung

maximalen Verformung von $u_x = 5$ mm, in einer Zeitspanne von 1000 sec. Zusätzlich ist eine Randbedingung am Referenzpunkt definiert ($u_y, u_z = 0$ 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 Newton-Raphson-Verfahren durchgeführt. Die Lastaufbringung erfolgt inkrementell in mehreren Zeitschritten. Die Gegenüberstellung der gemessenen mit der berechneten Versuchskurve (nach Kalibrierung) für Roving Typ O aus Kapitel 3.3 (Referenztextil Typ S ohne Querroving) ist in Abbildung 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 Crack 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 Auszugswiderstandes 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 aufgebracht Last. Für vorliegende Untersuchungen konnten vier charakteristische Laststufen identifiziert werden, in denen sich das Verhalten unterscheidet. Diese sind in Abbildung 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.

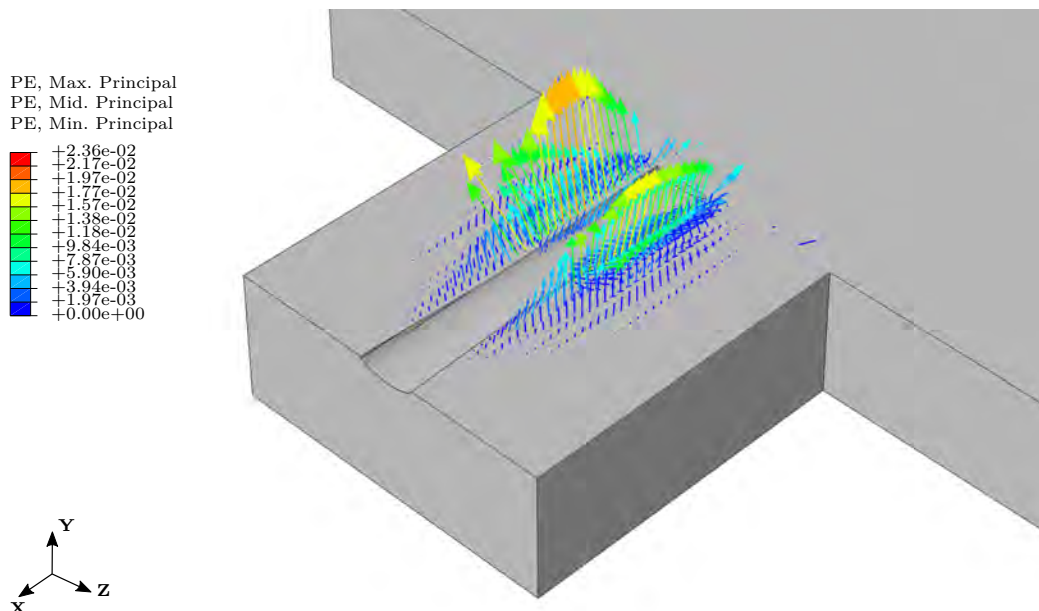


Abb. 4.9: Vektorielle Darstellung der plastischen Dehnungen in Haupttrichtung unmittelbar vor dem Versagen als Indikator für eine Rissbildung

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 Beispiel sind in Abbildung 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 Abbildung 4.10 sind die Hauptspannungen σ_{min} , σ_{mid} und σ_{max} für den vorliegenden Untersuchungsgegenstand abgebildet. 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 orthogonal zur Ebene der textilen Bewehrung am größten ausfallen. Es entstehen zwar auch Querkzugbeanspruchungen in der Ebene der textilen Bewehrung, diese sind in ihrer Größenordnung aber wesentlich geringer (mehr dazu im nächsten Abschnitt).

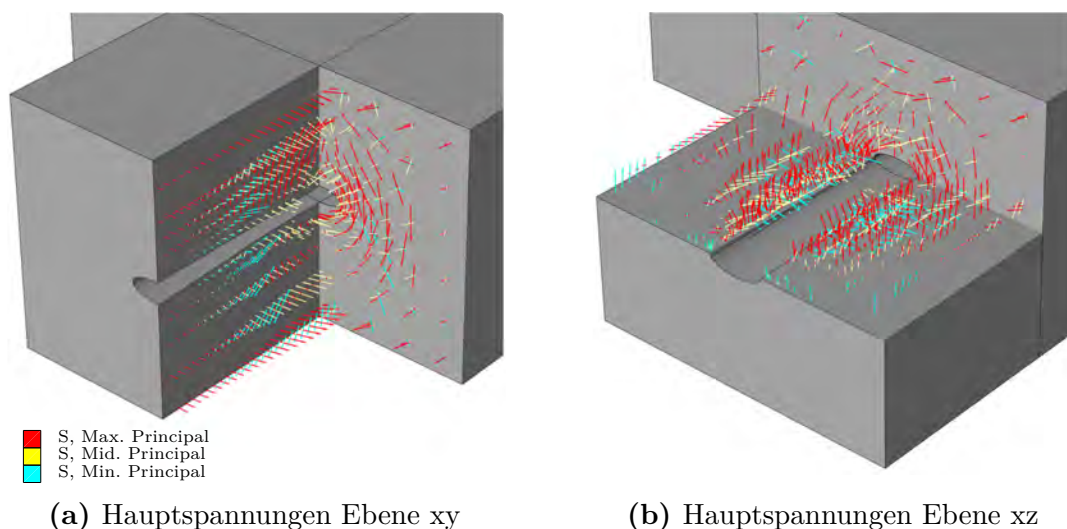


Abb. 4.10: Darstellung der Hauptspannungen σ_{min} , σ_{mid} und σ_{max}

4.3.3 Dehnungen und Spannungen im Betonkörper

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).

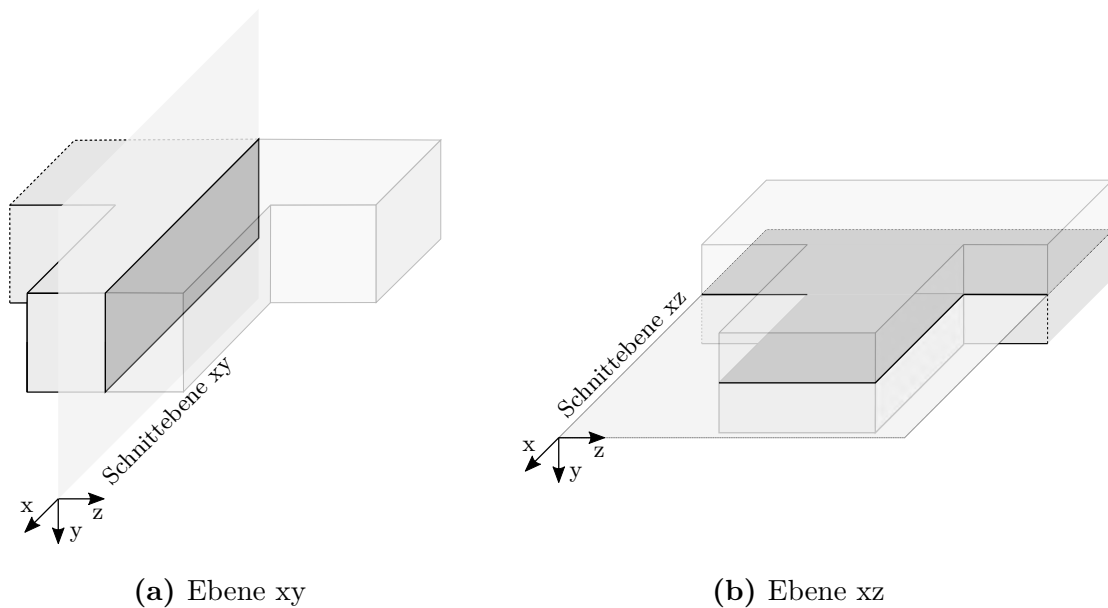
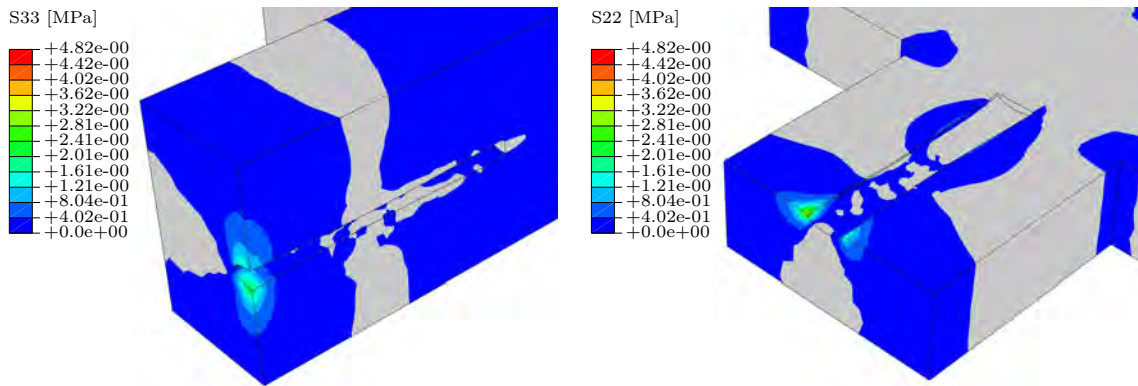


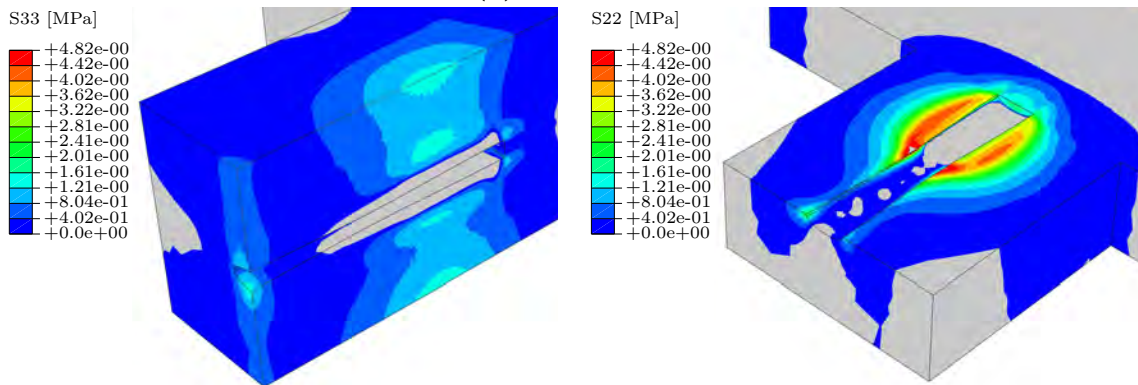
Abb. 4.11: Schnittführung entlang des Versuchskörpers für die Auswertung

In einem ersten Schritt soll die Darstellung der Spannungen (σ_{22} entspricht σ_{yy} und σ_{33} entspricht σ_{zz}) einen zusätzlichen Überblick über den Kraftfluss innerhalb des Bauteils geben und die Größenordnung der spaltrissbildenden Spannungen wiedergeben (siehe Abb. 4.12). Es werden nur die Zugspannungen angezeigt. Diese sind in der Darstellung mit der einaxialen Betonzugfestigkeit (siehe Kap. 4.2.2) begrenzt. Aufgrund des mehraxialen Spannungszustandes können sich geringfügige lokale Überschreitungen ergeben. In einem zweiten Schritt soll durch die Darstellung der Gesamtdehnungen und der anteiligen inelastischen Dehnungen eine Rissbildung im Untersuchungsbereich abgeleitet werden. Wie in weiterer Folge gezeigt wird, finden inelastische Dehnungen hauptsächlich in der Ebene der textilen Bewehrung statt. Aus diesem Grund wird die Darstellung und Gegenüberstellung der Gesamtdehnungen mit den inelastischen Dehnungen nur im Schnitt xz angeführt.

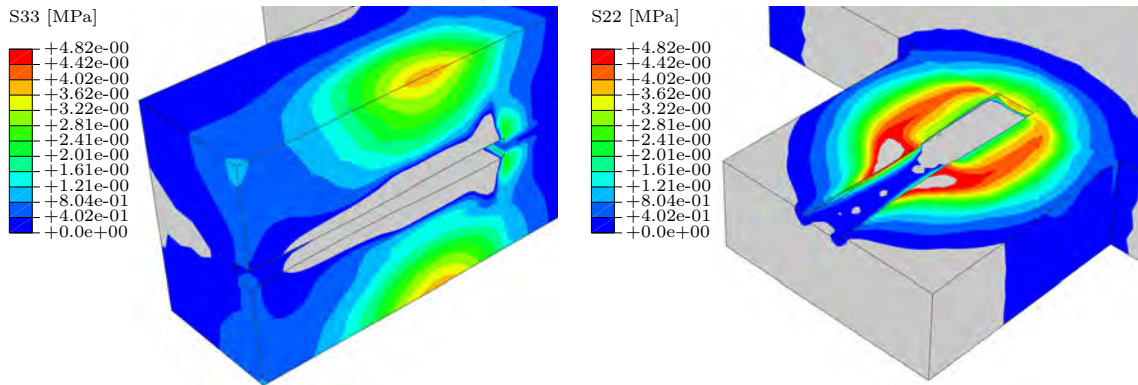
In Abbildung 4.12 ist der Übergang vom Haftverbund zum Reib- und Formverbund gut zu erkennen. Während in Abbildung 4.12a, in der die Spannungsverteilung innerhalb der Laststufe 1 dargestellt ist, sich die Spannungen aufgrund des dort auftretenden Schlupfes weitestgehend an der Rissflanke konzentrieren, 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



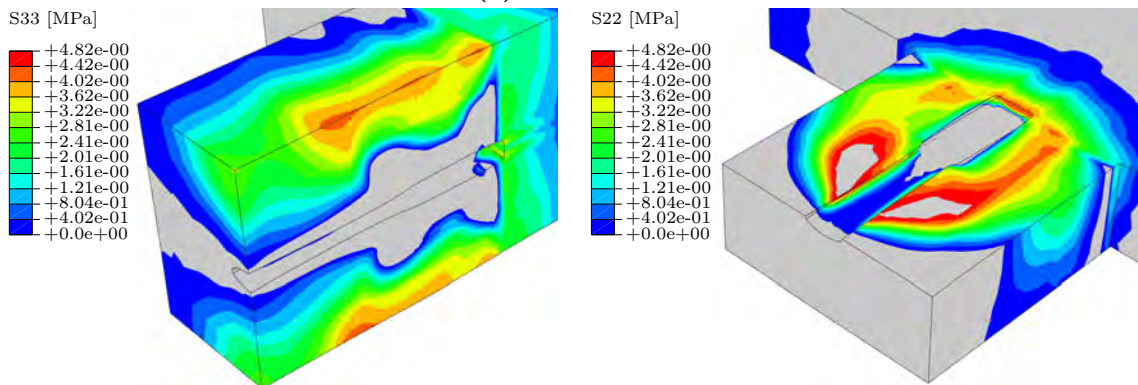
(a) Laststufe 1



(b) Laststufe 2

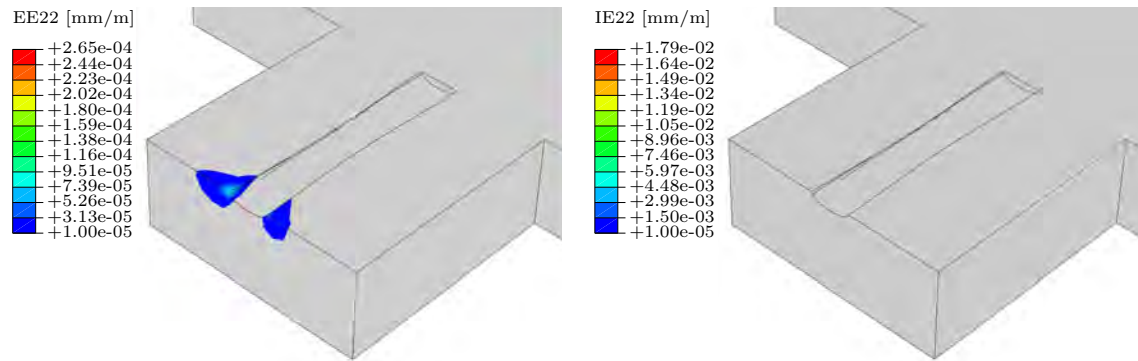


(c) Laststufe 3

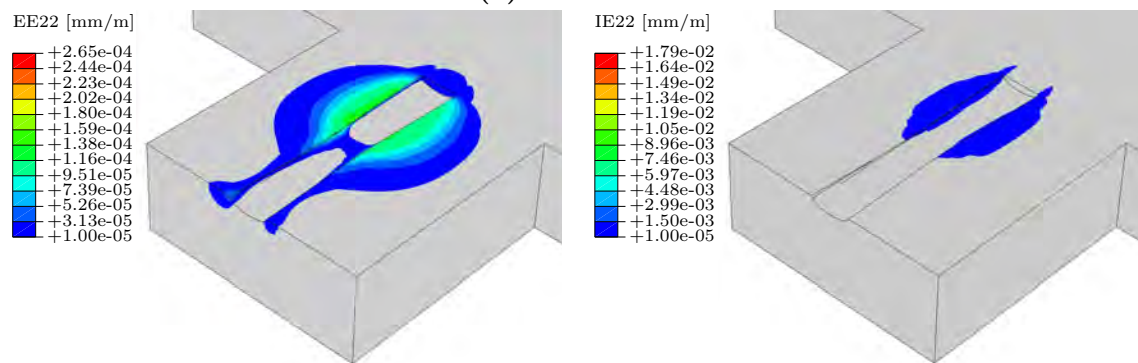


(d) Laststufe 4

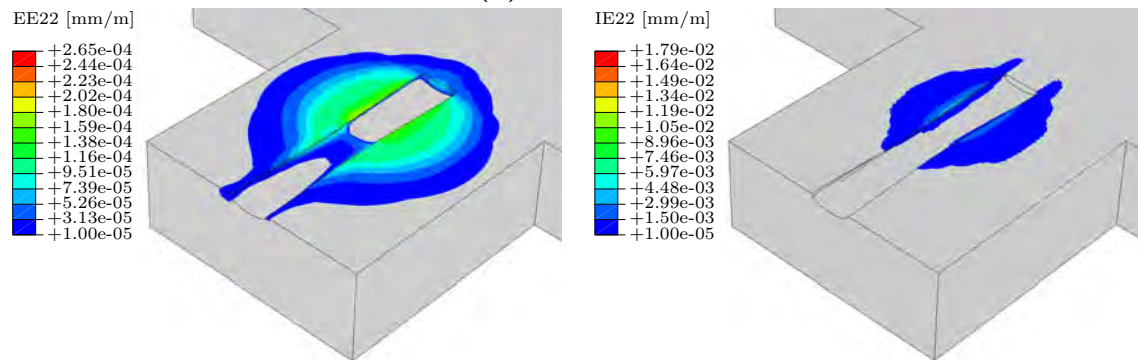
Abb. 4.12: Spannungsverteilung (links) σ_{33} , (rechts) σ_{22}



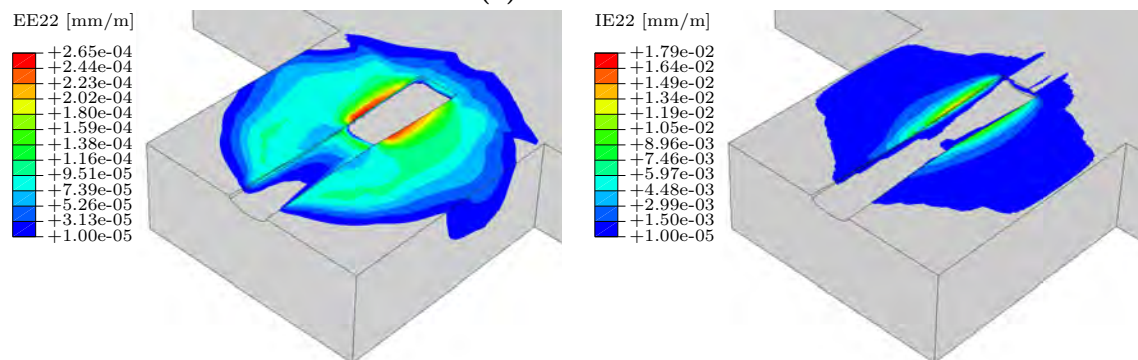
(a) Laststufe 1



(b) Laststufe 2



(c) Laststufe 3



(d) Laststufe 4

Abb. 4.13: Dehnungen (links) gesamt $\varepsilon_{e,22}$, (rechts) inelastisch $\varepsilon_{ie,22}$

4.3.4 Erkenntnisse aus der FE-Berechnung

Mit den vorangegangenen FE-Berechnungen konnte der Kraftfluss während eines Pull-out-Versuches innerhalb des Untersuchungsbereiches anschaulich 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 belastet sind. In Bezug auf die Spaltrissbildung konnten die bisherigen Erfahrungen mit den FE-Berechnungen gestützt werden. Bei Belastung entstehen hohe Quersugbeanspruchungen 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 Abbildung 4.15 sind exemplarisch für eine Laststufe $F_x \approx 3000$ N die resultierenden Spaltzugkräfte, welche aus den Spannungen, die orthogonal auf die Schnittführung wirken, integriert wurden, einmal orthogonal zur Ebene der textilen Bewehrung (Abb. 4.15a) und einmal in der Ebene der textilen Bewehrung (Abb. 4.15b) dargestellt.

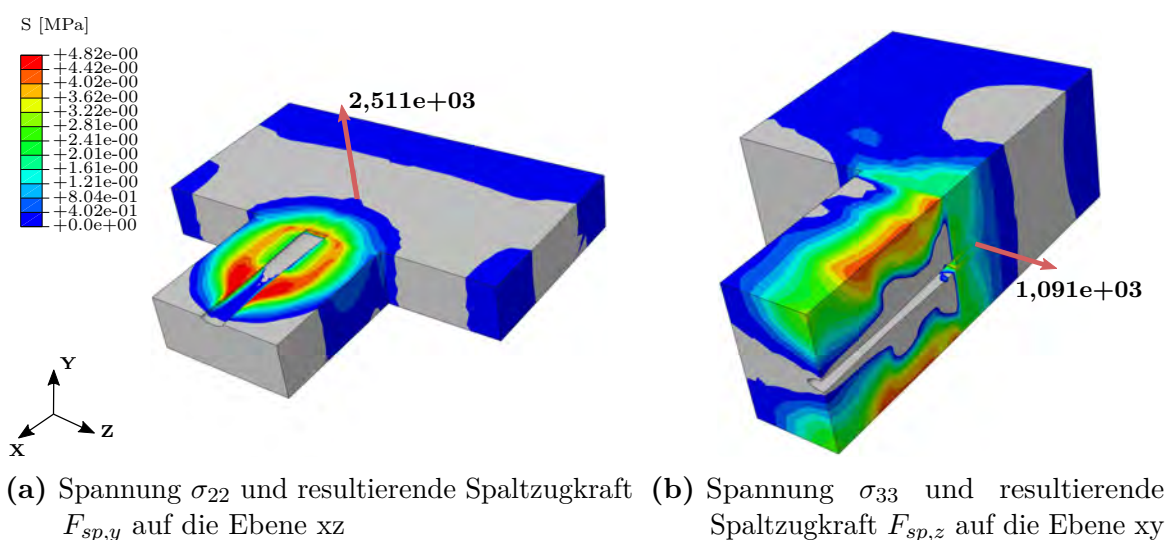


Abb. 4.15: Berechnung der resultierenden Spaltzugkräfte

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 Tabelle 4.4 sind die entsprechenden Spaltzugkräfte bei ebendieser Auszugslast $F \approx 3000$ N zusammengefasst. Bei Gegenüberstellung ergibt sich eine um den Faktor 2,30 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]	[-]
21	3087	2511	1091	2,30

4.4 Parameterstudie

4.4.1 Untersuchte Parameter

In den bisherigen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass bei Textilien, welche mit einer steifen Tränkung versehen sind, geometrische Eigenschaften der Rovings die Größe der Spaltzugbeanspruchung wesentlich beeinflussen. 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 Kapitel 3.3.1.1 eingeführten geometrischen Kennwerte zurückgegriffen und werden 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 Kapitel 4.2 vorgestellt wurde. Die jeweiligen Parameter sind in Abbildung 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 Untersuchungsbereiches – entspricht näherungsweise der Betondeckung; siehe Abb. 4.16b).

Um den Modellierungsaufwand in ABAQUS zu reduzieren wird die Eingabe des Modells, mit sämtlichen Eingabeparametern wie in Kapitel 4.2 beschrieben, in einem

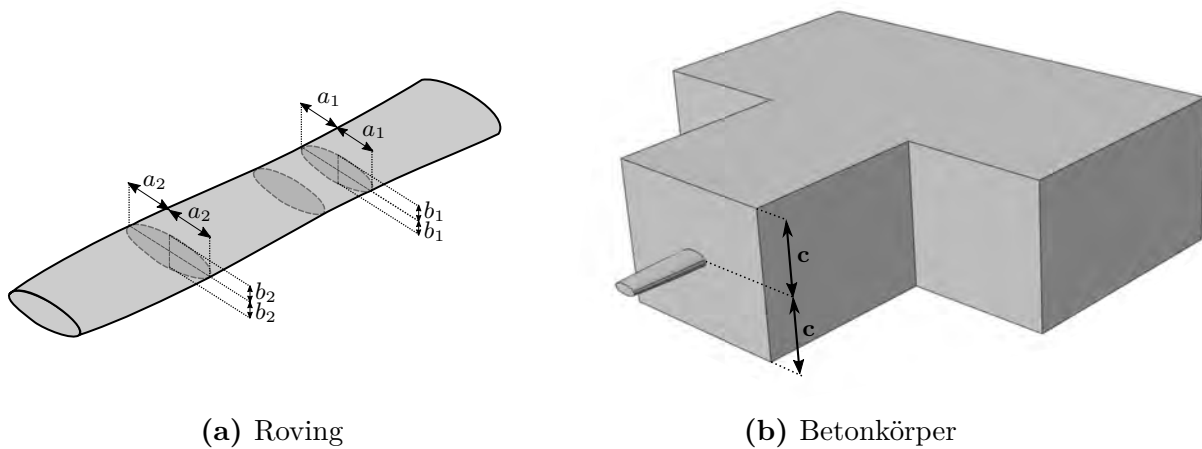


Abb. 4.16: Parameter, die im Zuge der Studie variiert wurden

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 in 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 Visual Basic for Applications (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 Tabelle 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 Flächenparameters 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 $k_F = 1,2$ sowie $k_P = -0,5$ 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

Parameter zur Beschreibung der:

k_F Garnform

k_P Dominanz der Aufweitung

k_A Größe der Aufweitung

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 erhält man als Ausgabewerte 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). Zusätzlich von Interesse sind die resultierenden Spaltzugkräfte $F_{sp,y}$ (entspricht einer Spaltzugkraft orthogonal auf die Ebene der textilen 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 Kapitel 4.3.4 integriert (in Abb. 4.17 exemplarisch dargestellt für die Schnittebene xz – analoge Vorgehensweise für die Schnittebene xy).

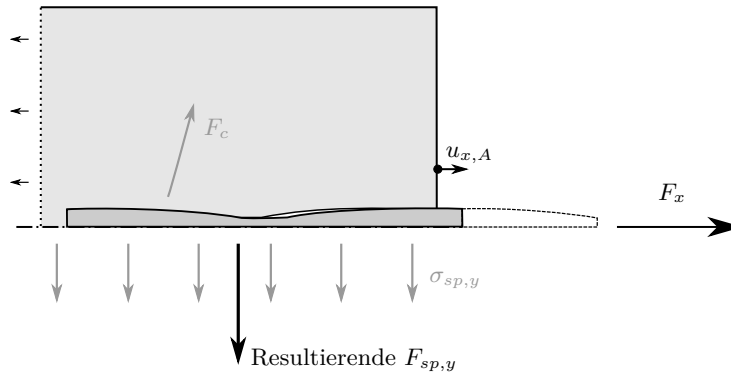


Abb. 4.17: Ausgabewerte aus ABAQUS nach erfolgter Berechnung

4.4.2 Ergebnisse der Parameterstudie

Allgemeines: Die Ergebnisse der geometrischen Parameterstudie am Roving werden nachfolgend in 3D-Plots dargestellt. Für die Auswertung wird eine Laststufe gewählt, in welcher der Beton sich 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 , auf der y -Achse der Parameter k_P in den jeweiligen Parametergrenzen aufgetragen. Für die z -Koordinate wird in einem ersten Plot das Verhältnis $F_{sp,y}/F_{sp,z}$ aufgetragen, welches Aufschluss über die Verteilung der jeweiligen Spaltzugkräfte in Abhängigkeit der Geometrie des Rovings gibt. 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 Messpunkten eine lineare Approximation stattfindet. In Abbildung 4.18 sind diese 3D-Plots, jeweils in Abhängigkeit des Flächenfaktor k_A , abgebildet. Dabei können Aspekte beobachtet werden, die die Erkenntnisse aus den vorausgegangenen experimentellen und numerischen Untersuchungen ergänzen. So ist festzustellen, dass das Verhältnis von $F_{sp,y}/F_{sp,z}$ sowohl 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

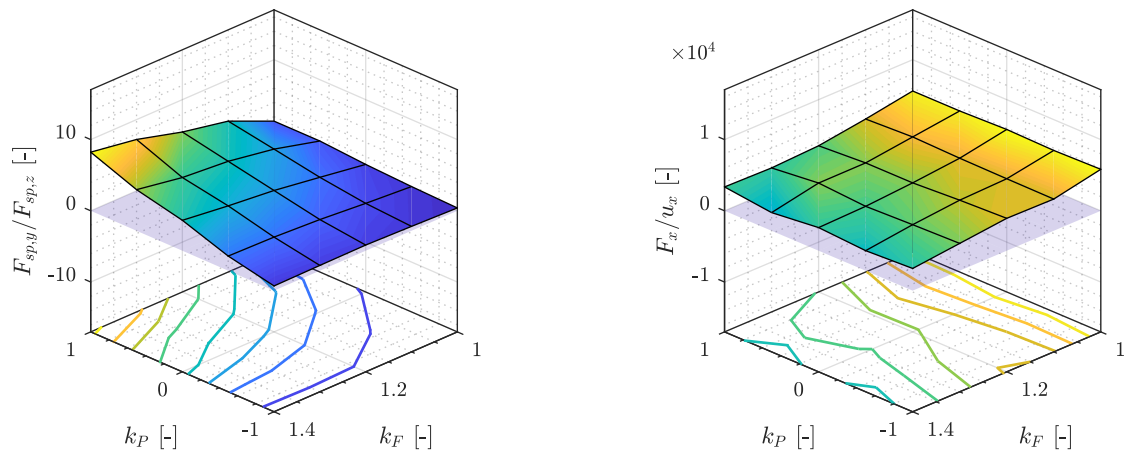
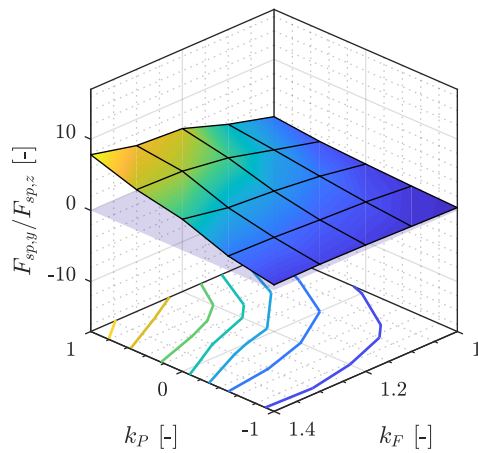
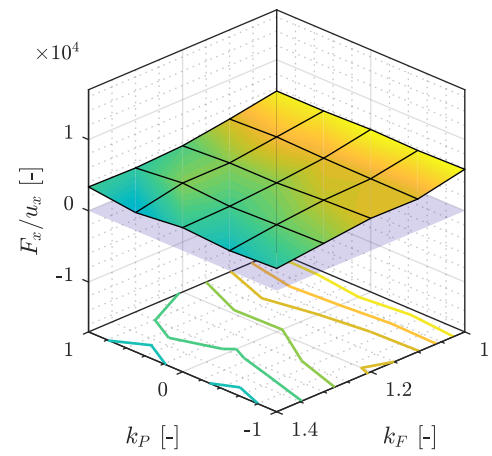
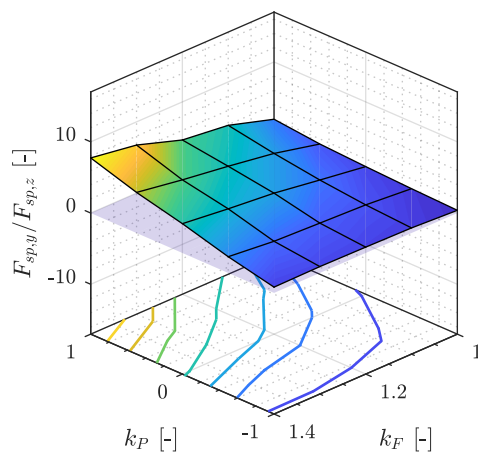
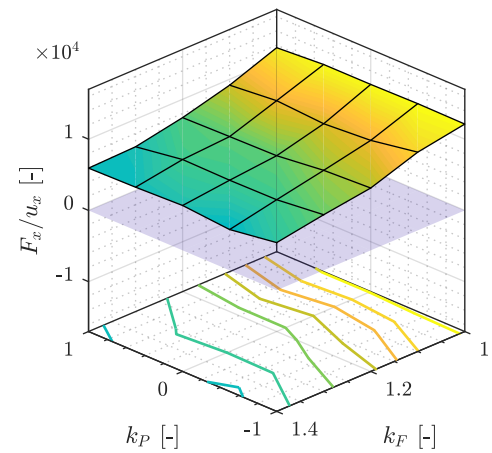
(a) $k_A = 1,2$ (b) $k_A = 1,5$ (c) $k_A = 1,8$

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

sind weitere Charakteristika ersichtlich. So nimmt das Verhältnis umgekehrt 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 Spaltzugkräfte $F_{sp,y}/F_{sp,z}$ ist beim Verhältnis F_x/u_x jedoch eine starke Abhängigkeit vom Aufweitungsparameter k_A ersichtlich. In diesem Fall geht mit zunehmender Flächenaufweitung k_A ein steiferes Verbundverhalten einher.

Weiterführend werden in den folgenden Abschnitten die 3D-Plots zur genauen Untersuchung der Einflüsse der geometrischen Parameter jeweils gesondert in einer 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 Abhängigkeit der Betondeckung aufgetragen. Die jeweiligen Erkenntnisse werden gesondert unter dem Abschnitt Einfluss der Betondeckung diskutiert.

Einfluss der Garnform: In Abbildung 4.19 sind die in einem 2D-Diagramm aufgelösten Plots aus dem vorherigen Abschnitt exemplarisch 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 aufgetragenen 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.

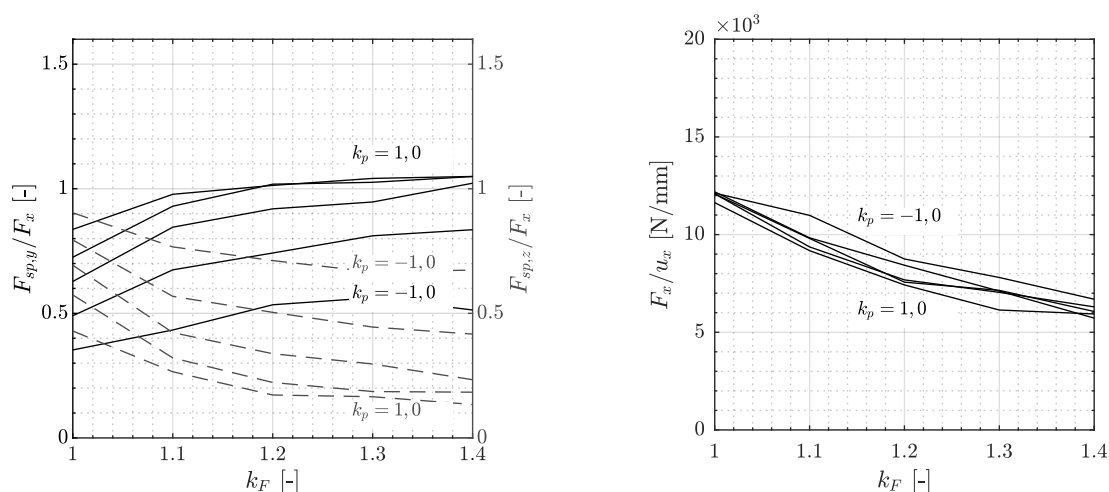


Abb. 4.19: Einfluss der Garnform ($k_A = 1,5$)

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 Spaltrissbildung 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: Abbildung 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.

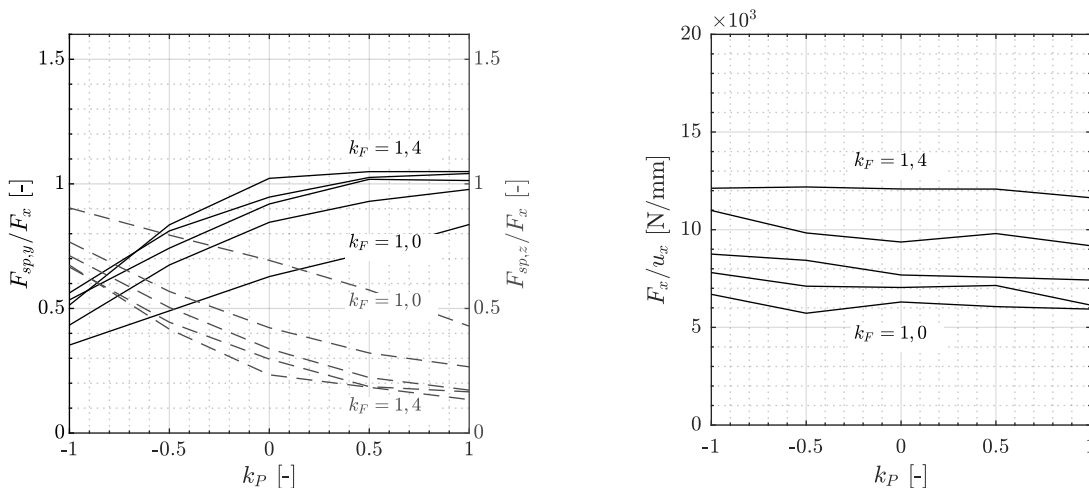


Abb. 4.20: Einfluss der Dominanz der Aufweitung ($k_A = 1,5$)

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 Abbildung 4.22 und 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 anhand einer Flächenaufweitung $k_A = 1,5$ diskutierten Parametern k_F und k_P 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 infolgedessen. Bei größer werdender Flächenaufweitung hingegen wird der Formverbund durch die lokale Deformation wenig beeinflusst. Abbildung 4.21 soll diesen Sachverhalt veranschaulichen.

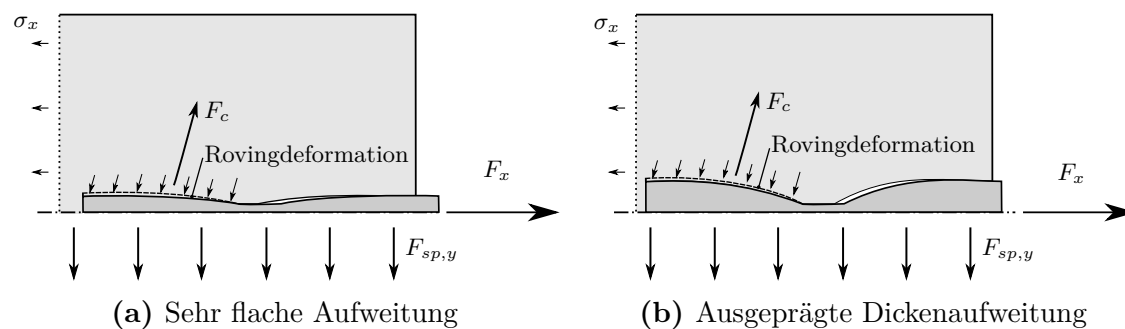
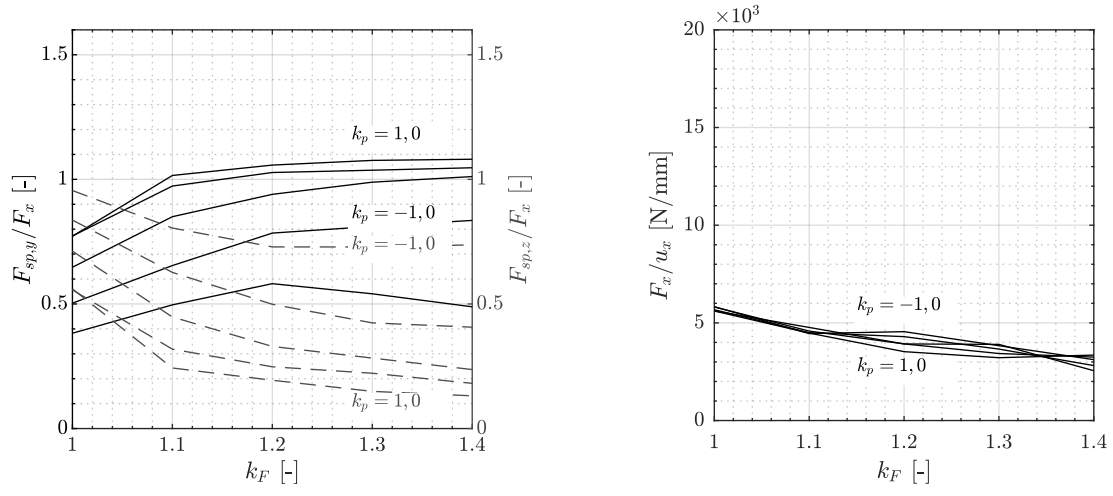


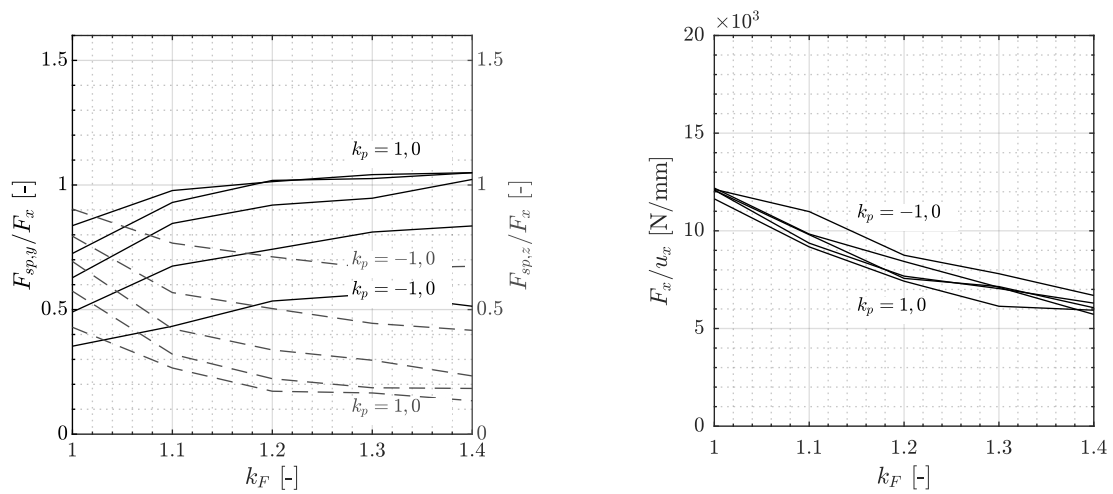
Abb. 4.21: Deformation des Rovings aufgrund hoher örtlicher Pressungen

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.

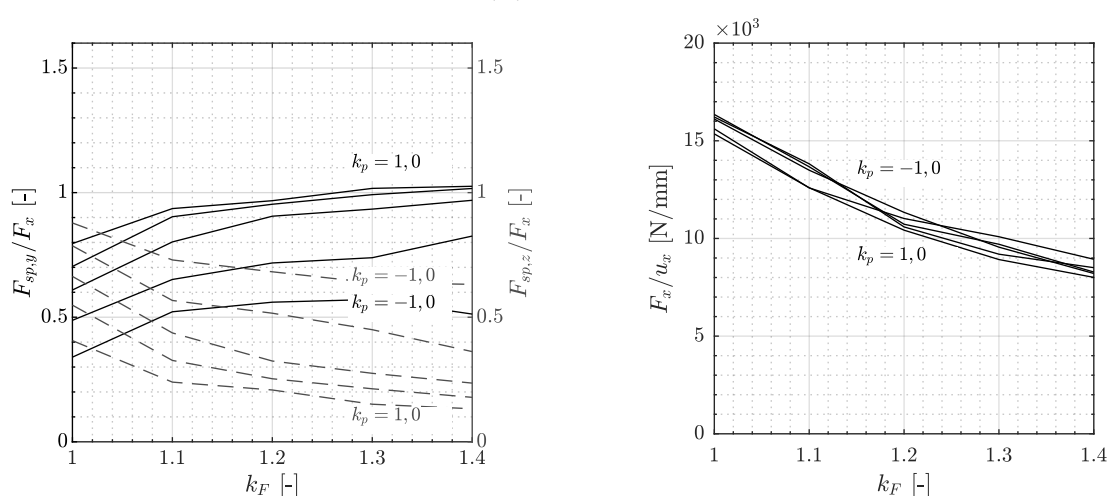
Einfluss der Betondeckung: In Abbildung 4.24 sind die jeweiligen Verhältnisse F_{sp}/F_x sowie F_x/u_x in Abhängigkeit der Betondeckung aufgetragen. Da sich aufgrund der unterschiedlichen Betonfläche Abweichungen in der Betontragfähigkeit ergeben, werden in diesem Fall nicht die Ausgabewerte bei einer



(a) $k_A = 1,2$

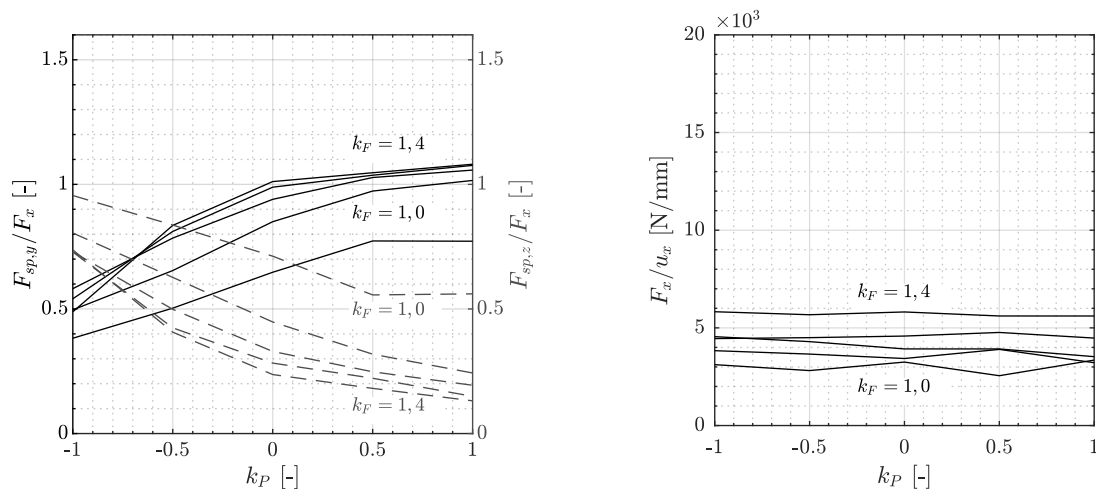


(b) $k_A = 1,5$

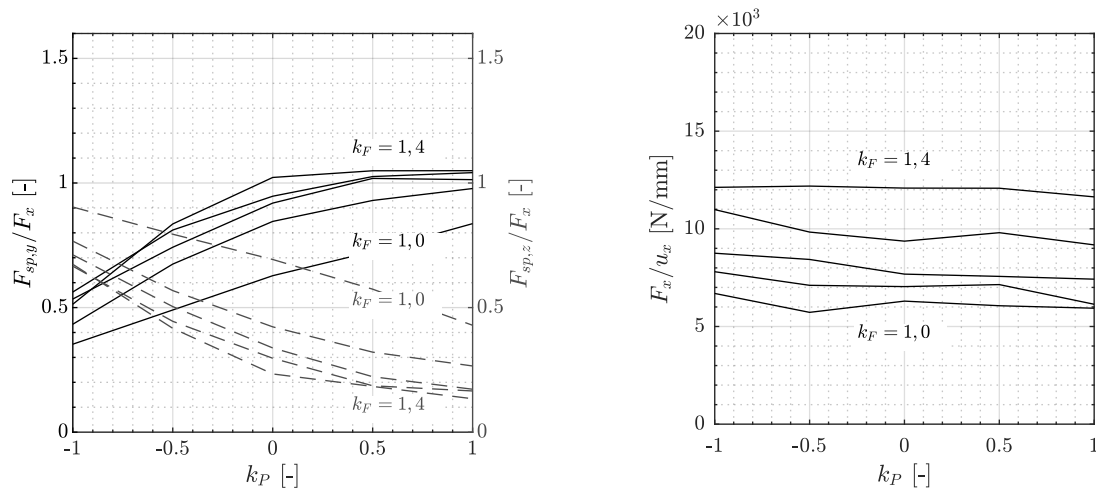


(c) $k_A = 1,8$

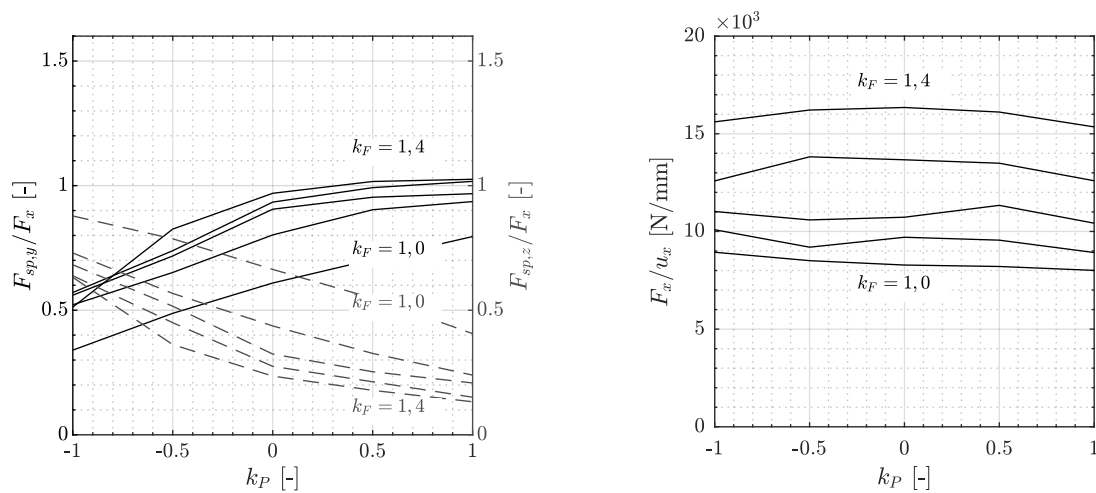
Abb. 4.22: Darstellung von (links) F_{sp}/F_x und (rechts) F_x/u_x , jeweils in Abhängigkeit von k_F , k_P und k_A



(a) $k_A = 1, 2$



(b) $k_A = 1, 5$



(c) $k_A = 1, 8$

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

identischen Belastung herangezogen, sondern repräsentativ vergleichbare Werte je Versuchskörper ermittelt. Im Speziellen wird auch hier darauf geachtet, dass der Betonkörper ungeschädigt ist (d. h. sich Dehnungen im elastischen Bereich befinden), da es ansonsten zu großen Lastumlagerungen und unterschiedlichen Spannungsverteilungen kommen kann.

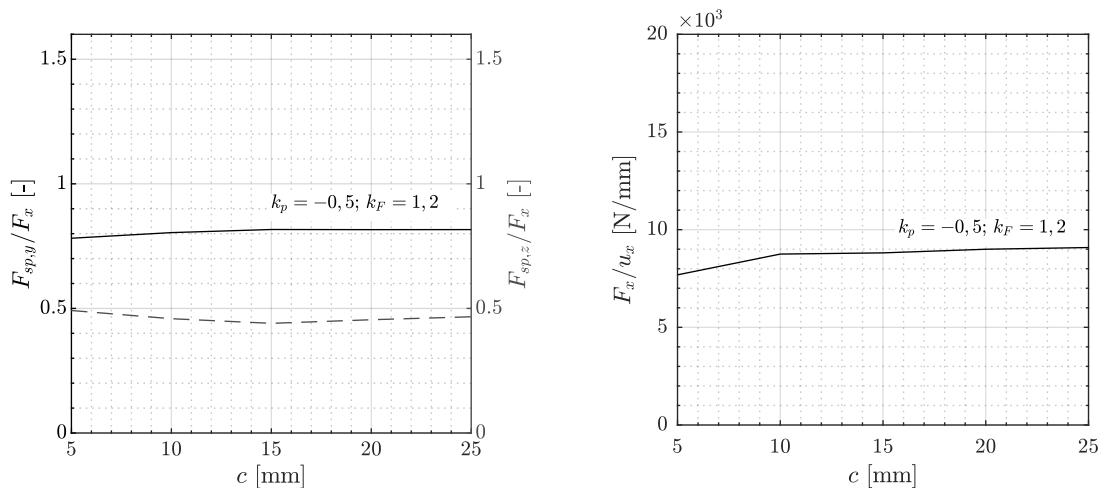


Abb. 4.24: Einfluss der Betondeckung ($k_A = 1,5$)

In den Auswertungen ist prinzipiell ein geringer Einfluss der 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. 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. In Bezug auf die maximal aufnehmbare Zugkraft F_x bei vorgegebener Verbundlänge $l_{b,o}$ konnte eine Abhängigkeit von der Betondeckung festgestellt werden. Dabei kann bei größer werdender Betondeckung mehr Verbundkraft übertragen werden, ohne dass es zu einem Spalten kommt. Da sich das Verhältnis von $F_{sy,p}/F_x$ wie vorhin dargelegt nur unwesentlich verändert, wird dies ebenfalls auf die höhere Quersteifigkeit des Untersuchungsbereiches und die damit einhergehende Querdehnungsbehinderung im Beton zurückgeführt. Veranschaulicht wird dies in Abbildung 4.25. Durch die erhöhte Querdehnungsbehinderung ergibt sich ein höheres Potential für Lastumlagerungen innerhalb der Spaltfläche, wodurch Spannungsspitzen nicht sofort zum Versagen führen und die Makrorissbildung erst später einsetzt.

Bei genauer Betrachtung der FE-Berechnungen ergeben sich aber weitere, wesentlich einflussreichere Aspekte in Bezug auf die Betondeckung. So beeinflusst

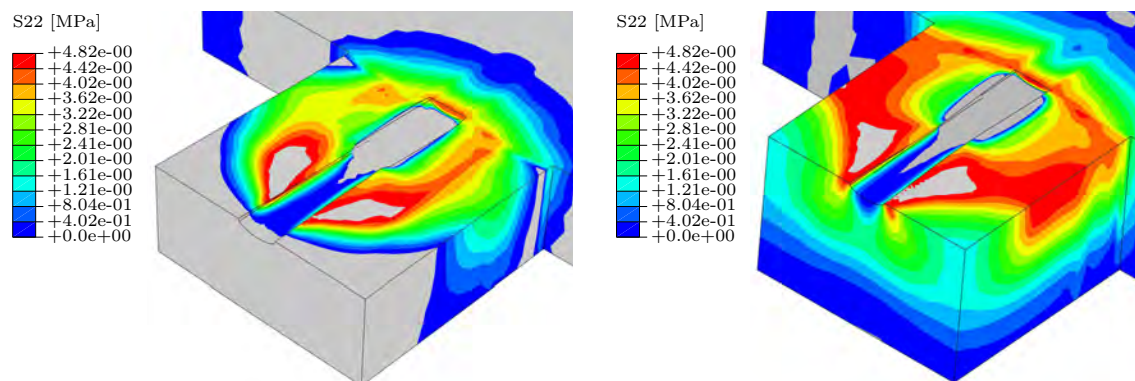


Abb. 4.25: Spannungsverteilung σ_{22} in der Spaltfläche direkt vor Versagen, für eine Betondeckung (links) $c = 15\text{mm}$ und (rechts) $c = 25\text{mm}$

die Betondeckung in hohem Ausmaß die Erstrisslast und damit 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 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 sich mit Zunahme der Betondeckung die Neigung des Betonkörpers zur Spaltrissbildung erhöht. Abbildung 4.26 verdeutlicht diesen Effekt. In Schütze und Curbach (2019) konnte dieser Effekt erst kürzlich auch experimentell abgebildet werden.

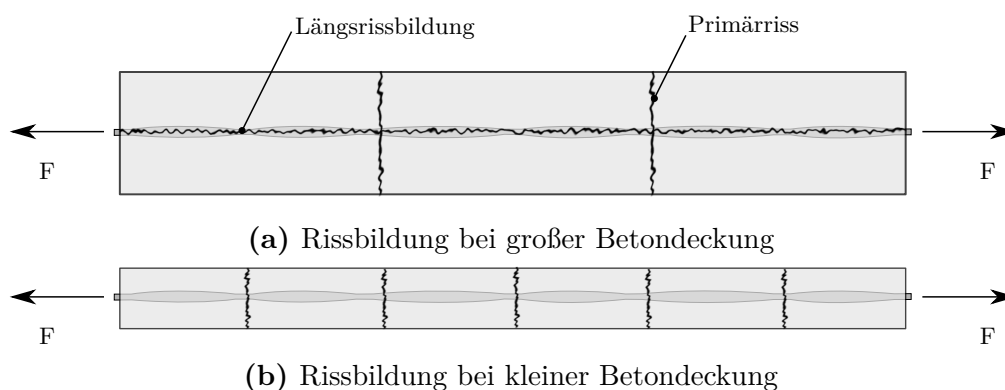


Abb. 4.26: Rissbildung in Abhängigkeit der Betondeckung

4.4.3 Einordnung der eigenen Versuche

Im Folgenden wird versucht, die eigenen experimentellen Untersuchungen aus Kapitel 3.3 einzuordnen. Voraussetzung für die Gültigkeit der gewonnen Erkenntnisse ist, dass ein entsprechender Formverbund der Bewehrung mit dem Beton vorliegt. Dies war im Fall von Roving Typ S (Schussrichtung) und Roving Typ K (Kettrichtung) der Fall. Die geometrischen Charakteristika der beiden Typen sind nachfolgend in Tabelle 4.6 nochmal angeführt.

Tab. 4.6: Geometrische Kennwerte von Faserstrangtyp S und K

Roving	$U_{r,m}$ [mm]	$A_{r,m}$ [mm ²]	k_F [-]	k_A [-]	k_P [-]	k_W [-]
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

Die Größenordnung der Spaltzugkräfte wird qualitativ durch Abgleich der Garnparameter mit den Diagrammen aus der Parameterstudie in Kapitel 4.4 ermittelt. Wird zur Ermittlung des Verhältnisses $F_{sp,y}/F_x$ jenes Diagramm herangezogen, bei dem der Garnparameter k_F auf der x-Achse aufgetragen ist, gliedert sich die weitere Vorgehensweise in folgende Schritte: Zuerst wird auf der x-Achse der entsprechende Garnparameter k_F aufgetragen. Davon ausgehend wird eine vertikale Linie bis zum Schnittpunkt mit der Kurve des entsprechenden Garnparameters k_P erstellt. Ausgehend von diesem Schnittpunkt wird eine horizontale Linie bis zur y-Achse aufgetragen und aus dem Schnittpunkt das Verhältnis von $F_{sp,y}/F_x$ abgelesen. Selbige Vorgehensweise gilt, unter Vertauschung der Garnparameter k_F und k_P , wenn zur Ermittlung des Verhältnisses $F_{sp,y}/F_x$ jenes Diagramm herangezogen wird, bei dem der Garnparameter k_P auf der x-Achse aufgetragen ist. In Abbildung 4.27 ist zu sehen, dass sich für Typ S etwas höhere Spaltkräfte ergeben. Dies hat sich in den experimentellen Untersuchungen, in dem beide Typen bei ähnlichem Beanspruchungsniveau versagten, nicht in diesem Ausmaße bewahrheitet. Es muss aber angemerkt werden, dass aufgrund der Herstellungsungenauigkeiten der Rovings die Ermittlung der resultierenden Spaltzugkräfte mit nicht unerheblichen Streuungen behaftet ist.

4.4.4 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 von der Garnform und der Richtungsdominanz der periodischen Aufweitung der Garne abhängig sind. 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

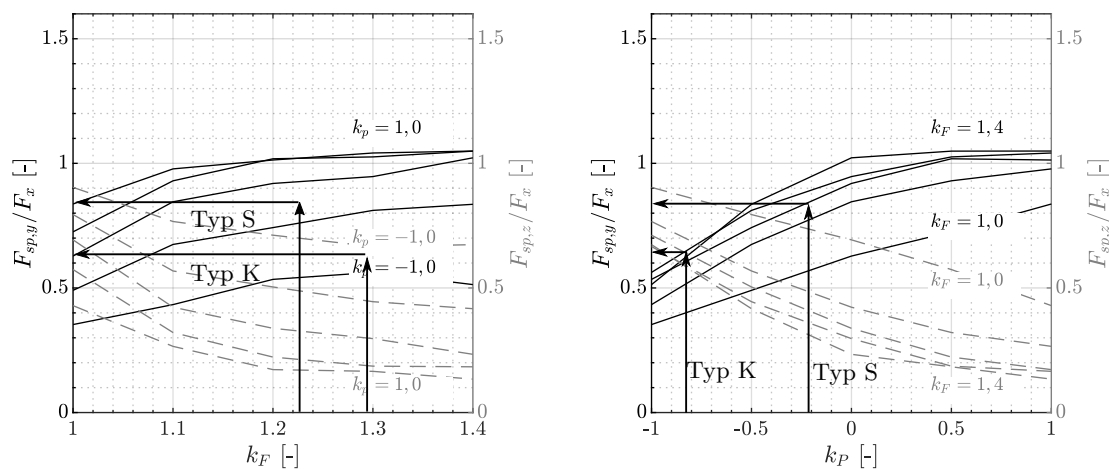


Abb. 4.27: Einordnung der experimentellen Untersuchungen in die Ergebnisse der Parameterstudie

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 geometrisch unterschiedliche Rovings 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. Herstellungsbedingt 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 zunehmendem 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 dieselbe Verbundsteifigkeit auf. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass ein Formverbund vorhanden ist.

Die entstehenden Spaltzugbeanspruchungen im Betonkörper konnten mit der Parameterstudie gut abgebildet werden. Schwieriger gestaltet sich die Bestimmung der Höhe der übertragbaren Verbundkraft F_x . Die übertragbare Verbundkraft ist stark abhängig vom Betonwiderstand, wobei dieser Widerstand durch mehrere Parameter beeinflusst wird. Die Rissorientierung der Spaltfläche ist diesbezüglich ein wesentlicher Parameter, der stark von der Garnform abhängig ist. Für runde Querschnitte

mit ausgeprägter Dickenaufweitung kann sich eine radialstahlige Rissbildung ergeben, wohingegen bei flachen Rovingquerschnitten eine Spaltrissbildung in der Ebene der textilen Bewehrung stattfindet. Die resultierende Spaltfläche und damit einhergehend der Spaltwiderstand unterscheiden sich dabei wesentlich. Als weiterer Parameter, der den Betonwiderstand beeinflusst, hat sich die Betondeckung herausgestellt. Eine gleiche Verbundlänge $l_{b,o}$ vorausgesetzt, ergibt sich durch Erhöhung der Betondeckung eine höhere Verbundkraft F_x , die übertragen werden kann. Dies wird auf die damit einhergehende Querdehnungsbehinderung zurückgeführt, wodurch eine weitreichende Lastumlagerung in der Spaltfläche ermöglicht wird, wohingegen bei geringen Betondeckungen dieses Potential zu Lastumlagerungen viel geringer ausfällt. Bei der Variation der Betondeckung konnten aber noch weitere Aspekte 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

4.5.1 Modellannahmen

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.

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

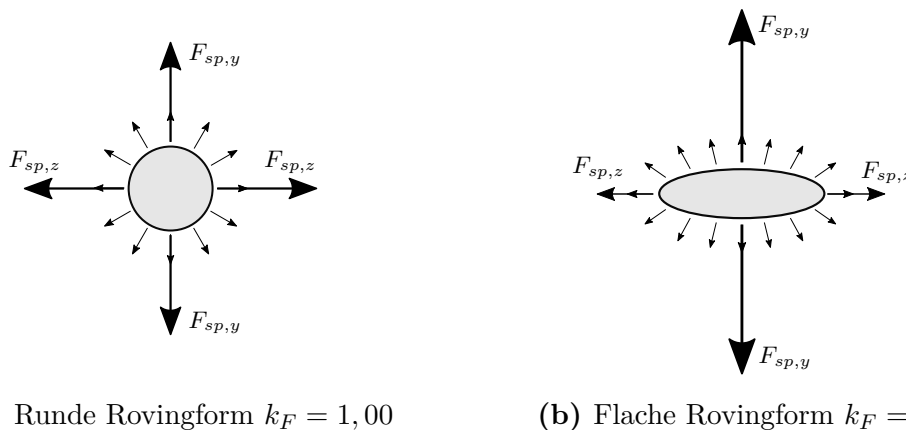
$$F_{sp,z} = (1 - \alpha_F) \cdot \cos \varphi \cdot \tan \theta \cdot F_x \quad (4.11)$$

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 Gleichung 4.10 ergibt sich in Abhängigkeit der Beiwerte k_F , k_P , k_A . Die Modellannahmen zu den einzelnen Faktoren und deren Einfluss auf die Größenordnung der auftretenden Spaltkräfte wird in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

Einfluss der Rovingform: Die resultierenden Spaltzugkräfte sind aufgrund der mit größer werdendem Beiwert k_F zunehmend elliptischeren Form des Rovings wesentlich ausgeprägter in Richtung der Nebenachse (kleiner Ellipsenhalbachse). Abbildung 4.28 verdeutlicht diesen Effekt.



(a) Runde Rovingform $k_F = 1,00$

(b) Flache Rovingform $k_F = 1,40$

Abb. 4.28: 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 zur Ebene der textilen Bewehrung. Ausgangspunkt für die Bestimmung der auftretenden Spaltzugkräfte ist Gleichung 4.12, welche eine Näherung des Umfangs U_r für den Roving darstellt:

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

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

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

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

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

mit

a, b Ellipsenhalbachsen ($a > b$)

Einsetzen von Gleichung 3.3 und 4.12 in Gleichung 4.15 liefert:

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

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

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 quadratischen Gleichung ergibt:

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

In Abbildung 4.29 ist das Verhältnis der Ellipsenachsen zueinander in Abhängigkeit des Formparameters k_F aufgetragen. Die erhaltene Kurve gibt die Tendenz des Verhältnisses von F_{sp}/F_x aus den numerischen Ergebnissen adäquat wieder (vergleiche dazu Abb. 4.19 – Kurvenverlauf von $k_P = 0,00$).

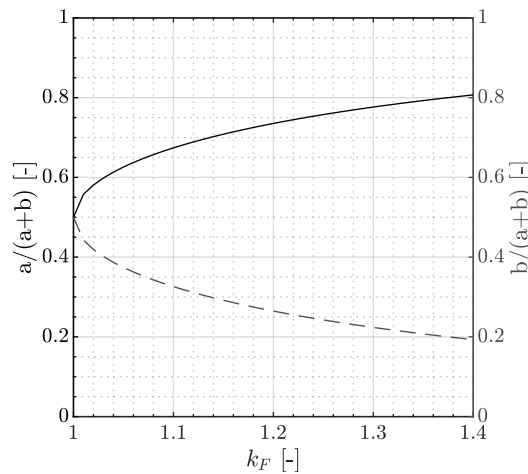
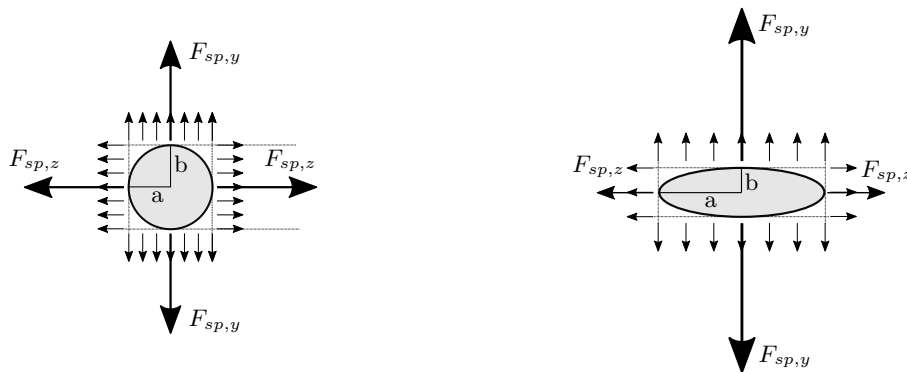


Abb. 4.29: Verhältnis der Ellipsenachsen in Abhängigkeit des Formparameters k_F

Zur Bestimmung des in Gleichung 4.10 eingeführten Beiwertes α_F wird von den Modellannahmen in Abbildung 4.30 Gebrauch gemacht. Vereinfacht wird hier eine gleichmäßige Spaltzugspannung über die Breite bzw. Höhe des Rovings angenommen. Dadurch können die resultierenden Spaltzugbeanspruchungen $F_{sp,y}$ bzw. $F_{sp,z}$ in Abhängigkeit des Verhältnisses der Ellipsenhalbachsen zueinander ermittelt werden. Der Beiwert zur Bestimmung der Spaltzugkräfte orthogonal zur Ebene der textilen Bewehrung $F_{sp,y}$ ergibt sich demnach zu $\alpha_F = a/(a+b)$,

wobei a bzw. b in Abhängigkeit des Formbeiwertes k_F nach Gleichung 4.20 ermittelt werden. Die Größe der resultierenden Spaltzugkraft in z -Richtung kann umgekehrt durch den Faktor $(1 - \alpha_F)$ berechnet werden.

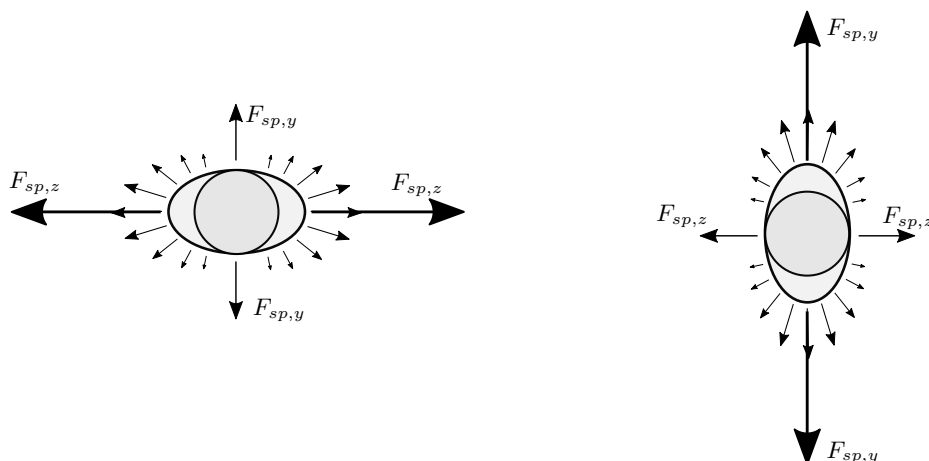


(a) Runde Rovingform $k_F = 1,00$

(b) Flache Rovingform $k_F = 1,40$

Abb. 4.30: Modellannahme zur Bestimmung des Parameters α_F

Einfluss aus 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 eher orthogonal zur Bewehrungsebene gerichtet ist (siehe Abb. 4.31).



(a) Ausgeprägte Breitenaufweitung

(b) Ausgeprägte Dickenaufweitung

Abb. 4.31: Ausprägung der Spaltzugkräfte in Abhängigkeit der Aufweitung

Zur Bestimmung des Verhältnisses der auftretenden Spaltzugkräfte wird in Abbildung 4.32 ein Rovingsegment in Abschnitt $\pi/2 - \pi$ betrachtet. Die jeweilige Aufweitung findet ausgehend von einem runden Rovingquerschnitt statt. Es

wird angenommen, dass die resultierende Spaltzugkraft durch den Flächenschwerpunkt der Aufweitung verläuft (dunkelgrauer Bereich in Abb. 4.32). Dadurch kann der Neigungswinkel φ der Betondruckstrebe ermittelt werden. In der nachfolgenden Gegenüberstellung der Ergebnisse wird gezeigt, dass diese Annahme mit ausreichender 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.

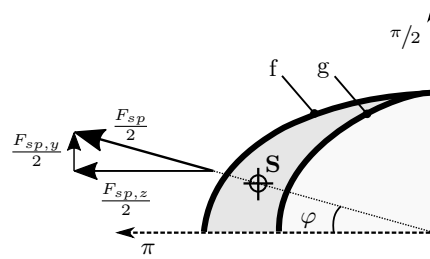


Abb. 4.32: Neigung der resultierenden Betondruckstrebe quer zur Längsachse

Der Schwerpunkt der Fläche zwischen den beiden Funktionen aus Abbildung 4.32 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 Flächenschwerpunkte 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 Spaltzugkräfte in Abhängigkeit des Ausprägungsparameters k_P sind in Abbildung 4.33 dargestellt. Geringe Abweichungen zu den Ergebnissen der numerischen Berechnungen in Abhängigkeit des Dominanzparameters (siehe vergleichend Abb. 4.20 – Kurvenverlauf von $k_F = 1,00$) sind erkennbar, dennoch scheint die Annahme, dass die resultierende Spaltkraft quer zur Längsachse durch den Flächenschwerpunkt der Aufweitung verläuft, gerechtfertigt.

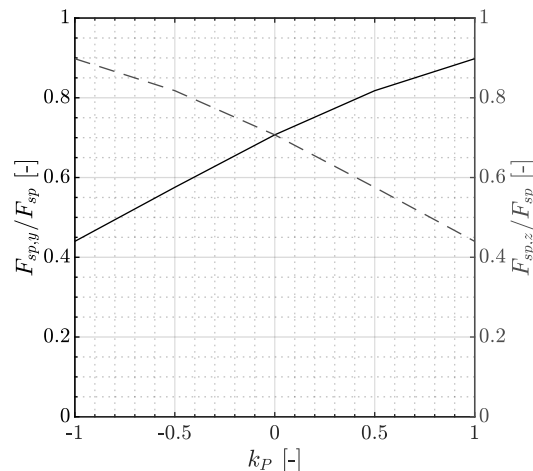


Abb. 4.33: Verhältnis der Spaltzugkräfte in Abhängigkeit des Formparameters k_P

Einfluss aus der Größe der Aufweitung: Die Größenordnung der auftretenden Spaltzugkräfte ist bei Vorliegen eines Formschlusses abhängig von der Neigung der Betondruckstrebe zur Längsachse der Bewehrung (siehe Abb. 4.34). 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 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.

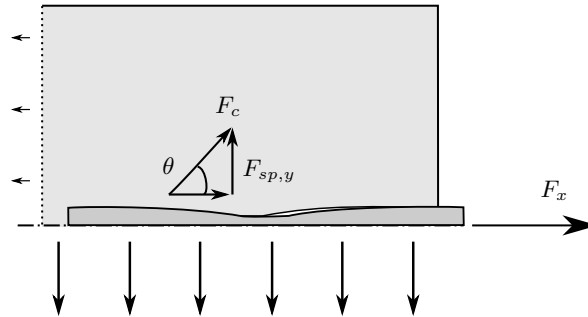


Abb. 4.34: Neigung der resultierenden Betondruckstrebe zur Längsachse

4.5.2 Vergleich mit den numerischen Berechnungen

Nachfolgend wird Gleichung 4.10 für verschieden Rovinggeometrien in den Parametergrenzen von $k_F = 1,0 : 0,10 : 1,4$ (Startwert : Schrittgröße : Endwert), $k_P = -1,0 : 0,50 : 1,0$ und $k_A = 1,5$ ausgewertet. Ein Vergleich der mit dem in diesem Kapitel vorgestellten Modell berechneten Spaltzugkräfte mit den numerisch ermittelten Spaltzugkräften in Kapitel 4.4 ist in Abbildung 4.35 dargestellt.

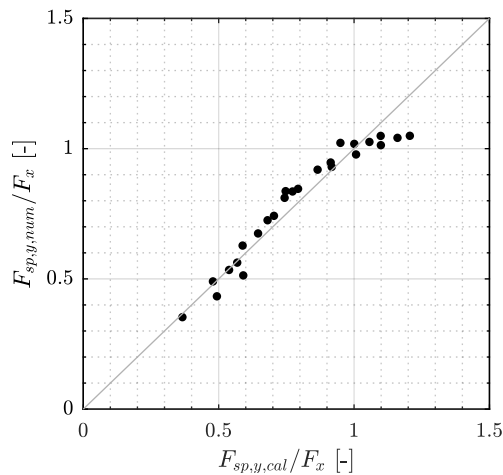


Abb. 4.35: Vergleich der nach dem vorgestellten Modell berechneten Spaltzugkräfte mit den numerisch ermittelten Spaltzugkräften ($k_A = 1,5$)

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 Gleichung 4.12 bei zunehmender Flachheit des Rovings zurückzuführen. Die Kenntnis der auftretenden Spaltzugkräfte lässt aber noch keine Aussage über eine tatsächliche

Spaltrissbildung zu. Dazu ist der entsprechende Betonwiderstand zu betrachten. Die genaue Bestimmung des Betonwiderstandes war nicht Gegenstand dieser Arbeit, dennoch wird diesbezüglich im folgenden Abschnitt auf einen wesentlichen Aspekt eingegangen, um eine erste Abschätzung, ob ein Bauteil spaltrissgefährdet ist, treffen zu können.

4.5.3 Berechnung des Betonwiderstandes

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 Tefpers (1979) die Spaltzugfestigkeit herangezogen. In den FE-Berechnungen hat sich diesbezüglich aber gezeigt, dass durch hohe örtliche Beanspruchungen ein steiler Spannungsgradient in der Spaltfläche vorliegt. Bevor es zu einer Spaltrissbildung im Beton kommt, tritt eine lokale Plastifizierung im Nahbereich des Rovings auf, die die Zugfestigkeit vermindert (siehe Abb. 4.36).

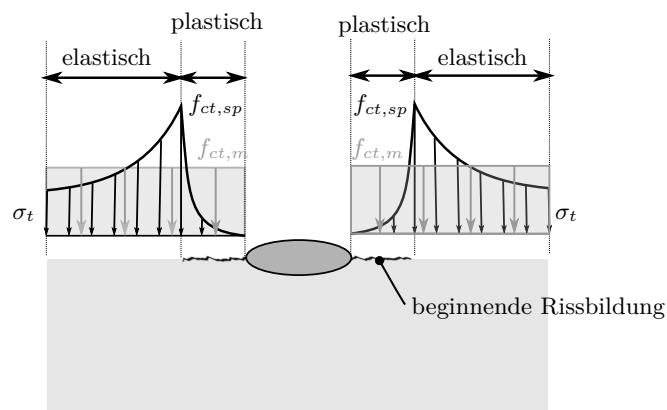


Abb. 4.36: Betonzugbeanspruchung in der Ebene der textilen Bewehrung

Für die Berechnung des Betonwiderstandes wird deshalb eine gemittelte Betonfestigkeit entlang der Spaltfläche 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 vorliegende Versuchskonfiguration zu: $\alpha_{ct,sp} = \frac{2}{3}$

Das vorgestellte Modell in Gleichung 4.10 erlaubt eine erste Abschätzung der auftretenden Spaltzugkräfte und ermöglicht darüber hinaus weiterführend in Kombination mit Gleichung 4.32 und 4.31 eine Beurteilung, ob das Bauteil entsprechend spaltrissgefährdet ist. Abschließend ist aber anzumerken, dass die Rolle des Betonwiderstandes noch weiterer Untersuchungen bedarf. So haben die numerischen Untersuchungen gezeigt, dass der Faktor $\alpha_{ct,sp}$ in Gleichung 4.32 in Abhängigkeit der Betondeckung variiert, da bei größer werdender Betonüberdeckung ein höheres Potential zu Lastumlagerungen vorhanden ist. Dadurch können bei zunehmender Betondeckung höhere gemittelte Zugfestigkeiten in der Spaltfläche in Rechnung gestellt werden. Diese Annahmen müssen experimentell noch validiert und der Parameter $\alpha_{ct,sp}$ entsprechend kalibriert werden.

5 Zusammenfassung

5.1 Problemstellung

Textilbewehrung ist eine vielversprechende Entwicklung, die den konventionellen Stahlbetonbau sinnvoll ergänzt. Im Speziellen weisen aus Carbonfasern bestehende Textilien 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 Carbontextilien 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 zwei Entwicklungsschritte zurückzuführen:

- Ein wichtiger Entwicklungsschritt auf dem Weg zu effizienten Textilbewehrungen besteht 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 Carbonrovings spricht man ab einer Filamentanzahl von 24.000 von Heavy Tows. Manchmal sind auch mehrere Rovings 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 Abhängigkeit der Geometrie der Rovings). Dadurch ergibt sich sein sehr steifes Verbundverhalten, wodurch prinzipiell die Rissabstände und Rissbreiten gering ausfallen. Speziell für Rovings 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. Mit dieser Arbeit wird versucht, diese Wissenslücke zu schließen. Dazu werden die Fragestellungen aus Kapitel 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 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 Rovingquerschnitts, (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 Rovings zu bestimmen, wurden vorab Laserscans der verwendeten Textilien erstellt, mit denen die geometrischen Charakteristika genau erfasst werden konnten. 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 Schussrovings, 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 Rovings 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 plus 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.
- In der potentiellen Spaltfläche tritt ein steiler Spannungsgradient bei Belastung auf. Angrenzend an den Roving treten bereits vor der Makrorissbildung in Form eines Spaltrisses aufgrund hoher örtlicher Beanspruchungen lokale Plastifizierungen auf. Dadurch kommt es zu Spannungsumlagerungen hin zu weniger belasteten Bereichen. Diese Spannungsumlagerungen sind aber nur begrenzt möglich, sodass nicht die volle Spaltzugfestigkeit, sondern nur eine mittlere Spaltzugfestigkeit in der Spaltfläche in Rechnung gestellt werden kann.
- Die Betondeckung hat einen maßgeblichen Einfluss auf die mittlere Spaltzugfestigkeit in der Spaltfläche und dadurch auf die Spaltrissbildung in textilbewehrten Bauteilen. So konnte in den numerischen Untersuchungen bei gleicher Verbundlänge l_b ein höherer Widerstand gegenüber einer Spaltrissbildung bei größer werdender Betondeckung festgestellt werden. Dies wird auf die höhere

Steifigkeit im Untersuchungsbereich und die damit einhergehende Querdehnungsbehinderung des Betons zurückgeführt. Dadurch ist das Potential für Spannungsumlagerungen im Beton höher und es kann eine höhere mittlere Betonzugfestigkeit in der Spaltfläche in Rechnung gestellt werden.

- Auf Bauteilebene hat die Betondeckung wesentlichen Einfluss auf die Primär-rissbildung. 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 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 Tränkungs-material imprägniert sind, ergeben sich Nachteile in ebendieser Versuchsdurchführung. So kann es zu unterschiedlichen Versagensformen kommen – hier ist zwischen einem Pull-out-Versagen, einem Garnriss und einem Versagen zufolge Spalten zu differenzieren –, 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 von der Bauteilgeometrie weitestgehend unabhängig ist, wäre es einfach möglich, das Verbundverhalten und die Verbundtragfähigkeit für eine Textilkonfiguration zu bestimmen, das dann für unterschiedliche Bauteilgeometrien ihre Gültigkeit behält. Ein Versagen durch Spaltrissbildung hingegen ist gekennzeichnet durch eine Spreng-rissbildung im Beton aufgrund hoher Querkzugbeanspruchungen 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 zwischen Textilkonfigurationen, welche mit einer steifen Tränkung und jene die mit einer weichen Tränkung imprägniert sind, zu unterscheiden.

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 Trängung 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 aufwendige 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 es 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 vorzeitigen 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 zum Beispiel 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

Die Untersuchungen, die in dieser Arbeit durchgeführt wurden, erfolgten auf Basis einer Textilkonfiguration, die eine hohe Feinheit aufweist und mit einem steifen Trängungsmaterial 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 Trängungsmaterial 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.

Der Inhalt dieser Arbeit beschäftigt sich vorrangig mit der Entstehung von Spaltzugspannungen und deren Größenordnung. Auf der Widerstandsseite wurden zwar erste Untersuchungen durchgeführt, welche Parameter den Betonwiderstand beeinflussen, hier sind aber noch tiefergehende Untersuchungen vorzunehmen. Vor allem der Einfluss der Betondeckung sollte in weiteren experimentellen Untersuchungen beurteilt werden. In ersten numerischen Berechnungen, die in dieser Arbeit durchgeführt wurden, hat sich ein entsprechender Einfluss der Betondeckung auf die Entstehung von Spaltrissen gezeigt.

Abschließend ist zu erwähnen, dass die Kalibrierung der Modellparameter aus Kapitel 4.5 anhand der numerischen Parameterstudie erfolgte. 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 (2019). *Manual*. Dassault Systems. URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/abaquscae/> (Zugriff am 15.12.2015).
- 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 (2008). *Technisches Merkblatt – Wirkung von Fließmitteln in zementgebundenen Baustoffen*. URL: <http://www.col9.com/portal/streamer?fid=348554> (Zugriff am 15.12.2015).
- Benedix, R. (2006). *Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure*. Wiesbaden: B. G. Teubner.
- 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. Bagneux: 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. TU Dresden, S. 213–226.
- Cherif, C. (2011). *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Berlin/Heidelberg: Springer. 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. Dresden: 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, S. 381–401. DOI: 10.1007/978-3-642-17992-1.
- Dominginghaus, H. (2012). *Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen*. Berlin/Heidelberg: Springer.
- Egger, M. und J. Feix (2017). „Textilbeton im Ingenieurbau“. In: *Innsbrucker Bautage*. Hrsg. von J. Feix und J. Berger. Innsbruck: Studia Universitätsverlag, S. 88–108.
- Egger, M. und C. Walzl (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 (Zugriff am 15.12.2015).
- Ehrenstein, G. W. (2006). *Faserverbundkunststoffe: Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften*. München: Carl Hanser.
- 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. Berkeley: 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, S. 157–230.
- Fib – Fédération Internationale du Béton (Okt. 2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Flemming, M., G. Ziegmann und S. Roth (1995). *Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices*. Berlin/Heidelberg: Springer.
- 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, S. 39–109. DOI: 10.1007/978-3-642-17992-1.
- GOM (2019). *Auswertesoftware Gom Correlate*. URL: <https://www.gom.com/de/3d-software/gom-correlate.html> (Zugriff am 15.12.2015).
- Hahn, L. (2018). „Innovative Fertigungstechnologie zur Herstellung von vorgeformten textilen Bewehrungen“. In: *10. Carbon- und Textilbetontage*. Hrsg. von C³ – Carbon Concrete Composite e. V. und TUDALIT e. V. Dresden.
- 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. Märtin (2011). „Gewirkte Halbzeuge und Wirktechniken“. In: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Hrsg. von C. Cherif. Berlin/Heidelberg: Springer, 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. Aachen: 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 textildbewehrtem 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) 2, 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. DOI: 10.1016/0008-8846(76)90007-7.
- Hinzen, M. (2017). „Prüfmethode zur Ermittlung des Zugtragverhaltens von textiler Bewehrung für Beton“. In: *Bauingenieur* (92) 6, 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, S. 453–507. DOI: 10.1007/978-3-642-17992-1.
- ISO 3341 (Mai 2000). *Textilglas – Garne – Bestimmung der Reißkraft und Bruchdehnung*. Standard. Genf: International Organization for Standardization.
- Janetzko, S. (2013). „Methodik zur Gestaltung von Bewehrungssystemen für textildbewehrten 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) 10, 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) 6, 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, S. 111–169. DOI: 10.1007/978-3-642-17992-1.
- Li, Y., J. Bielak, J. Hegger und R. Chudoba (2018). „An incremental inverse analysis procedure for identification of bond-slip laws in composites applied to textile reinforced concrete“. In: *Composites Part B: Engineering* (137), S. 111–122. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.11.014.
- Lieboldt, M., M. Tietze und F. Schladitz (Juli 2018). „C³-Projekt – Erfolgreiche Partnerschaft für Innovation im Bauwesen“. In: *Bauingenieur* (93) 7/8, 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. DOI: 10.1016/0020-7683(89)90050-4.
- Martin, H. und P. Noakowski (1981). *Verbundverhalten von Betonstählen. Untersuchungen auf der Grundlage von Ausziehversuchen*. DafStb-Heft 319. Berlin: Ernst & Sohn.
- Michaeli, W. und M. Wegener (1989). *Einführung in die Technologie der Faserverbundwerkstoffe*. München: Carl Hanser.
- 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. 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. Lausanne: 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*. München: Carl Hanser.
- 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. 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. 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. DafStb-Heft 138. Berlin: 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) 6, 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 (Ont., CAN).
- Schade, M. (2011). „Gestickte Halbzeuge und Sticktechniken“. In: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Hrsg. von C. Cherif. Berlin/Heidelberg: Springer, 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. Reisgen, M. Schleser und J. Jeřábek (2011). „Theoretische und experimentelle Untersuchung des spaltungsinduzierten Versagens von TRC Prüfkörpern“. In: *6th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS6) – Textilbeton in Theorie und Praxis*. Hrsg. von R. Curbach M. und Ortlepp. TU Dresden. Dresden, 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) 4, 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. Zürich: 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 (2019). *solidian GRID Q95/95-CCE-38*. URL: <https://www.solidian.com/produkte/ebene-bewehrung/> (Zugriff am 15.12.2015).
- 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). „Faserstoffabelle nach P.-A. Koch: Carbonfasern“. In: *Chemiefasern/Textilindustrie* (39) 91, S. 1277–1284.
- Wulfhorst, B., R. Kaldenhof und K. Hörsting (1993). „Faserstoffabelle 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*. Berlin/Heidelberg: Springer.

A Experimentelle Untersuchungen

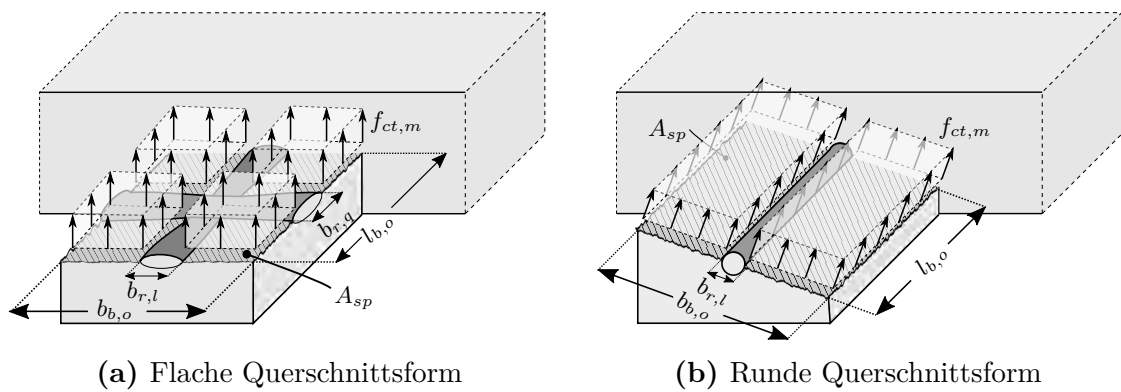


Abb. A.1: Bestimmung des resultierenden Spaltwiderstandes

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

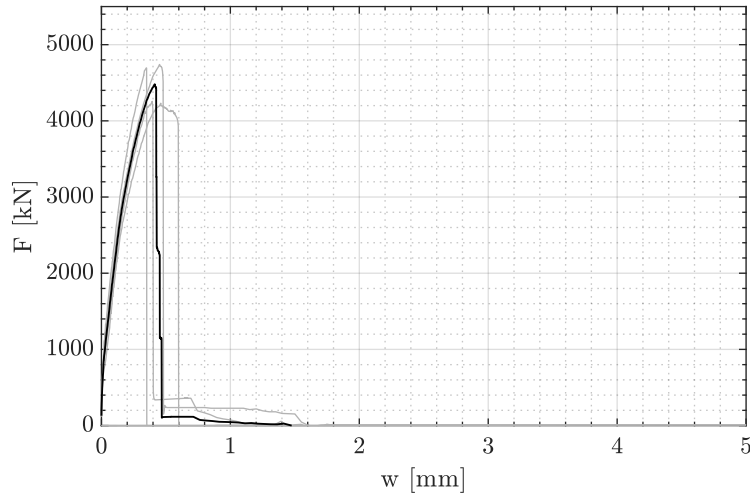
Fortsetzung auf der nächsten Seite

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

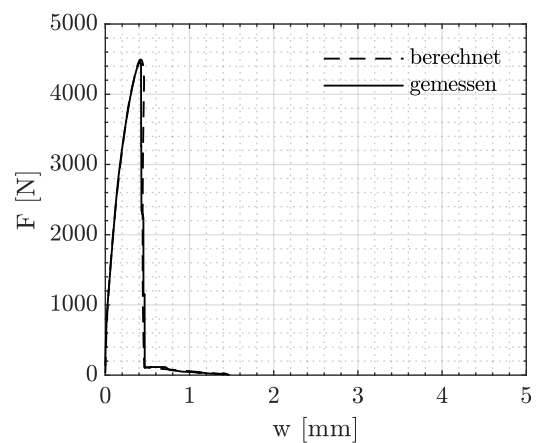
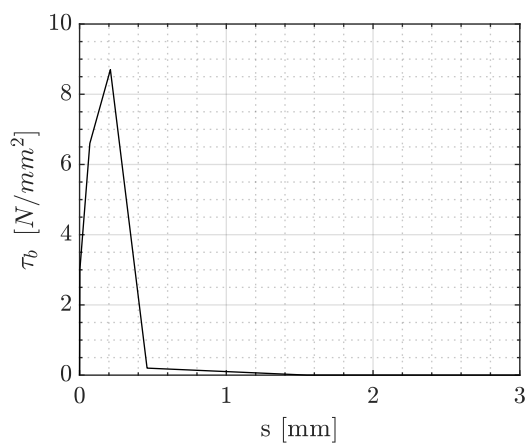
Kraft-Rissöffnungsbeziehung



	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	0,414
s	274,6	0,053

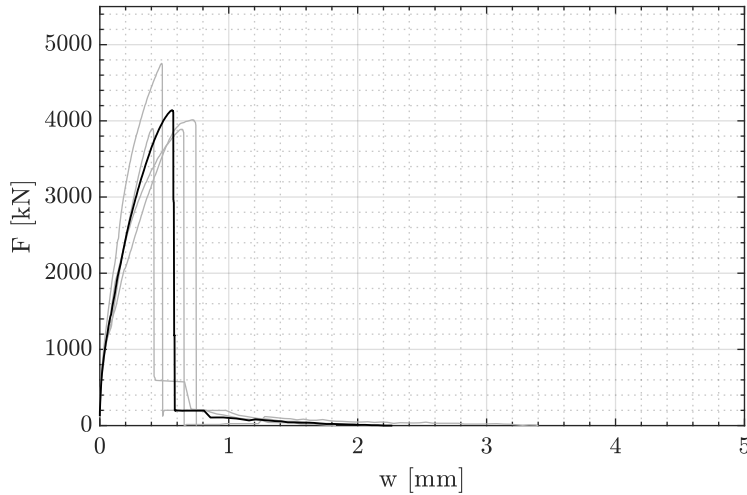
Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung

	1	2	3	4	5	6
τ_b [MPa]	0,001	3,00	6,60	8,70	0,20	0,001
s [mm]	0	0,002	0,070	0,210	0,460	1,550



A.2 Versuchsserie Typ O

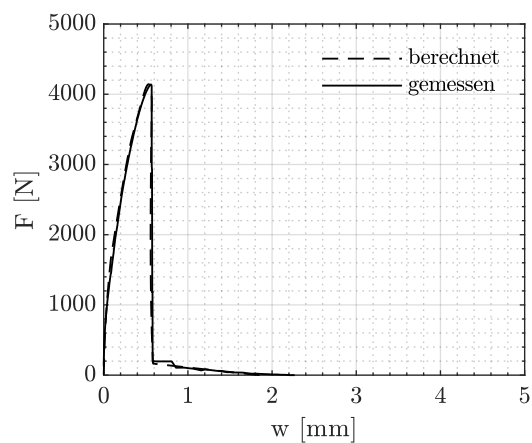
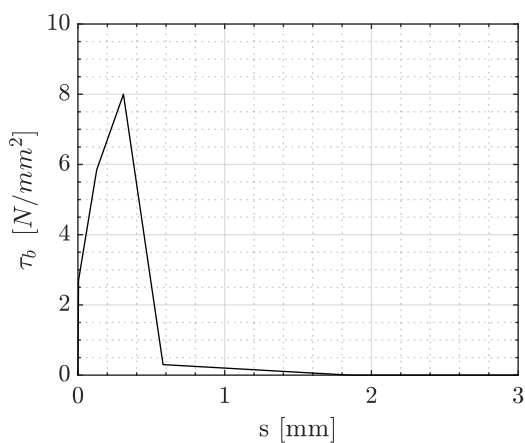
Kraft-Rissöffnungsbeziehung



	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	0,558
s	413,4	0,141

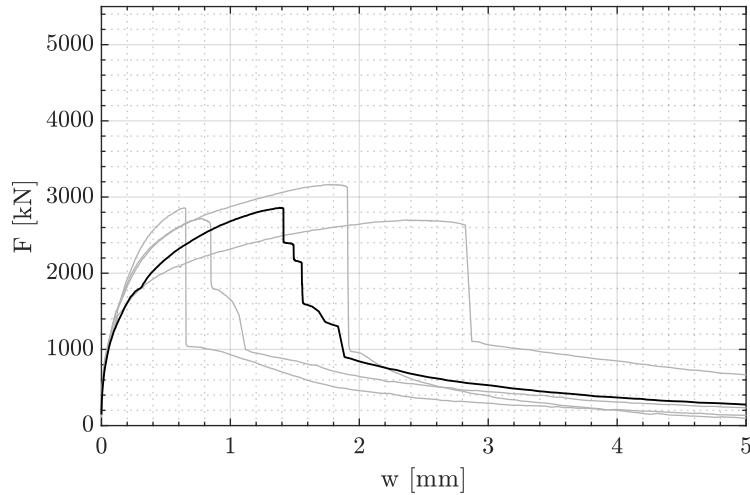
Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung

	1	2	3	4	5	6
τ_b [MPa]	0,001	2,70	5,85	8,00	0,30	0,001
s [mm]	0	0,004	0,128	0,310	0,580	1,850



A.3 Versuchsserie Typ F

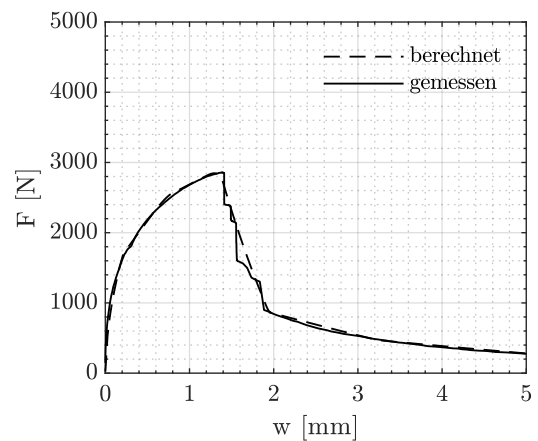
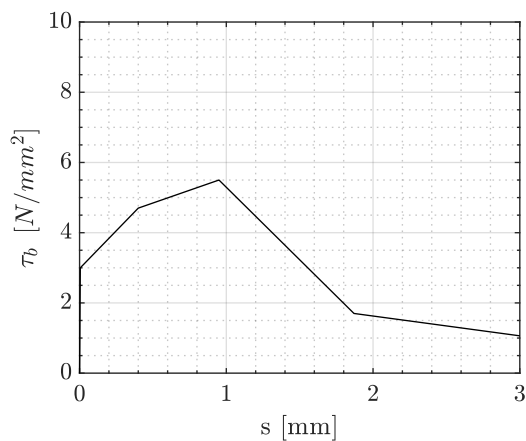
Kraft-Rissöffnungsbeziehung



	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	1,385
s	216,1	0,828

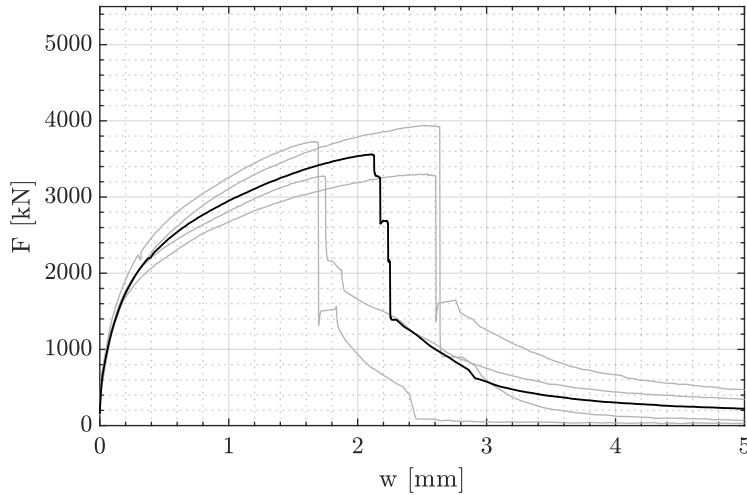
Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung

	1	2	3	4	5	6	7
τ_b [MPa]	0,001	3,00	4,70	5,50	1,70	0,95	0,20
s [mm]	0	0,005	0,40	0,950	1,870	3,200	7,000



A.4 Versuchsserie Typ R

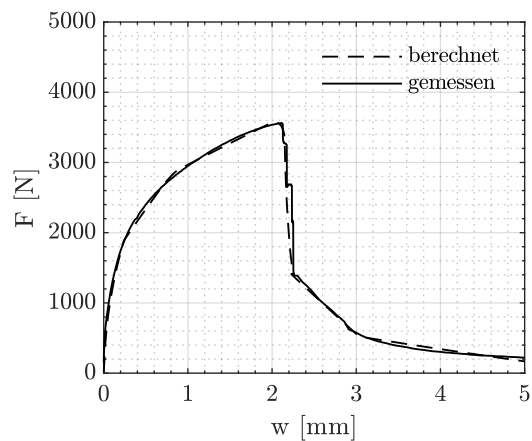
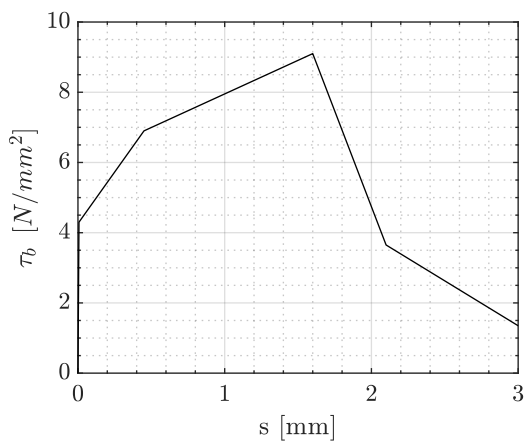
Kraft-Rissöffnungsbeziehung



	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	2,110
s	327,0	0,484

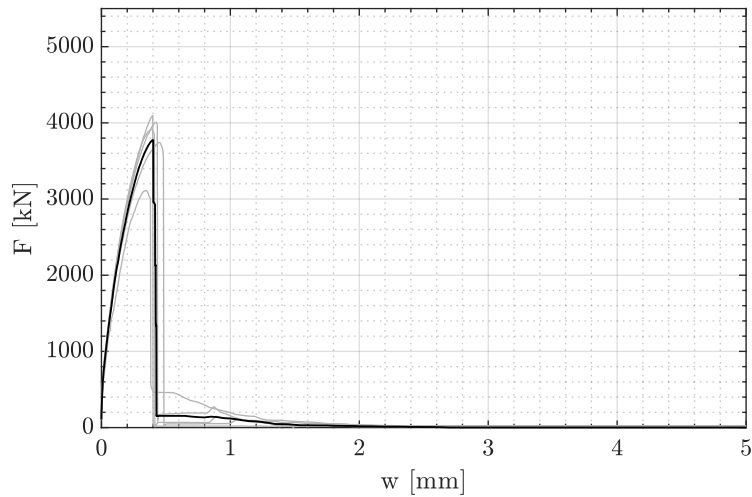
Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung

	1	2	3	4	5	6	7
τ_b [MPa]	0,001	4,30	6,90	9,10	3,65	1,35	0,01
s [mm]	0	0,007	0,450	1,600	2,100	3,000	6,000



A.5 Versuchsserie Typ K

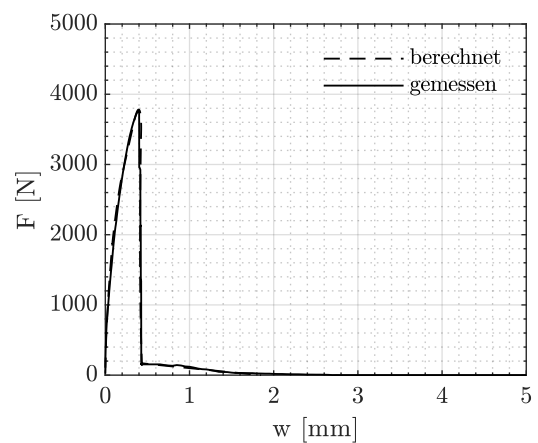
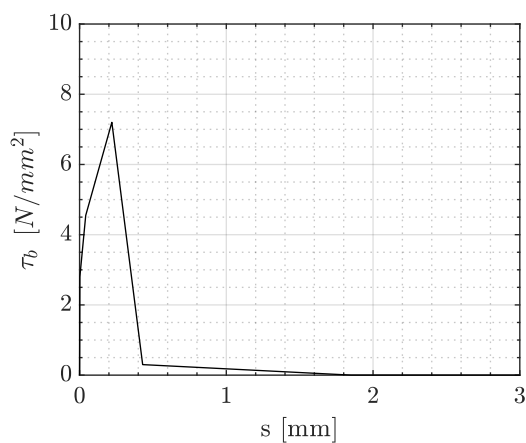
Kraft-Rissöffnungsbeziehung



	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	393,6	0,040

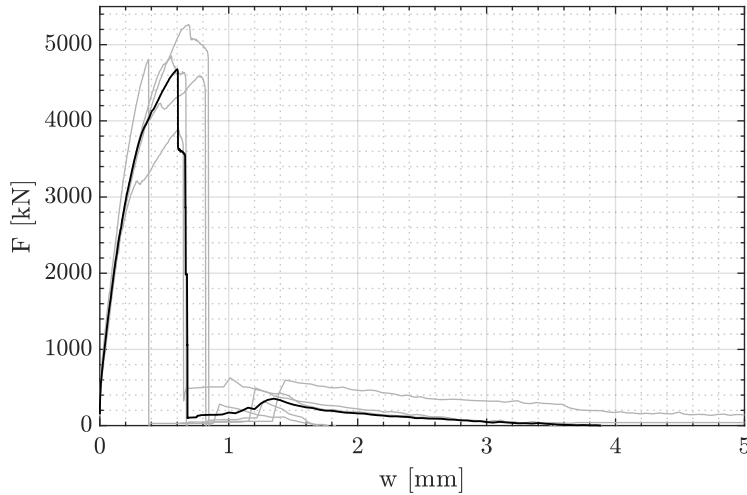
Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung

	1	2	3	4	5	6
τ_b [MPa]	0,001	2,80	4,55	7,20	0,30	0,001
s [mm]	0	0,002	0,042	0,220	0,430	1,850



A.6 Versuchsserie Typ U

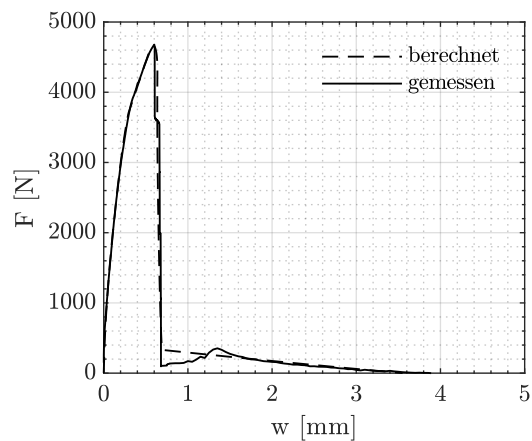
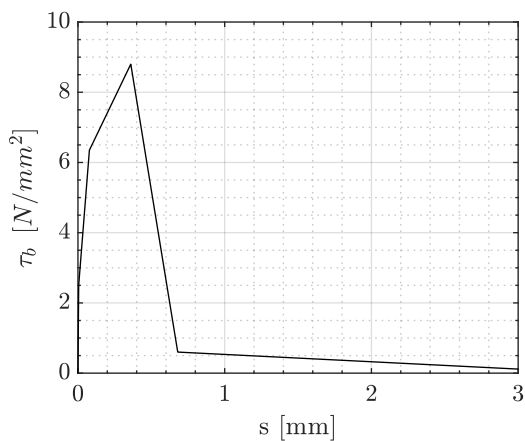
Kraft-Rissöffnungsbeziehung



	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	2,50	6,35	8,80	0,60	0,001
s [mm]	0	0,005	0,078	0,360	0,680	3,550



B Python-Code

```
1
2 # -*- coding: mbcs -*-
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

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 [-]
2,09	1,90	2,31	2,58	12,50	18,75	12,55	15,39	13,97	1,00	1,50	0,50
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

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 [-]
3,04	0,85	3,04	1,52	8,08	14,55	13,20	14,74	13,97	1,20	1,80	1,00
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

Mit Textilbeton den Betonbau neu denken – dieser innovative Verbundwerkstoff gibt Ingenieur_innen neue Möglichkeiten für schlanke und dauerhafte Konstruktionen im Betonbau an die Hand.

In dieser Forschungsarbeit wird auf das Verbundverhalten dieses neuen Verbundwerkstoffes und hier im Speziellen auf eine Längsrissbildung im Beton, die in der Ebene der textilen Bewehrung entstehen kann, eingegangen. In experimentellen und numerischen Untersuchungen wird gezeigt, dass die Entstehung von hohen Spaltzugbeanspruchungen, die zur beschriebenen Rissbildung führen, im

Wesentlichen von der Geometrie der Faserstränge abhängig ist. Zur Charakterisierung der Bewehrung werden deshalb anhand von Laserscans an textilen Bewehrungen geometrische Kennwerte eingeführt. Auf Basis der gesammelten Erkenntnisse wird ein Modell vorgestellt, das auf geometrischen Annahmen beruht und eine Berechnung der auftretenden Spaltzugkräfte ermöglicht. Mit dieser Abhandlung wird ein Beitrag zu einem besseren Verständnis des Verbundverhaltens textiler Bewehrungen in Beton geleistet, wodurch ein weiterer Schritt auf dem Weg zur Etablierung dieses neuen Werkstoffes in der Baupraxis gesetzt wird.

ISBN 978-3-85448-034-1



www.tuwien.at/academicpress