

MASTERARBEIT

Entwicklung einer Mikrostaalfaser zur Anwendung in UHPC

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplomingenieurs der Studienrichtung Bauingenieurwissenschaften

Verfasst von

Alexander Roman Beisl, BSc

Graz, Juni 2015

Betreuer: O. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue
Zweitbetreuer: Bmstr. Dipl.-Ing. Philipp Hadl
Institut für Betonbau
Technische Universität Graz

Eingereicht an der Technischen Universität Graz
Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

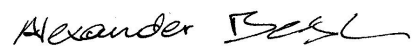
AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

13.05.2015

Datum/ Date



Unterschrift/ Signature

Danksagung

Zu Beginn bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Nguyen Viet Tue, der es mir ermöglichte meine Masterarbeit am Institut für Betonbau zu absolvieren. Für seinen ausgesprochen großen Beitrag zu dieser Arbeit bedanke ich mich bei meinem Betreuer D.I. Bmstr. Philipp Hadl, der mir dieses spannende und herausfordernde Thema vorgeschlagen hat. Im Betonlabor sowie im Büro stand er mir immer kompetent zur Seite. Mein Dank gilt auch allen Mitarbeitern der TU Graz welche mich im Labor beim Betonieren unterstützt haben.

Bei meinen Eltern und meiner Großmutter bedanke ich mich für die finanzielle und mentale Unterstützung während meines gesamten Studiums. Meinen Schwestern Claudia und Julia sei für das Korrigieren meiner Arbeiten, genauso wie für das Zwischenmenschliche gedankt. Bei meiner Freundin Birgit bedanke ich mich für die Unterstützung während meines Studiums und für die Reisen die wir in den Ferien unternommen haben.

Am Ende sei meinen Studienkollegen (Christian, Gregor, Irene, Manuel, Martin, Matthias, Michael und Stefan) gedankt, welche mich durch die Diskussionen zu den Lehrveranstaltungen immer weiter brachten und auch abseits der Universität eine Bereicherung für mich waren.

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Mikrostaalfaser zur Anwendung in Ultra High Performance Concrete (UHPC). Aufbauend auf theoretischen Grundlagen und UHPC im Allgemeinen sowie dessen Festbeton- und Frischbetoneigenschaften folgt eine detaillierte Betrachtung der Wirkungsweise von Fasern im Beton. Dabei wird die Grundgleichung der Nachrisszugfestigkeit von Faserbeton hergeleitet. Dies geschieht durch eine eingehende Betrachtung der Einzelkomponenten der Gleichung ausgehend von der Einzelfaser zum Verbundwerkstoff UHPC. Ebenfalls thematisiert wird das Entfestigungsverhalten ausgehend vom Mikro- zum Makroriss, sowie ein Überblick über die beiden unterschiedlichen Rissmodelle (Fictitious Crack Model, Crack Band Model) und deren Modifizierung. Abschließend folgt im theoretischen Teil eine Erläuterung zur Wirkungsweise von unterschiedlichen Fasern im Bauteil, dem sogenannten Fasercocktail.

Der experimentelle Teil der Arbeit konzentriert sich auf die Untersuchung und Dimensionierung eines Feindrahtes, welcher im UHPC als Faser eingesetzt werden soll. Zu Beginn wurden Vorversuche durchgeführt, aus denen Erkenntnisse gewonnen wurden, die für die weitere Untersuchung des Feindrahtes hilfreich waren. Danach wurden erste Ausziehversuche ausgeführt, um die Verbundeigenschaften des Feindrahtes mit dem UHPC zu untersuchen. Anschließend erfolgte eine Betrachtung der Faseroberfläche unter dem Rasterelektronenmikroskop und eine weitere Reihe an Ausziehversuchen.

Daraufhin wurden mit geschnittenen Fasern erste Biegezugversuche durchgeführt. Durch die Prüfung der Frisch- und Festbetoneigenschaften konnten Grenzwerte für die Länge der Faser und die einzusetzende Fasermenge ermittelt werden. In einem weiteren Schritt wurden Biegezugversuche an größeren Balken mit gleichem Fasergehalt und unterschiedlicher Faserlänge durchgeführt, um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen. Dabei erwiesen sich Fasern mit einem Durchmesser von 0.12 mm als besonders geeignet. Diese Faserabmessungen werden in einem laufenden Forschungsvorhaben verwendet. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf die weiteren Untersuchungen.

Abstract

This master thesis deals with the development of a micro steel fibre for Ultra High Performance Concrete (UHPC). Based on theoretical principles the fresh and hardened concrete properties are described. Following this, the interaction between fibres and concrete is examined in detail. The basic equation for post cracking behaviour and its variables are analysed. This work also describes of the fictitious crack model and the crack band model, as well as one of their modifications. Finally the theoretical part of this thesis is concluded by a chapter about the interaction of fibres differing in length within a certain mixture, a so called fibre cocktail.

The experiments carried out for this thesis focus on the investigation and size of a wire suitable as a UHPC fibre. At the beginning, bending tests with commercially available fibres were carried out to gain information for the following test setups. The first tests conducted were single fibre pull out tests, in order to examine the bond properties between the wire and the UHPC. Subsequently the surface of the wire was examined by an electron microscope and a second series of single fibre pullout tests was performed.

After the examination of bond properties, the fresh and hardened state properties were studied. Therefore, a series of bending and compression tests were carried out. The specimens included different fibre lengths and fibre volumes. The test results led to an upper and lower limit for the fibre amount. To compare the results from the previous bending tests, an additional test series with large beams was carried out. In this series, only the fibre length was modified. At the end, this master thesis is summarized and an outlook on the upcoming research is presented.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	9
1.1	Ausgangslage und Motivation	9
1.2	Zielsetzung.....	9
1.3	Aufbau der Arbeit	10
2	Ultra High Performance Concrete	11
2.1	Mechanisches Verhalten	11
2.2	Frischbetoneigenschaften.....	13
3	Wirkungsweise von Fasern.....	15
3.1	Ausziehverhalten der Einzelfaser	15
3.2	Orientierung und Verteilung	19
3.3	Menge	24
3.4	Grundgleichung der Nachrisszugfestigkeit.....	26
3.5	Entfestigungsverhalten.....	28
3.6	Rissmodelle.....	30
3.7	Fasercocktail	33
4	Experimentelle Untersuchungen.....	35
4.1	Verwendete UHPC-Mischung	35
4.2	Vorversuche	36
4.2.1	Versuchsaufbau	36
4.2.2	Versuchsdurchführung	37
4.2.3	Ergebnisse.....	39
4.3	Ausziehversuche 1	42
4.3.1	Versuchsaufbau	42
4.3.2	Versuchsdurchführung	43
4.3.3	Ergebnisse.....	44
4.4	Rasterelektronenmikroskop-Untersuchung der Faseroberfläche	47
4.4.1	Versuchsaufbau	48
4.4.2	Versuchsdurchführung	48
4.4.3	Ergebnisse.....	49
4.5	Ausziehversuche 2	52
4.5.1	Versuchsaufbau	52
4.5.2	Versuchsdurchführung	53
4.5.3	Ergebnisse.....	54

4.6	Biegezug-Tastversuche.....	61
4.6.1	Versuchsaufbau	62
4.6.2	Versuchsdurchführung	62
4.6.3	Ergebnisse.....	63
5	Abschlussversuche und empfohlene Faserabmessung.....	72
5.1	Biegezugversuche	72
5.1.1	Versuchsaufbau	73
5.1.2	Versuchsdurchführung	73
5.1.3	Ergebnisse.....	74
5.2	Rückrechnung auf Verbundspannung.....	75
5.3	Schlussfolgerungen.....	77
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	78
	Literaturverzeichnis.....	79
	Abbildungsverzeichnis.....	82
	Tabellenverzeichnis.....	86
	Anhang – REM-Bilder.....	87

Verwendete Symbole und Abkürzungen

A_c	Betonquerschnitt
CBM	Crack Band Model
d_f	Faserdurchmesser
$d_{g,max}$	Größtkorndurchmesser
E^*	Entlastungsmodul
E_m	E-Modul
F	Kraft
FCM	Fictitious Crack Model
F_{max}	Maximal übertragbare Kraft
f_u	Faserzugfestigkeit
F_v	Maximale Versuchskraft
g	Faserwirksamkeit
l_b	Einbindelänge
l_f	Faserlänge
$l_{f,crit}$	Kritische Faserlänge
$l_{f,proj}$	Projizierte Faserlänge
MW	Mittelwert
N_f	Faseranzahl
REM	Rasterelektronenmikroskop
$R_{p0.2}$	Ersatzstreckgrenze
U/min	Umdrehungen pro Minute
UHPC	Ultra High Performance Concrete
V	Faserfaktor
V_c	Bruttobetonvolumen
V_f	Fasergehalt [kg/m^3]
w	Rissweite
WA	Wegaufnehmer

x_{F_v}	Weg bis F_v
x_{ges}	Gesamter Ausziehweg
XPS	Extrudiertes Polystyrol
δ	Durchbiegung
ε	Dehnung
η	Faserorientierungsbeiwert
θ	Faserausziehwinkel
P	Faserdichte
ρ_{crit}	Kritischer Fasergehalt
ρ_f	Fasergehalt [Vol-%]
σ	Spannung
σ_{cf0}	Nachrisszugfestigkeit
$\sigma_{max,mittel}$	Mittlere maximale Biegezugspannung
σ_{riss}	Maximale Matrixzugfestigkeit
τ_f	Verbundspannung

1 Einleitung

Beton ist der meist verwendete Werkstoff im Bauwesen und wird ständig weiter entwickelt. Ultra High Performance Concrete stellt in diesem Zusammenhang den aktuellen Entwicklungsstand dar und ermöglicht durch seine hohen Festigkeiten filigrane und dauerhafte Bauteile. Die hohen Festigkeiten gehen in der Regel mit einer Versprödung des Baustoffes einher. Daher ist der Einsatz von metallischen oder organischen Fasern notwendig. In diesem Zusammenhang haben sich Mikrostaalfasern mit einem Durchmesser von 0.15-0.3 mm bewährt. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Mikrostaalfaser mit einem Durchmesser von 0.12 mm entwickelt.

1.1 Ausgangslage und Motivation

Um Siliziumblöcke zu Elementen für die Fotovoltaikindustrie zu verarbeiten wird von der Fa. *Vostalpine Special Wire GmbH* ein Feindraht mit einem Durchmesser von 0.08 mm-0.18 mm verwendet. Mit diesem Feindraht werden Blöcke in sehr dünne Elemente geschnitten. Die Qualitätsanforderungen an den erwähnten Feindraht sind sehr hoch, da er auf einer Länge von mehreren Kilometern fehlerfrei sein muss. Ist dies nicht der Fall, kann der Draht für das Schneiden von Siliziumblöcken nicht eingesetzt werden. Der Draht wird ausgeschieden und im Zuge des LD-Verfahrens wieder eingeschmolzen.

Um die bereits in das Produkt investierte Energie, Arbeitskraft und das Know-how nicht zu verschwenden, soll der Draht einem anderen Verwendungszweck zugeführt werden. Aus diesem Grund soll er weiterverarbeitet werden und als Faser in UHPC zum Einsatz kommen.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, zunächst die Eigenschaften des Feindrahtes in Verbindung mit UHPC zu untersuchen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen soll eine Faser entwickelt werden. Dabei sind sowohl die Länge als auch die Menge der aus dem Feindraht herzustellenden und zu verarbeitenden Fasern zu definieren. Schlussendlich soll eine optimale Faserabmessung definiert werden

1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird zunächst der Begriff UHPC definiert und abgegrenzt. Darauf folgt in Kapitel 2.1 die Betrachtung des mechanischen Verhaltens von UHPC in Abhängigkeit seiner Beanspruchung. Abgeschlossen wird Kapitel 2 durch Erläuterungen zu den Frischbetoneigenschaften von UHPC (Kapitel 2.2).

In Kapitel 3 werden die einzelnen mechanischen Parameter (Kapitel 3.1, 3.2 und 3.3) der Grundgleichung für die Nachrisszugfestigkeit von Faserbeton (Kapitel 3.4) erläutert. Anschließend wird in Kapitel 3.5 das Entfestigungsverhalten von Faserbeton beschrieben. Danach folgt in Kapitel 3.6 eine Betrachtung der Rissbildung und der dafür angewendeten unterschiedlichen Rissmodelle. Schließlich wird die Kombination unterschiedlicher Fasertypen in Kapitel 3.7 betrachtet.

Kapitel 4 widmet sich den im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Versuchen. Zunächst wird in Kapitel 4.1 die verwendete UHPC-Mischung beschrieben. Danach wird in Kapitel 4.2 auf die Vorversuche eingegangen. Kapitel 4.3 widmet sich der ersten Reihe an Ausziehversuchen an dem zu untersuchenden Feindraht. Da die Ergebnisse aus Kapitel 4.3 nicht zufriedenstellend waren, wurden die Faseroberflächen mit dem Rasterelektronenmikroskop untersucht, wie in Kapitel 4.4 genauer erläutert. Die zweite Reihe an Ausziehversuchen wird in Kapitel 4.5 beschrieben. Im Anschluss daran wurden erste Biegezugversuche und Druckversuche mit mikrostahlfaserverstärktem UHPC durchgeführt, diese werden in Kapitel 4.6 beschrieben.

Kapitel 5 behandelt Versuche an Balken, die durchgeführt wurden, um die bisherigen Ergebnisse zu vergleichen. Dazu wird aus den Biegezugspannungen mittels Ingenieurmodellen auf die Verbundspannung der Fasern zurückgerechnet. Die aus den durchgeführten Versuchen gezogenen Schlussfolgerungen werden in Kapitel 6 zusammengefasst und der Ausblick behandelt.

2 Ultra High Performance Concrete

Als UHPC (Ultra High Performance Concrete) wird lt. [27] ein Beton mit Druckfestigkeiten von 150-250 N/mm² verstanden. Diese gegenüber Normalbeton 5-10 Mal höheren Druckfestigkeiten werden lt. [18] durch eine Minimierung der Störungen im Gefüge und eine Maximierung der Packungsdichte erreicht. Dafür müssen nach [27] die Partikelgrößen bis in den Mehlkornbereich (Korngröße < 0.125 mm) abgestimmt werden. Um dies zu erreichen werden latent hydraulische Stoffe (z.B.: Hüt-tensandmehl), puzzolanische Zusatzstoffe (z.B.: Mikrosilika) und Steinmehle eingesetzt. Des Weiteren wird ein sehr niedriger W/B-Wert verwendet (0.15-0.25 lt. [27]; ~ 0.2 lt. [18] und < 0.35 lt. [22]). Um den Beton dennoch verarbeiten zu können, werden hochwirksame Verflüssiger auf Polycarboxylatbasis beigemischt [29]. Mit speziellen Verflüssigern ist sogar die Realisierung eines selbstverdichtenden UHPC möglich. Durch den geringen W/B-Wert und den hohen Zementanteil kommt es des Weiteren zu hohen autogenen Schwindmaßen [18]. Je nach Größtkorn des Zuschlages kann zwischen Feinkorn-UHPC (≤ 1 mm) und Grobkorn-UHPC (> 1 mm) unterschieden werden [22].

2.1 Mechanisches Verhalten

Durch die Optimierung der Packungsdichte werden Druckfestigkeiten erreicht, welche schon im Bereich niedriger Stahlgüten liegen, siehe Abb. 2.1. Diese hohen Druckfestigkeiten, gehen lt. [18] auch mit einer Versprödung des Werkstoffes einher. So verhält sich UHPC bis zu einem Erreichen von ungefähr 80-90 % der Höchstlast linear-elastisch. Bei Erreichen der Höchstlast versagt der Werkstoff dann aber plötzlich ohne Vorankündigung [22], siehe Abb. 2.2. Ebenfalls charakteristisch für den Bruch von UHPC unter Druckbeanspruchung ist, dass die Bruchflächen durch die Zuschläge verlaufen. Der Grund dafür liegt einerseits im guten Verbund von Zuschlag und Matrix, siehe 3.1, andererseits in der Zementsteifigkeit [22].

In [27] wird die Möglichkeit erwähnt, dem UHPC Fasern beizumengen, um sein Nachbruchverhalten zu verbessern und ein duktiles Versagen zu erreichen, siehe Abb. 2.2. Eine weitere Möglichkeit die Duktilität zu verbessern ist lt. [22] die Umschnürung des Werkstoffes, zum Beispiel durch mit UHPC gefüllte Stahlformrohre.

Der E-Modul von UHPC ist im Vergleich zu Normalbeton und bei Verwendung identer Zuschläge höher. Er kann bei den oben erwähnten Druckfestigkeiten Werte zwischen 43.000 und 55.000 N/mm² erreichen [22].

Die Zugfestigkeit der Matrix liegt zwischen 5 und 10 N/mm² [27]. UHPC weist auch unter einaxialer Zugbeanspruchung ein sprödes Versagen auf. Hier führt die Zugabe von Fasern zu einem duktileren Nachbruchverhalten [22]. Lt. [18] kann es durch die Zugabe von Fasern zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit auf bis zu 30 N/mm² kommen. Um solche Festigkeiten zu erreichen, kommt es nach dem Erst-riss zu einer Laststeigerung durch den Verbundwerkstoff unter einer Mehrfachrissbildung. Lt. [7] spricht man dabei von einem „überkritischen Fasergehalt“, siehe Kap. 3.3. Dieses Verhalten kann lt. [27] als Abgrenzung von UHPC zu konventionellen Faserbetonen gesehen werden.

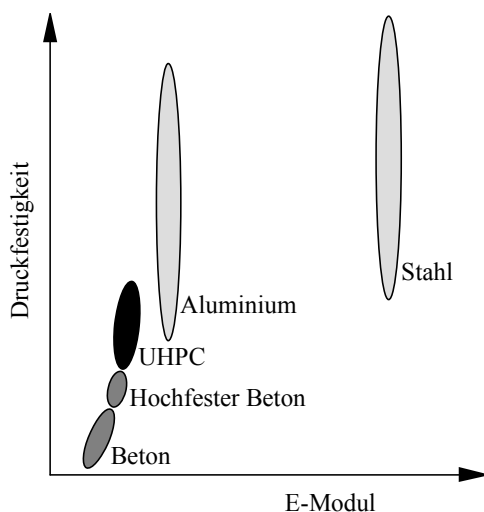


Abb. 2.1: Qualitativer Druckfestigkeitsvergleich zwischen UHPC und anderen Werkstoffen, nach [18]

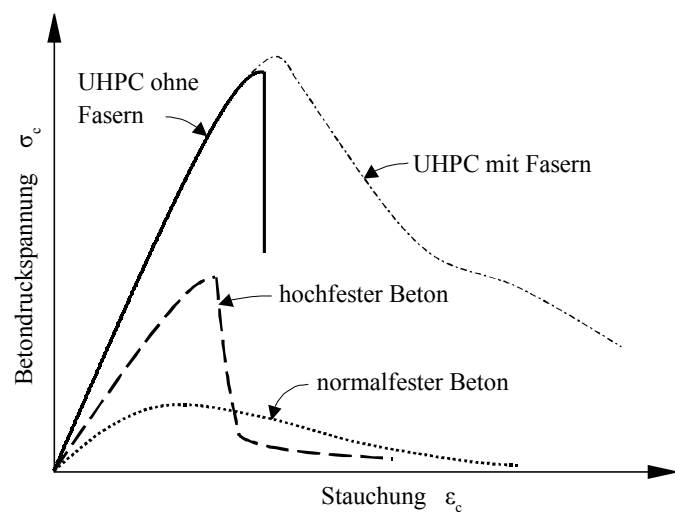


Abb. 2.2: Charakteristische Spannungs-Dehnungslinien verschiedener Betone, [22]

Da lt. [36] sämtliche direkte Zugversuche an UHPC eine Herausforderung darstellen, werden in der Praxis meist Biegezugversuche durchgeführt. Die daraus resultierenden Biegezugfestigkeiten, sind lt. [27] fiktive Werte, welche sich auf die Randfaser eines ungerissenen Querschnitts beziehen. Der Grund für die Durchführung von Biegezugversuchen und die Ermittlung von Biegezugfestigkeiten liegt im einfacheren Versuchsaufbau und den geringeren Kosten. Mit den Biegezugfestigkeiten muss auf eine zentrische Zugfestigkeit rückgerechnet werden. Eine Möglichkeit stellt die in [13] entwickelte numerische Methode dar. Dabei können Nachrisszugfestigkeiten ohne Verwendung der Finiten Element Methode aus Biegezugversuchen berechnet werden.

2.2 Frischbetoneigenschaften

Werden einer Betonmischung Fasern zugegeben, so verringert sich die Fließfähigkeit und damit die Verarbeitbarkeit des Betons [35]. Dafür gibt es mehrere Gründe: Glatte gerade Fasern weisen im Gegensatz zu konventionellen Zuschlägen – bei gleichem Volumen – eine größere Oberfläche auf. Dies führt lt. [38] zu höherer Kohäsion zwischen Faser und Matrix und dadurch zu einer verminderten Verarbeitbarkeit. Ebenfalls weist die Oberfläche der Fasern eine andere Beschaffenheit auf, wodurch sie andere Eigenschaften als die Oberfläche der Zuschläge aufweist [14]. Lt. [7] kommt es durch den Einsatz von Fasern außerdem zu einem erhöhten Wasseranspruch und es wird im Vergleich zu Normalbeton mehr Zementleimvolumen benötigt.

Werden geometrisch verformte Fasern (beispielsweise mit Endhaken, gewellt, etc.) beigemischt, kommt es ebenfalls zu einer Verschlechterung der Verarbeitbarkeit. Der Grund dafür liegt lt. [38] in der im Vergleich zu geraden Fasern erhöhten Reibung zwischen den geometrisch verformten Fasern und den Zuschlägen.

Die maximal mögliche Fasermenge wird deshalb lt. [14] durch den Punkt bestimmt, bei dem eine stark verminderte Verarbeitbarkeit des Frischbetons auftritt. Dieser Punkt ist sowohl von der Betonzusammensetzung, als auch von dem verarbeiteten Fasertyp (Werkstoff und Form) abhängig. In [7] wird hier vor allem das Verhältnis von Faserlänge zu Faserdurchmesser – auch Faserschlankheit oder l/d -Verhältnis erwähnt. Je höher dieser Wert ist desto schlechter ist die Verarbeitbarkeit des Frischbetons bei gleichem Fasergehalt.

Werden nun trotz der abnehmenden Verarbeitbarkeit weitere Fasern zugegeben, so kann es lt. [10] ab einer gewissen Fasermenge zur sogenannten Igelbildung kommen. Unter Faserigel versteht man lt. [7] die Agglomeration von einzelnen Fasern zu Bällen, siehe Abb. 2.3. Ein Faserigel stellt eine Inhomogenität im Faserbetongefüge dar und beeinflusst die Festbetoneigenschaften negativ [10]. Dieses Phänomen kann auch bei der Zugabe der Fasern im Mischprozess auftreten. Um dies zu verhindern müssen die Fasern beim Zugeben vereinzelt werden. Dies kann durch Einsieben [10] oder Einblasen [23] der Fasern erreicht werden.

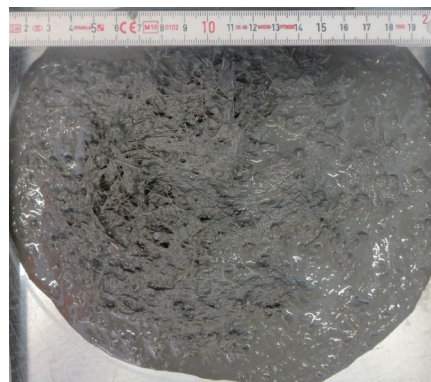


Abb. 2.3: Igelbildung in UHPC nach der Entnahme aus dem Mischer

Der Luftporengehalt von Faserbeton liegt lt. [7] immer höher als jener von faserfreiem Beton. Er liegt lt. [6] in einem Bereich von 1-4 %. Je geringer die Viskosität desto geringer lt. [6] auch der Luftporengehalt. Dieser Zusammenhang wird in [31] ebenfalls beobachtet und dadurch erklärt, dass mit steigender Fließfähigkeit des Betons, auch die Entlüftungsfähigkeit steigt. In [6] wird noch auf die Tendenz verwiesen, dass mit steigender Faserlänge auch der Luftporengehalt steigt.

Selbstverdichtender Beton ist ein Beton, der sich beim Fließen einer Entmischung widersetzt, ohne Rütteln die Schalung ausfüllt und sich dabei selbst entlüftet [14]. Des Weiteren muss er in der Lage sein die Fasern - unter Beibehaltung seiner selbstverdichtenden Eigenschaften - als Frischbeton zu transportieren [35]. Ding, et al. [9] berichten, dass Fasergehalte von bis zu 50 kg/m³ Stahlfasern zu keinem Verlust der selbstverdichtenden Eigenschaften führen.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass der Entwurf einer Faserbetonrezeptur einen Kompromiss zwischen den Frischbetoneigenschaften (Verarbeitbarkeit und Homogenität) und den Festbetoneigenschaften (Werkstofffestigkeiten) darstellt [14].

3 Wirkungsweise von Fasern

3.1 Ausziehverhalten der Einzelfaser

Um die Nachbruch-Eigenschaften des UHPC durch Faserzugabe zu verbessern, muss die Faser bei Rissbildung lt. [32] ausgezogen werden. Um dies zu erreichen, darf die Zugspannung der Faser selbst nicht überschritten werden. Sollte dies dennoch passieren, kommt es zum Reißen der Faser und der Verbundwerkstoff Faserbeton versagt spröde und nicht – wie angestrebt – duktil. Die Kraft, welche von einer Faser übertragen werden kann, ist lt. [7] abhängig vom Verbund zwischen der Faser und der umgebenden Zementmatrix. Dieser Verbund kann lt. [37] in einen physikalisch-chemischen (Haft- und Reibverbund) und einen mechanischen (Formverbund) gegliedert werden. In [22] wird davon ausgegangen, dass die Verbundeigenschaften in UHPC ausreichen, um nur mit dem physikalisch-chemischen Verbund eine ausreichende Kraftübertragung zu erreichen. Dies konnte bei den ersten Ausziehversuchen in dieser Arbeit, siehe Kapitel 4.3, nicht bestätigt werden. Aus diesem Grund wird hier auch der mechanische Verbund behandelt.

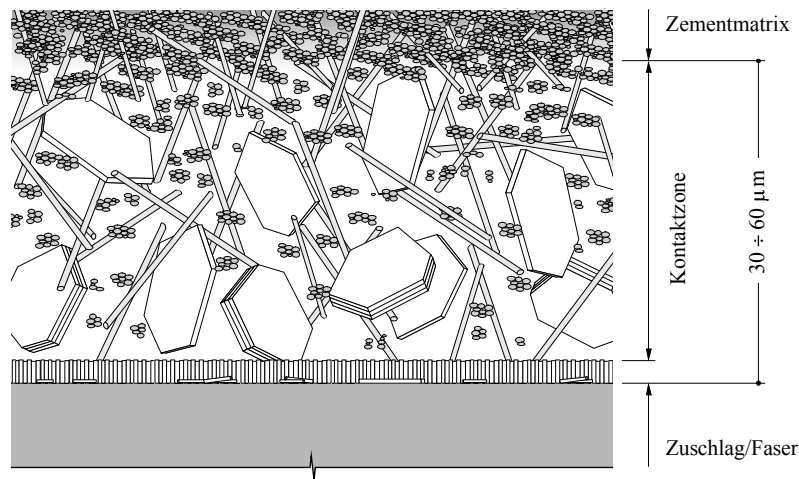


Abb. 3.1: Kontaktzone zwischen Faser und Matrix, nach [26]

Am Beginn ist die Faser lt. [7, 32] vollständig von der Betonmatrix umschlossen. Es besteht eine physikalisch-chemische Bindung (Adhäsion) und man spricht von Haftverbund. Bei dieser Verbundart verformen sich Matrix und Faser unter Belastung gleichmäßig und elastisch als Verbundkörper, siehe Abb. 3.2 a) und Abb. 3.3 „I“. Dies ist möglich, bis die auftretenden Scherspannungen die Festigkeit der Kontaktzone überschreiten.

In [26] wird die Kontaktzone als eine ungefähr 30-60 μm dicke Schicht beschrieben, welche sich zwischen Faseroberfläche oder Gesteinskorn und der Zementmatrix bildet, siehe Abb. 3.1. Sie weist lt. [22] eine geringere Festigkeit als die Matrix auf und besteht aus Calciumhydroxidkristallen. Bei UHPC wird bewusst versucht, diese Schicht mit Feinstfüllern zu minimieren. Dies wirkt sich lt. [22] positiv auf den Verbund zwischen Faser und Matrix aus. Weiters wird in [26] die Möglichkeit erwähnt über Betonzusatzmittel die Kontaktzone, und damit die Verbundfestigkeit, zu beeinflussen.

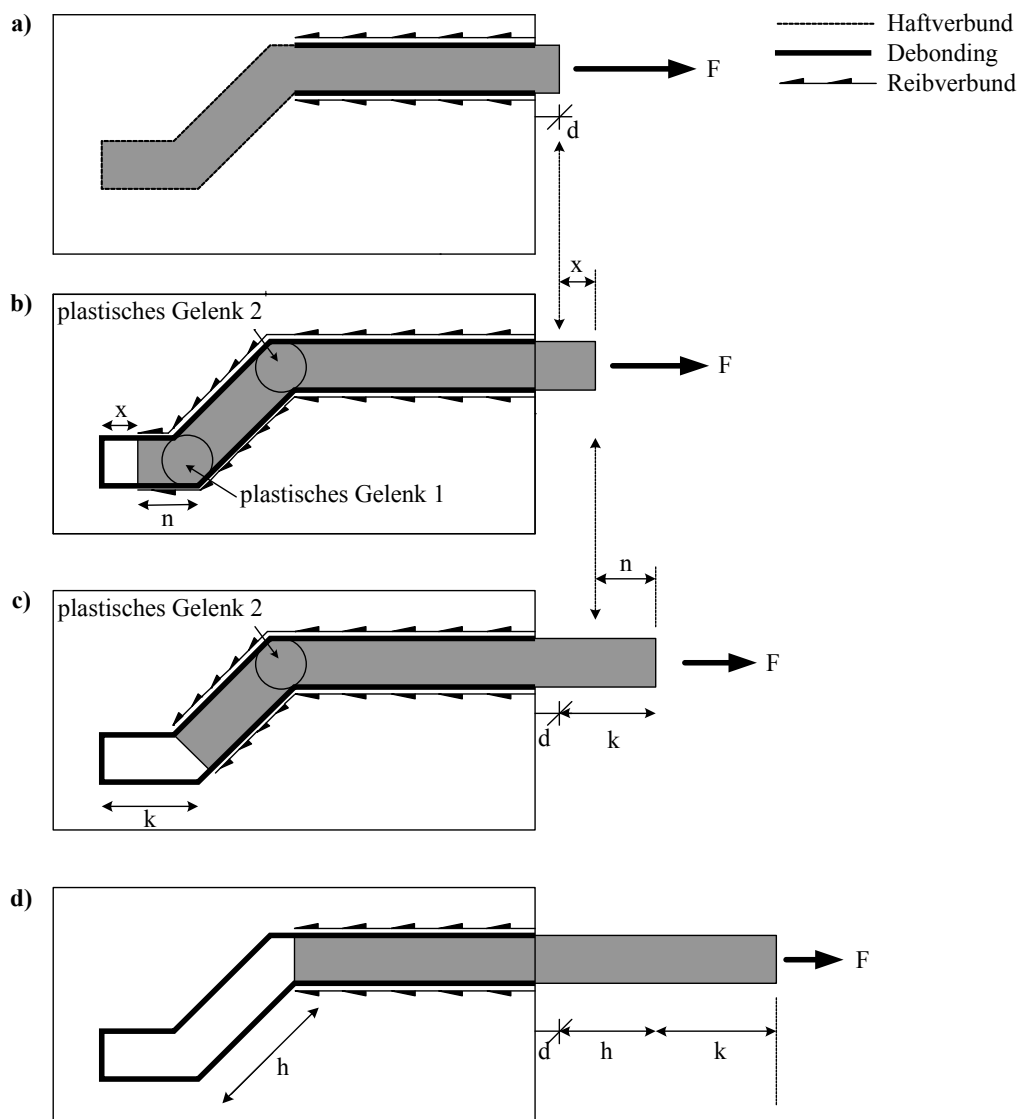


Abb. 3.2: Faserauszug einer geometrisch verformten Faser, nach [7, 32]

Nach dem Überschreiten der Festigkeit der Kontaktzone kommt es lt. [7, 32] zum „Debonding“. Ausgehend von einem Initialriss beginnt das Loslösen der Faser aus dem Haftverbund, siehe Abb. 3.2 a). Durch die dabei entstehende Relativverschiebung zwischen Faser und Matrix, kommt es zu Reibverbund. Dieser ist in [7] sowohl als abhängig von der elastischen Dehnung als auch der Oberflächenbeschaffenheit der Faser, sowie der Beschaffenheit der Kontaktzone beschrieben. Mit zunehmender Kraft löst sich der Haftverbund der Faser weiter bis sich lt. [22] der letzte verbleibende Teil durch gespeicherte elastische Energie abrupt löst, siehe Abb. 3.2 b). Bei glatten Fasern ist der Reibverbund jener Verbundmechanismus, der bis zum vollständigen Auszug der Faser aktiv ist, siehe Abb. 3.3.

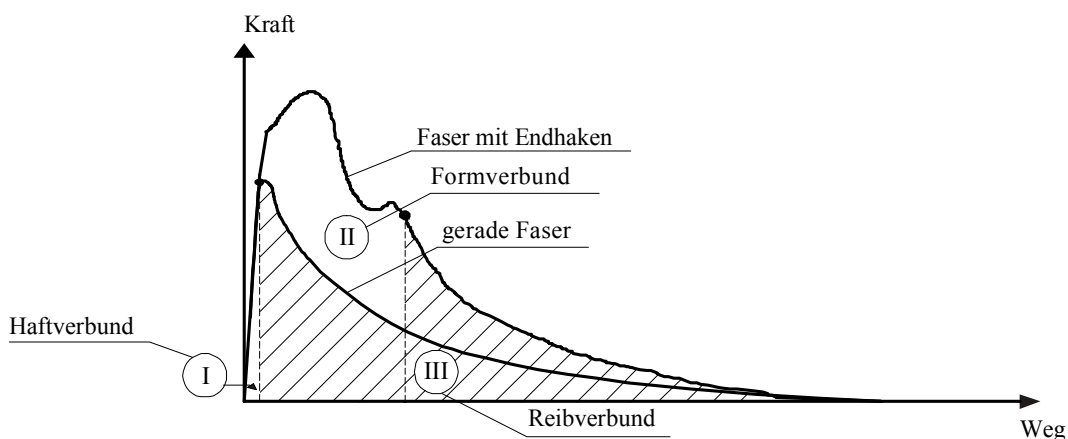


Abb. 3.3: Qualitative Darstellung zweier Ausziehversuche, nach [7, 14]

Die Eigenschaften des mechanischen Verbundes werden lt. [37] durch die geometrischen Parameter der Faser bestimmt. Dabei kann zwischen Verformungen unterschieden werden, die sich über die gesamte Faser erstrecken und solchen, bei denen sich die Verformungen nur am Ende der Faser befinden (Endhaken). Seine Wirkung kann der Formverbund nach den ersten Schlupferscheinungen zwischen Faser und Matrix erreichen [7]. Dies geschieht durch eine Verzahnung der geometrischen Verformungen der Faser mit der Matrix, wodurch es zu einer kraftschlüssigen Verbindung kommt. Diese Verbindung wirkt lt. [7] dem Herausziehen der Faser entgegen. Wird die Kraft nun weiter gesteigert, kommt es unter Bildung plastischer Gelenke in den Verformungen, siehe Abb. 3.2 b) und c) zu einem Auszug der Faser aus der Matrix [32]. Sind sämtliche geometrische Verformungen plastisch deformiert, so kommt es zu einem Auszug der Faser unter Reibverbund, siehe Abb. 3.2 d).

Bis das „Debonding“ der Faser vollständig abgeschlossen ist, wird von der Faseraktivierungsphase gesprochen, siehe Abb. 3.2 a). Nachdem dieser Punkt überschritten wurde und die Faser nur noch ausgezogen wird, wird von der Faserauszugsphase gesprochen, siehe Abb. 3.2 b) bis c) [18].

Um das Verbundverhalten zwischen Faser und Matrix mathematisch behandeln zu können, wurden in der Vergangenheit unterschiedliche Verbundgesetze formuliert. Eine Diskussion und Zusammenstellung findet sich in [26]. Da sich lt. [26] auch mit dem vereinfachten, starr-plastischen Verbundgesetz ausreichend genaue Ergebnisse für Faserbeton erzielen lassen, wird dies für die folgenden Betrachtun-

gen zu Grunde gelegt. Das starr-plastischen Verbundgesetz geht, wie in Abb. 3.4 ersichtlich, von einer über die gesamte Faserlänge bzw. -oberfläche konstanten Verbundspannung τ_f [N/mm²] aus. Legt man nun eine Einbindelänge l_b [mm], einen kreisförmigen Faserquerschnitt und einen Faserdurchmesser d_f [mm] fest, so kann man mithilfe der Formel (3.1) auf die von der Faser übertragbare Kraft F [N] schließen.

$$F = \tau_f * l_b * d_f * \pi \quad (3.1)$$

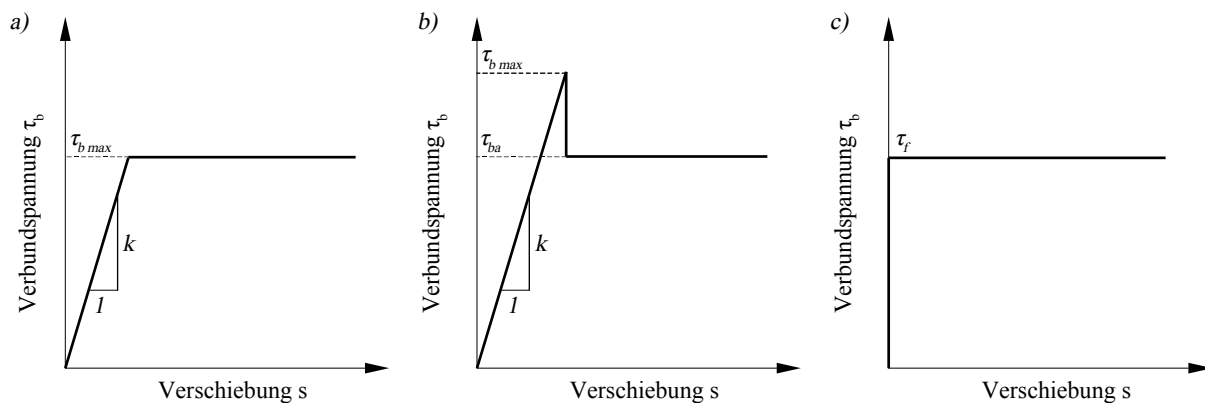


Abb. 3.4: a) Ideal-elastisch-ideal-plastisches Verbundgesetz, b) Ideal-elastisch-abgetreppert-ideal-plastisches Verbundgesetz, c) Starr-plastisches Verbundgesetz, nach [26]

Wichtig zu erwähnen ist, dass die maximal übertragbare Kraft F_{max} [N] an die Zugfestigkeit der Faser f_u [N/mm²] gebunden ist [12].

$$F_{max} = f_u * \frac{d_f^2 * \pi}{4} \quad (3.2)$$

Betrachtet man nun eine Faser, welche einen in Fasermittre auftretenden Riss rechtwinkelig kreuzt, so spricht man von der „Modellfaser“ [12]. Da der Faserauszug aufgrund des geringeren Widerstands lt. [7] immer auf der kürzeren Seite stattfindet, stellt der in der Mitte der Faser auftretende Riss bei der Modellfaser den Idealfall dar [12]. Aus dem bisher genannten ergibt sich für die rissüberbrückende Faser eine maximale Einbindelänge l_b von der Hälfte der Faserlänge l_f .

Setzt man nun $F = F_{max}$ (Formel (3.1) = (3.2)), so ergibt sich bei gegebenem Faserdurchmesser d_f [mm], Verbundspannung τ_f [N/mm²] und Zugfestigkeit der Faser f_u [N/mm²] die kritische Faserlänge $l_{f,crit}$ [mm], bei der die Modellfaser voll ausgelastet ist, ein Reißen aber gerade noch nicht eintritt.

$$l_{f,crit} = \frac{f_u * d_f}{2 * \tau_f} \quad (3.3)$$

Die experimentelle Ermittlung der Verbundspannung τ_f erfolgt lt. [22] über Ausziehversuche an der Einzelfaser. Diese Ausziehversuche gleichen vom Prinzip her jenen an Betonstählen [22]. Für die Versuche können lt. [26] Probekörper mit einseitigem oder zweiseitigem Verbund hergestellt werden, siehe Abb. 3.5. Um die Verbundspannung τ_f zu ermitteln, wird Formel (3.1) in Bezug auf τ_f ausgewertet. Nähere Beschreibungen, der im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Ausziehversuche, befinden sich in Kap. 4.3.

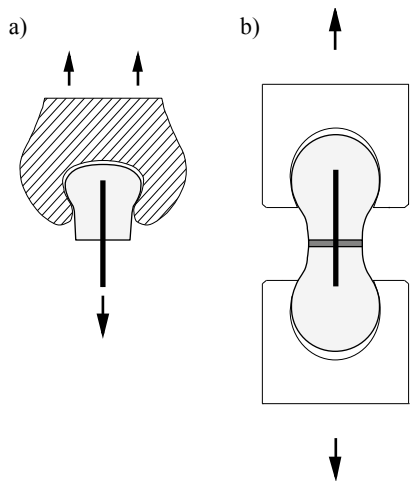


Abb. 3.5: Faserausziehversuche: a) Einseitiger Verbund [26], b) Zweiseitiger Verbund (Kap. 4.3.1)

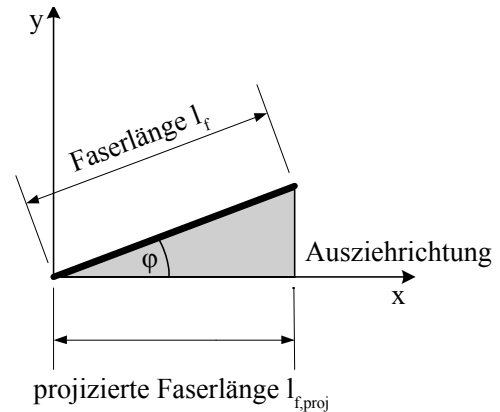


Abb. 3.6: Definitionen der Faserlängen für den Orientierungsbeiwert, nach [34]

3.2 Orientierung und Verteilung

Die Faserorientierung beschreibt lt. [32] die Ausrichtung der Fasern in einem definierten Volumen. Um die Faserorientierung zu quantifizieren hat sich lt. [10] in der Literatur der Faserorientierungsbeiwert η durchgesetzt. Unter η wird die Summe der in Ausziehrichtung projizierten mittleren Faserlänge aller Fasern, dividiert durch die Gesamtlänge der Fasern, verstanden [10, 32]. Sind also alle Fasern in Bezugsrichtung orientiert, nimmt η den Wert 1 an. Stehen im Gegensatz dazu alle Fasern normal auf die Ausziehrichtung, so nimmt η den Wert 0 an [32]. Dieser Zusammenhang wird mit Formel (3.4) beschrieben und ist in Abb. 3.6 dargestellt.

$$\eta = \frac{1}{N_F} * \sum_{n=0}^{N_F} \frac{l_{f,proj}}{l_f} \quad 0 \leq \eta \leq 1.0 \quad (3.4)$$

Bei der analytischen Herleitung der theoretischen Faserorientierungsbeiwerte in [26] wird über die Auftretenswahrscheinlichkeit der zwei Raumwinkel integriert. In Abhängigkeit der angenommenen idealen Faserverteilung (eindimensional, zweidimensional oder dreidimensional) ergeben sich folgende theoretische Faserorientierungsbeiwerte:

- $\eta_{1D} = 1.0$
- $\eta_{2D} = 2/\pi = 0.637$
- $\eta_{3D} = 0.5$

In unterschiedlichen Arbeiten finden sich, für die theoretische Herleitung der Faserorientierung, teilweise stark voneinander abweichende Werte [10]. Als Beispiel sei hier die in [22] zusammengestellte Bandbreite des theoretischen Faserorientierungsbeiwertes bei dreidimensionaler Verteilung genannt: $0.2 < \eta_{3D} < 0.66$. Der Grund für diese divergierenden Werte liegt lt. [18] in den unterschiedlichen Randbedingungen und Reduktionsfaktoren, welche von den Autoren berücksichtigt wurden. Jene Einflüsse, welche die Faserorientierung eines Bauteils von der im Allgemeinen als zufällig dreidimensional zu betrachtenden abweichen lassen, werden hier nun im Anschluss erläutert [10].

Die Orientierung der Fasern ist lt. [21] abhängig von sich gegenseitig beeinflussenden äußeren Einflüssen. So ist die im Festbetonzustand anzutreffende Faserorientierung abhängig von folgenden Herstellungsphasen:

- Frischbetoneigenschaften nach dem Mischen des Betons
- Einbringen in die Schalung
- Betonfluss und/oder Einbringen von Verdichtungsenergie
- Schalungsgeometrie und dadurch auftretende Randeffekte

In jeder dieser Herstellungsphasen herrscht – an einer bestimmten Stelle – eine gewisse Faserorientierung vor, welche von der darauffolgenden Phase verändert wird.

Die Fließfähigkeit des Faserbetons ist die Frischbetoneigenschaft mit dem größten Einfluss auf die Faserorientierung nach dem Mischvorgang [21]. Bei Faserbeton kann deshalb lt. [21] eine ideal dreidimensionale Faserorientierung nach dem Mischvorgang angenommen werden ($\eta_{3D} = 0.5$). Selbstverdichtender Faserbeton weicht hier jedoch schon von dieser Orientierung ab, da sein Fließvorgang lt. [21] als in Ebenen idealisiert betrachtet werden kann. Dadurch kommt es zu einer stärkeren Ausrichtung der Fasern in der Horizontalen.

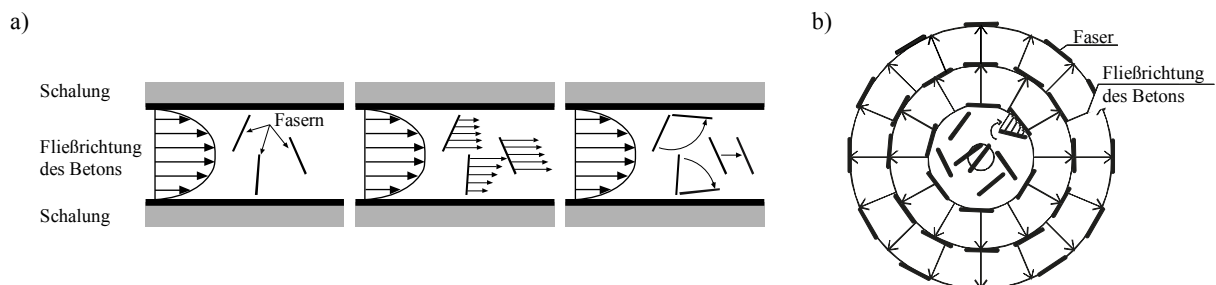


Abb. 3.7: Einfluss des Betonflusses auf die Faserorientierung; a) Im Balken, nach [31]; b) In der Platte, nach [1]

Die Art und Weise wie der Beton in die Schalung eingebracht wird, also die Betonierrichtung und die Betonierhöhe, haben lt. [19, 21] ebenfalls einen bemerkenswerten Einfluss auf die Faserorientierung. Dieser Einfluss ist bei höherer Viskosität geringer, er hängt also direkt mit den Frischbetoneigenschaften zusammen [21].

Durch das Einbringen von Verdichtungsenergie neigen Fasern lt. [10] zu einer in Ebenen angeordneten Ausrichtung senkrecht auf die Betonierrichtung. Da der in dieser Arbeit verwendete UHPC ein selbstverdichtender Beton ist, wird auf diesen Punkt nicht näher eingegangen.

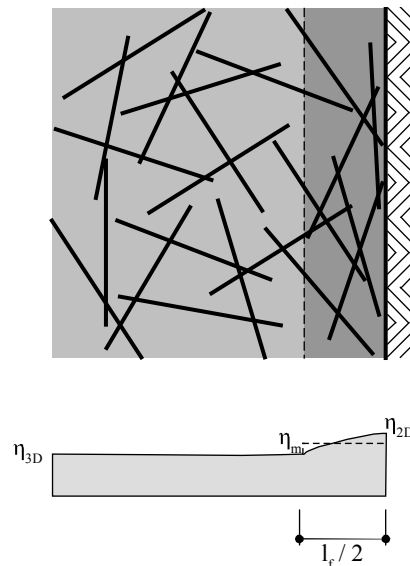


Abb. 3.8: Randeffecte, nach [4]

Fasern in fließendem Beton stellen lt. [12] einen Widerstand gegen die Bewegung des Betons dar, weshalb sie sich immer mehr in Fließrichtung drehen, da dabei ihr Widerstand geringer wird. Durch diesen Effekt kommt es zu einem Ausrichten der Fasern parallel zur Fließrichtung des Betons. Dem gegenüber stehen die Ergebnisse der Experimente von [1] und [15]. Beide analysierten die Faserorientierung in einer Platte und kamen zu dem Schluss, dass sich die Fasern normal auf die Fließrichtung ausrichten. Stähli, et al. [31] und Hadl, et al. [15] untersuchten die Faserorientierung bei Balken und kamen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass sich Fasern normal auf die Fließrichtung ausrichten. In [31] wurde außerdem beobachtet, dass der Einfluss auf die Orientierung bei höheren Fließgeschwindigkeiten und/oder längeren Fließzeiten, sowie bei höheren l/d -Verhältnissen zunimmt [12]. Nimmt jedoch der Fasergehalt zu, so kommt es durch die zunehmende gegenseitige Behinderung der Fasern zu einer Abnahme der Orientierung in Fließrichtung [12]. Durch Reibung zwischen Beton und Schalung kommt es lt. [31] in Abhängigkeit der Schalungsgeometrie zu einem bestimmten Strömungsprofil, siehe Abb. 3.7. Dies sorgt dafür, dass über den Querschnitt unterschiedliche Geschwindigkeiten herrschen und somit auch über den Querschnitt die Fasern unterschiedlich stark von der Orientierung durch fließenden Beton betroffen sind.

Die Geometrie der Schalung trägt auch durch die sogenannten Randeﬀekte zur Ausrichtung der Fasern bei [18]. Die Fasern richten sich dabei lt. [7] parallel zu den Schalﬂächen aus. Dies passiert lt. [18, 21] in einem Abstand von $l_f / 2$. Um dem Effekt Rechnung zu tragen, wird in [4] ein mittlerer Faserorientierungsbeiwert von $\eta_m = 0.6$ in einer Entfernung von $l_f / 2$ vorgeschlagen, siehe Abb. 3.8. Wichtig ist, dass dieser Wert von einer idealen dreidimensionalen Faserorientierung ausgeht, welche lt. [21] durch die zuvor erwähnten Effekte nicht vorhanden ist. In [21] wurde der Randeﬀekt deshalb noch intensiver untersucht. Prinzipiell bestätigen diese Untersuchungen jedoch die Richtigkeit der Näherung in [4].

Betrachtet man nun den Eckbereich einer Schalung so existieren dort zwei Schalkanten, wodurch es lt. [7] zu einer eindimensionalen Ausrichtung der Fasern kommt. Auch diese Vereinfachung wurde in [21] noch differenzierter analysiert.

Des Weiteren trägt der sogenannte Mastabseﬀekt zur Orientierung der Fasern bei. Darunter versteht man das unterschiedliche Verhalten zweier Probekörper, die idente Materialeigenschaften und eine gleiche Probekörpergeometrie aufweisen, jedoch unterschiedlich groß sind [27]. Dies ist lt. [10] auf die Abhängigkeit der Faserorientierung von der Bauteilgröße zurück zu führen. Je höher ein Bauteil, desto eher nähert sich die Faserorientierung der ideal dreidimensionalen an ($\eta_{3D} = 0.5$). Je dünner ein Bauteil, desto eher wird sich eine ideal zweidimensionale Faserorientierung einstellen ($\eta_{2D} = 0.637$) [27]. Der Mastabseﬀekt wurde u.a. in folgenden Arbeiten untersucht: [10, 30].

Werden unterschiedliche Faserlängen verwendet, so stellen die längeren Fasern für die kürzeren Fasern eine Art Barriere dar, welche sie in ihrer freien Rotation behindert [24], siehe Abb. 3.9.

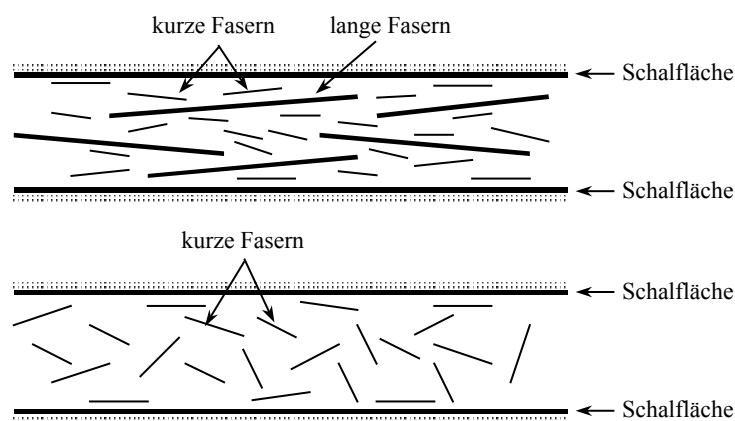


Abb. 3.9: Gegenseitiger Einfluss von unterschiedlich langen Fasern, nach [24]

Geht man nun davon aus, dass bis zum Aushärten des Betons keine weiteren Produktionsschritte mehr erfolgen, so entspricht die Faserorientierung nach dem Einbringen in die Schalung, jener im Festbetonzustand [21]. Des Weiteren lässt sich aus dem unter „Randeffekten“ Gesagten Folgendes ableiten:

Mit zunehmendem Anteil der Randbereiche am Gesamtquerschnitt eines Balkens nimmt die Faserorientierung in Zugrichtung zu. Dadurch kommt es zu einer Erhöhung des Faserorientierungsbeiwertes und unter Verwendung der Gleichung (3.11) in Kapitel 3.4 zu einer Erhöhung der Nachrisszugfestigkeit [18].

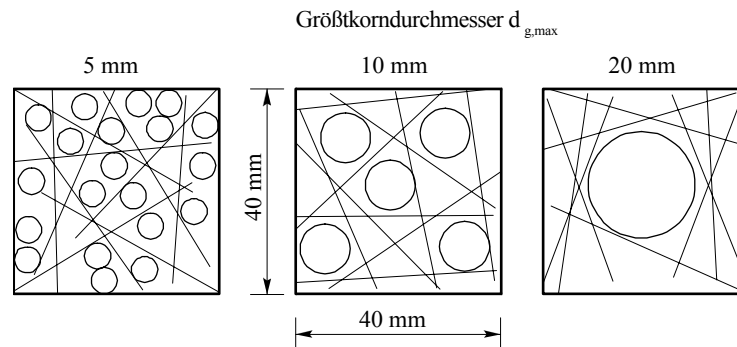


Abb. 3.10: Faserverteilung in Abhängigkeit des Verhältnisses Größtkorndurchmesser/Faserlänge, nach [7]

Als Faserverteilung wird in [34] die Anzahl der Fasern in einem definierten Volumen, oder einer definierten Fläche verstanden. Eine möglichst gleichmäßige Faserverteilung ist lt. [24] eine notwendige Voraussetzung, um optimale Festbetoneigenschaften zu erhalten und muss deshalb lt. [27] genau wie die Faserorientierung in der Bemessung berücksichtigt werden, siehe Kap. 3.4. Wichtig für eine möglichst gleichmäßige Faserverteilung sind vor allem die Frischbetoneigenschaften des Betons [22]. Die Stabilität des Frischbetons ist dabei lt. [22] eine, wesentlich die Faserverteilung beeinflussende, Frischbetoneigenschaft. Je besser ein Absetzen der Fasern verhindert wird, desto eher kommt es lt. [14] zu einer homogenen Faserverteilung im Bauteil. Die Interaktion zwischen Zuschlag und Faser kann ebenfalls eine homogene Faserverteilung beeinträchtigen. Dies passiert lt. [7] ab einem Verhältnis von Größtkorndurchmesser zu Faserlänge von $> 0,5$, siehe Abb. 3.10. Des Weiteren kann es, wie schon in Kap. 2.2 erwähnt, zur Igelbildung im Frischbeton und damit zu einer nicht homogenen Verteilung der Fasern im Beton kommen.

3.3 Menge

Die Menge an Fasern, welche sich im Faserbeton befinden, wird lt. [7] als Fasergehalt bezeichnet und relativ in Bezug auf das Gesamtvolumen des Faserbetons angegeben, beispielsweise Kilogramm Fasern pro Kubikmeter Beton (V_f) [kg/m^3]. Die Angabe in kg/m^3 ist lt. [17] für die Ermittlung der Kosten und die Herstellung relevant. Eine alternative Möglichkeit, die Menge an Fasern im Beton anzugeben, ist jene in Volumsprozent (ρ_f) [Vol-%]. Diese Art der Angabe des Fasergehalts ist lt. [17] ein Maß für die mechanische Wirksamkeit und wird deshalb auch in Gleichung (3.11) verwendet. Die Umrechnung erfolgt dabei über die Dichte der Fasern (P), siehe Gleichung (3.5).

$$V_f \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = \rho_f [\text{Vol} - \%] * P \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] * 10 \quad (3.5)$$

Da nach dem Auftreten von Makrorissen, siehe Kap. 3.6, nur noch durch die Fasern Kräfte über die Rissufer hinweg übertragen werden können, ist die Anzahl der vorhandenen Fasern, neben den in Kap. 3.1 und 3.2 diskutierten Parametern, entscheidend für das Nachbruchverhalten des Faserbetons [33].

Allgemein wird bei dem Nachbruchverhalten des Faserbetons zwischen überkritischem und unterkritischem Fasergehalt unterschieden [7, 22, 33]. Der kritische Fasergehalt stellt dabei die Grenze zwischen diesen beiden Zuständen dar. In [7] wird der kritische Fasergehalt definiert als die Fähigkeit der Fasern die im Zuge der Makrorissbildung auftretenden Zugspannungen gerade noch über die Rissufer zu übertragen. Alternativ dazu definiert [33] den kritischen Fasergehalt als „*das Verhältnis der Zugfestigkeiten von Betonmatrix und Fasern*“. In [22] wird darauf hingewiesen, dass der kritische Fasergehalt mit der Mindestbewehrung bei Stahlbetonbauteilen vergleichbar ist.

Der kritische Fasergehalt (ρ_{crit}) für gerade Fasern, welche vollständig in Zugrichtung ($\eta = 1$) orientiert sind, wird lt. [7] wie folgt hergeleitet:

$$\rho_{crit} = \frac{\sigma_{riss}}{\tau_f} * \frac{d_f}{l_f} \quad (3.6)$$

- σ_{riss} ... maximale Matrixzugfestigkeit
- τ_f ... Verbundspannung
- d_f ... Faserdurchmesser
- l_f ... Faserlänge

Befinden sich weniger Fasern im Bauteil als der kritische Fasergehalt ($\rho_f < \rho_{crit}$) so spricht man vom unterkritischen Fasergehalt [7]. Dieser kennzeichnet sich lt. [33] durch ein Abfallen der Arbeitslinie nach dem Erreichen der Matrixzugfestigkeit, siehe Abb. 3.11. Unterkritische Fasergehalte stellen lt. [22], aufgrund der besseren Verarbeitbarkeit und der geringeren Kosten, den Standard bei Faserbetonen dar.

Wird eine Steigerung der Zugtragfähigkeit über die Matrixzugfestigkeit hinaus erreicht, so spricht man lt. [22] vom überkritischen Fasergehalt, siehe Abb. 3.11. Bei UHPC ist ein überkritischer Fasergehalt häufig anzutreffen. Der Grund dafür liegt lt. [22] an den zugegebenen Fasermengen in Verbindung mit den deutlich besseren Verbundeigenschaften der UHPC-Matrix.

Wie bereits in Kap. 2.1 erwähnt, kann die Zugfestigkeit der UHPC-Matrix entweder durch direkte Zugversuche oder Biegezugversuche bestimmt werden. Aus diesem Grund unterscheidet [36] den kritischen Fasergehalt noch einmal hinsichtlich dieser beiden Kriterien. Es werden dabei 4 Levels definiert. Level 1 beschreibt dabei den unterkritischen Fasergehalt bei Zug- und Biegezugversuch (strain softening, deflection softening), Level 3 und 4 den überkritischen Fasergehalt bei beiden Versuchsmethoden (strain hardening, deflection hardening).

Level 2 stellt einen Punkt dar, bei dem es im Biegezugversuch zu einer Steigerung der Kraft nach dem Überschreiten der Matrixzugfestigkeit kommt, es liegt also ein überkritischer Fasergehalt vor (deflection hardening). Im Zugversuch kommt es hingegen zu einem Abfallen der Kraft nach dem Erreichen der Matrixzugfestigkeit, folglich handelt es sich um den unterkritischen Fasergehalt (strain softening).

Es muss also erwähnt werden, dass eine reine Unterscheidung bezüglich des Fasergehalts ohne Berücksichtigung der Versuchskonfiguration (Zug oder Biegezug) nicht ausreicht, um die Thematik des kritischen Fasergehaltes zu erfassen.

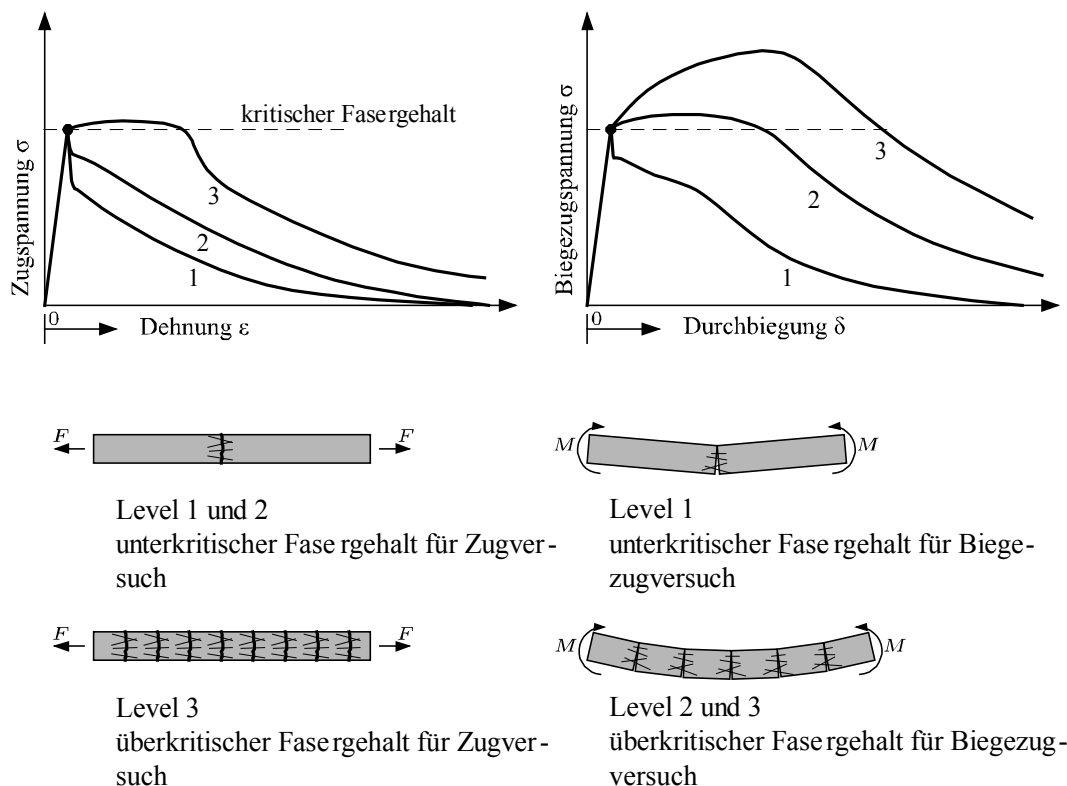


Abb. 3.11: kritischer Fasergehalt nach [36], mit Unterscheidung in Level 1-3

3.4 Grundgleichung der Nachrisszugfestigkeit

Die Nachrisszugfestigkeit eines Faserbetonbauteils ergibt sich lt. [12] aus der Summe der Ausziehkräfte sämtlicher den Riss überbrückender Fasern. Die von der Modellfaser über einen Riss übertragbare Kraft wurde in Kap. 3.1 bereits hergeleitet und kann mit Formel (3.1) angegeben werden. Um nun von der Modellfaser auf die Nachrisszugfestigkeit zu schließen, müssen folgende Punkte berücksichtigt werden.

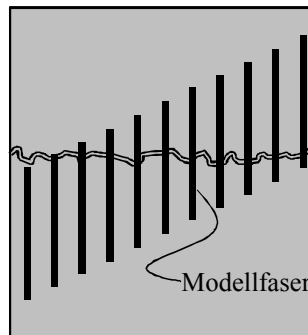


Abb. 3.12: Verteilung der Einbindelängen l_b , nach [12]

Zunächst handelt es sich bei der Einbindelänge der Modellfaser um die maximal mögliche Einbindelänge. In [7] wird angenommen, dass alle möglichen Einbindelängen von $l_b = 0$ bis $l_b = l_f / 2$ beim Auftreten eines Risses gleichmäßig verteilt sind, siehe Abb. 3.12. Daraus ergibt sich für die Nachrisszugfestigkeit eine mittlere Einbindelänge l_b von $l_f/4$. Die Anzahl an Fasern m , die einen Riss kreuzen können, hängt direkt vom Fasergehalt ρ_f ab und kann für einen Betonquerschnitt A_c und einen runden Faserquerschnitt A_f lt. [12] wie folgt ermittelt werden.

$$\rho_f = \frac{V_f}{V_c} = \frac{m * \frac{d_f^2 * \pi}{4} * l_f}{A_c * l_f} \quad (3.7)$$

Dabei stellt V_f das Volumen aller Fasern im Bruttobetonvolumen V_c dar. Umgeformt nach m ergibt die Formel (3.7) die Anzahl der Fasern, welche den Riss kreuzen.

$$m = \frac{4 * \rho_f * A_c}{d_f^2 * \pi} \quad (3.8)$$

Bis hierher wird angenommen, dass eine definierte Anzahl an Fasern m den auftretenden Riss in Bezugsrichtung kreuzt. Da in der Realität jedoch eine mehr oder weniger beliebige Ausrichtung der Fasern vorhanden ist, wird diese lt. [22] durch den Faserorientierungsbeiwert η und die Faserwirksamkeit g in der Grundgleichung der Nachrisszugfestigkeit berücksichtigt. Auf η wurde bereits in Kap. 3.2 eingegangen.

Die Faserwirksamkeit g stellt lt. [18] einen globalen Faktor dar, welcher den veränderten Widerstand der beliebig orientierten Faser beim Ausziehen aus dem Beton berücksichtigt. Dieser veränderte Wi-

derstand wird in [22] durch die auftretenden Umlenkkräfte erklärt, welche entstehen, wenn der Riss von der Faser nicht senkrecht gekreuzt wird, siehe Abb. 3.13. Die Umlenkkräfte führen lt. [18] zu zwei gegenläufigen Erscheinungen. Auf der einen Seite kommt es zu einer lokalen Erhöhung der Reibungskraft, wodurch die Ausziehkraft zunimmt. Dem gegenüber steht die Möglichkeit von Matrixabplatzungen beim Faseraustritt. Diese können lt. [22] zu einer abrupten Verkürzung der Einbindelänge führen, siehe Abb. 3.13. Diese beiden Erscheinungen waren Gegenstand zahlreicher Untersuchungen, welche in [26] diskutiert werden. Deshalb wird hier ein kurzer Überblick über die von unterschiedlichen Autoren genannten Bandbreiten der Faserwirksamkeit g gegeben:

- Jungwirth [18]
 - $g = \sqrt{0.75}$ bei $\eta_{2D} = \pi/2$
 - $g = 0.75$ bei $\eta_{3D} = 0.5$
- Freytag und Santner [12], Pfyl [26]
 - $g = 1.0$
- Markovic [24]
 - $g > 1.0$

Für die Berechnungen in dieser Arbeit wurde die Faserwirksamkeit g mit 1.0 angenommen.

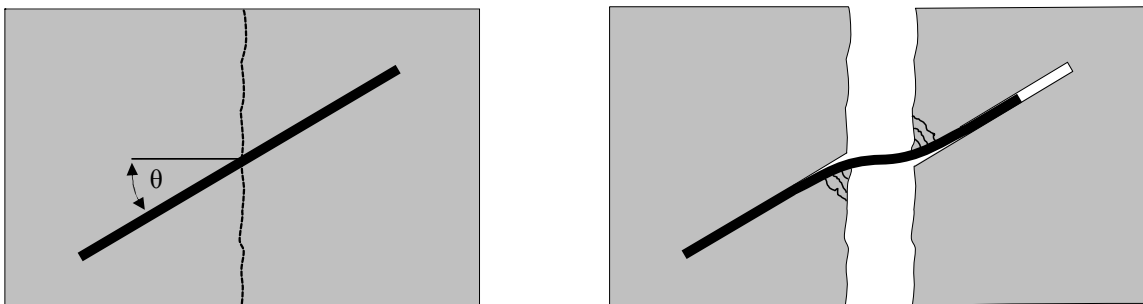


Abb. 3.13: Ausziehvorgang einer Faser unter dem Winkel θ , nach [18]

Ausgehend von der Betrachtung, dass die Nachrisszugfestigkeit σ_{cf0} eine Spannung ist, welche sich aus der über den gerissenen Betonquerschnitt A_c übertragbaren Kraft F ergibt, wird im Folgenden nun der Zusammenhang hergeleitet.

$$\sigma_{cf0} = \frac{F}{A_c} \quad (3.9)$$

Da ein vollkommen gerissener Querschnitt angenommen wird, können für die Übertragung der Kraft F über die Rissufer nur die Fasern berücksichtigt werden. Setzt man für F nun also Gleichung (3.1) mit einer Einbindelänge $l_b = l_f/4$ ein, berücksichtigt die beiden Faktoren η und g , sowie Gleichung (3.8), so ergibt sich Gleichung (3.9) zu:

$$\sigma_{cf0} = \frac{1}{A_c} * \frac{4 * \rho_f * A_c}{d_f^2 * \pi} * \eta * g * \tau_f * \frac{l_f}{4} * d_f * \pi \quad (3.10)$$

In gekürzter Form ergibt sich die lt. [22] von der Rissbreite abhängige Grundgleichung der Nachrisszugfestigkeit (3.11)

$$\sigma_{cf0} = \frac{l_f}{d_f} * \eta * g * \tau_f * \rho_f \quad (3.11)$$

In Gleichung (3.11) lässt sich die Faserschlankheit l_f/d_f identifizieren. Dabei wird ersichtlich, dass mit der Höhe der Faserschlankheit auch die Höhe der Nachrisszugfestigkeit σ_{cf0} zunimmt. Die Faserschlankheit kann aber aus Gründen der Verarbeitbarkeit, siehe Kap. 2.2, nicht beliebig hoch gesteigert werden. In [12] wird deshalb ein Richtwert für die maximale Faserschlankheit von geraden Stahlfasern in Abhängigkeit des Fasergehalts ρ_f [Vol-%] definiert:

$$\frac{l_f}{d_f} \leq \frac{220}{\rho_f} \quad (3.12)$$

In der Literatur [7, 22, 32] finden sich ebenfalls Richtwerte für eine maximale Faserschlankheit von 100. Die Ermittlung der Nachrisszugfestigkeit σ_{cf0} aus Probekörpern wird experimentell, mithilfe von Zugversuchen oder Biegezugversuchen, durchgeführt, siehe Kap. 2.1.

3.5 Entfestigungsverhalten

Im ungerissenen Zustand beteiligen sich die Fasern lt. [7] nur im Verhältnis der Dehnsteifigkeiten von Faser zu Beton an der Lastabtragung, da sie lt. [18] ohne Rissbildung nicht aktiviert sind. Es kommt jedoch zu einer Steigerung des E-Moduls, siehe Kap. 2.1. Des Weiteren kann das Materialverhalten im ungerissenen Zustand lt. [10] als linear-elastisch angenommen werden.

Am Beginn des Übergangs vom ungerissenen Zustand zum gerissenen Zustand stehen sogenannte Mikrorisse, siehe Abb. 3.14. Diese sind durch die Herstellung schon im unbelasteten Beton vorhanden [22]. Die Anzahl an Mikrorissen ist bei UHPC aufgrund seiner ausgeprägten Homogenität und kleinen Zuschläge jedoch geringer als bei Normalbeton [18]. Welche Vorgänge zur Entstehung von Mikrorissen in UHPC bei der Herstellung führen ist lt. [22] noch nicht vollständig geklärt. Die im UHPC vorhandenen Fasern können die Mikrorissbildung jedoch günstig beeinflussen.

Tritt nun eine äußere Beanspruchung auf, so vergrößern sich lt. [7] die Mikrorisse in der Nähe einer Unstetigkeitsstelle und es entsteht eine sogenannte Rissprozesszone, siehe Abb. 3.15 1). Diese stellt lt. [22] eine Zone von fein verteilten, großteils parallelen Mikrorissen dar. Bei zunehmender Belastung nimmt das Wachstum der Mikrorisse zu [7]. Ob nun ein Makroriss auftritt, wird lt. [22] von der Energieaufnahmefähigkeit der Fasern im Beton bestimmt. Können die Fasern in der ersten Rissprozesszone genug Energie aufnehmen, um die Ausbildung eines Makrorisses zu verhindern, so entsteht eine weitere Rissprozesszone, siehe Abb. 3.15 2). Die Ausbildung von weiteren Rissprozesszonen ist so lange möglich, wie dies die Energieaufnahmefähigkeit der Fasern zulässt.

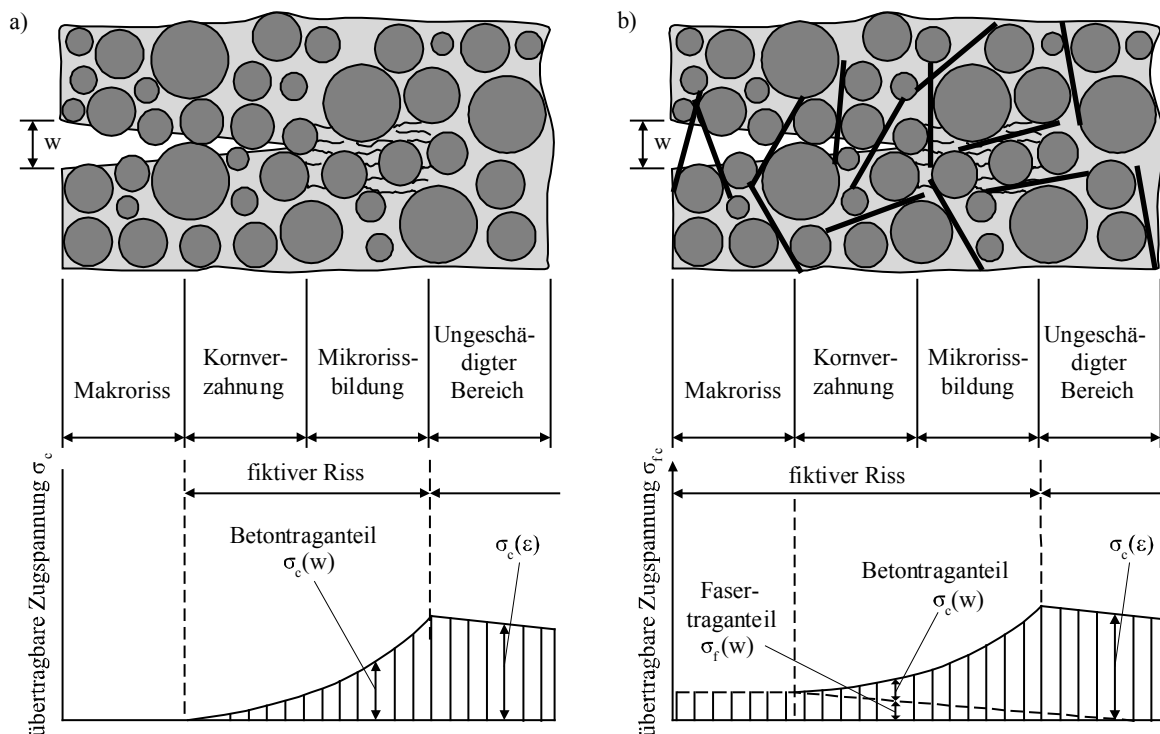


Abb. 3.14: Entfestungsverlauf in Normal- und Faserbeton, nach [32]

Bei Normal- und Faserbeton können zunächst über die Verzahnung der Zuschläge (Kornverzahnung) Zugkräfte ($\sigma_c(w)$) übertragen werden, siehe Abb. 3.14. Dies ist bei UHPC aufgrund des Verlaufs der Bruchflächen, siehe Kap. 2.1 und der geringen Größe der Zuschläge nicht möglich [18], was zur Folge hat, dass die über die Rissufer zu übertragende Zugspannung ($\sigma_f(w)$) bei UHPC von der Faser plötzlich übernommen werden muss.

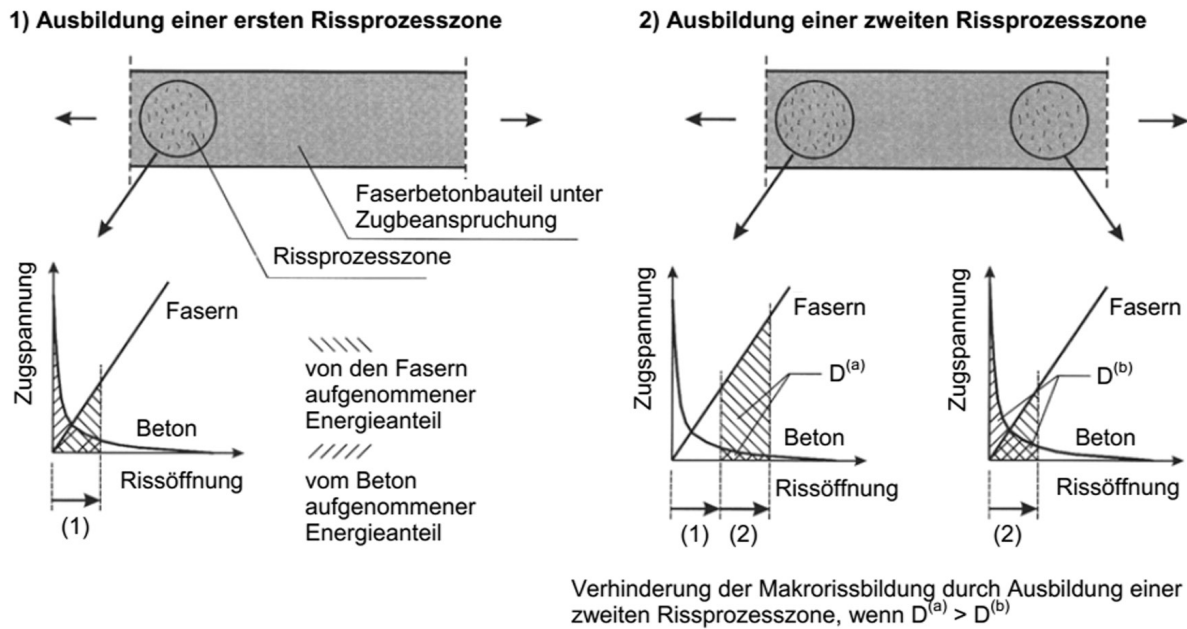


Abb. 3.15: Ausbildung von Rissprozesszonen, [22]

3.6 Rissmodelle

Wie bereits in Kap. 3.5 erwähnt, kann das Materialverhalten im ungerissenen Zustand als linear-elastisch und damit als durch die Festigkeitslehre beschreibbar angenommen werden (E_m in Abb. 3.16 f). Wird nun die Matrixzugfestigkeit an einer beliebigen Stelle im Bauteil überschritten, so kommt es lt. [18] zu einem initialen Riss. An der Spitze dieses Risses entstehen lt. [10] Spannungssingularitäten, welche theoretisch zu unendlich großen Spannungen führen. Um dies zu umgehen, haben sich lt. [20] zwei Kohäsionsrissmodelle durchgesetzt:

- Fictitious Crack Model (FCM) [16]
- Crack Band Model (CBM) [3]

Diese beiden Modelle unterscheiden sich lt. [2] in der Schadenslokalisierung. Beim FCM werden lt. [22] sämtliche in Rissprozesszonen auftretenden Mikrorisse einem fiktiven Riss zugeordnet. Dieser fiktive Riss wird dann durch eine Spannungs-Rissöffnungsbeziehung (σ - w -Diagramm) beschrieben [2].

Im Gegensatz dazu wird beim CBM die Dehnungsentfestigung nicht einem fiktiven Riss zugeordnet, sondern über ein Rissband verschmiert betrachtet. Das Rissband wird dabei durch eine Spannungs-Dehnungsbeziehung (σ - ϵ -Diagramm) beschrieben [2]. Für UHPC existieren lt. [22] jedoch keine experimentellen Ergebnisse, welche Breite für das Rissband anzusetzen ist. Konträr zu dieser Aussage verhält sich das Faktum, dass das CBM in [36] Verwendung findet.

Beide Modelle gehen lt. [26] davon aus, dass sich nach dem Öffnen des Makrorisses die Verformungen in selbigem konzentrieren und sich der Bereich des Kontinuums elastisch verkürzt. Ebenso gehen beide Modelle von einem unterkritischen Fasergehalt aus, siehe Kap.3.3. Da bei UHPC jedoch häufig ein überkritischer Fasergehalt vorliegt, wurde von Jungwirth [18] ein Modell entwickelt, welches die linear-elastische Verformung, die multiple Rissbildung und das FCM kombiniert.

Wird nun, wie zuvor beschrieben, die Energieaufnahmefähigkeit der Fasern in einer Rissprozesszone überschritten, so kommt es zu einem Makroriss (in [18] als „Mesoriss“ bezeichnet). In diesem Riss befinden sich die Fasern lt. [18] in der Aktivierungsphase (Kap. 3.1). Aufgrund des verfestigenden Verhaltens kommt es auch in weiteren Rissprozesszonen zu einer Makrorissbildung, man spricht von multipler Rissbildung, siehe Abb. 3.16 b). Bei der Ausbildung jedes neuen Risses wird die Matrixzugfestigkeit überschritten und die über die Rissufer zu übertragende Kraft wird von Fasern übernommen. Dies ergibt den in Abb. 3.16 e) ersichtlichen charakteristisch gezackten Spannungsverlauf. Wie in der Abbildung ersichtlich, wird dieser jedoch linear angenähert. Dies ist lt. [18] deshalb möglich, da die Rissbildung im UHPC-Bauteil sehr gleichmäßig auftritt und deshalb verschmiert betrachtet werden kann.

Haben sich im Bauteil alle möglichen Risse ausgebildet, so spricht [18] von der Rissstabilisierung, siehe Abb. 3.16 c). Wird die Belastung nun weiter gesteigert, so werden nach und nach alle risskreuzenden Fasern vollständig aktiviert. Dies ergibt den Spannungsverlauf bis zum Erreichen der Nachrisszugfestigkeit σ_{cf0} des UHPC-Bauteils, in Abb. 3.16 f) als f_{ct} bezeichnet. Nach dem Erreichen der Nachrisszugfestigkeit gehen in einem Riss die Fasern in die Faserausziehphase über, siehe Abb. 3.16 d). Ab diesem Punkt wird in [18] das Verhalten des UHPC-Bauteils mithilfe des FCM beschrieben. Um die beim FCM auftretende elastische Verkürzung zu berücksichtigen, führt [18] für dieses bei multipler Rissbildung sehr komplexe Phänomen den linear approximierten Entlastungsmodul E^* ein. Dieser ist schematisch in Abb. 3.16 f) dargestellt.

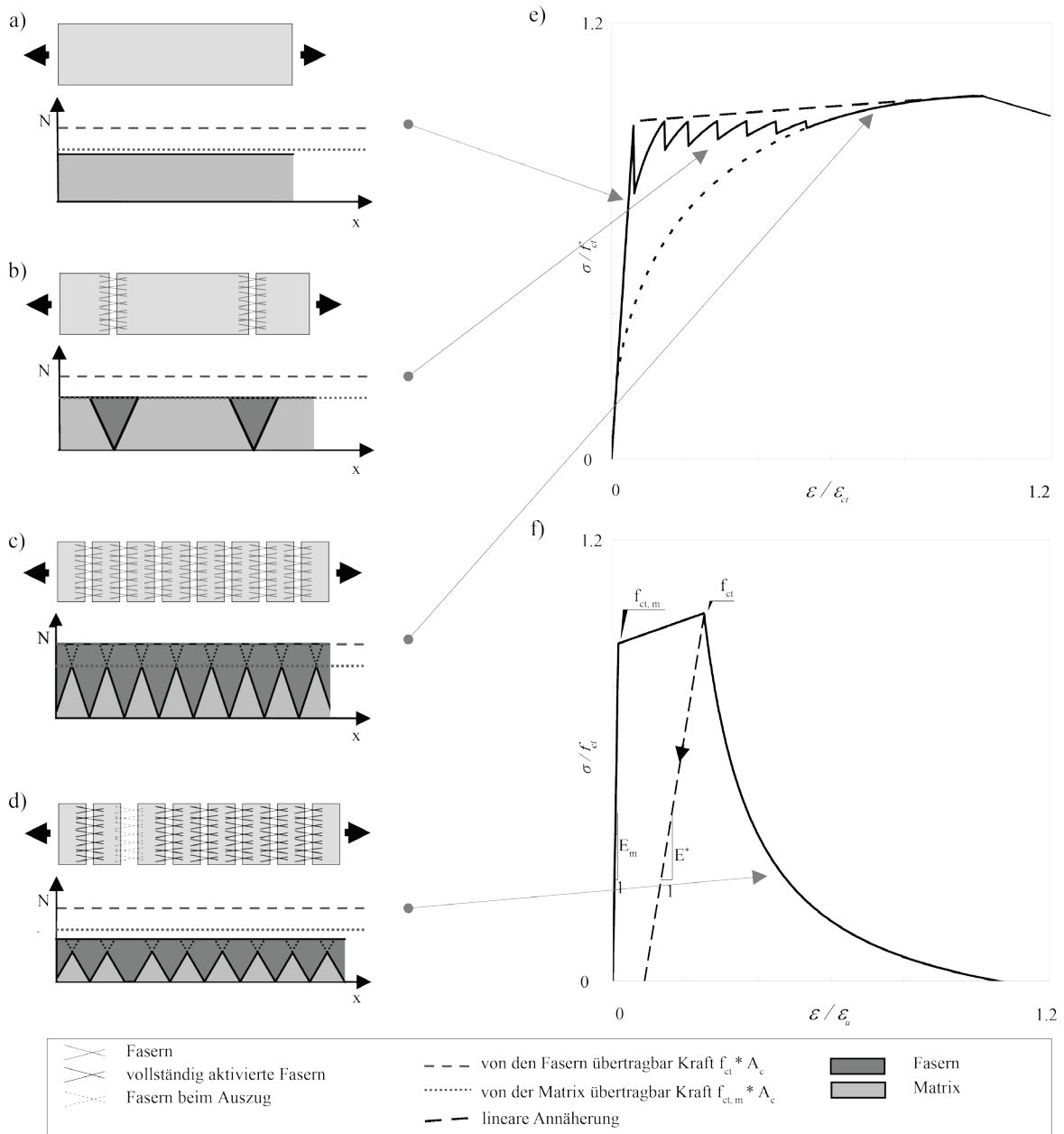


Abb. 3.16: Modell von Jungwirth [18], a) linear-elastischer Bereich, b) multiple Rissbildung, c) Rissstabilisierung, d) Risslokalisierung und Faserauszug (FCM), e) Aktivierungsphase mit multipler Rissbildung, f) Rissöffnungsphase mit linearer Approximation der multiplen Rissbildung und Berücksichtigung des Entlastungsmoduls E^*

3.7 Fasercocktail

Unter dem Begriff Fasercocktail wird in der Literatur eine Kombination von unterschiedlichen Fasertypen (Werkstoff und Form) verstanden [11, 28]. Diese Definition wird in dieser Arbeit dahingehend eingeschränkt, dass unter diesem Begriff nur Fasern mit identem Werkstoff verstanden werden. Für die Verwendung von geraden Stahlfasern mit unterschiedlichem l/d -Verhältnis wird in [24] das Grundprinzip festgelegt, um sicher zu stellen, dass alle Fasern die auftretenden Risse so wirksam wie möglich überbrücken.

Kleine, dünne Fasern können lt. [24] die auftretenden Mikrorisse wesentlich wirksamer überbrücken als große, dicke Fasern, siehe Abb. 3.17 a). Dies ist einerseits auf ihren geringen Durchmesser zurückzuführen, der lt. [11] eine Aktivierung der Fasern schon bei der Mikrorissbildung zulässt. Andererseits nimmt die Faseranzahl bei gleichem Fasergehalt mit sinkendem Fasergewicht zu [24].

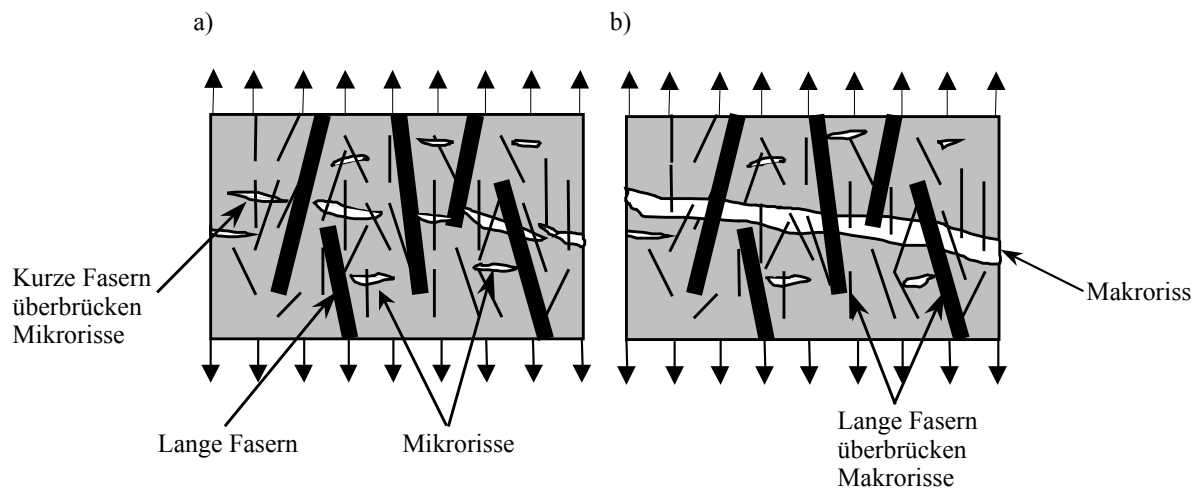


Abb. 3.17: Fasercocktail-Prinzip, a) der Einfluss kurzer Fasern, b) der Einfluss langer Fasern, nach [24]

Tritt nach dem Zusammenschluss der Mikrorisse ein Makroriss auf, so werden lt. [35] die längeren Fasern des Fasercocktails aktiviert und die kürzeren ausgezogen, siehe Abb. 3.17 b). Durch die längeren Fasern kann lt. [24] somit vor allem die Duktilität, aber auch die Nachrisszugfestigkeit gesteigert werden. Betrachtet man also das mechanische Verhalten des UHPC, so stellt ein Fasercocktail eine optimale Lösung dar. Dies wird in [24] durch Versuchsergebnisse bestätigt. Bei gleichem Fasergehalt (2 %) weist die Kombination zweier Fasertypen (13/0.2 und 40/0.5) eine signifikant höhere Biegezugfestigkeit auf als der UHPC bei dem nur ein Fasertyp (13/0.2) verwendet wurde, siehe Abb. 3.18.

In [28] wird für die Verarbeitbarkeit eines Fasercocktails mit einer Anzahl an i unterschiedlichen Fasern folgende Gleichung angegeben:

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{l_{f,i}}{d_{f,i}} * \rho_{f,i} \quad V \leq 220 \quad (3.13)$$

- V ... Faserfaktor
- $l_{f,i}$... Länge der i -ten Faser
- $d_{f,i}$... Durchmesser der i -ten Faser
- $\rho_{f,i}$... Fasergehalt der i -ten Faser

Es wird in [28] darauf hingewiesen, dass der Faserfaktor V einen Wert von 220 nicht übersteigen soll. Aus Gleichung (3.13) geht somit hervor, dass kleine Fasern bei gleichem Fasergehalt die Verarbeitbarkeit weniger beeinträchtigen als lange Fasern. Somit stellt ein Fasercocktail auch betreffend der Frischbetoneigenschaften eine optimale Lösung dar.

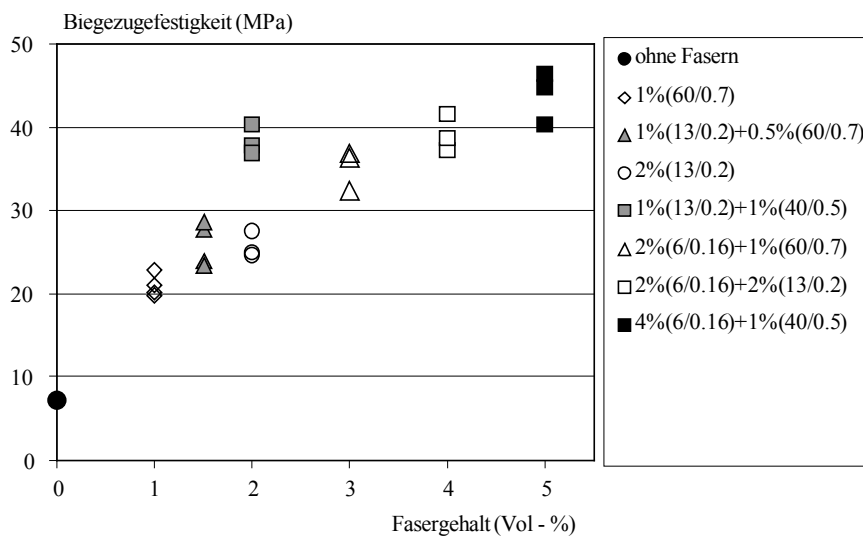


Abb. 3.18: Versuche von Markovic [24], Vol.-%(l_f/d_f)

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Verwendete UHPC-Mischung

Für die Durchführung der Versuche wurde die am Institut für Betonbau entwickelte UHPC-Standardrezeptur L1 verwendet. Bei der Standardrezeptur L1 handelt es sich um einen selbstverdichtenden Feinkorn-UHPC. Im Laufe dieser Arbeit wurde UHPC mit unterschiedlichen Zementchargen hergestellt, dadurch kam es zu Schwankungen in der Druckfestigkeit. Der Standardrezeptur L1 wurden in unterschiedlichen Versuchen unterschiedliche Mengen an Fasern beigemischt. Der Anteil in Volumsprozent [Vol-%] ist bei den jeweiligen Versuchen angegeben.

	L1 [kg/m ³]	L1B [kg/m ³]
Cem I 52.5 N Lafrage CG	720.0	720
Mikrosilika	93.6	93.6
Quarzmehl	201.6	201.6
Wasser	180.0	180
Fließmittel	28.8	25.2
Gesteinskörnung 100-200 µm	290.0	289
Gesteinskörnung 0.3-0.8 mm	870.0	578
Basaltplitt 2-4 mm	0	327

Tab. 4.1: Verwendete UHPC-Rezepturen

4.2 Vorversuche

Zu Beginn der Versuche wurden Biegebalken, mit frei am Markt erhältlichen Fasern, hergestellt, da der zu entwickelnde Mikrodraht zu diesem Zeitpunkt noch nicht verfügbar war. Die Erkenntnisse aus diesen Vorversuchen wurden verwendet, um den Entwurf der Konfiguration weiterer Biegezugversuche zu optimieren. Es wurden 27 Biegezugversuche durchgeführt. Diese setzten sich aus 3 Versuchskörpern je Fasergehalt und Fasertyp zusammen. Es wurden 3 unterschiedliche Fasergehalte und 3 unterschiedliche Fasertypen untersucht. 2 der 3 untersuchten Fasertypen stammen von der Firma Stratec. Faserart 1 weist eine Länge von 9 mm und einen Durchmesser von 0.150 mm auf, Faserart 2 eine Länge von 20 mm und einen Durchmesser von 0.200 mm. Faserart 3 stammt von der Firma Baumbach Metall, weist eine Länge von 12.7 mm und einen Durchmesser von 0.175 mm auf. Folgende Versuchsserien wurden durchgeführt:

Nr.	Faserart	Fasergehalt ρ_f [Vol-%]	Faserschlankheit [l/d]
1	Stratec 9/0.150 mm	0.75	60
2	Stratec 9/0.150 mm	1.25	
3	Stratec 9/0.150 mm	1.75	
4	Baumbach 12.7/0.175 mm	0.75	68.6
5	Baumbach 12.7/0.175 mm	1.25	
6	Baumbach 12.7/0.175 mm	1.75	
7	Stratec 20/0.200 mm	0.75	100
8	Stratec 20/0.200 mm	1.25	
9	Stratec 20/0.200 mm	1.75	

Tab. 4.2: Versuchsserien der Vorversuche

4.2.1 Versuchsaufbau

Für die Umsetzung der Vorversuche wurden Versuchskörper in Prismenform mit einer Länge von 450 mm, einer Breite von 80 mm und einer Höhe von 50 mm gewählt, siehe Abb. 4.1. Auf Grund der im Vergleich zur Faserlänge, geringen Größe der Versuchskörper muss an dieser Stelle auf den Einfluss des Maßstabeffektes verwiesen werden, siehe Kap. 3.2.

Es wurden 4-Punkt-Biegezugversuche durchgeführt, bei denen die Versuchskörper auf Metallrollen gelagert wurden, um das Einleiten einer horizontalen Kraft bei der Versuchsdurchführung soweit als möglich zu vermeiden. Während des Versuchs wurde die Durchbiegung δ in der Mitte der Prismen mithilfe von 2 Wegaufnehmern (WA) gemessen, analog zu 4-Punkt-Biegezugversuchen gemäß DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [8]. Simultan zu den Messungen der Wegaufnehmer wurde die Kraft der Prüfmaschine mithilfe einer Kraftmessdose aufgezeichnet. Diese Rohdaten wurden anschließend zur Auswertung herangezogen.

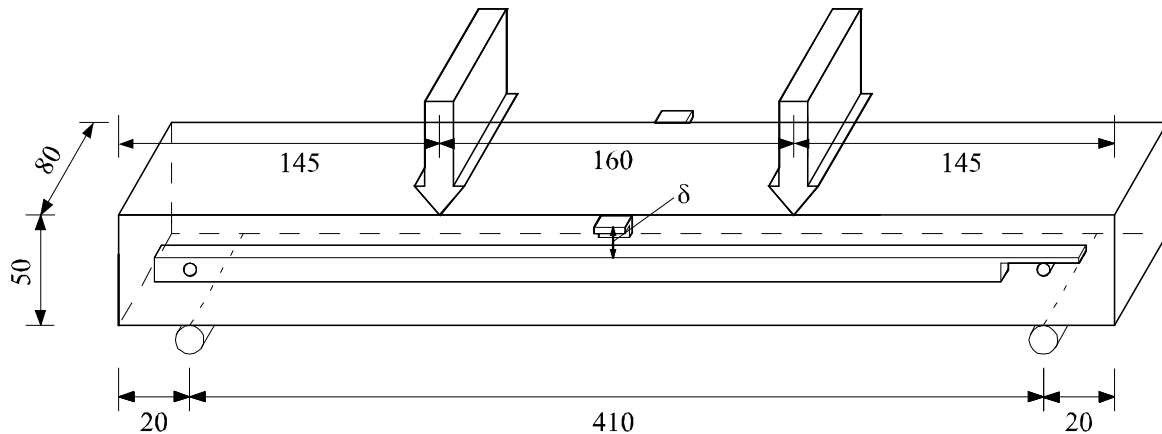


Abb. 4.1: 4-Punkt-Biegezugversuchskonfiguration für die Vorversuche (Maße in Millimeter)

4.2.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn der Versuche wurde eine Schalung hergestellt, welche es ermöglichte 9 Versuchskörper gleichzeitig zu betonieren, siehe Abb. 4.2. Es wurde an 3 aufeinander folgenden Tagen jeweils 3-Mal die Betonrezeptur L1 (Kap. 4.1) mit unterschiedlichen Fasergehalten (siehe Tab. 4.2) in einem Eirich-Labormischer wie folgt gemischt:



Abb. 4.2: Schalung für die Versuchskörper der Vorversuche

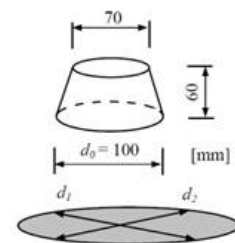


Abb. 4.3: Hägermann-Flow

Bei stillstehendem Mischer wurden zu Beginn der Zement, die Mikrosilika und das Quarzmehl eingefüllt. Danach wurden bei 150 U/min Wasser und Fließmittel zugegeben. Nachdem dies abgeschlossen war, wurde die Temperatur des Frischbetons dokumentiert, die Drehzahl auf 450 U/min erhöht und der Leim 6 Minuten lang gemischt. Am Ende der 6 Minuten erfolgte eine Reduktion der Drehzahl auf 150 U/min, das Beimengen der Gesteinskörnung und eine Mischdauer von 4-5 Minuten. Danach wurden die Fasern händisch vereinzelt und manuell zugegeben. Die Mischdauer für Gesteinskörnung und Fasern bei 150 U/min betrug 6 Minuten. Danach wurde erneut die Temperatur dokumentiert und die Konsistenz des Frischbetons überprüft. Dies geschah durch die Messung der Fließzeit t_{200} und des Hägermann-Flow. Für beide Messverfahren wird der Hägermann-Konus (Abmessungen siehe Abb. 4.3) auf einer trockenen Glasplatte platziert, mit UHPC befüllt und abgezogen. Danach wird der Konus angehoben und die Zeit gemessen die verstreicht bis der auslaufende Frischbeton an zwei Punkten einen Kreis mit einem Durchmesser von 200 mm berührt. Diese Zeit wird als Fließzeit t_{200} bezeichnet. Zwei Minuten nach dem Anheben des Konus werden die zwei Abmessungen d_1 und d_2 gemessen und gemittelt, siehe Abb. 4.3. Dieser Wert wird als Hägermann-Flow bezeichnet.

Nachdem Abschluss des Mischvorgangs wurde der UHPC am Rand der Schalung eingebracht und der Einbringort und die Fließrichtung vermerkt. Da es sich bei der Rezeptur L1 um einen selbstverdichtenden Beton handelt, war kein Verdichten notwendig. Nach dem Betonieren wurden die Versuchskörper mit Folie abgedeckt und am darauffolgenden Tag ausgeschalt. Bis zur Versuchsdurchführung wurden die Versuchskörper an der Luft und bei Raumtemperatur 21 Tage lang gelagert.

Bevor der in Kap. 4.2.1 beschriebene 4-Punkt-Biegezugversuch durchgeführt werden konnte, mussten bei jedem Versuchskörper die Wegaufnehmer (WA) angebracht werden, siehe Abb. 4.4. Nach dem Prüfen der einzelnen Versuchskörper wurden die sichtbaren Makrorisse gezählt. Des Weiteren wurde der Abstand vom Rand des Versuchskörpers zu dem Makroriss gemessen.



Abb. 4.4: Versuchskörper bei der Vorbereitung für einen Biegezugversuch, WA re. unten



Abb. 4.5: Biegezugversuch mit montiertem WA

4.2.3 Ergebnisse

Zu Beginn der Auswertung der Versuche wurden die Rohdaten der Prüfmaschine aufbereitet, um sie in Biegezugspannung/Durchbiegungs-Diagrammen darstellen zu können. Abb. 4.6 und Abb. 4.7 zeigen die Spannungs-Durchbiegungskurven.

Danach wurde aus den einzelnen Versuchskörpern einer Versuchsserie der Mittelwert der Biegezugspannung ermittelt. Die Mittelwerte der einzelnen Versuchsserien wurden ebenfalls in Biegezugspannung/Durchbiegungs-Diagrammen dargestellt. Nachfolgend sind die Mittelwerte allerdings je Faserart gruppiert, siehe Abb. 4.8.

	t_{200} [sec]	Hägermann Flow [cm]	$\sigma_{\max, \text{mittel}}$ [N/mm ²]
$l_f = 9 \text{ mm } \rho_f = 0.75 \%$	9.5	29.00	16.11
$l_f = 9 \text{ mm } \rho_f = 1.25 \%$	9.0	28.25	22.15
$l_f = 9 \text{ mm } \rho_f = 1.75 \%$	10.0	28.25	27.91
$l_f = 12.7 \text{ mm } \rho_f = 0.75 \%$	9.0	29.50	25.01
$l_f = 12.7 \text{ mm } \rho_f = 1.25 \%$	9.0	28.75	31.04
$l_f = 12.7 \text{ mm } \rho_f = 1.75 \%$	11.5	28.00	38.72
$l_f = 20 \text{ mm } \rho_f = 0.75 \%$	9.0	28.50	28.22
$l_f = 20 \text{ mm } \rho_f = 1.25 \%$	9.5	28.50	37.72
$l_f = 20 \text{ mm } \rho_f = 1.75 \%$	15.5	25.75	39.41

Tab. 4.3: Frischbeton- und Festbetoneigenschaften der einzelnen Versuchsserien im Vergleich

Bei den nachfolgenden Diagrammen ist zu erkennen, dass der Variationskoeffizient bei allen Serien mit 3 geprüften Versuchskörpern bis ca. 3 mm Durchbiegung unter 5 % liegt. Dies kann bei der vorhandenen Konfiguration als sehr niedrig angesehen werden und deutet auf eine homogene Faserverteilung hin. Des Weiteren ist in Abb. 4.8 erkennbar, dass mit steigender Faserschlankheit $[l/d]$ und steigendem Fasergehalt ρ_f [Vol-%] die Biegezugfestigkeit der Probekörper zunimmt. Die Fließzeit t_{200} und der Hägermann-Flow nehmen jedoch mit steigender Faserschlankheit $[l/d]$ und steigendem Fasergehalt ρ_f [Vol-%] ab, siehe Tab. 4.3.

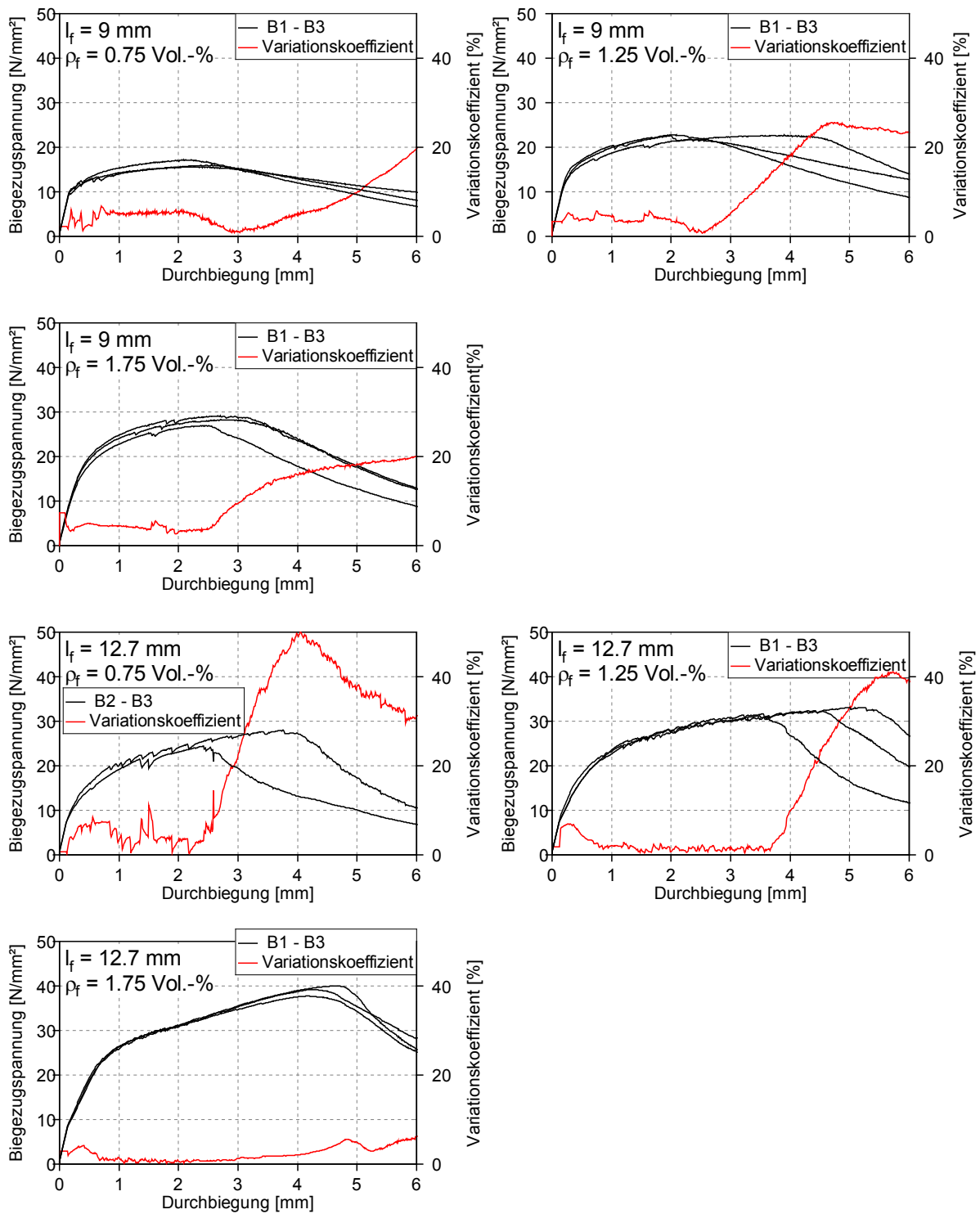


Abb. 4.6: Biegezugspannung-/Durchbiegungs-Diagramme der Versuchsserien 1-6

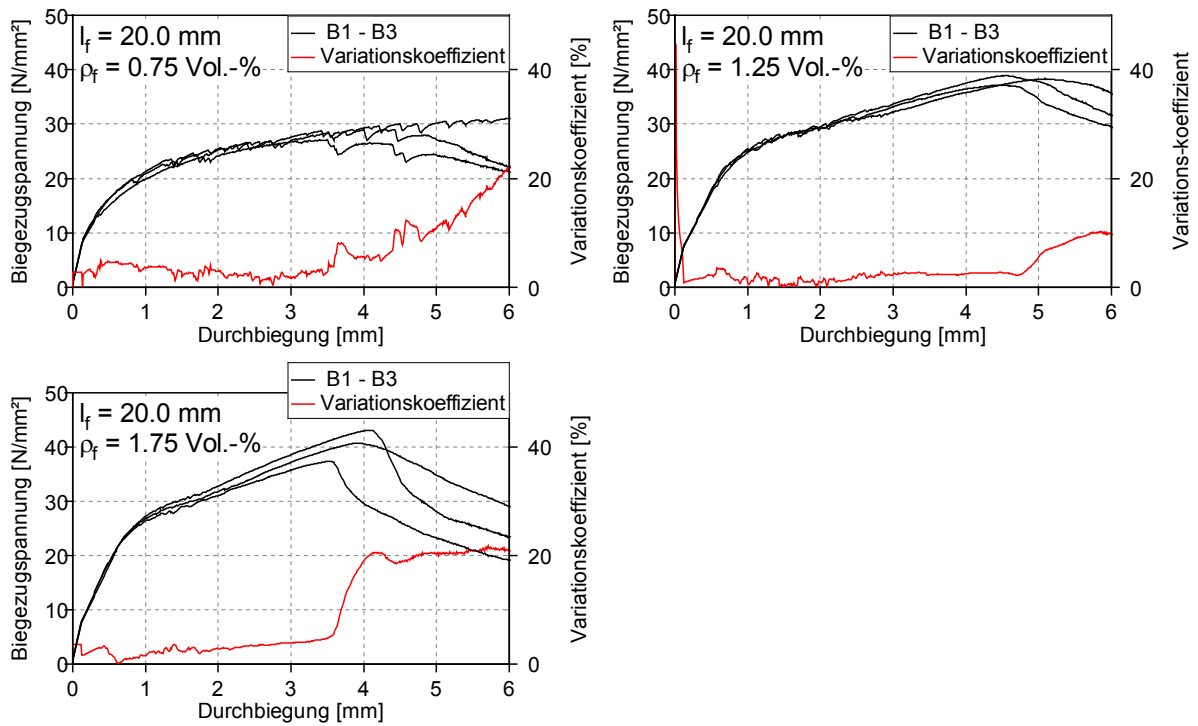


Abb. 4.7: Biegezugspannung-/Durchbiegungs-Diagramme der Versuchsserien 7-9

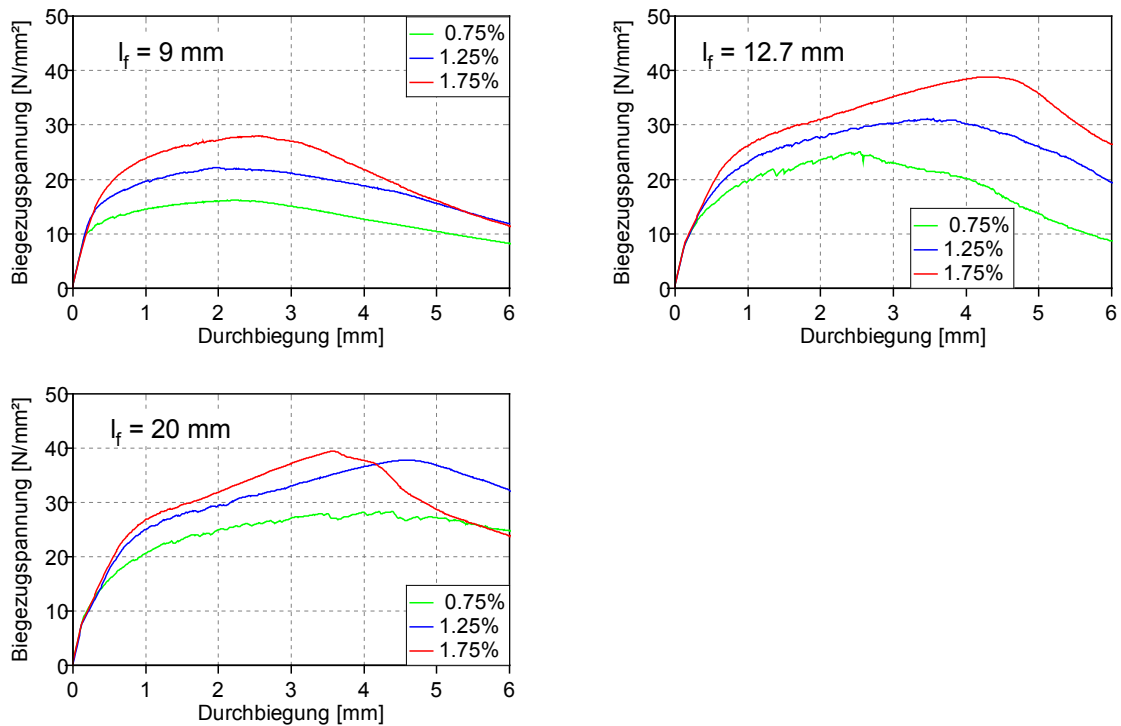


Abb. 4.8: Mittelwerte der Biegezugspannungen je Versuchsserie, gruppiert nach Fasertyp

4.3 Ausziehversuche 1

Bevor erste Biegeversuche mit dem geschnittenen zu untersuchenden Feindraht durchgeführt wurden, musste der Verbund zwischen dem Feindraht und der UHPC-Matrix mithilfe von Ausziehversuchen untersucht werden. Dazu wurden 36 Ausziehversuche durchgeführt. Es wurden zwei unterschiedliche Fasertypen untersucht. Zum einen der Feindraht der Firma Voest mit einem Durchmesser von 0.12 mm, zum anderen eine Faser der Firma Stratec ($l/d = 20/0.2$) als Referenzfaser. Die Ausziehversuche wurden bei einer Einbindelänge von 4 mm, 6 mm und 8 mm durchgeführt.

4.3.1 Versuchsaufbau

Für die Umsetzung der Ausziehversuche wurde ein Versuchskörper in Form eines Hundeknochens mit beidseitigem Verbund gewählt, siehe Abb. 4.9 a). Der vorhandene Spalt wurde nur durch die Faser mit der zu untersuchenden Einbindelänge überbrückt, siehe Abb. 4.9 b). Während des Versuchs wurde mithilfe einer Kraftmessdose die auftretende Kraft und simultan dazu der Kolbenweg der Prüfmaschine aufgezeichnet. Um die tatsächliche Einbindelänge zu erhalten, wurden sämtliche Fasern vollständig aus den Versuchskörpern ausgezogen. Diese Rohdaten wurden dann zur Auswertung herangezogen.

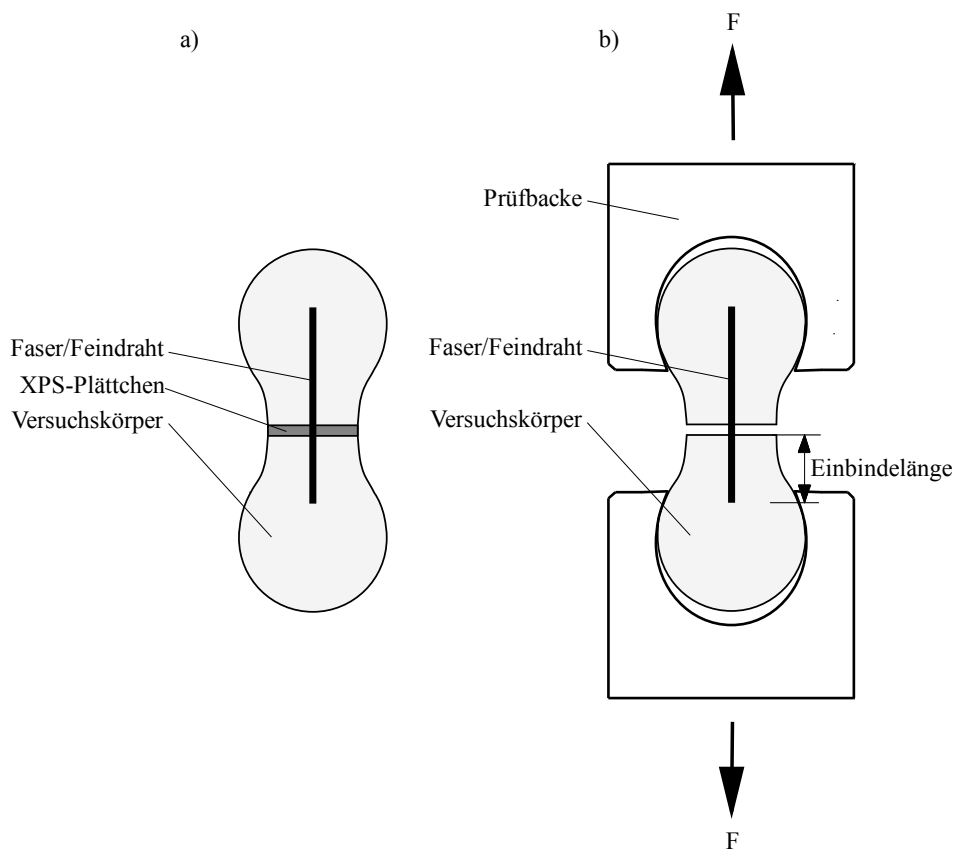


Abb. 4.9: Versuchskörper nach dem Ausschalen a) und während des Versuch b)

4.3.2 Versuchsdurchführung

Für jede mögliche Kombination aus Faser und Einbindelänge wurden sechs Versuchskörper betoniert. Dies ergab folgende Versuchsserien:

Nr.	Faser	Einbindelänge	Maschinenummer
10	Stratec 20/0.2 mm	8 mm	A1-A8
11	Stratec 20/0.2 mm	6 mm	A9-A14
12	Stratec 20/0.2 mm	4 mm	A15-A20
13	Voest Feindraht 0.12 mm	8 mm	A21-A26
14	Voest Feindraht 0.12 mm	6 mm	A26-A32
15	Voest Feindraht 0.12 mm	4 mm	A33-A37

Tab. 4.4: Versuchsserien der Ausziehversuche 1 mit glatten Fasern

Zunächst wurden aus extrudiertem Polystyrol (XPS) Plättchen mit einer Abmessung von 25/25 mm hergestellt, siehe Abb. 4.10. Diese hielten die Faser in der gewünschten Position (Mitte des Probekörpers, zu untersuchende Einbindelänge) und trennten die beiden Probekörperhälften, siehe Abb. 4.11.



Abb. 4.10: XPS-Plättchen mit Stratec Faser

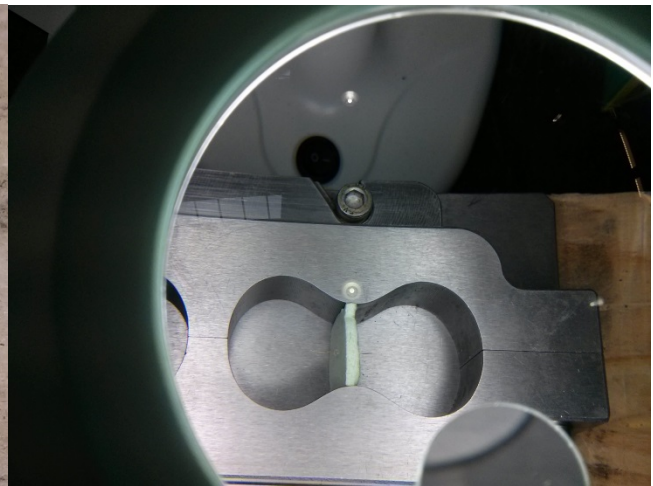


Abb. 4.11: Versuchskörper-Schalung mit XPS-Plättchen

Betoniert wurde an zwei aufeinander folgenden Tagen, jeweils 18 Versuchskörper, mit der Betonrezeptur L1, siehe Kap. 4.1. Für das Betonieren der 18 Versuchskörper war eine Mischung ausreichend. Da es sich bei der Betonrezeptur L1 um einen selbstverdichtenden Beton handelte, war kein Verdichten notwendig. Die Probekörper wurden jeweils am darauf folgenden Tag ausgeschalt und an der Luft bei Raumtemperatur bis zur Prüfung 21 Tage lang gelagert.

Vor der Prüfung der Versuchskörper wurde das XPS-Plättchen mit Aceton beträufelt. Dadurch ging es in eine zähe Masse über und konnte zwischen dem Beton und der einzelnen Faser entfernt werden, siehe Abb. 4.13. Der Verbund zwischen den beiden Probekörperhälften bestand somit nur mehr durch die Faser mit der zu untersuchenden Einbindelänge, siehe Abb. 4.12. Nach der Vorbereitung wurden die Versuchskörper wie in Kap. 4.3.1 beschrieben geprüft und ausgewertet, siehe Kap 4.3.3.



Abb. 4.13: Ausgeschalter Versuchskörper (re.) und mit Aceton beträufelte XPS-Plättchen (li. und mi.)

Abb. 4.12: Einrichten des Versuchskörpers in der Prüfmaschine

4.3.3 Ergebnisse

Die Verbundspannung τ_f wurde mit Hilfe der in Kap. 3.1 beschriebenen Formel (3.1) unter Annahme eines starr-plastischen Verbundverhaltens berechnet. Dazu wurde für jeden Versuchskörper zuerst aus den Rohdaten die maximale Versuchskraft F_v [N] und der dazu gehörige Weg x_{Fv} [mm] ermittelt. Als nächstes wurde die Einbindelänge l_b [mm] ermittelt, über welche beim Versuch die Kraftübertragung stattfand. Dies geschah durch das Subtrahieren des bis zu F_v zurückgelegten Weges x_{Fv} von dem bis zum Ausziehen der Faser zurückgelegten Weg x_{ges} [mm], siehe Formel (4.1). Die Ergebnisse der einzelnen Probekörper und die Mittelwerte der Verbundspannungen sind in Tab. 4.5 ersichtlich.

$$l_b = x_{ges} - x_{Fv} \quad (4.1)$$

Die aus den Rohdaten erhaltene Kraft wurde durch den Faserquerschnitt dividiert um Faserspannung/Weg-Diagramme zu erhalten, siehe Abb. 4.14. Die bei der Auswertung der Verbundspannung ausgeschiedenen Probekörper, wiesen eine signifikant unterschiedliche Verbundspannung im Vergleich zu den übrigen Probekörper auf (8, 9, 19, 26 und 27), siehe Tab. 4.5.

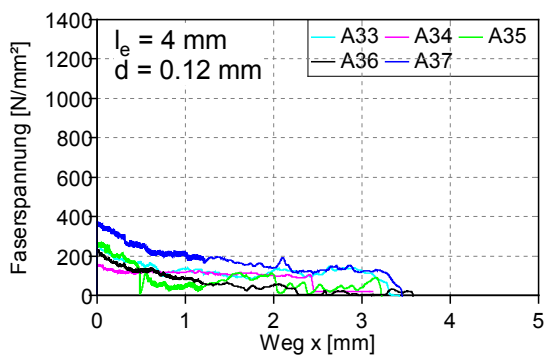
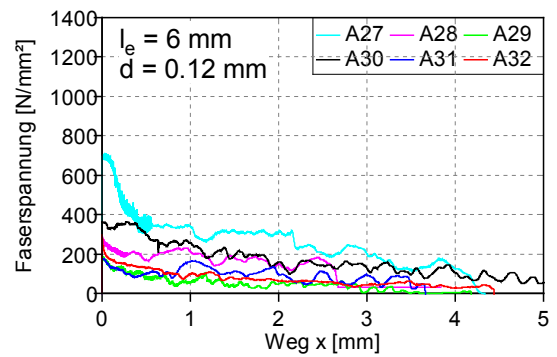
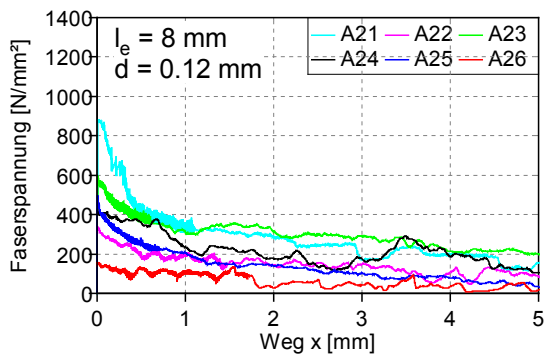
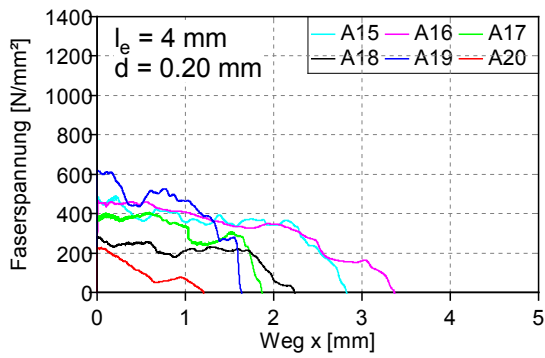
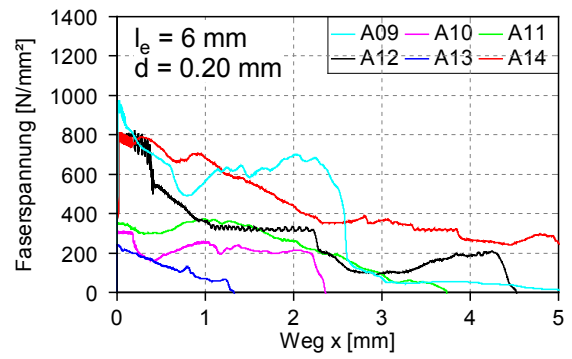
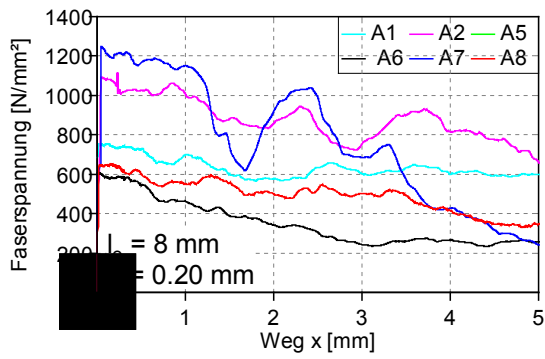


Abb. 4.14: Faserspannung-/Wegdiagramme der Ausziehversuche 1 mit geraden Fasern

Ausziehversuche mit geraden Fasern								
	Einbindelänge	Machinennummer	Einbindelänge Excel [mm]	Kraft Excel [N]	Verbundspannung [N/mm ²]	MW Verbundspannung [N/mm ²]	MW Verbundspannung [N/mm ²]	
Stratec 20/0.2 mm	8 mm	1	6.20	24.25	6.22	7.8	8.8	
		2	5.74	34.79	9.65			
		5	5.60	29.21	8.30			
		6	5.20	20.12	6.16			
		7	7.30	39.21	8.55			
		8	7.00	21.37	4.86			
	6 mm	9	2.30	31.43	21.75	8.5		
		10	2.12	10.05	7.55			
		11	2.50	11.39	7.25			
		12	4.30	26.31	9.74			
		13	1.24	7.68	9.85			
		14	5.00	26.25	8.36			
	4 mm	15	2.40	15.42	10.23	10.2		
		16	3.04	14.72	7.70			
		17	1.67	12.94	12.34			
		18	1.80	9.06	8.01			
		19	1.60	19.39	19.29			
		20	0.90	7.19	12.71			
	VOEST Feindraht 0.12 mm	8 mm	21	7.40	10.35	3.71		2.6
			22	7.80	4.03	1.37		
23			7.00	7.27	2.75			
24			5.05	4.95	2.60			
25			6.80	6.21	2.42			
26			5.75	1.89	0.87			
6 mm		27	4.10	8.24	5.33	2.2		
		28	2.40	3.46	3.82			
		29	4.20	2.25	1.42			
		30	5.48	4.27	2.06			
		31	3.64	2.10	1.53			
		32	4.40	3.56	2.15			
4 mm		33	3.14	2.96	2.50	2.6		
	34	2.44	1.97	2.14				
	35	3.19	3.14	2.61				
	36	3.58	2.92	2.16				
	37	3.28	4.38	3.54				
	-	-	-	-				

Tab. 4.5: Verbundspannungen der Ausziehversuche 1

In den Faserspannung-/Wegdiagrammen ist ersichtlich, dass selbst bei der maximal gewählten Einbindelänge von 8 mm, der Feindraht nicht bis an die Ersatzstreckgrenze $R_{p0,2} = 2300 \text{ N/mm}^2$ beansprucht wird [5]. Ebenfalls ist in Tab. 4.5 ersichtlich, dass die Verbundspannungen der Faser der Firma Stratec (8.8 N/mm^2) mehr als 3.5 Mal höher ist als jene des Voest Feindraht 0.12 mm (2.5 N/mm^2).

Eine mögliche Ursache für die geringen Verbundspannungen ist eine Verunreinigung des Feindrahtes. Aus diesem Grund wurden die Oberfläche der beiden Fasern mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops untersucht und verglichen, siehe Kap. 4.4. Eine andere Möglichkeit kann eine nicht vollständige Umhüllung des Feindrahtes durch den Zementleim sein, da die Proben nicht gerüttelt wurden. Dies wird in Kapitel 4.5 näher untersucht.

4.4 Rasterelektronenmikroskop-Untersuchung der Faseroberfläche

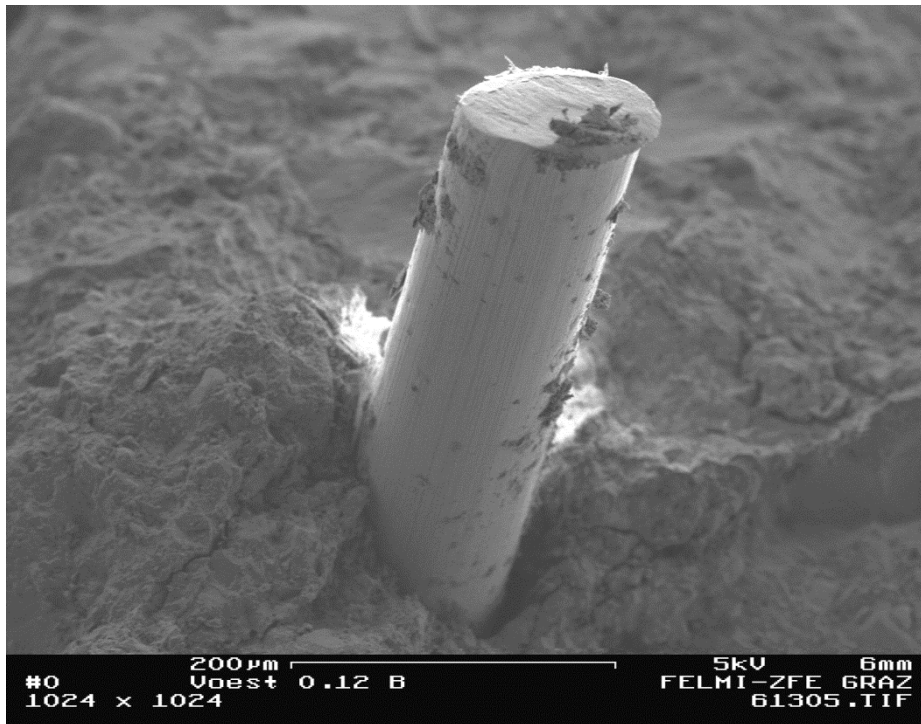


Abb. 4.15: Voest Feindraht 0.12 mm eingebettet in UHPC-Versuchskörper

Um ein detailliertes Bild von den Oberflächen der beiden in den Ausziehversuchen verwendeten Fasern zu erhalten, wurden diese mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops untersucht. Folgende Versuchsserien wurden durchgeführt:

Nr.	Faser	Oberfläche	Art
16	Stratec 20/0.2 mm	unbehandelt	glatt
17	Stratec 20/0.2 mm	freigelegt	glatt
18	Voest Feindraht 0.12 mm	unbehandelt	glatt
19	Voest Feindraht 0.12 mm	freigelegt	glatt
20	Stratec 20/0.2 mm	gereinigt	glatt
21	Voest Feindraht 0.12 mm	gereinigt	glatt

Tab. 4.6: REM Versuchsserien

Unter unbehandelt wird eine beliebige Faser verstanden, welche noch keine Verarbeitung oder Beanspruchung erfahren hat. Freigelegt beschreibt eine Faser, welche kurz vor dem Mikroskopieren aus dem UHPC eines Probekörpers freigelegt wurde. Gereinigt bezeichnet eine unbehandelte Faser, deren Oberfläche unter Verwendung von Aceton gereinigt wurde.

4.4.1 Versuchsaufbau

Im Rasterelektronenmikroskop (REM) wurden für die einzelnen Versuchsserien an unterschiedlichen Stellen der Faser Bilder aufgenommen. Dabei wurden folgende REM-Parameter variiert:

- Entfernung zur Oberfläche
- Detektoren (SE, SI und BSE)
- Spannung des elektrischen Feldes

Um die Aufnahmen in Bezug auf die Oberflächenbeschaffenheit zu analysieren, wurden Aufnahmen mit identen Parametern gegenüber gestellt und visuell verglichen.

4.4.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn der Untersuchungen wurden die Versuchsserien 1, 2 und 4 mikroskopiert. Daraus entstanden die Aufnahmen *61293.tif* bis *61311.tif*. Während des Mikroskopierens dieser Versuchsserien war eine punktweise Verunreinigung (Kohlenstoff) der Faseroberflächen der Versuchsserien 1 und 2 zu erkennen. Der Kohlenstoff stellt sich dabei als schwarze Punkte dar und ist in den Aufnahmen des BSE-Detektors am besten zu erkennen, siehe Abb. 4.17.

Aus diesem Grund wurden die Fasern der Versuchsserien 1 und 2 mit Aceton gereinigt und gemeinsam mit Versuchsserien 3 wieder eingeschleust. Mit dieser Konfiguration wurden die Bilder *61313.tif* bis *61329.tif* aufgenommen. Zum Schluss wurde noch einmal die Probe 4 mikroskopiert, wobei die Bilder *61330.tif* bis *61333.tif* entstanden.

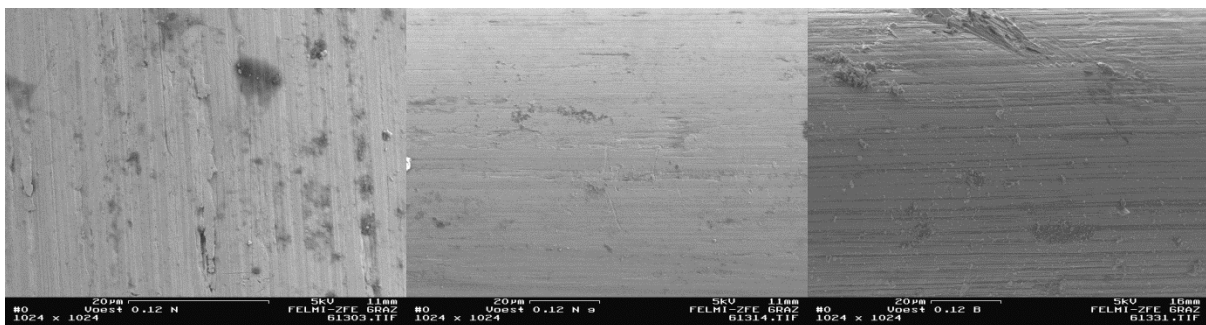


Abb. 4.16: Vergleich von Voest Feindraht 0.12 mm: unbehandelt (li.), gereinigt (Mitte) und freigelegt (re.)

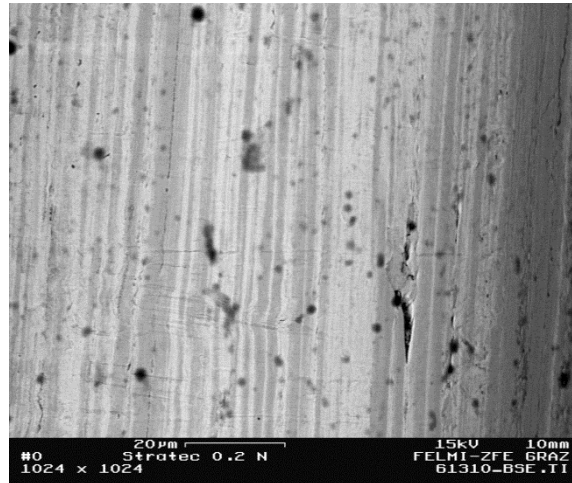


Abb. 4.17: Verschmutzungen auf Stratec 20/0.2 mm unbehandelt, dargestellt mithilfe des BSE-Detektors

4.4.3 Ergebnisse

Um die Aufnahmen des REM miteinander vergleichen zu können, wurden diese gegenübergestellt. Dabei wurde jeweils eine gleiche Anzahl an Bildern von den beiden unterschiedlichen Fasern mit gleichen Oberflächeneigenschaften gruppiert (Versuchsserien 1 und 3, 2 und 4, 5 und 6). Des Weiteren weisen die Bilder der Gruppierungen gleiche REM-Parameter auf. Die in diesem Kapitel gegenübergestellten Abbildungen stellen jeweils nur einen Auszug aus dem gesamten Bildmaterial dar. Die vollständige Gegenüberstellung der Versuchsserien befindet sich im Anhang ab S. 87.

Wie bereits erwähnt sind auf den Bildern der Versuchsserien 1 und 3 Verschmutzungen zu sehen. Diese sind jedoch punktförmig und treten nicht wie ein die ganze Oberfläche benetzender Film auf, siehe schwarze Flecken in Abb. 4.17. Des Weiteren kann kein die unterschiedlichen Ausziehfestigkeiten erklärender signifikanter Unterschied zwischen dem Grad der Verschmutzung der einzelnen Versuchsserie festgestellt werden. Ein Rückschluss auf das Vorhandensein eines möglichen Schmierfilms durch den Herstellungsprozess der Faser kann somit weder bestätigt, noch ausgeschlossen werden.

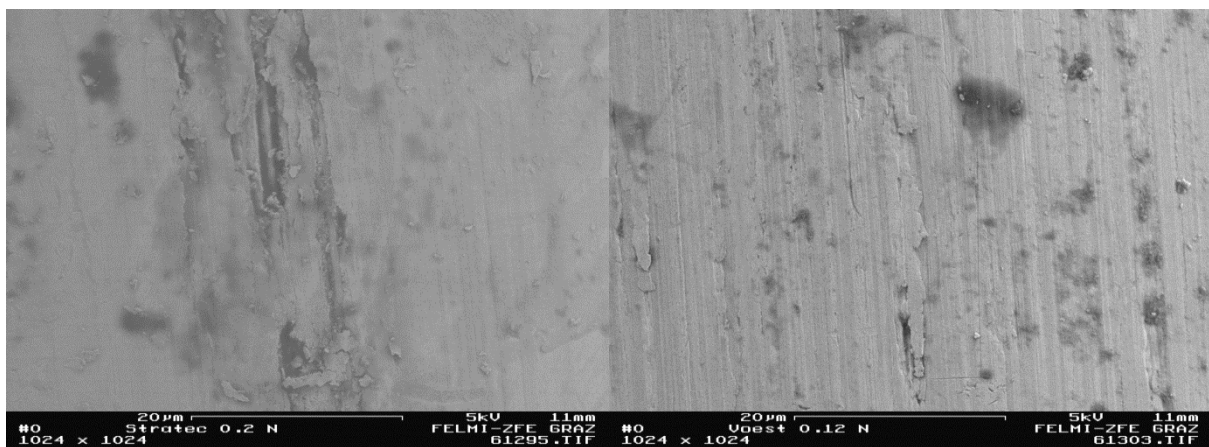


Abb. 4.18: Auszug aus dem Vergleich Detail unbehandelt:

Stratec 20/0.2 mm (li.) und Voest Feindraht 0.12 mm (re.)

Des Weiteren zeigte ein Vergleich der gereinigten Oberflächen (Versuchsserien 5 und 6) keinen signifikanten Unterschied in der Oberflächenstruktur, siehe Abb. 4.19. Dieser wird bei näheren Aufnahmen noch einmal deutlicher, siehe Abb. 4.20. Dort wirkt Probe 6 sogar rauer als Probe 5, was konträr zu den Ergebnissen der Ausziehversuche steht, siehe Kap. 4.3. Hier muss jedoch angemerkt werden, dass der pro Aufnahme betrachtete Bereich in Abb. 4.20, nur ca. $300 \mu\text{m}^2$ beträgt und damit sehr klein ist.

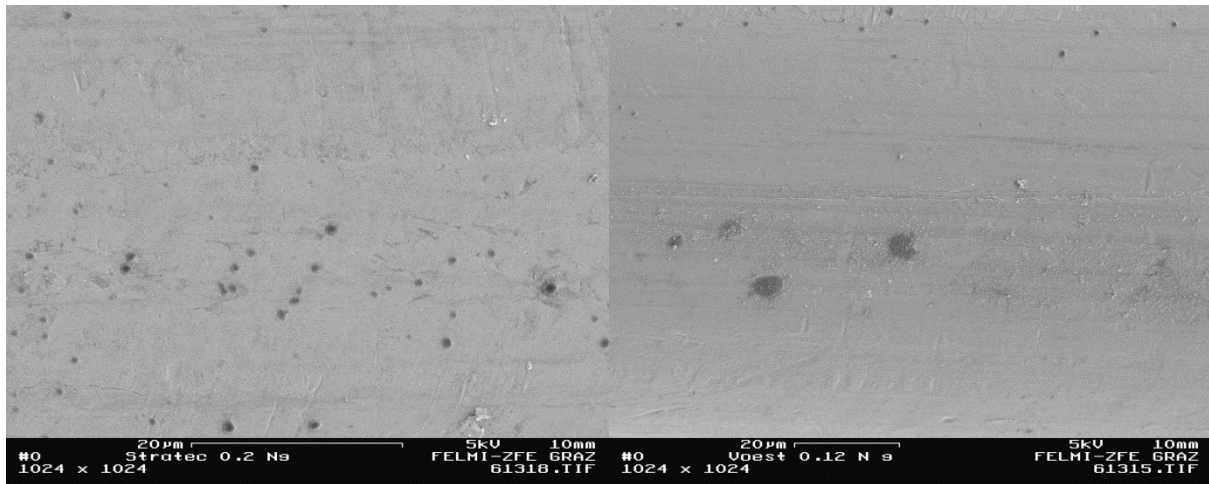


Abb. 4.19: Auszug aus dem Vergleich Übersicht gereinigt:

Stratec 20/0.2 mm (li.) und Voest Feindraht 0.12 mm (re.)

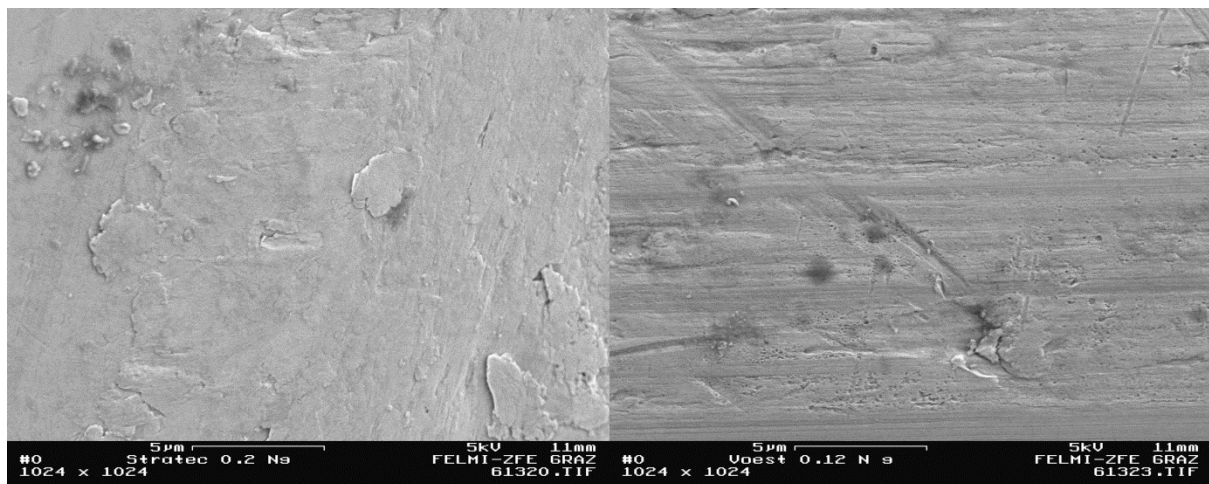


Abb. 4.20: Auszug aus dem Vergleich Detail gereinigt:

Stratec 20/0.2 mm (li.) und Voest Feindraht 0.12 mm (re.)

Bei dem Vergleich der Versuchsserien 2 und 4 fällt sowohl bei der Übersicht als auch bei der Detailansicht auf, dass der Beton in unterschiedlicher Form an der Faser haftet, siehe Abb. 4.21 und Abb. 4.22. Die Detailaufnahme lässt ebenfalls erkennen, dass auf Probe 2 mehr Beton haftet als auf Probe 4. Ob dies jedoch einen Einfluss auf die Verbundeigenschaften der Fasern hat, konnte nicht eindeutig geklärt werden.

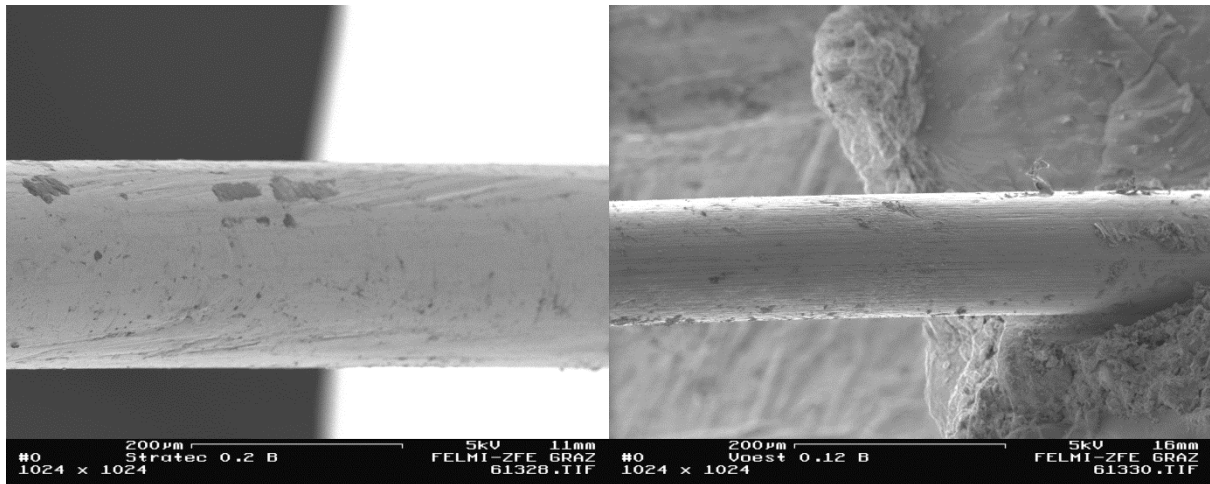


Abb. 4.21: Auszug aus dem Vergleich Übersicht freigelegt:
Stratec 20/0.2 mm (li.) und Voest Feindraht 0.12 mm (re.)

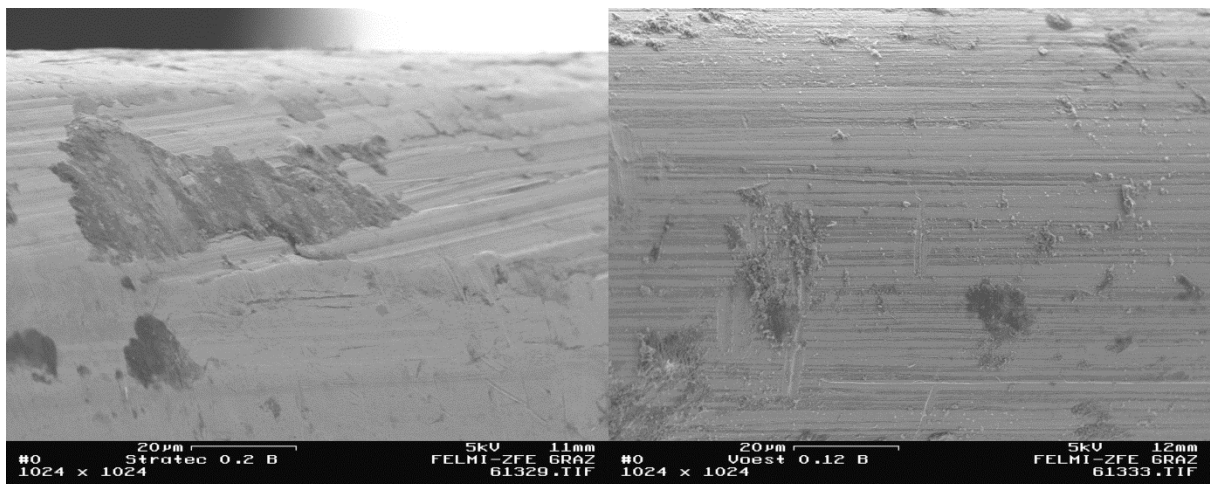


Abb. 4.22: Auszug aus dem Vergleich Detail freigelegt:
Stratec 20/0.2 mm (li.) und Voest Feindraht 0.12 mm (re.)

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die REM-Aufnahmen keinen Rückschluss auf die signifikant unterschiedlichen Ausziehfestigkeiten der beiden Fasern zulassen.

4.5 Ausziehversuche 2

Um die schlechten Verbundeigenschaften des Voest-Feindrahtes besser zu analysieren, wurde eine zweite Reihe an Ausziehversuchen durchgeführt. Im Gegensatz zur ersten Reihe an Ausziehversuchen wurden die Versuchskörper nun mit UHPC-Leim befüllt. Insgesamt wurden 90 Versuche dieser Art durchgeführt. Dabei wurden 6 unterschiedliche Faserarten untersucht.

- Voest Feindraht 0.12 mm unbehandelt
- Stratec 20/0.2 mm
- Voest Feindraht 0.12 mm gereinigt
- Voest Feindraht 0.12 mm strukturiert
- 0.175 mm Messing
- 0.175 mm Zink

Wie bereits bei der ersten Reihe an Ausziehversuchen wurden einerseits der Feindraht der Firma Voest mit einem Durchmesser von 0.12 mm und andererseits die Faser der Firma Stratec ($l/d = 20/0.2$) untersucht. Um eine mögliche Verunreinigung des Feindrahtes der Firma Voest auszuschließen, wurde der Voest Feindraht mit 0.12 mm Durchmesser mit Aceton gereinigt und als dritte Faserart untersucht. Eine weitere Möglichkeit den Verbund zwischen Faser und UHPC-Matrix zu verbessern, stellt eine Strukturierung der Faser dar. Aus diesem Grund wurde als vierte Faserart der strukturierte Feindraht der Firma Voest mit 0.12 mm Durchmesser untersucht. Die fünfte und sechste untersuchte Faserart waren zwei von der Firma Voest hergestellte Feindrähte aus Stahl mit 0.175 mm Durchmesser und zwei unterschiedlichen Oberflächenbeschichtungen aus Zink und Messing. Die Ausziehversuche der zweiten Versuchsreihe wurden wie bei der ersten Versuchsreihe mit 4 mm, 6 mm und 8 mm Einbindelänge durchgeführt.

4.5.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist identisch mit jenem in Kapitel 4.3.1. Es wurde der Kolbenweg der Prüfmachine aufgezeichnet und simultan dazu die auftretende Kraft mit einer Kraftmessdose gemessen. Die Faser wurde vollständig ausgezogen um die tatsächliche Einbindelänge zu erhalten. Die aus der Prüfung der Probekörper erhaltenen Rohdaten wurden zur Auswertung herangezogen.

4.5.2 Versuchsdurchführung

Für jede mögliche Kombination aus Faser und Einbindelänge wurden fünf Versuchskörper hergestellt. Dies ergab über sämtliche realisierte Einbindelängen hinweg folgende Versuchsserien:

Nr.	Faser	Maschinennummer
22	Voest Feindraht 0.12 mm unbehandelt	A38-A63
23	Stratec 20/0.2 mm	A66-A104
24	0.175 mm Messing	A105-A118
25	Voest Feindraht 0.12 mm gereinigt	A120-A135
26	Voest Feindraht 0.12 mm strukturiert	A136-A150
27	0.175 mm Zink	A151-A165

Tab. 4.7: Versuchsserien der Ausziehversuche März

Die Vorbereitung der Schalungen und der Feindrähte für die Herstellung der Versuchskörper erfolgte, mit Ausnahme des Reinigungsprozesses (Nr. 4), ident zu jener in Kapitel 4.3.2. Bei der Reinigung des Feindrahtes mit Aceton wurde wie folgt vorgegangen: Der Feindraht wurde an einem Ende in Aceton getaucht. Um ein teilweises Auflösen des XPS-Plättchens beim Einbau der Faser in selbiges zu verhindern, wurden die gereinigten Feindrähte vor dem Einbau in das XPS-Plättchen an der Luft getrocknet, siehe Abb. 4.23.



Abb. 4.23: Bereits mit Aceton gereinigte Feindrähte beim Trocknen



Abb. 4.24: Mit Silikon gedichtete Schalung vor dem Betonieren

Das Betonieren der Versuchskörper erfolgte auf Grund der hohen Anzahl an fünf aufeinanderfolgenden Tagen. Es wurden pro Tag jeweils 18 Versuchskörper aus UHPC-Leim betoniert, siehe Abb. 4.25. Die Rezeptur für den UHPC-Leim basiert auf der Betonrezeptur L1. Die Mischprozedur ist ident mit der in Kap. 4.2.2. Es wurden jedoch keine Zuschläge beigemischt, weshalb der Mischprozess nach sechs Minuten beendet wurde. Um eine vollständige Umhüllung der Fasern in den Versuchskörpern sicher zu stellen, wurde trotz der selbstverdichtenden Eigenschaften des UHPC-Leim minimale Verdichtungsarbeit geleistet.

Da der UHPC-Leim nach dem Betonieren der ersten Versuchsreihe teilweise aus den Schalungen auslief, wurden die Schalungen in den darauffolgenden Versuchsreihen mit Silikon abgedichtet, siehe Abb. 4.24. Diese Maßnahme konnte ein Auslaufen des UHPC-Leims verhindern. Am darauf folgenden Tag wurden die Versuchskörper ausgeschalt und bis zur Prüfung für 14 Tage an der Luft bei Raumtemperatur gelagert.

Vor dem Prüfen wurden die XPS-Plättchen wie bereits in Kapitel 4.3.2 mit Aceton beträufelt. Dadurch konnte das XPS entfernt werden und der Verbund zwischen den beiden Probekörperhälften bestand nur mehr durch die einzelne Faser mit der gewählten Einbindelänge.

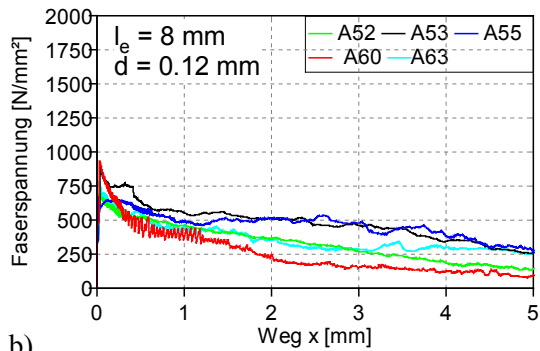
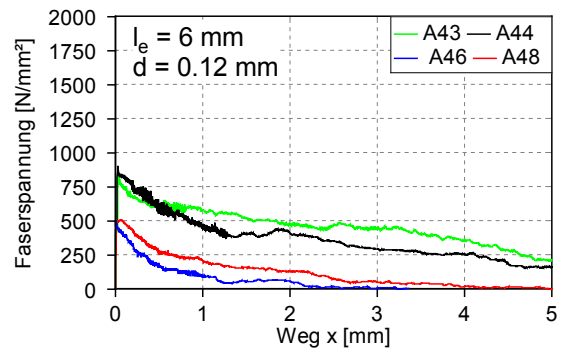
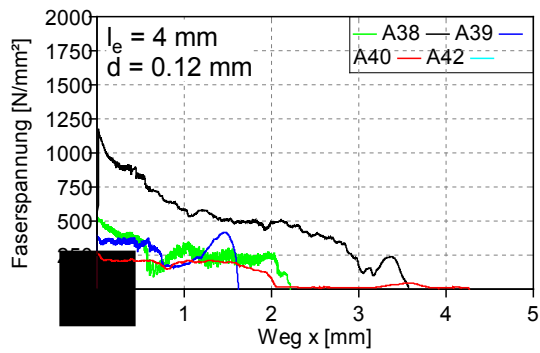


Abb. 4.25: Betonieren der Probekörper mit UHPC-Leim

4.5.3 Ergebnisse

Die Auswertung der Rohdaten wurde ident wie jene in Kapitel 4.3.3 durchgeführt. Zunächst wurde aus den Rohdaten die maximale Versuchskraft F_v [N] und die Einbindelänge l_b [mm] ermittelt. Darauf folgte die Umrechnung in Faserspannung/Weg-Diagramme, welche in Abb. 4.27 bis Abb. 4.29 dargestellt sind. Die bei der Auswertung ausgeschiedenen Probekörper, wiesen entweder eine signifikant geringere Verbundspannung auf (41, 68, 119) oder der Feindraht wurde auf der deutlich längeren Seite, und nicht auf jener mit der vorgesehen Einbindelänge, ausgezogen (155, 157), siehe Tab. 4.8 und Tab. 4.9.

a)



b)

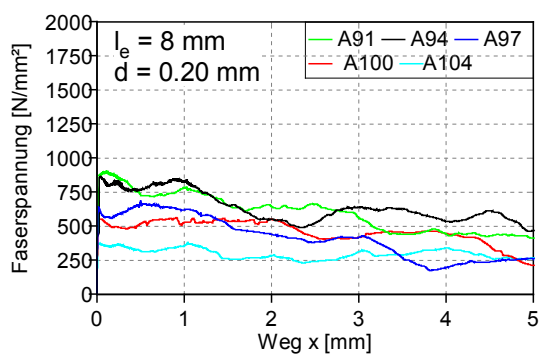
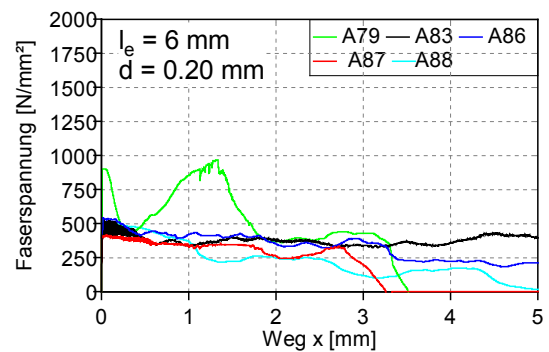
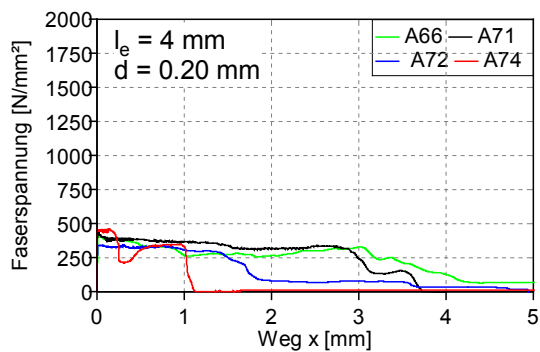
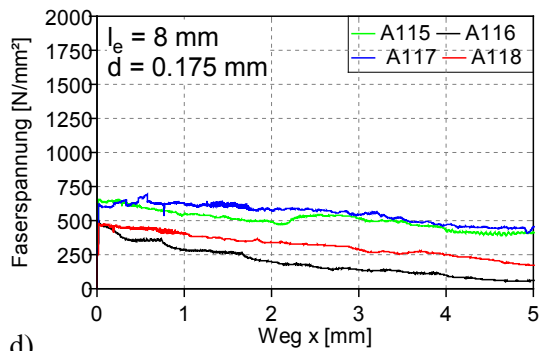
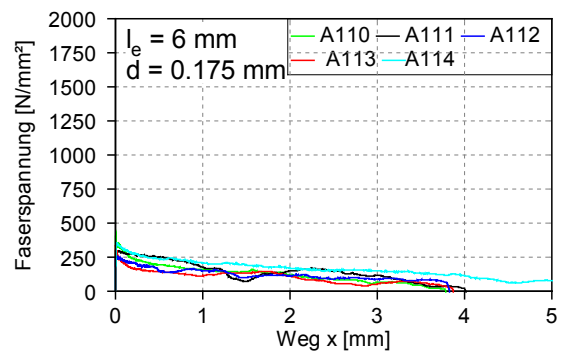
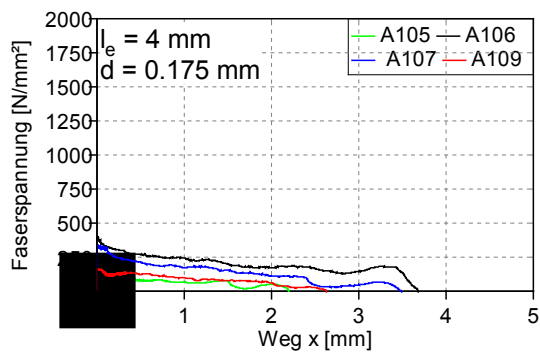


Abb. 4.26: Faserspannung-/Wegdiagramme:

- a) VOEST Feindraht 0.12 mm unbehandelt
- b) Stratec 20/0.2 mm

c)



d)

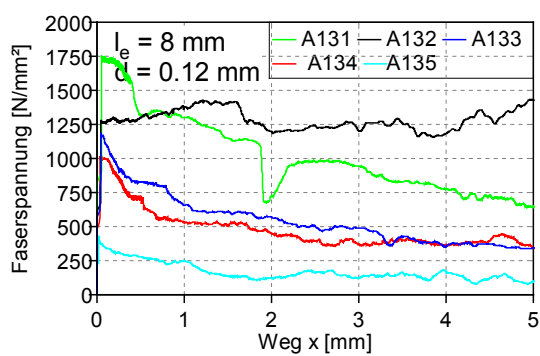
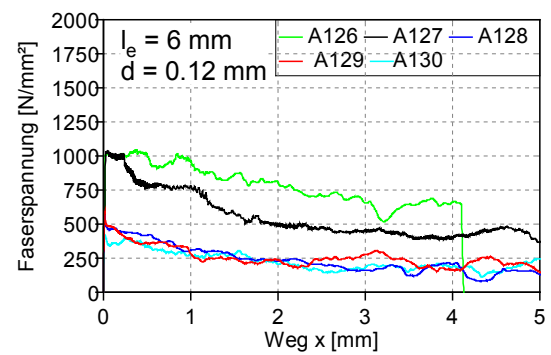
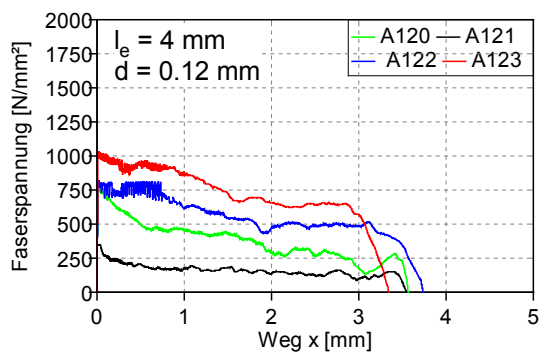
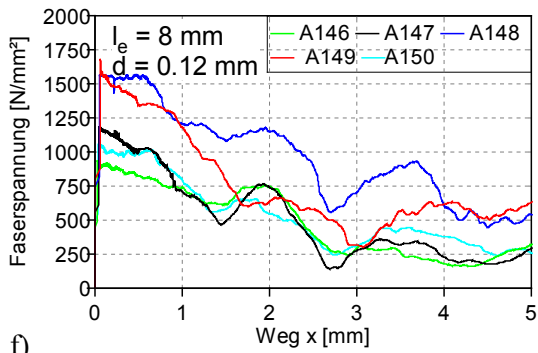
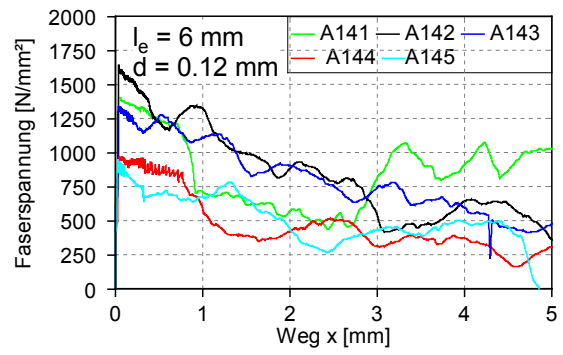
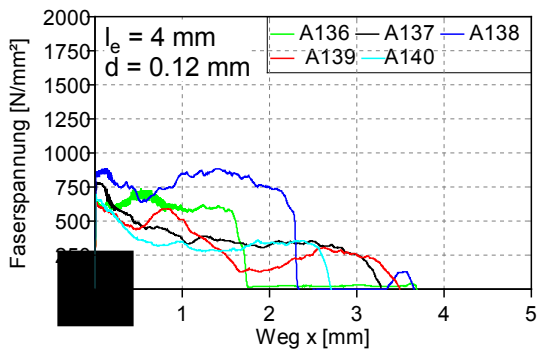


Abb. 4.27: Faserspannung-/Wegdiagramme:

- c) 0.175 mm Messing
- d) VOEST Feindraht 0.12 mm gereinigt

e)



f)

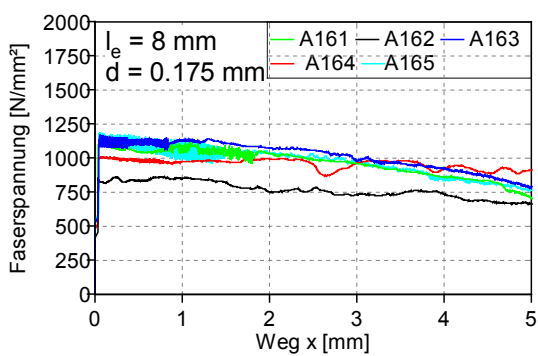
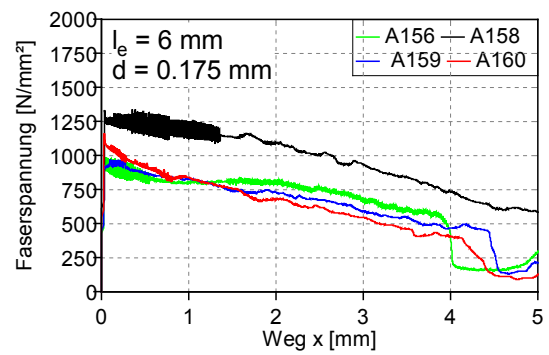
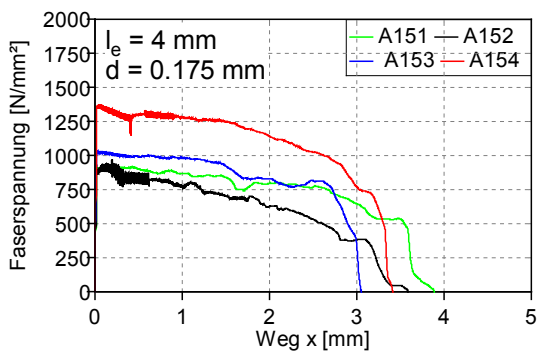


Abb. 4.28: Faserspannung-/Wegdiagramme:

- e) VOEST Feindraht 0.12 mm strukturiert
- f) 0.175 mm Zink

	Einbindelänge	Maschinennummer	Einbindelänge Excel [mm]	Kraft Excel [N]	Verbundspannung [N/mm ²]	MW Verbundspannung [N/mm ²]	MW Verbundspannung [N/mm ²]
VOEST Feindraht 0.12 mm unbehandelt	4 mm	38	2.22	6.09	7.28	7.0	4.9
		39	3.56	14.37	10.70		
		40	1.62	4.80	7.85		
		41	6.95	3.96	1.51		
		42	4.27	3.34	2.07		
	6 mm	43	5.76	12.05	5.55	4.7	
		44	5.91	10.77	4.83		
		46	2.92	6.02	5.47		
		48	5.31	6.06	3.03		
	8 mm	50	-	-	-	3.4	
		52	6.99	7.93	3.01		
		53	8.02	11.09	3.67		
		55	7.57	7.75	2.71		
60		7.50	10.73	3.79			
Stratec 20/0.2 mm	4 mm	63	7.32	9.97	3.61	8.7	
		66	5.59	13.05	3.72		
		68	7.72	12.73	2.63		
		71	3.72	14.39	6.16		
	6 mm	72	4.95	11.29	3.63	6.5	
		74	1.12	14.92	21.21		
		79	3.50	28.09	12.77		
		83	6.41	17.81	4.42		
	8 mm	86	7.09	17.03	3.82	5.3	
		87	3.26	13.64	6.66		
88		5.33	16.03	4.79			
91		6.05	29.48	7.76			
94		8.00	28.57	5.68			
97		5.63	20.39	5.76			
0.175 mm Messing	4 mm	100	6.21	17.12	4.39	3.8	
		104	7.22	12.24	2.70		
		105	2.20	3.49	2.88		
		106	3.68	9.81	4.85		
	6 mm	107	3.50	8.58	4.46	3.7	
		108	-	-	-		
		109	2.64	4.11	2.83		
		110	3.79	10.17	4.88		
	8 mm	111	4.01	7.41	3.36	3.3	
		112	3.83	6.34	3.01		
113		3.87	8.86	4.16			
114		5.43	9.18	3.08			
115		6.91	16.05	4.23			
116		7.44	12.53	3.06			
VOEST Feindraht 0.12 mm gereinigt	4 mm	117	7.77	15.15	3.55	6.7	
		118	8.74	11.69	2.43		
		119	20.01	9.35	0.85		
		120	3.56	9.77	7.28		
		121	3.55	4.17	3.12		
	6 mm	122	3.72	9.52	6.78	4.6	
		123	3.33	11.86	9.45		
		124	-	-	-		
		126	4.10	11.96	7.74		
		127	5.29	11.99	6.01		
	8 mm	128	5.59	7.26	3.45	4.7	
		129	5.81	7.04	3.21		
		130	5.50	5.10	2.46		
		131	7.00	20.26	7.68		
		132	8.79	16.48	4.97		
	8 mm	133	8.08	13.69	4.49	4.7	
		134	7.61	11.78	4.11		
		135	8.18	6.60	2.14		

Tab. 4.8: Verbundspannungen der Ausziehversuche 2, Seite 1

	Einbindelänge	Maschinennummer	Einbindelänge Excel [mm]	Kraft Excel [N]	Verbundspannung [N/mm ²]	MW Verbundspannung [N/mm ²]	MW Verbundspannung [N/mm ²]
VOEST Feindraht 0.12 mm strukturiert	4 mm	136	3.63	8.46	6.18	8.2	7.0
		137	3.28	9.60	7.76		
		138	2.32	11.63	13.30		
		139	3.49	7.29	5.54		
		140	2.70	8.35	8.20		
	6 mm	141	5.67	15.92	7.45	7.2	
		142	5.26	18.96	9.56		
		143	5.51	15.40	7.42		
		144	5.50	11.22	5.41		
		145	4.84	11.13	6.10		
	8 mm	146	6.21	10.87	4.64	5.6	
		147	7.14	13.68	5.08		
		148	7.01	18.06	6.83		
		149	7.67	19.32	6.68		
		150	7.23	12.44	4.56		
0.175 mm Zink	4 mm	151	3.87	22.35	10.51	14.0	9.6
		152	3.57	24.13	12.30		
		153	3.04	25.24	15.10		
		154	3.40	33.71	18.04		
		155	24.45	30.12	2.24		
	6 mm	156	5.46	24.32	8.10	9.3	
		157	22.28	31.59	2.58		
		158	5.36	33.01	11.20		
		159	5.29	24.38	8.38		
		160	5.50	28.46	9.41		
	8mm	161	7.21	27.52	6.94	6.4	
		162	7.95	21.29	4.87		
		163	7.04	29.03	7.50		
		164	7.46	24.84	6.06		
		165	7.82	29.19	6.79		

Tab. 4.9: Verbundspannungen der Ausziehversuche 2, Seite 2

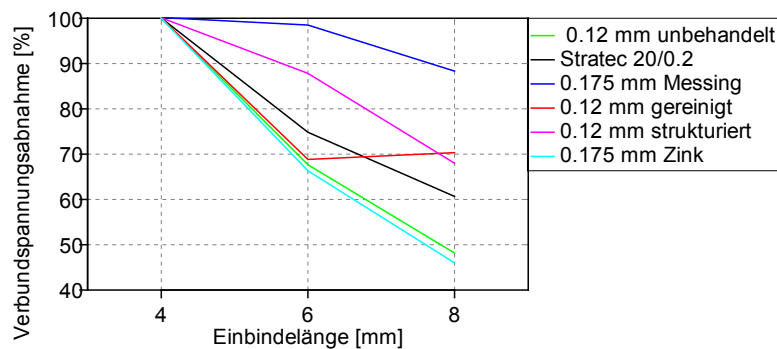


Abb. 4.29: Verbundspannung der einzelnen Faserarten bei unterschiedlichen Einbindelängen relativ zur maximalen Verbundspannung

Wie aus der Berechnung der Verbundspannung in Tab. 4.8 und Tab. 4.9 ersichtlich ist, weist der Feindraht mit 0.175 mm Durchmesser und Zink-Beschichtung mit einer Verbundspannung von 9.6 N/mm² die höchste Verbundspannung mit dem UHPC-Leim auf. Im Gegensatz dazu erreicht der Feindraht mit gleicher Dicke und Messing-Beschichtung mit einer Verbundfestigkeit von 3.6 N/mm² nur den niedrigsten Wert der Versuchsreihe. Es lässt sich also eine deutliche Abhängigkeit der Verbundfestigkeit von der Oberflächenbeschichtung ableiten.

Vergleicht man die Verbundspannungen der Faser der Firma Stratec (l/d = 20/0.2) mit der UHPC-Standardrezeptur L1 (Ausziehversuche 1, siehe Tab. 4.5) und jener mit dem UHPC-Leim (Ausziehversuche 2, siehe Tab. 4.8) so fällt auf, dass diese abnimmt. Mit der UHPC-Standardrezeptur L1 beträgt die Verbundspannung 8.8 N/mm², mit dem UHPC-Leim jedoch lediglich 6.7 N/mm².

Stellt man nun denselben Vergleich bei dem unbehandelten Voest Feindraht 0.12 mm über die beiden Versuchsreihen (Tab. 4.5 und Tab. 4.8) an, so nimmt die Verbundspannung allerdings zu. Mit der UHPC-Standardrezeptur L1 beträgt die Verbundspannung 2.5 N/mm², mit dem UHPC-Leim ist sie jedoch mit 4.9 N/mm² fast doppelt so hoch. Diese Ergebnisse bestätigen den in Kapitel 4.3 geäußerten Verdacht, der nicht vollständigen Umhüllung des Feindrahtes durch den UHPC-Leim. Möglich ist dies auf Grund des geringen Durchmessers des Feindrahtes im Vergleich zu den Zuschlägen des UHPC. Auch die fehlende Verdichtungsarbeit bei dem selbstverdichtenden UHPC kann zu einer nicht vollständigen Umhüllung des Feindrahtes führen. Bei der Herstellung von UHPC kann auf Grund der Zugabe der Fasern im Mischer eine nicht vollständige Umhüllung der Fasern mit UHPC-Leim jedoch ausgeschlossen werden.

Eine weitere Möglichkeit die geringen Verbundspannungen des Voest Feindrahtes 0.12 mm bei den Ausziehversuchen (Ausziehversuche) zu erklären, ist eine Verunreinigung der Oberfläche des Feindrahtes. Vergleicht man die Verbundspannungen des unbehandelten Feindrahtes mit jenen des gereinigten, so ist eine geringfügige Zunahme der Verbundspannungen von 6 % erkennbar. Es ist also anzunehmen, dass die Verunreinigung der Feindrahtoberfläche nur einen geringen bis keinen Einfluss auf die Verbundfestigkeit hat.

Vergleicht man die Verbundspannungen des unbehandelten Voest Feindrahtes 0.12 mm, mit jenen des strukturierten, so erkennt man eine Zunahme der Verbundfestigkeit um 43 %, von 4.9 N/mm² (unbehandelt) auf 7.0 N/mm² (strukturiert). Es lässt sich also auch durch eine geringfügige Strukturierung des Feindrahtes dessen Verbundspannung erheblich steigern.

Betrachtet man die Mittelwerte der Verbundspannungen je Einbindelänge, so lässt sich in Tab. 4.8, Tab. 4.9 und Abb. 4.30 eine klare Tendenz zur Abnahme der Verbundspannungen mit zunehmender Einbindelänge erkennen. Diese Abnahme ist, abhängig von der Faserart, unterschiedlich stark ausgeprägt, siehe Abb. 4.30. Die in diesem Kapitel präsentierten Ergebnisse lassen darauf schließen, dass das starr-plastische Verbundgesetz für die untersuchten Fasern keine Gültigkeit besitzt, und die Verbundspannung mit zunehmender Einbindetiefe abnimmt.

4.6 Biegezug-Tastversuche

Da der Feindraht der Firma Voest nun seitens des Herstellers zu Fasern verarbeitet wurde, konnten erste Probekörper für Biegezugversuche und Druckversuche hergestellt werden. Dies ermöglichte es einen Überblick über die Frischbeton- und Festbetoneigenschaften des UHPC, in Verbindung mit dem Voest Feindraht 0.12 mm, zu bekommen. Zum Einsatz kamen dabei drei unterschiedlichen Längen des Feindrahtes: 9 mm, 12 mm und 15 mm, sowie eine Referenzfaser der Firma Bekaert mit einer Länge von 13 mm und einem Durchmesser von 0.2 mm. Es wurden jeweils drei Prismen und zwei Würfel hergestellt, der Fasergehalt variierte dabei je nach Faserart zwischen 0.25 % und 1.5 Vol-%. Folgende Versuchsserien wurden durchgeführt:

Nr.	Faserart	Fasergehalt ρ_f [Vol-%]	Faserschlankheit [l/d]
28	Bekaert 13/0.20 mm	0.50	65
29	Bekaert 13/0.20 mm	1.00	
30	Bekaert 13/0.20 mm	1.50	
31	Voest Feindraht 9/0.12 mm	0.50	75
32	Voest Feindraht 9/0.12 mm	0.75	
33	Voest Feindraht 9/0.12 mm	1.00	
34	Voest Feindraht 12/0.12 mm	0.50	100
35	Voest Feindraht 12/0.12 mm	0.75	
36	Voest Feindraht 12/0.12 mm	1.00	
37	Voest Feindraht 15/0.12 mm	0.25	125
38	Voest Feindraht 15/0.12 mm	0.50	
39	Voest Feindraht 15/0.12 mm	0.66	
40	Nullbeton		0

Tab. 4.10: Versuchsserien der Tastversuche

4.6.1 Versuchsaufbau

Druckversuche

Die Druckversuche wurden mit würfelförmigen Versuchskörpern mit einer Kantenlänge von 100 mm durchgeführt. Das Aufbringen der Kraft erfolgte kraftgesteuert, für die Messung des Wegs wurde der Kolbenweg aufgezeichnet. Der gesamte Versuch wurde nach ÖNORM EN 12390 durchgeführt.

Biegezugversuche

Für die Biegezugversuche wurden prismenförmige Versuchskörper mit einer Länge von 160 mm, einer Breite von 40 mm und einer Höhe von 40 mm hergestellt, siehe Abb. 4.31. Auch hier muss auf Grund der geringen Größe der Versuchskörper auf den in Kap. 3.2 erläuterten Maßstabseffekt verwiesen werden. Die Prismen wurden mit Hilfe eines 3-Punkt-Biegezugversuches getestet, siehe Abb. 4.31. Während des Versuches waren die Versuchskörper auf Metallrollen gelagert, um das Einleiten von horizontalen Kräften durch die Auflager zu verhindern. Die Kraft wurde weggesteuert, mit einer Geschwindigkeit von 0.25 mm/sec aufgebracht und während des Versuches durch eine Kraftmessdose aufgezeichnet.

Zur Messung der Durchbiegung wurden keine Wegaufnehmer verwendet, sondern der Maschinenweg aufgezeichnet. Die Rohdaten der Kraftmessdose und des Maschinenwegs wurden anschließend zur Auswertung herangezogen.

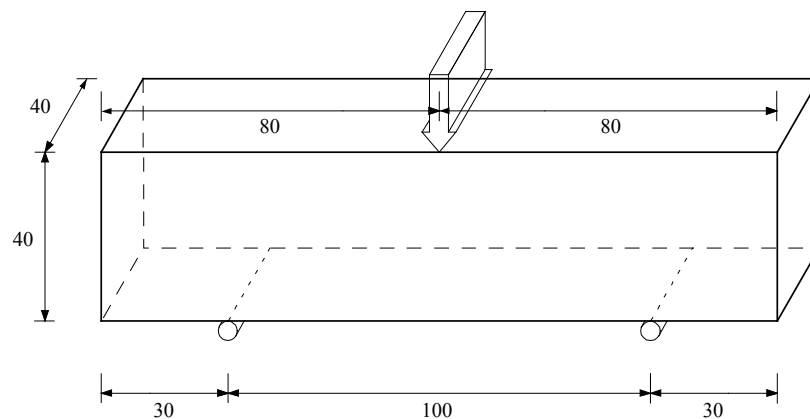


Abb. 4.30: 3-Punkt-Biegezugversuchskonfiguration (Maße in Millimeter)

4.6.2 Versuchsdurchführung

Für die Tastversuche wurden bei der Betonrezeptur L1 25 % der Gesteinskörnung durch Basalt ersetzt, da dies die im Laufe des Forschungsvorhabens aktuelle Betonrezeptur darstellte. Die verwendete Rezeptur wurde als Betonrezeptur L1B bezeichnet, siehe Tab. 4.1.

An zwei Tagen wurde insgesamt 13-mal die Betonrezeptur L1B, mit unterschiedlichen Fasergehalten und Fasertypen, in einem Eirich-Labormischer gemischt. Der verarbeitete Feindraht mit einer Länge von 15 mm, enthielt Fasern, welche länger als die vorgesehen 15 mm waren, siehe Abb. 4.33.

Diese wurden beim Einwiegen und Einmischen der Fasern ausgeschieden. Das Mischen wurde dabei wie in Kap. 4.2.2 beschrieben durchgeführt. Nach jedem Mischvorgang wurden die Frischbetoneigenschaften mit Hilfe des Hägermann-Flow und der Fließzeit t_{200} kontrolliert. Dabei ist in Abb. 4.37 gut ersichtlich, dass mit steigendem l/d-Verhältnis der Fasern der Hägermann-Flow abnimmt.

Bei jedem Fasertyp wurde der Fasergehalt schrittweise erhöht und kontrolliert, ob es zu einer nachteiligen Beeinflussung der Frischbetoneigenschaften (z. B. Faserigel oder Entmischung) durch den beigegebenen Fasergehalt kommt. War dies der Fall, wurde der Fasergehalt bei der nächsten Mischung nicht weiter erhöht, sondern verringert. Durch diese Einflussnahme auf den Fasergehalt, kam es bei den unterschiedlichen Fasertypen zu sehr unterschiedlichen Fasergehalten, von 0.25 % bis 1.5 %.



Abb. 4.31: Voest Feindraht 12/0.12 mm



Abb. 4.32: Ausgeschiedener überlanger Feindraht, bei angestrebten 15 mm Faserlänge (li. unten)

Nach dem Mischen wurden die Versuchskörper von der Seite mit UHPC befüllt, siehe Abb. 4.35. Da es sich bei der Betonrezeptur L1B um einen selbstverdichtenden Beton handelt wurde keine Verdichtungsenergie eingebracht. Abschließend wurden die Versuchskörper mit Folie abgedeckt und am nächsten Tag ausgeschalt. Die Prismen wurden bis zur Prüfung 14 Tage, die Würfel 28 Tage, bei Raumtemperatur gelagert.

4.6.3 Ergebnisse

Druckversuche

Bei den Druckversuchen wurde die gemessene maximale Last des Prüfkörpers durch die tatsächliche Fläche des Würfels dividiert. Aus den so erhaltenen Druckspannungen je Prüfkörper wurden wie in Tab. 4.11 ersichtlich Mittelwerte je Fasergehalt gebildet. Vergleicht man die so erhaltenen Mittelwerte je Fasergehalt mit jenem des Nullbetons, so kann man den Einfluss unterschiedlicher Faserlängen und -mengen auf die Druckfestigkeit des UHPC feststellen. Wie in Tab. 4.11 und Abb. 4.34 erkennbar, lässt sich weder eine Tendenz zur Steigerung noch zur Abnahme der Druckfestigkeit durch die Zugabe unterschiedlicher Fasermengen erkennen.

	Fasergehalt [Vol-%]	Spannung [Mpa]	MW Spannung [Mpa]
Bekaert 13/0.20 mm	0.5	195.7	194.4
		193.0	
	1	190.5	192.9
		195.3	
	1.5	194.8	192.8
		190.9	
VOEST Feindraht 9/0.12 mm	0.5	197.3	193.6
		189.8	
	0.75	196.2	193.0
		189.8	
	1	198.9	200.4
		201.8	
VOEST Feindraht 12/0.12 mm	0.5	193.6	193.6
		193.7	
	0.75	191.9	193.5
		195.2	
	1	192.3	194.4
		196.4	
VOEST Feindraht 15/0.12 mm	0.25	199.7	200.0
		200.3	
	0.5	200.3	199.7
		199.1	
	0.66	202.2	200.1
		198.0	
0-Beton	0	198.7	198.5
		198.2	

Tab. 4.11: Druckspannungen der Tastversuche

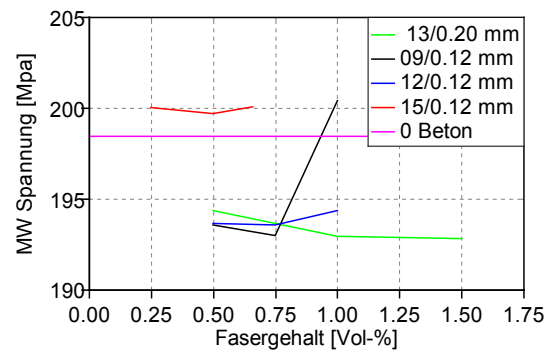


Abb. 4.33: MW der Druckspannungen der unterschiedlichen Prüfreiheiten

Biegezugversuche

Die Rohdaten wurden zu Beginn wie in Kap. 4.2.3 aufbereitet und bis zur Erstrisslast linear-elastisch idealisiert. Bei den Versuchskörpern mit Mehrfachrissbildung, siehe Abb. 4.36, musste die Auswertung angepasst werden.

Abb. 4.51 und Abb. 4.52 zeigen die Biegezugspannung-/Durchbiegungsdiagramme des UHPC mit unterschiedlichen Fasergehalten, Abb. 4.54 jene des Nullbetons. Abb. 4.53 zeigt wie in Kap. 4.2.3 Biegezugspannungs-/Durchbiegungsdiagramme der Mittelwerte einzelner Versuchsserien, gruppiert je Faserart.



Abb. 4.34: Seitliches Befüllen der Prismenschalung

Abb. 4.35: Mehrfachrissbildung eines Versuchskörpers

Nr.	Faserart	t_{200} [sec]	Hägermann Flow [cm]	$\sigma_{\max, \text{mittel}}$ [N/mm ²]
28	$l_f = 13 \text{ mm } \rho_f = 0.50 \%$	6	31.0	13.75
29	$l_f = 13 \text{ mm } \rho_f = 1.00 \%$	8	29.0	16.14
30	$l_f = 13 \text{ mm } \rho_f = 1.50 \%$	12	27.0	24.30
31	$l_f = 9 \text{ mm } \rho_f = 0.50 \%$	7	29.5	12.32
32	$l_f = 9 \text{ mm } \rho_f = 0.75 \%$	13	27.0	14.94
33	$l_f = 9 \text{ mm } \rho_f = 1.00 \%$	14	25.3	20.37
34	$l_f = 12 \text{ mm } \rho_f = 0.50 \%$	8	29.3	14.53
35	$l_f = 12 \text{ mm } \rho_f = 0.75 \%$	14	25.5	19.92
36	$l_f = 12 \text{ mm } \rho_f = 1.00 \%$	>40	20.3	26.00
37	$l_f = 15 \text{ mm } \rho_f = 0.25 \%$	7	29.8	7.51
38	$l_f = 15 \text{ mm } \rho_f = 0.50 \%$	11	27.8	12.14
39	$l_f = 15 \text{ mm } \rho_f = 0.66 \%$	16	25.0	17.10
40	0 Beton	6	31.3	13.26

Tab. 4.12: Frischbeton- und Festbetoneigenschaften der einzelnen Versuchsserien im Vergleich

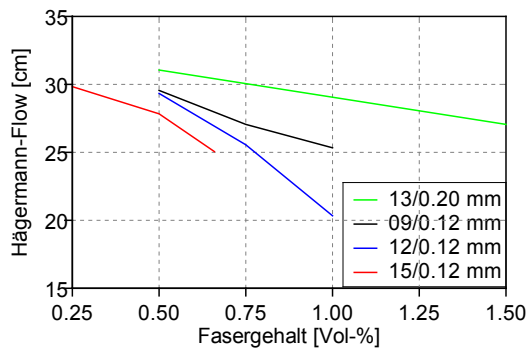
Frischbeton


Abb. 4.36 Hägermann-Flow in Abhängigkeit des Fasergehaltes und der Faserart

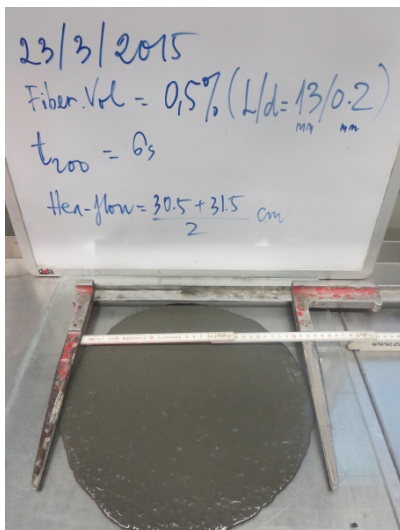


Abb. 4.37: $l_f = 13 \text{ mm } \rho_f = 0.5 \%$

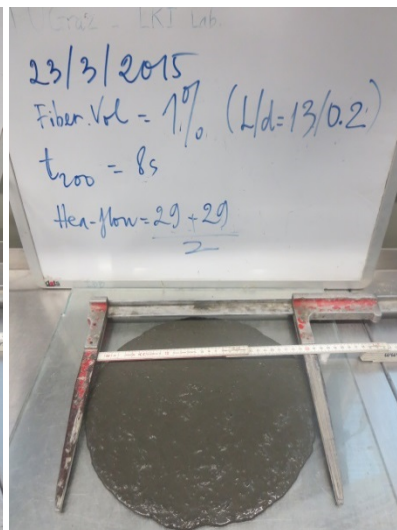


Abb. 4.38: $l_f = 13 \text{ mm } \rho_f = 1.0 \%$

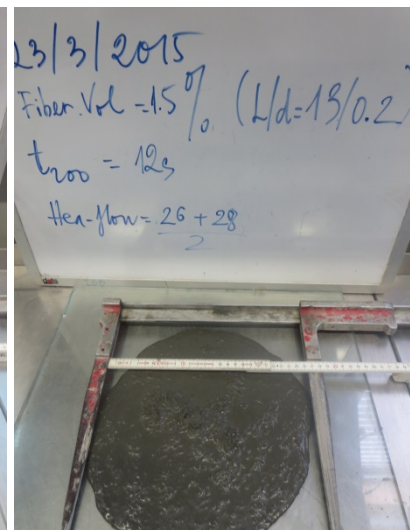


Abb. 4.39: $l_f = 13 \text{ mm } \rho_f = 1.5 \%$

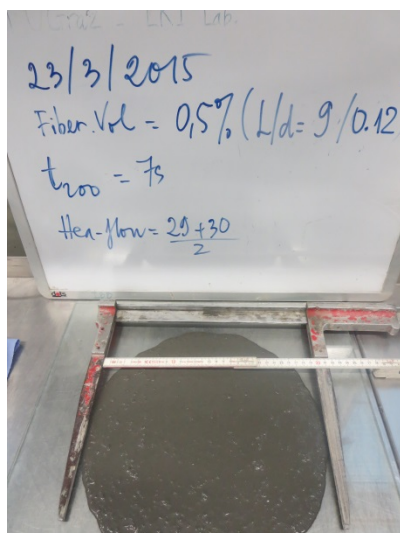


Abb. 4.40: $l_f = 9 \text{ mm } \rho_f = 0.5 \%$

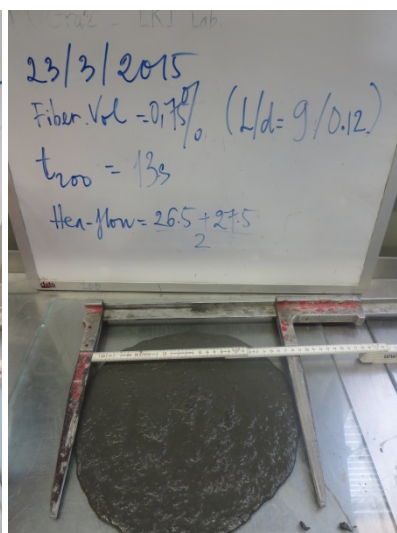


Abb. 4.41: $l_f = 9 \text{ mm } \rho_f = 0.75 \%$

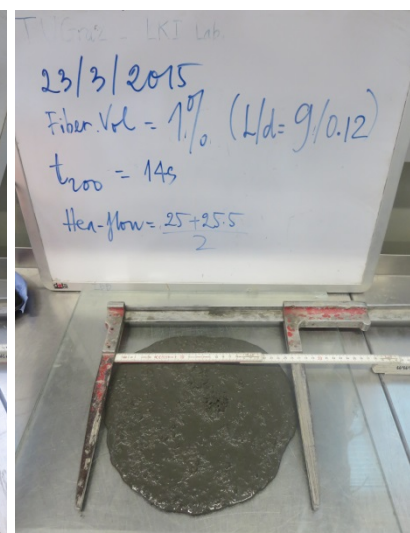
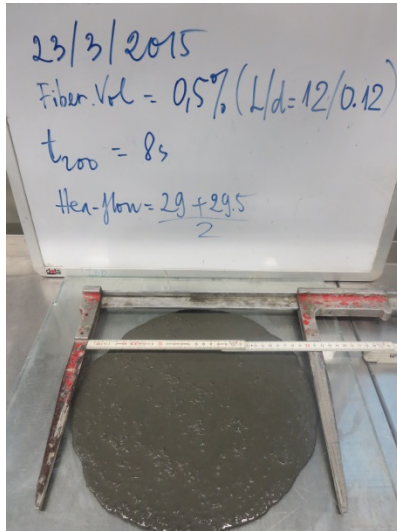
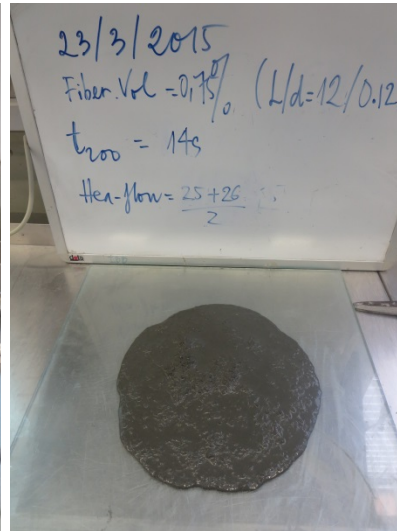
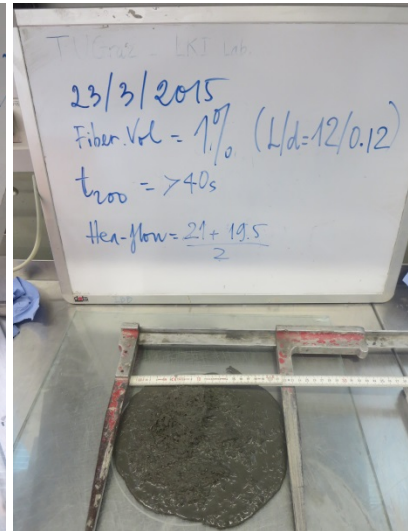
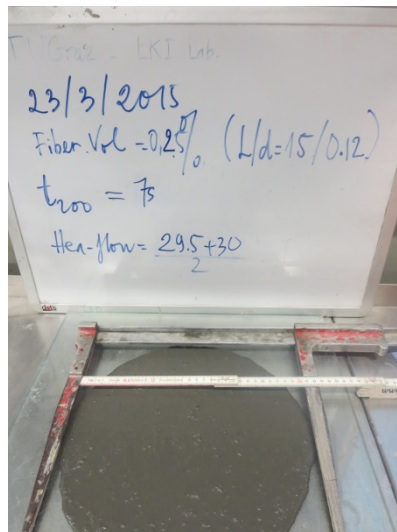
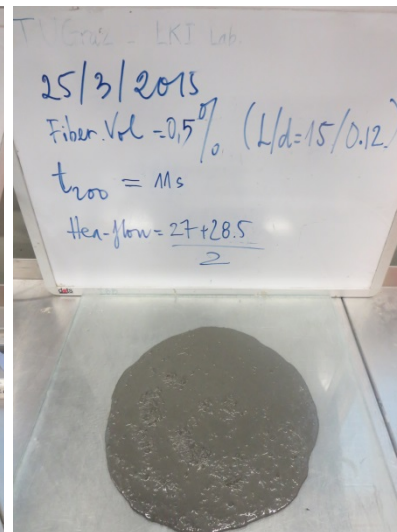
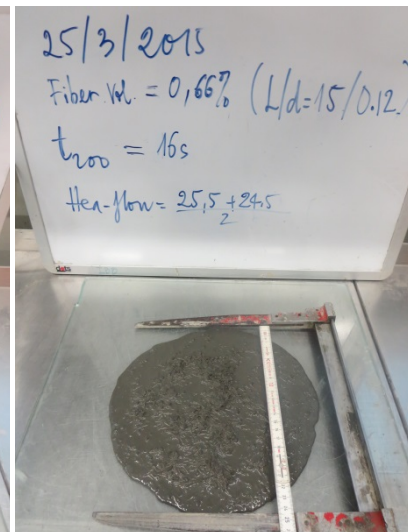
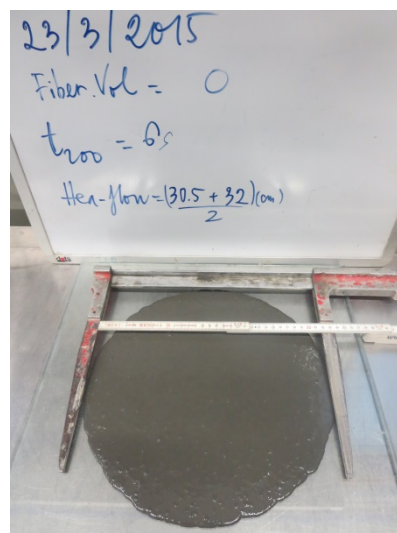


Abb. 4.42: $l_f = 9 \text{ mm } \rho_f = 1.0 \%$


 Abb. 4.44: $l_f = 12 \text{ mm}$ $\rho_f = 0.5 \%$

 Abb. 4.43: $l_f = 12 \text{ mm}$ $\rho_f = 0.75 \%$

 Abb. 4.45: $l_f = 12 \text{ mm}$ $\rho_f = 1.0 \%$

 Abb. 4.47: $l_f = 15 \text{ mm}$ $\rho_f = 0.25 \%$

 Abb. 4.48: $l_f = 15 \text{ mm}$ $\rho_f = 0.5 \%$

 Abb. 4.49: $l_f = 12 \text{ mm}$ $\rho_f = 0.66 \%$

 Abb. 4.46: $l_f = 15 \text{ mm}$ $\rho_f = 0.25 \%$

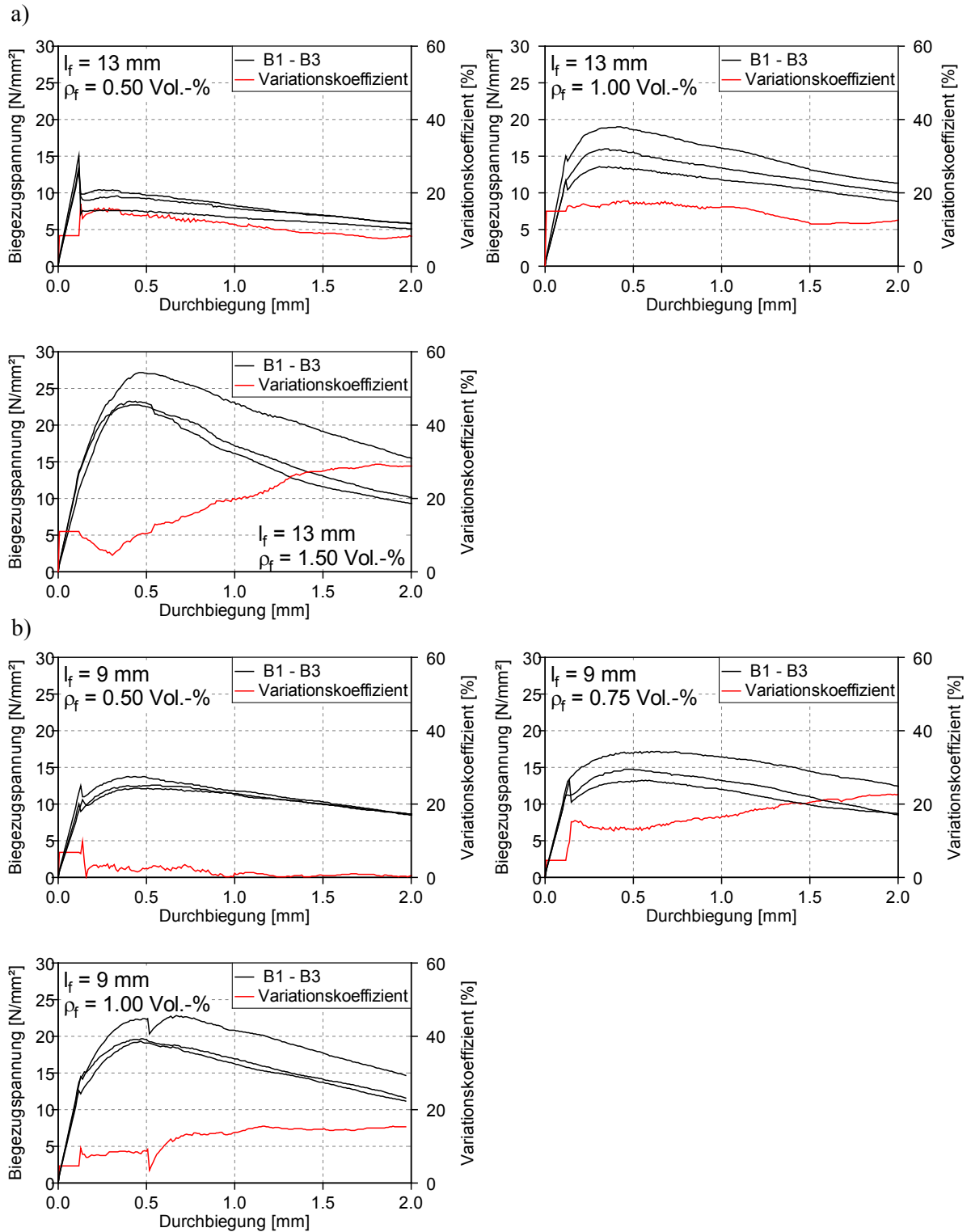


Abb. 4.50: Biegezugspannung-/Durchbiegungsdiagramme:

- a) Bekaert 13/0.2 mm
- b) VOEST Feindraht 9/0.12 mm

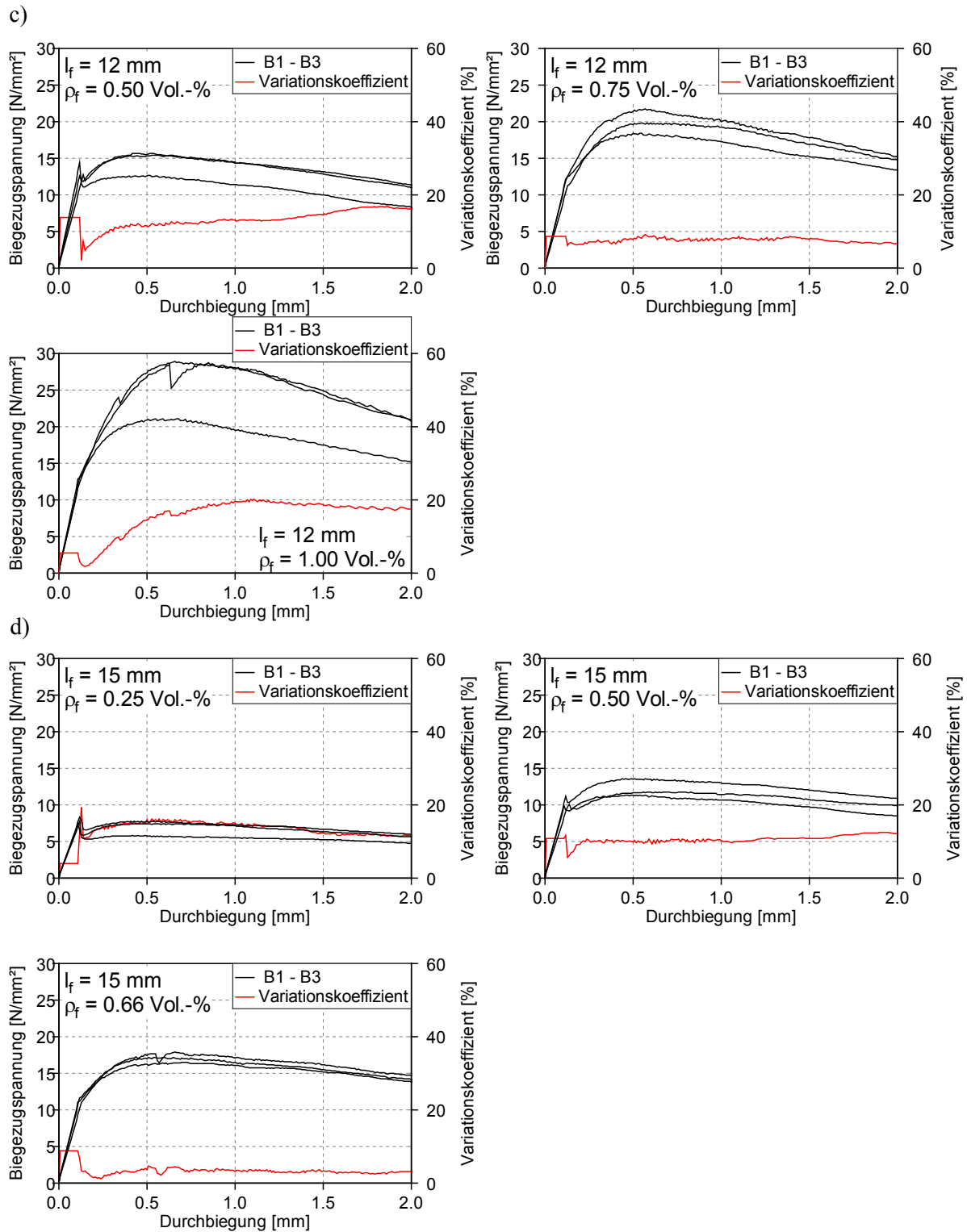


Abb. 4.51: Biegezugspannung-/Durchbiegungsdiagramme:

- c) VOEST Feindraht 12/0.12 mm
- d) VOEST Feindraht 15/0.12 mm

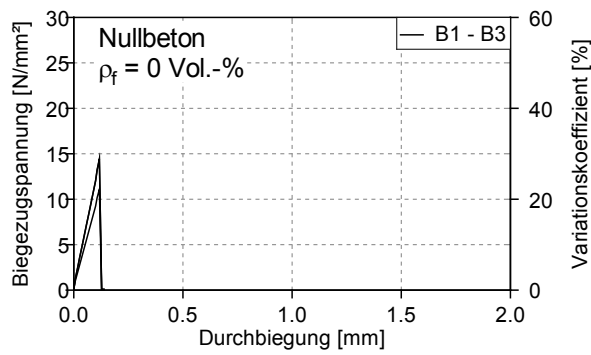


Abb. 4.52: Biegezugspannung-/Durchbiegungsdiagramme: 0 Beton

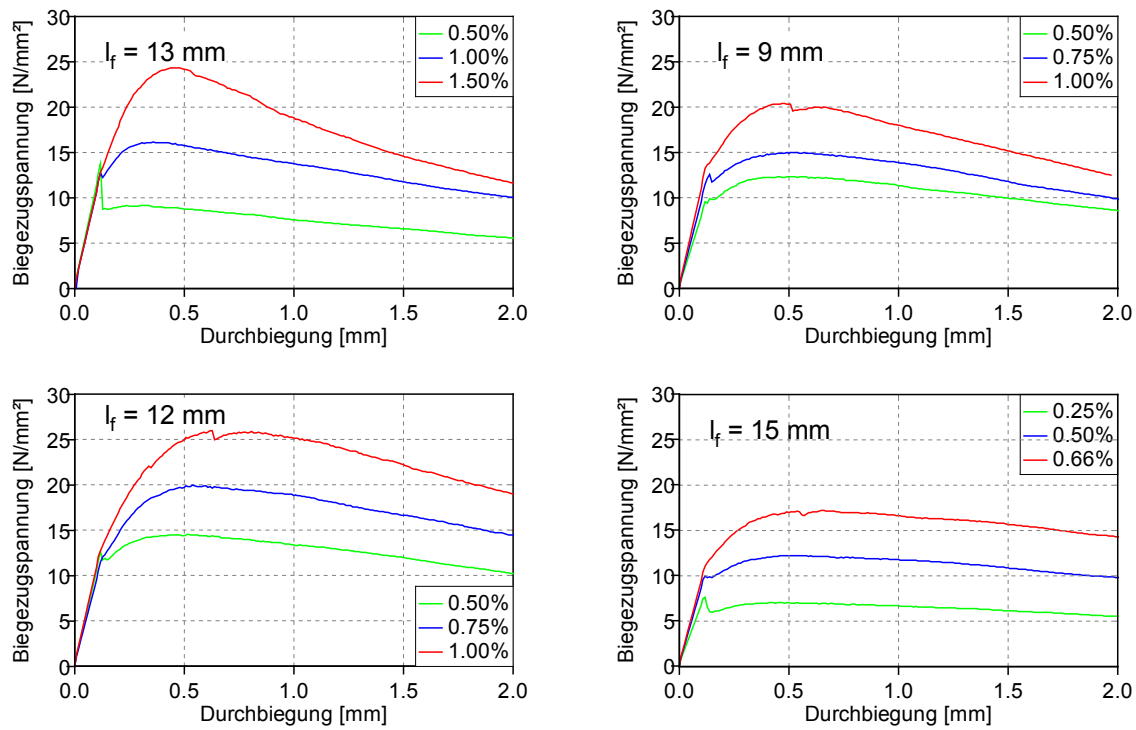


Abb. 4.53: Biegezugspannung-/Durchbiegungsdiagramme:

Mittelwerte der unterschiedlichen Faserarten (a bis d) aus jeweils 3 Versuchskörpern

Vergleicht man die Mittelwerte der unterschiedlichen Faserarten in Abb. 4.53 so fällt auf, dass der Feindraht mit einer Länge von 15 mm bei gleichem Fasergehalt eine geringere maximale Biegezugspannung ($\sigma_{\max, \text{mittel}}$) aufweist als jener mit 12 mm, dies ist auch in Tab. 4.12 ersichtlich. Bei der Erhöhung der Faserlänge von 12 mm auf 15 mm kommt es zu einer Abnahme von $\sigma_{\max, \text{mittel}}$ um 16 %. Des Weiteren wird in der Tabelle ersichtlich, dass sich $\sigma_{\max, \text{mittel}}$ der 15 mm langen Faser nur geringfügig von jenem der 9 mm langen Faser unterscheidet.

Ein Vorteil, den die Faser mit einer Länge von 15 mm gegenüber jener mit 12 mm und 9 mm Länge bietet, ist die erhöhte Duktilität. Trotz des geringen Durchmessers von nur 0.12 mm und einer sehr hohen Faserschlankeheit von 125 wurde weder bei der Faserherstellung noch bei der Faserverarbeitung ein Brechen, Verbiegen oder Einrollen der Faser beobachtet. Dies lässt sich auf den sehr hohen E-Modul des Faserwerkstoffes zurück führen [5]. Die Frischbetoneigenschaften werden ab einem Fasergehalt von 0.5 Vol-% negativ beeinflusst, weshalb kürzere Fasern bevorzugt zu verwenden sind, siehe Abb. 4.49.

Die Faser mit einer Länge von 12 mm und einer Faserschlankeheit von 100 weist bei vergleichbarem Fasergehalt die höchste maximale Biegezugspannung aller drei untersuchten Fasern auf, siehe Abb. 4.53. Ab einem Fasergehalt von 0.75 Vol-% werden die Frischbetoneigenschaften von der Faser negativ beeinflusst, siehe Abb. 4.44. Auf Grund der Frischbeton- und Festbetoneigenschaften der 12 mm langen Faser in Verbindung mit der Rezeptur L1B, wurde diese Faserlänge als Obergrenze für die weiteren Untersuchungen definiert.

Die Untergrenze der weiter zu untersuchenden Faserlänge wird durch die 9 mm lange Faser gebildet. Bei dieser Länge wurden die Frischbetoneigenschaften erst ab einem Fasergehalt von 1.0 Vol-% negativ beeinflusst, siehe Abb. 4.43. Des Weiteren wies die 9 mm Faser, wie in Tab. 4.12 ersichtlich, für ihre geringe Faserschlankeheit ein hohes $\sigma_{\max, \text{mittel}}$ bei gleichzeitig guter Verarbeitbarkeit auf. Der Nullbeton wies nach 14 Tagen ein $\sigma_{\max, \text{mittel}}$ von ca. 13 N/mm² auf.

5 Abschlussversuche und empfohlene Faserabmessung

Bei den in Kapitel 4 durchgeführten Versuchen zeigte sich am Beginn, dass die Verbundspannungen des Voest Feindrahtes mit 0.12 mm Durchmesser im Vergleich zu jenen der Referenzfaser sehr gering waren. Nach einer Untersuchung der Oberfläche mit Hilfe eines REM und einer Optimierung des Versuchsaufbaus konnten die Ergebnisse der Ausziehversuche zwar gesteigert werden, blieben jedoch unterhalb der zu erwartenden Werte.

Anschließend wurden die Frischbeton- und Festbetoneigenschaften mit geschnittenen Fasern untersucht. Dazu wurde der Feindraht zu Fasern verarbeitet und der Betonrezeptur L1B beigemischt. Die Ergebnisse zeigten keinen Einfluss unterschiedlicher Fasergehalte auf die Druckfestigkeit des UHPC. Bei vergleichbaren Fasergehalten (0.5 %) wurde durch die 12 mm Faser eine höhere Biegezugspannung als durch die 9 mm und 15 mm Faser erreicht. Die Frischbetoneigenschaften wurden, in Abhängigkeit von der Faserschlankheit, ab einem Fasergehalt von 0.5 % ($l_f = 15$ mm), 0.75% ($l_f = 12$ mm) und 1.0% ($l_f = 9$ mm) negativ beeinflusst, siehe Abb. 4.49, Abb. 4.44, Abb. 4.43.

5.1 Biegezugversuche

Um die in Kap. 4 gewonnenen Erkenntnisse über die untersuchten Fasern mit größeren Probekörpern zu verifizieren, wurden Balken mit 0.75 % Fasergehalt und den vier in Kap. 4.6 verwendeten Faserarten hergestellt. Dadurch sollte das Tragverhalten im 4-Punkt-Biegezugversuch untersucht werden, sowie ob eine Mehrfachrissbildung (Multi-Cracking-Verhalten) bei konstantem Momentenverlauf möglich ist. Anschließend wurde mit dem Programm von Gröger, et al. [13] auf eine zentrische Spannungs-Rissöffnungsbeziehung zurückgerechnet. Damit wurde mit dem Modell von Mayer [25] auf die Verbundspannung τ_f zurückgerechnet.

Nr.	Faserart	Fasergehalt ρ_f [Vol-%]	Faserschlankheit [l/d]
41	VOEST Feindraht 9/0.12 mm	0.75	75
42	VOEST Feindraht 12/0.12 mm		100
43	VOEST Feindraht 15/0.12 mm		125
44	Bekaert 13/0.20 mm		65

Tab. 5.1: Versuchsserien der Vergleichsversuche

Es wurden erneut folgende Faserlängen des Voest Feindrahtes untersucht: 9 mm, 12 mm und 15 mm. Als Referenzfaser wurde wieder jene der Firma Bekaert mit einem Durchmesser von 0.2 mm und einer Länge von 13 mm verwendet. Je Faser wurden 3 Biegebalken mit einem Fasergehalt von 0.75 Vol-% betoniert.

5.1.1 Versuchsaufbau

Die hergestellten Versuchskörper waren prismenförmig, mit einer Länge von 700 mm, einer Breite von 150 mm und einer Höhe von 50 mm. Um die Prismen zu testen, wurde wie in Kap. 4.2 ein 4-Punkt-Biegezugversuch durchgeführt, siehe Abb. 5.1. Auch bei diesen Versuchen wurden die Prismen auf Metallrollen gelagert, um ein Einleiten von horizontalen Kräften während des Versuchs zu vermeiden. Die Durchbiegung δ wurde durch zwei Wegaufnehmer gemessen und der 4-Punkt-Biegezugversuch wurde analog zur DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [8] durchgeführt.

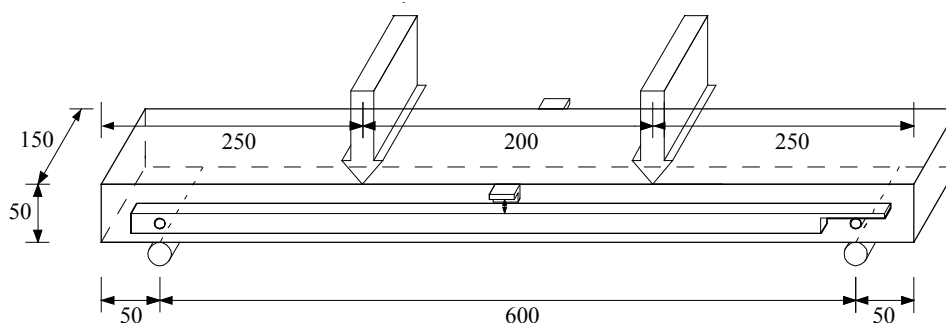


Abb. 5.1: 4-Punkt-Biegezugversuchskonfiguration für die Versuche (Maße in Millimeter)

5.1.2 Versuchsdurchführung

Nach dem Erhalt der Fasern wurde an einem Tag 12-mal die Mischung L1B mit einem Fasergehalt von 0.75 Vol-% hergestellt. Gemischt wurden die einzelnen Betonagen in einem Eirich-Labormischer, wobei der Ablauf des Mischens ident war zu jenem in Kap. 4.2.2. Die Frischbetoneigenschaften wurden bei der jeweils ersten von drei Mischungen kontrolliert. Dies geschah, wie in den vorangegangenen Kapiteln, mit Hilfe der Fließzeit t_{200} und dem Hägermann-Flow, siehe Kap. 4.2.2. Die Schalungen wurden im Anschluss an das Mischen von der Seite befüllt, mit Wasser besprüht um die Bildung von Elefantenhaut zu vermeiden, und mit einer Folie abgedeckt. Die Betonrezeptur L1B ist ein selbstverdichtender UHPC, aus diesem Grund mussten die Versuchskörper nicht verdichtet werden. Die Versuchskörper wurden am darauffolgenden Tag ausgeschalt und bei Raumtemperatur 14 Tage lang an der Luft gelagert.

5.1.3 Ergebnisse

Die Rohdaten wurden, wie in den vorangegangenen Kapiteln (4.2.3 und 4.6.3), welche Biegezugversuche thematisieren, aufbereitet. Da alle Versuchskörper eine Mehrfachrissbildung aufwiesen, musste auch hier die Auswertung angepasst werden.

Abb. 5.2 zeigt die Biegezugspannung-/Durchbiegungs-Diagramme der einzelnen Prüfkörper gruppiert nach Faserart. Abb. 5.3 stellt die Mittelwerte je Versuchsserie gegenüber. Es ist ersichtlich, dass die Voest Fasern stets zu einem besseren Tragverhalten führen, als die Referenzfaser. Die 12 mm und 15 mm Fasern führen zu einem besseren Tragverhalten als die 9 mm Fasern. Der Unterschied von 12 mm auf 15 mm Fasern ist kaum erkennbar. Da die 12 mm Fasern die Frischbetoneigenschaften weniger stark beeinflussen, lieferte diese Faserlänge die besten Ergebnisse. Das Tragverhalten der 9 mm und 12 mm Fasern streut nur in sehr geringem Maße, was am niedrigen Variationskoeffizienten in Abb. 5.2 erkennbar ist. In Tab. 5.2 werden die Frischbeton- und Festbetoneigenschaften der unterschiedlichen Versuchskörper gegenübergestellt.

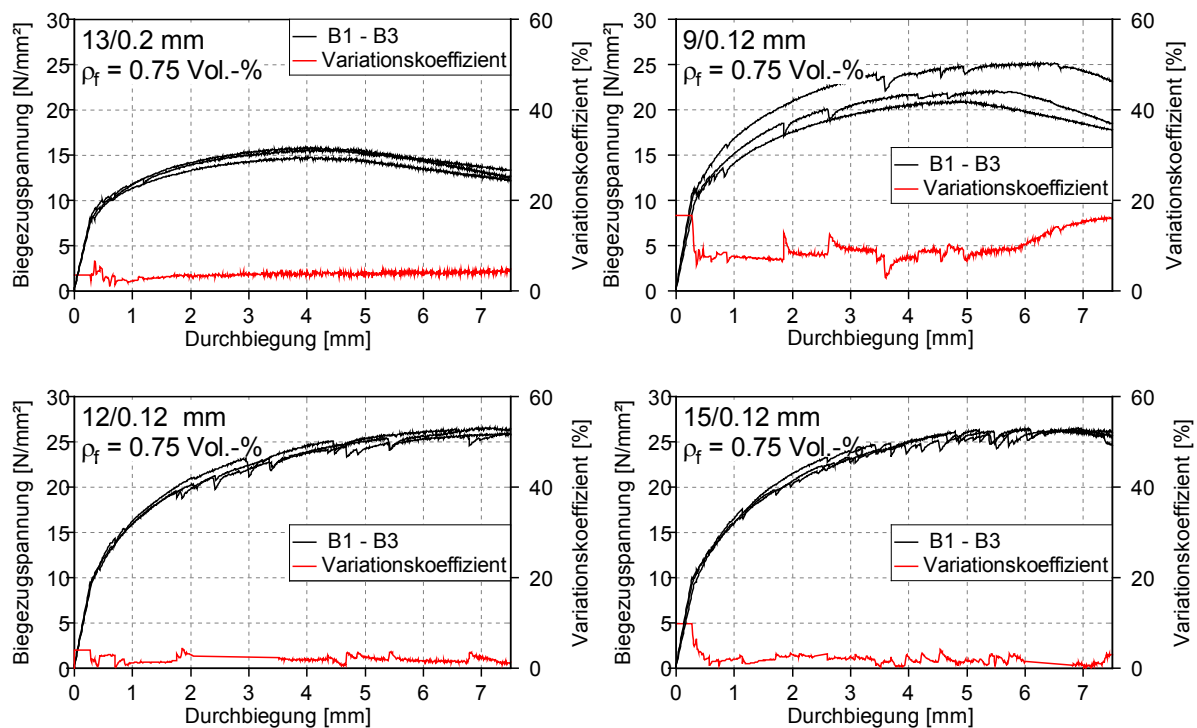


Abb. 5.2: Biegezugspannung-/Durchbiegungs-Diagramme der Versuchsreihen

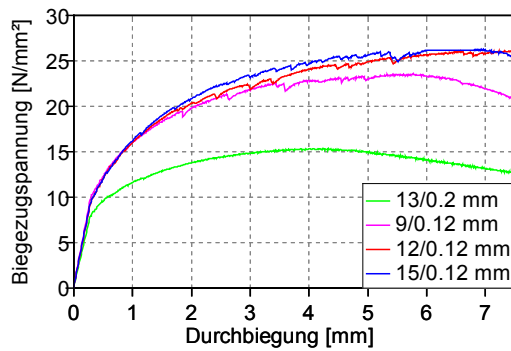
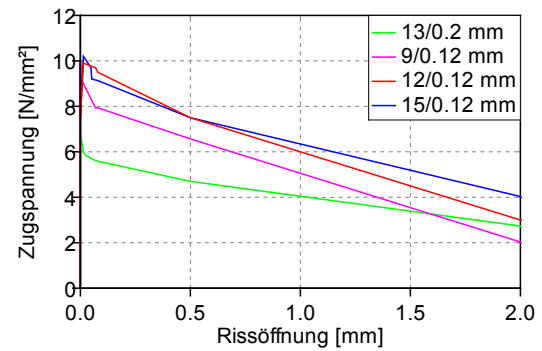


Abb. 5.3: Mittelwerte der Biegezugspannungen


 Abb. 5.4: Nach Gröger, et al. [13] ermitteltes
Zugspannung-/Rissöffnungs-
Diagramm der Biegezugversuche

Nr.	Faserart	t_{200} [sec]	Hägermann Flow [cm]	$\sigma_{\max, \text{mittel}}$ [N/mm ²]
41	$l_f = 9 \text{ mm } \rho_f = 0.75 \%$	5.0	27.75	23.50
42	$l_f = 12 \text{ mm } \rho_f = 0.75 \%$	6.9	26.50	26.04
43	$l_f = 15 \text{ mm } \rho_f = 0.75 \%$	12.0	24.25	26.10
44	$l_f = 13 \text{ mm } \rho_f = 0.75 \%$	6.4	29.50	15.33

Tab. 5.2: Frischbeton- und Festbetoneigenschaften der einzelnen Versuchsserien im Vergleich

5.2 Rückrechnung auf Verbundspannung

Um auf die tatsächlich vorhandene Verbundspannung zwischen Fasern und UHPC rückrechnen zu können, waren mehrere Schritte notwendig. Zunächst wurden die Mittelwerte der einzelnen Biegezugversuchsserien gebildet, siehe Abb. 5.3. Diese Biegezugspannung-/Durchbiegungs-Kurven wurden danach mit Hilfe des in [13] vorgestellten Programmes in Zugspannung-/Rissöffnungs-Beziehungen umgerechnet, siehe Abb. 5.4. Diese Zugspannung-/Rissöffnungs-Beziehungen wurden danach in einem Bereich von null bis zwei Millimeter durch das in [25] vorgestellte Modell angenähert, siehe Abb. 5.5. Die Annäherung geschah durch eine Variation der Verbundspannung τ_f und dem Festlegen der Faserorientierung $\eta = 0.75$. So wurden die Verbundspannungen für die Fasern ermittelt, welche in Tab. 5.3 gegenübergestellt sind.

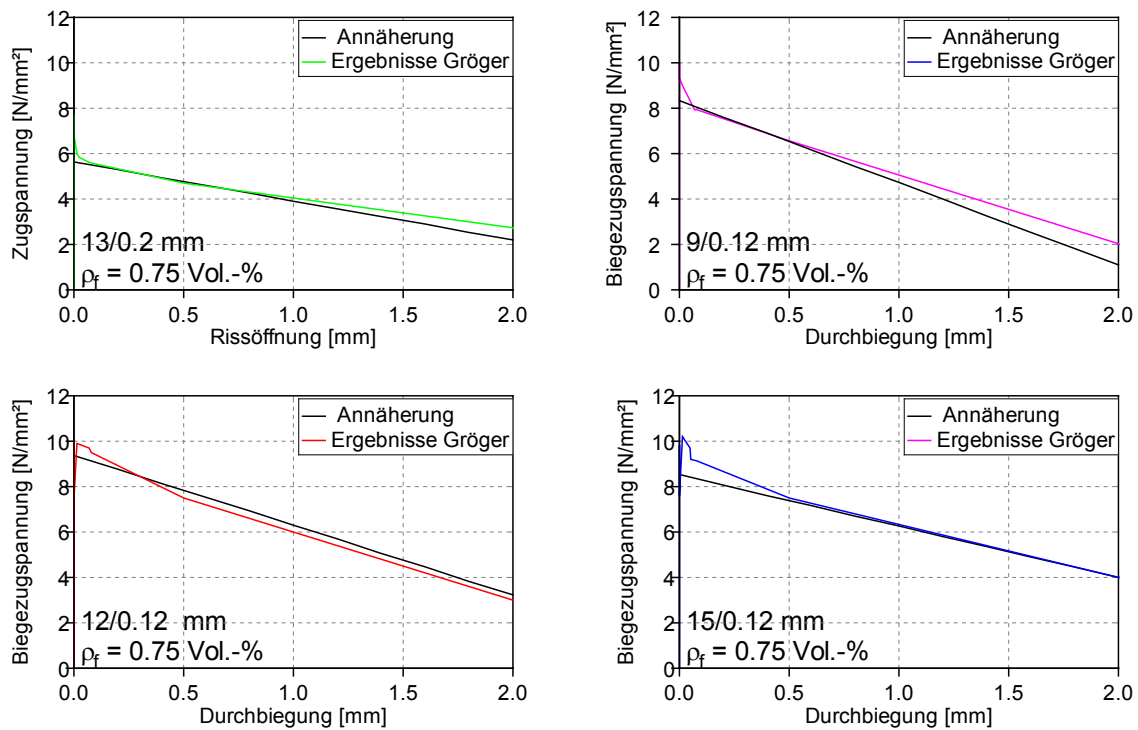


Abb. 5.5: Angenäherte Zugspannung-/Rissöffnungs-Kurven

Biegezugversuche				Ausziehversuche 2	
Nr.	Faserart	η [-]	τ_f [N/mm²].	l_e [mm]	τ_f [N/mm²]
41	9/0.12 mm $\rho_f = 0.75$ %	0.75	18	4	7
42	12/0.12 mm $\rho_f = 0.75$ %		15	6	4.7
43	15/0.12 mm $\rho_f = 0.75$ %		11	8	3.4
44	13/0.20 mm $\rho_f = 0.75$ %		14		

 Tab. 5.3: Rückgerechnete Verbundspannung τ_f

Es ist ersichtlich, dass die berechneten Verbundspannungen wesentlich höher sind als die in Kap. 4.5 durch Ausziehversuche ermittelten Werte. Die mittlere Verbundspannung der Voest Faser nimmt mit zunehmender Faserlänge ab. Dies konnte sowohl in den Ausziehversuchen als auch der Nachrechnung beobachtet werden. Die berechnete Verbundspannung der 9 mm und 12 mm Faser ist höher als jene der Referenzfaser.

5.3 Schlussfolgerungen

Die Biegezugversuche bestätigen die Ergebnisse der Versuche an den Prismen aus Kapitel 4.6. Durch eine Steigerung der Faserlänge von 12 mm auf 15 mm kommt es zu einer vernachlässigbaren Steigerung der maximalen Biegezugspannung, siehe Tab. 5.2. Ebenfalls kann weder eine Steigerung der Duktilität noch der zentrischen Zugfestigkeit durch eine Erhöhung der Faserlänge von 12 mm auf 15 mm erreicht werden, siehe Abb. 5.3 und Abb. 5.4. Da sich durch die Verwendung einer 15 mm langen Faser die Frischbetoneigenschaften bei gleichem Fasergehalt mehr verschlechtern und die Festbetoneigenschaften nicht verbessern, ist das Verwenden einer Faser mit einer Länge von 15 mm nicht zielführend. An dieser Stelle wird die Verwendung der Faser mit einem Durchmesser von 0.12 mm und einer Faserlänge von 12 mm empfohlen.

Vergleicht man die Ergebnisse der 9 mm langen Faser mit jenen der 12 mm langen Faser, so lässt sich bis zu einer Durchbiegung von 2 mm nur ein kleiner Unterschied bei der Biegezugspannung erkennen, siehe Abb. 5.3. Bei der maximalen Biegezugspannung ergibt sich allerdings eine Steigerung um 11 % durch die Verwendung der 12 mm langen Faser, siehe Tab. 5.2. Ebenso kann die Duktilität und die Zugspannung gesteigert werden, siehe Abb. 5.3 und Abb. 5.4. Die Verbesserungen der Festbetoneigenschaften gehen jedoch auch hier mit einer Verschlechterung der Frischbetoneigenschaften einher, siehe Tab. 5.2.

Die rückgerechneten Verbundspannungen nehmen mit zunehmender Faserlänge ab. In Tab. 5.3 ist erkennbar, dass die rückgerechneten Verbundspannungen deutlich höher sind als jene der Ausziehversuche (Kap. 4.5). Wahrscheinlich werden die Fasern im Mischprozess besser mit UHPC ummantelt als bei den Ausziehversuchen. Es bleibt daher festzuhalten, dass die Verbundspannungen aus Ausziehversuchen wie sie in Kapitel 4.5 durchgeführt wurden, nicht ohne Kontrolle und etwaige Modifikation der Ergebnisse übernommen werden können.

Der genaue Gehalt an 12 mm Fasern ist abhängig vom zu verwendenden Bauteil. Die Festlegung des genauen Fasergehaltes erfolgt in späteren Projektphasen entsprechend den Anforderungen des Bauteils.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens unterschiedliche Feindräfte der Firma *Voestalpine Special Wire GmbH* untersucht, um diese in UHPC als Fasern einzusetzen. Es wurden sowohl die Verbundeigenschaften als auch die Frischbeton- und Festbetoneigenschaften untersucht.

Die ersten Ausziehversuche wurden nur mit einem Feindraht mit Durchmesser 0.12 mm durchgeführt. Da die Verbundeigenschaften im Vergleich zur Referenzfaser deutlich schlechter waren, wurde der Feindraht mittels Rasterelektronenmikroskop untersucht. Die Untersuchung der Oberfläche des Feindrahtes ermöglichte keinen Rückschluss auf die schlechten Verbundeigenschaften des Feindrahtes.

Aus diesem Grund wurde eine zweite Reihe an Ausziehversuchen durchgeführt, bei denen der Versuchsaufbau geändert wurde. Im Zuge dieser Versuche wurden auch andere für das Forschungsvorhaben relevante Feindräfte untersucht. Durch die getroffenen Maßnahmen konnte die Verbundspannung des Feindrahtes mit 0.12 mm gesteigert werden. Die mittlere Verbundspannung nimmt allerdings mit steigender Einbindelänge stark ab.

Die Frischbeton- und Festbetoneigenschaften wurden bei unterschiedlichen Faserlängen ebenfalls nur für den Feindraht mit 0.12 mm Durchmesser untersucht. Dabei zeigte sich kein Einfluss unterschiedlicher Fasergehalte auf die Druckfestigkeit des UHPC. Die Frischbetoneigenschaften verschlechterten sich mit zunehmendem Fasergehalt und steigender Faserschlantheit.

Um die bis dahin gewonnenen Erkenntnisse und die Entwicklung der Mikrostahtfaser zu verifizieren wurden abschließend 4-Punkt-Biegezugversuche durchgeführt. Dabei erwies sich die Faser mit einer Länge von 12 mm und einer Schlantheit von 100 als besonders geeignet.

Die Biegezugspannung-/Durchbiegungs-Beziehungen wurden mittels Ingenieurmodell auf Zugspannung-/Rissöffnungs-Beziehungen umgerechnet. Die umgerechneten Beziehungen wurden danach mit einem am Institut für Betonbau vorab entwickelten Programm angenähert, um auf die tatsächlichen Verbundspannungen der Fasern in den Balken zu schließen. Dies ergab, dass die Verbundspannungen der Fasern im Balken wesentlich höher sind als jene aus den Ausziehversuche.

Die empfohlene Faserlänge beträgt 12 mm bei einem Durchmesser von 0.12 mm. Im Forschungsvorhaben *Substitution von Stahl durch UHPC* muss je nach Bauteil und Anforderung im weiteren Projektverlauf ein entsprechender Fasergehalt definiert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Abrishambaf, A., Barros, J. A. O., und Cunha, V. M. C. F.: "Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels", *Cement and Concrete Research*, vol. 51, pp. 57-66, 2013.
- [2] Bäuml, M. F.: "Steigerung der Dauerhaftigkeit selbstverdichtender Betone durch den Einsatz von Polymerfaserkurzschnitt", Dissertation, ETH Zürich, Zürich, 2002.
- [3] Bažant, Z. und Oh, B. H.: "Crack band theory for fracture of concrete", *Materials and Structures*, vol. 16, pp. 155-177, 1983.
- [4] Behloul, M.: "Analyse et modélisation du comportement d'un matériau à matrice cimentaire fibrée à ultra hautes performances", Dissertation, E.N.S. Cachan, Cachan, 1996.
- [5] E-Mail vom 23.2.2015; Betreff: "Daten zur Faser" von Berger, W.
- [6] Bergmeister, K., Fingerloos, F., und Worner, J. D.: "Beton-Kalender 2010: Brücken, Betonbau im Wasser". Berlin: Ernst & Sohn, 2010.
- [7] Bergmeister, K. und Wörner, J.-D.: "Beton-Kalender 2006". Berlin: Ernst & Sohn, 2006.
- [8] Deutsches Institut für Normung Deutscher Ausschuss für, S.: "DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton". Berlin [u.a.] Beuth, 2010.
- [9] Ding, Y., Liu, S., Zhang, Y., und Thomas, A.: "The investigation on the workability of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 1462-1470, 2008.
- [10] Erdem, E.: "Probabilistisch basierte Auslegung stahlfasermodifizierter Betonbauteile auf experimenteller Grundlage", Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2002.
- [11] Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T., und Fröhlich, S.: "Ultra-high performance concrete UHPC: fundamentals, design, examples". Berlin: Ernst & Sohn, 2014.
- [12] Freytag, B. und Santner, G.: "Bemessung von Bauteilen aus faserbewehrtem UHPC -Zug, Druck, Biegung", 2008.
- [13] Gröger, J., Tue, N. V., und Wille, K.: "Bending Behaviour and Variation of flexural Parameters of UHPFRC".
- [14] Grünewald, S.: "Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete", Dissertation, Delft University, Delft, 2004.
- [15] Hadl, P., Gröger, J., und Tue, N. V.: "Experimentelle Untersuchungen zur Streuung im Zugtragverhalten von Stahlfaserbeton", *Bautechnik*, vol. 06, 2015.

- [16] Hillerborg, A., Mod er, M., und Petersson, P. E.: "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements", *Cement and Concrete Research*, vol. 6, pp. 773-781, 1976.
- [17] *Richtlinie Faserbeton*,  . V. f. B.-u. Bautechnik, 2008.
- [18] Jungwirth, J.: "Zum Tragverhalten von zugbeanspruchten Bauteilen aus Ultra-Hochleistungs-Faserbeton", Dissertation,  cole Polytechnique Fédérale De Lausanne, Lausanne, 2006.
- [19] Kang, S. T., Lee, B. Y., Kim, J.-K., und Kim, Y. Y.: "The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 2450-2457, 2011.
- [20] Kessler-Kramer, C.: "Zugtragverhalten von Beton unter Erm dungsbeanspruchung", Dissertation, TH Karlsruhe, Karlsruhe, 2002.
- [21] Laranjeira, F., Aguado, A., Molins, C., Grünewald, S., Walraven, J., und Cavalaro, S.: "Framework to predict the orientation of fibers in FRC: A novel philosophy", *Cement and Concrete Research*, vol. 42, pp. 752-768, 2012.
- [22] Leutbecher, T.: "Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem ultrahochfesten Beton (UHPC)", Dissertation, Universität Kassel, Kassel, 2008.
- [23] Maidl, B.: "Stahlfaserbeton". Berlin: Ernst, 1991.
- [24] Markovic, I.: "High-Performance Hybrid-Fibre Concrete -Development and Utilisation -", Dissertation, TU Delft, Delft, 2006.
- [25] Mayer, M.: "Ein Modell zur Bestimmung der Streuungen im Nachrisszugtragverhalten von Faserbeton", Dissertation/Thesis, 2014.
- [26] Pfyf, T.: "Tragverhalten von Stahlfaserbeton", Dissertation, ETH Zürich, Zürich, 2003.
- [27] Reichel, M. M.: "Dünnwandige Segmentfertigteiltbauweisen im Brückenbau aus gefasertem Ultrahochleistungsbeton (UHFB): Tragverhalten, Bemessung und Konstruktion", Dissertation, TU Graz, Graz, 2010.
- [28] Scheydt, J. C., Millon, O., M ller, H. S., und Thoma, K.: "Entwicklung eines brandbest ndigen ultrahochfesten Betons f r hochdynamische Beanspruchungen", *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 107, pp. 289-301, 2012.
- [29] Schmidt, M.: "Ultra high performance concrete: (UHPC) ; 10 years of research and development at the University of Kassel". Kassel: Kassel University Press, 2007.
- [30] Soroushian, P. und Lee, C.-D.: "Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete", *ACI Materials Journal*, vol. 87, pp. 433-439, 1990.
- [31] Stähli, P., Custer, R., und van Mier, J. M.: "On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC", *Materials and Structures*, vol. 41, pp. 189-196, 2008.
- [32] Strack, M.: "Modellbildung zum rissbreitenabh ngigen Tragverhalten von Stahlfaserbeton unter Biegebeanspruchung", Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2007.

- [33] Tue, N. V., Gröger, J., und Böttcher, C.: "Ermittlung der Rissbreiten bei Faserbeton mit und ohne Betonstahlbewehrung", Abschlussbericht, Universität Leipzig, Leipzig, 2009.
- [34] Tue, N. V., Henze, S., Küchler, M., Schenck, G., und Wille, K.: "Ein optoanalytisches Verfahren zur Bestimmung der Faserverteilung und -Orientierung in Stahlfaserverstärktem UHFB", *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 102, pp. 674-680, 2007.
- [35] Walraven, J.: "Hochfester Beton: von akademischer Spielerei zu harter Realität" in "Massivbau in ganzer Breite: Festschrift Zum 60. Geburtstag Von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch", Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, pp. 431-446.
- [36] Wille, K., El-Tawil, S., und Naaman, A. E.: "Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading", *Cement and Concrete Composites*, vol. 48, pp. 53-66, 2014.
- [37] Wille, K. und Naaman, A. E.: "Pullout behavior of high-strength steel fibers embedded in ultra-high-performance concrete", *ACI Materials Journal*, vol. 109, pp. 479-488, 2012.
- [38] Yu, R., Spiesz, P., und Brouwers, H. J. H.: "Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)", *Cement and Concrete Research*, vol. 56, pp. 29-39, 2014.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Qualitativer Druckfestigkeitsvergleich zwischen UHPC und anderen Werkstoffen, nach [18]	12
Abb. 2.2: Charakteristische Spannungs-Dehnungslinien verschiedener Betone, [22]	12
Abb. 2.3: Igelbildung in UHPC nach der Entnahme aus dem Mischer	13
Abb. 3.1: Kontaktzone zwischen Faser und Matrix, nach [26]	15
Abb. 3.2: Faserauszug einer geometrisch verformten Faser, nach [7, 32]	16
Abb. 3.3: Qualitative Darstellung zweier Ausziehversuche, nach [7, 14]	17
Abb. 3.4: a) Ideal-elastisch-ideal-plastisches Verbundgesetz, b) Ideal-elastisch-abgetrept-ideal-plastisches Verbundgesetz, c) Starr-plastisches Verbundgesetz, nach [26]	18
Abb. 3.5: Faserausziehversuche: a) Einseitiger Verbund [26], b) Zweiseitiger Verbund (Kap. 4.3.1)	19
Abb. 3.6: Definitionen der Faserlängen für den Orientierungsbeiwert, nach [34]	19
Abb. 3.7: Einfluss des Betonflusses auf die Faserorientierung; a) Im Balken, nach [31]; b) In der Platte, nach [1]	20
Abb. 3.8: Randeffekte, nach [4]	21
Abb. 3.9: Gegenseitiger Einfluss von unterschiedlich langen Fasern, nach [24]	22
Abb. 3.10: Faserverteilung in Abhängigkeit des Verhältnisses Größtkorndurchmesser/Faserlänge, nach [7]	23
Abb. 3.11: kritischer Fasergehalt nach [36], mit Unterscheidung in Level 1-3	25
Abb. 3.12: Verteilung der Einbindelängen l_b , nach [12]	26
Abb. 3.13: Ausziehvorgang einer Faser unter dem Winkel θ , nach [18]	27
Abb. 3.14: Entfestigungsverlauf in Normal- und Faserbeton, nach [32]	29
Abb. 3.15: Ausbildung von Rissprozesszonen, [22]	30
Abb. 3.16: Modell von Jungwirth [18], a) linear-elastischer Bereich, b) multiple Rissbildung, c) Rissstabilisierung, d) Risslokalisierung und Faserauszug (FCM), e)	

Aktivierungsphase mit multipler Rissbildung, f) Rissöffnungsphase mit linearer Approximation der multiplen Rissbildung und Berücksichtigung des Entlastungsmoduls E^*	32
Abb. 3.17: Fasercocktail-Prinzip, a) der Einfluss kurzer Fasern, b) der Einfluss langer Fasern, nach [24]	33
Abb. 3.18: Versuche von Markovic [24], $\text{Vol.-%}(l_f/d_f)$	34
Abb. 4.1: 4-Punkt-Biegezugversuchskonfiguration für die Vorversuche (Maße in Millimeter)	37
Abb. 4.2: Schalung für die Versuchskörper der Vorversuche	37
Abb. 4.3: Hägermann-Flow	37
Abb. 4.4: Versuchskörper bei der Vorbereitung für einen Biegezugversuch, WA re. unten	38
Abb. 4.5: Biegezugversuch mit montiertem WA	38
Abb. 4.6: Biegezugspannung-/Durchbiegungs-Diagramme der Versuchsserien 1-6	40
Abb. 4.7: Biegezugspannung-/Durchbiegungs-Diagramme der Versuchsserien 7-9	41
Abb. 4.8: Mittelwerte der Biegezugspannungen je Versuchsserie, gruppiert nach Fasertyp	41
Abb. 4.9: Versuchskörper nach dem Ausschalen a) und während des Versuch b)	42
Abb. 4.10: XPS-Plättchen mit Stratec Faser	43
Abb. 4.11: Versuchskörper-Schalung mit XPS-Plättchen	43
Abb. 4.12: Einrichten des Versuchskörpers in der Prüfmaschine	44
Abb. 4.13: Ausgeschalter Versuchskörper (re.) und mit Aceton beträufelte XPS-Plättchen (li. und mi.)	44
Abb. 4.14: Faserspannung-/Wegdiagramme der Ausziehversuche 1 mit geraden Fasern	45
Abb. 4.15: Voest Feindraht 0.12 mm eingebettet in UHPC-Versuchskörper	47
Abb. 4.16: Vergleich von Voest Feindraht 0.12 mm: unbehandelt (li.), gereinigt (Mitte) und freigelegt (re.)	48
Abb. 4.17: Verschmutzungen auf Stratec 20/0.2 mm unbehandelt, dargestellt mithilfe des BSE-Detektors	49
Abb. 4.18: Auszug aus dem Vergleich Detail unbehandelt: Stratec 20/0.2 mm (li.) und Voest Feindraht 0.12 mm (re.)	49
Abb. 4.19: Auszug aus dem Vergleich Übersicht gereinigt: Stratec 20/0.2 mm (li.) und Voest Feindraht 0.12 mm (re.)	50

Abb. 4.20: Auszug aus dem Vergleich Detail gereinigt: Stratec 20/0.2 mm (li.) und Voest Feindraht 0.12 mm (re.)	50
Abb. 4.21: Auszug aus dem Vergleich Übersicht freigelegt: Stratec 20/0.2 mm (li.) und Voest Feindraht 0.12 mm (re.)	51
Abb. 4.22: Auszug aus dem Vergleich Detail freigelegt: Stratec 20/0.2 mm (li.) und Voest Feindraht 0.12 mm (re.)	51
Abb. 4.23: Bereits mit Aceton gereinigte Feindrähte beim Trocknen	53
Abb. 4.24: Mit Silikon gedichtete Schalung vor dem Betonieren	53
Abb. 4.25: Betonieren der Probekörper mit UHPC-Leim	54
Abb. 4.27: Faserspannung-/Wegdiagramme:	55
Abb. 4.28: Faserspannung-/Wegdiagramme:	56
Abb. 4.29: Faserspannung-/Wegdiagramme:	57
Abb. 4.30: Verbundspannung der einzelnen Faserarten bei unterschiedlichen Einbindelängen relativ zur maximalen Verbundspannung	59
Abb. 4.31: 3-Punkt-Biegezugversuchskonfiguration (Maße in Millimeter)	62
Abb. 4.32: Voest Feindraht 12/0.12 mm	63
Abb. 4.33: Ausgeschiedener überlanger Feindraht, bei angestrebten 15 mm Faserlänge (li. unten)	63
Abb. 4.34: MW der Druckspannungen der unterschiedlichen Prüfreiheiten	64
Abb. 4.35: Seitliches Befüllen der Prismenschalung	65
Abb. 4.36: Mehrfachrissbildung eines Versuchskörpers	65
Abb. 4.37 Hägermann-Flow in Abhängigkeit des	66
Abb. 4.38: $l_f = 13 \text{ mm } \rho_f = 0.5 \%$	66
Abb. 4.39: $l_f = 13 \text{ mm } \rho_f = 1.0 \%$	66
Abb. 4.40: $l_f = 13 \text{ mm } \rho_f = 1.5 \%$	66
Abb. 4.41: $l_f = 9 \text{ mm } \rho_f = 0.5 \%$	66
Abb. 4.42: $l_f = 9 \text{ mm } \rho_f = 0.75 \%$	66
Abb. 4.43: $l_f = 9 \text{ mm } \rho_f = 1.0 \%$	66
Abb. 4.44: $l_f = 12 \text{ mm } \rho_f = 0.75 \%$	67
Abb. 4.45: $l_f = 12 \text{ mm } \rho_f = 0.5 \%$	67

Abb. 4.46: $l_f = 12 \text{ mm}$ $\rho_f = 1.0 \%$	67
Abb. 4.47: $l_f = 15 \text{ mm}$ $\rho_f = 0.25 \%$	67
Abb. 4.48: $l_f = 15 \text{ mm}$ $\rho_f = 0.25 \%$	67
Abb. 4.49: $l_f = 15 \text{ mm}$ $\rho_f = 0.5 \%$	67
Abb. 4.50: $l_f = 12 \text{ mm}$ $\rho_f = 0.66 \%$	67
Abb. 4.51: Biegezugspannung-/Durchbiegungsdiagramme:	68
Abb. 4.52: Biegezugspannung-/Durchbiegungsdiagramme:	69
Abb. 4.54: Biegezugspannung-/Durchbiegungsdiagramme: 0 Beton	70
Abb. 4.53: Biegezugspannung-/Durchbiegungsdiagramme:	70
Abb. 5.1: 4-Punkt-Biegezugversuchskonfiguration für die Versuche (Maße in Millimeter)	73
Abb. 5.2: Biegezugspannung-/Durchbiegungs-Diagramme der Versuchsreihen	74
Abb. 5.3: Mittelwerte der Biegezugspannungen je Versuchsserie	75
Abb. 5.4: Nach Gröger, et al. [13] ermitteltes Zugspannung-/Rissöffnungs-Diagramm der Biegezugversuche	75
Abb. 5.5: Angenäherte Zugspannung-/Rissöffnungs-Kurven	76

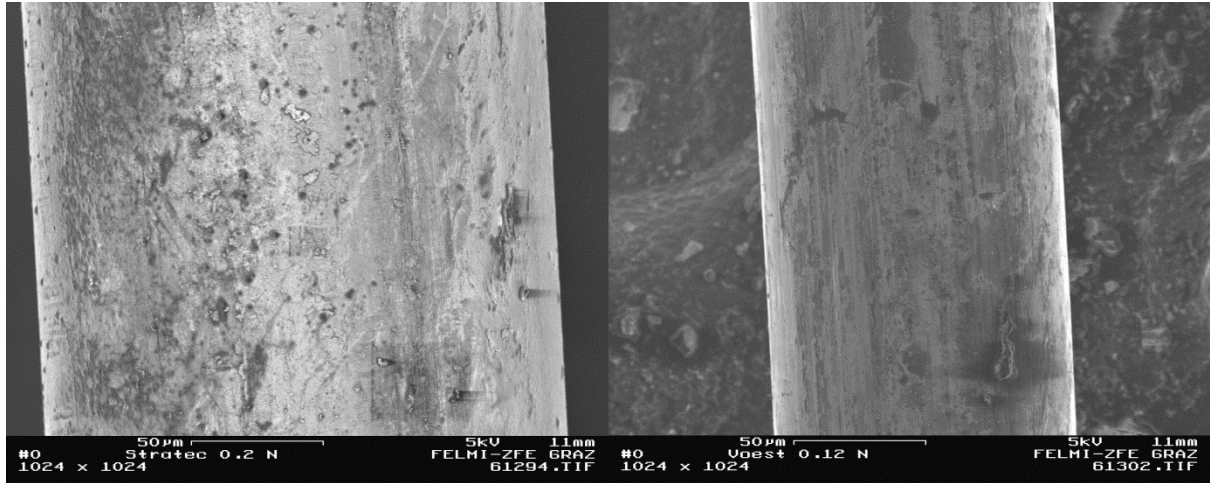
Tabellenverzeichnis

Tab. 4.1: Verwendete UHPC-Rezepturen	35
Tab. 4.2: Versuchsserien der Vorversuche	36
Tab. 4.3: Frischbeton- und Festbetoneigenschaften der einzelnen Versuchsserien im Vergleich	39
Tab. 4.4: Versuchsserien der Ausziehversuche 1 mit glatten Fasern	43
Tab. 4.5: Verbundspannungen der Ausziehversuche 1	46
Tab. 4.6: REM Versuchsserien	47
Tab. 4.7: Versuchsserien der Ausziehversuche März	53
Tab. 4.8: Verbundspannungen der Ausziehversuche 2, Seite 1	58
Tab. 4.9: Verbundspannungen der Ausziehversuche 2, Seite 2	59
Tab. 4.10: Versuchsserien der Tastversuche	61
Tab. 4.11: Druckspannungen der Tastversuche	64
Tab. 4.12: Frischbeton- und Festbetoneigenschaften der einzelnen Versuchsserien im Vergleich	65
Tab. 5.1: Versuchsserien der Vergleichsversuche	72
Tab. 5.2: Frischbeton- und Festbetoneigenschaften der einzelnen Versuchsserien im Vergleich	75
Tab. 5.3: Rückgerechnete Verbundspannung τ_f	76

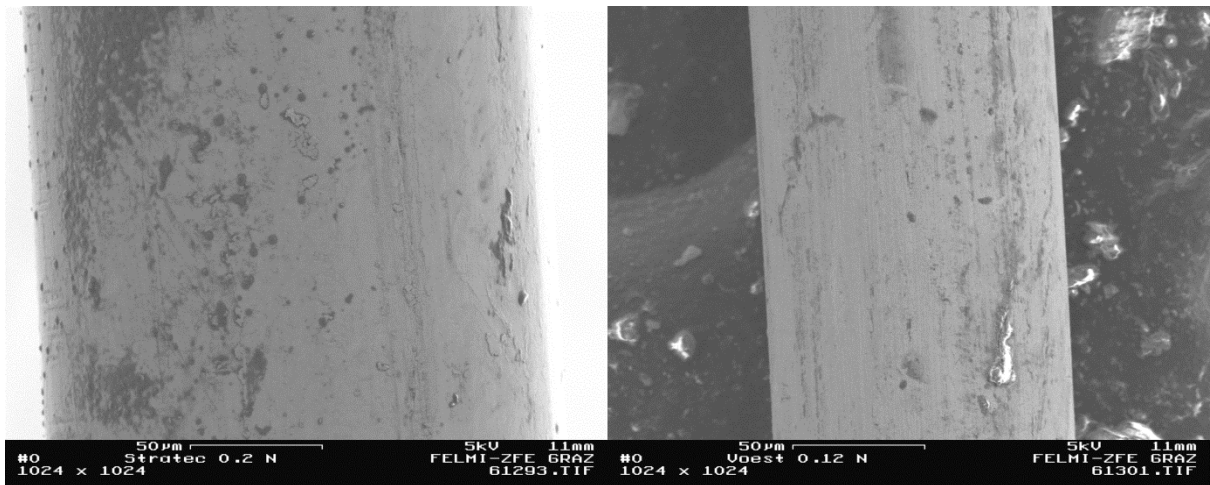
Anhang – REM-Bilder

Unbehandelt

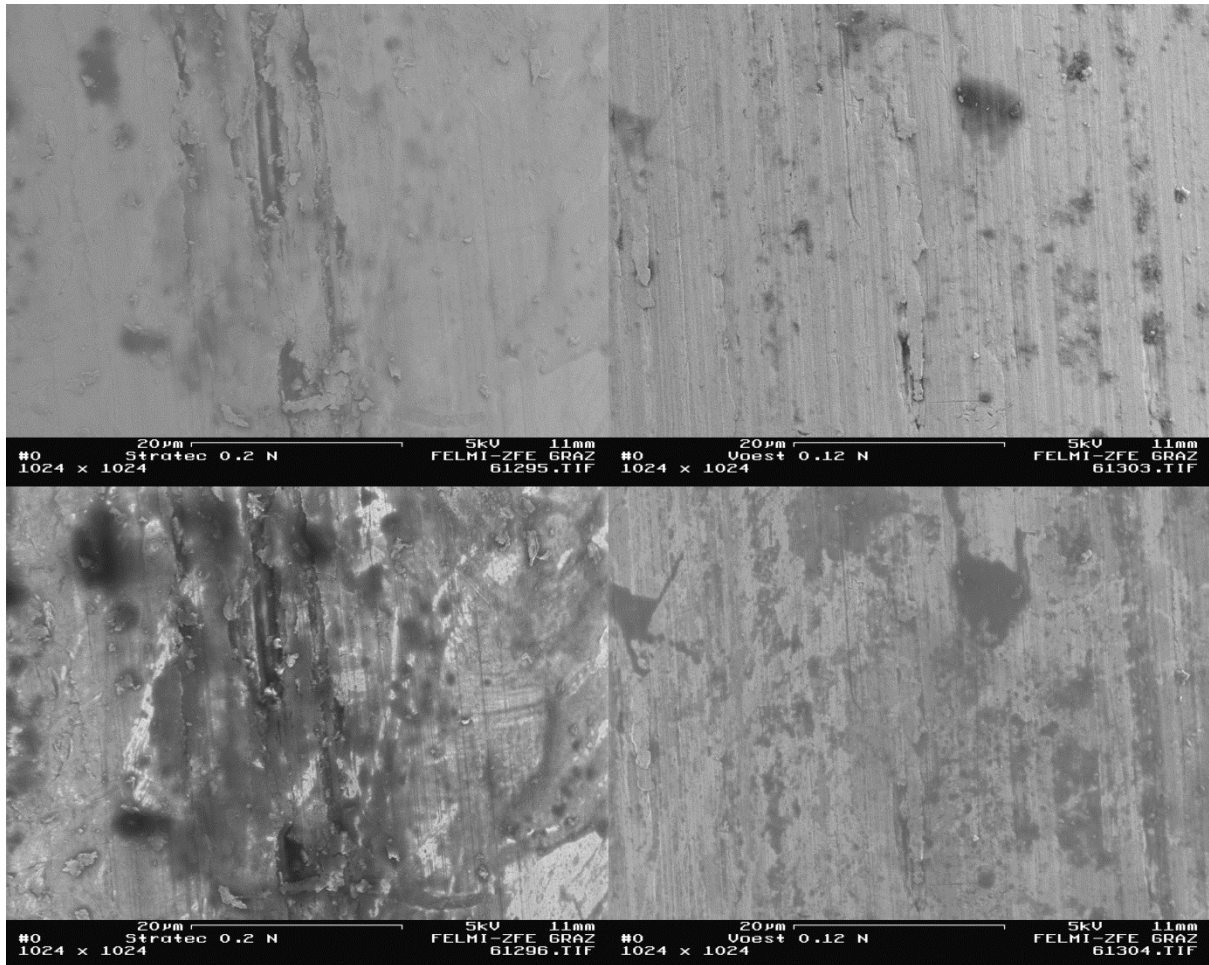
Übersicht Detektor 1



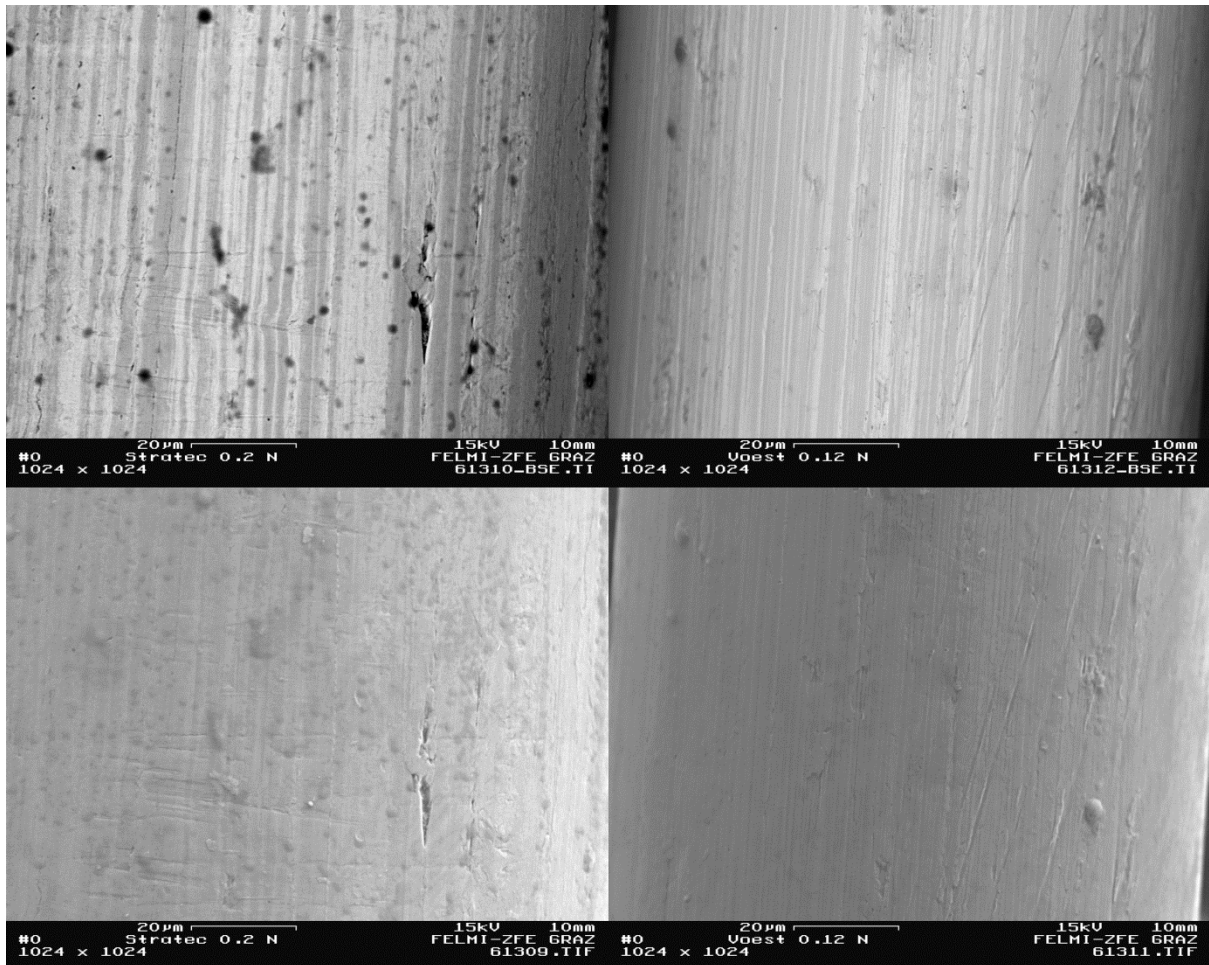
Übersicht Detektor 2



Detail

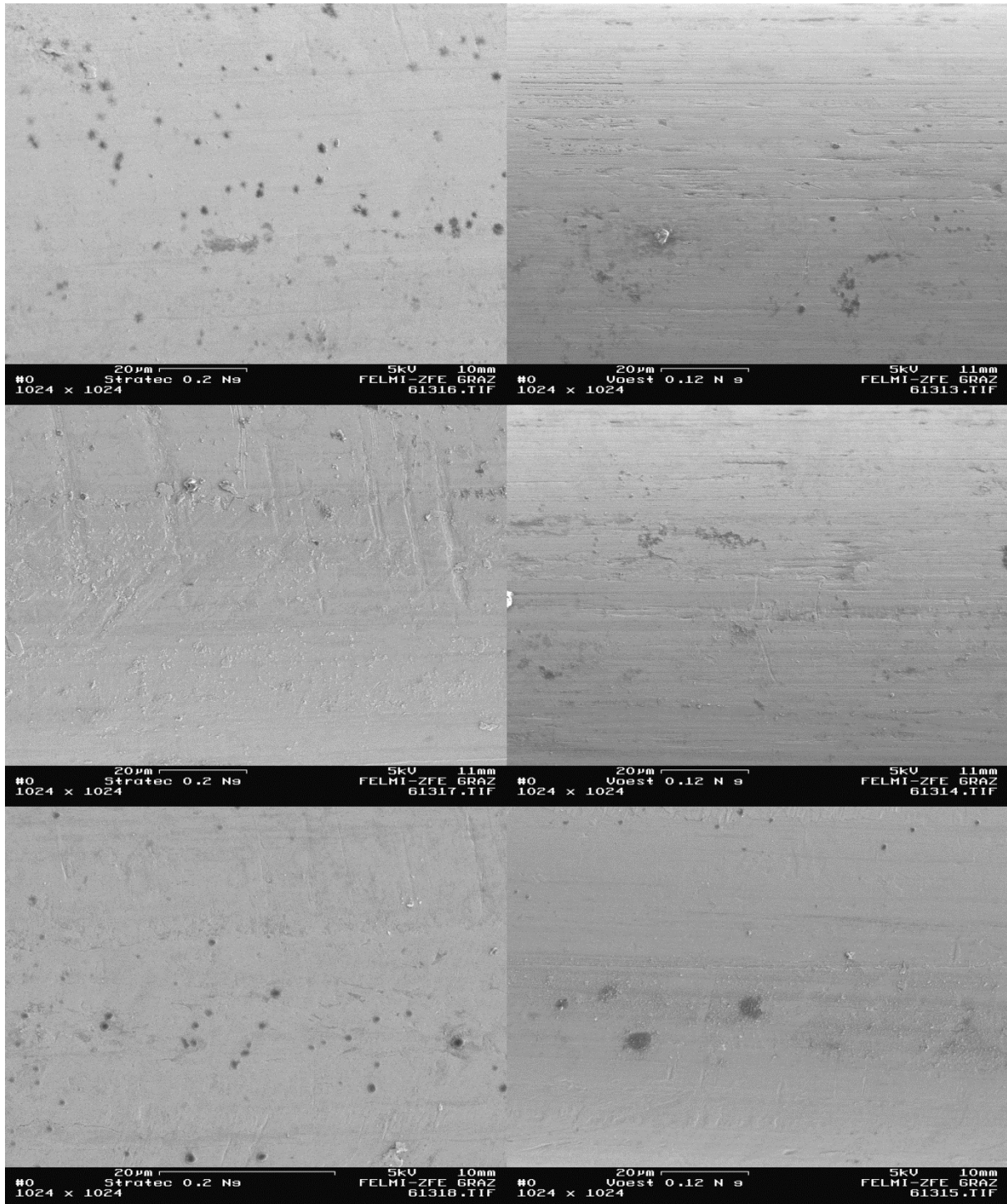


Detail BSE

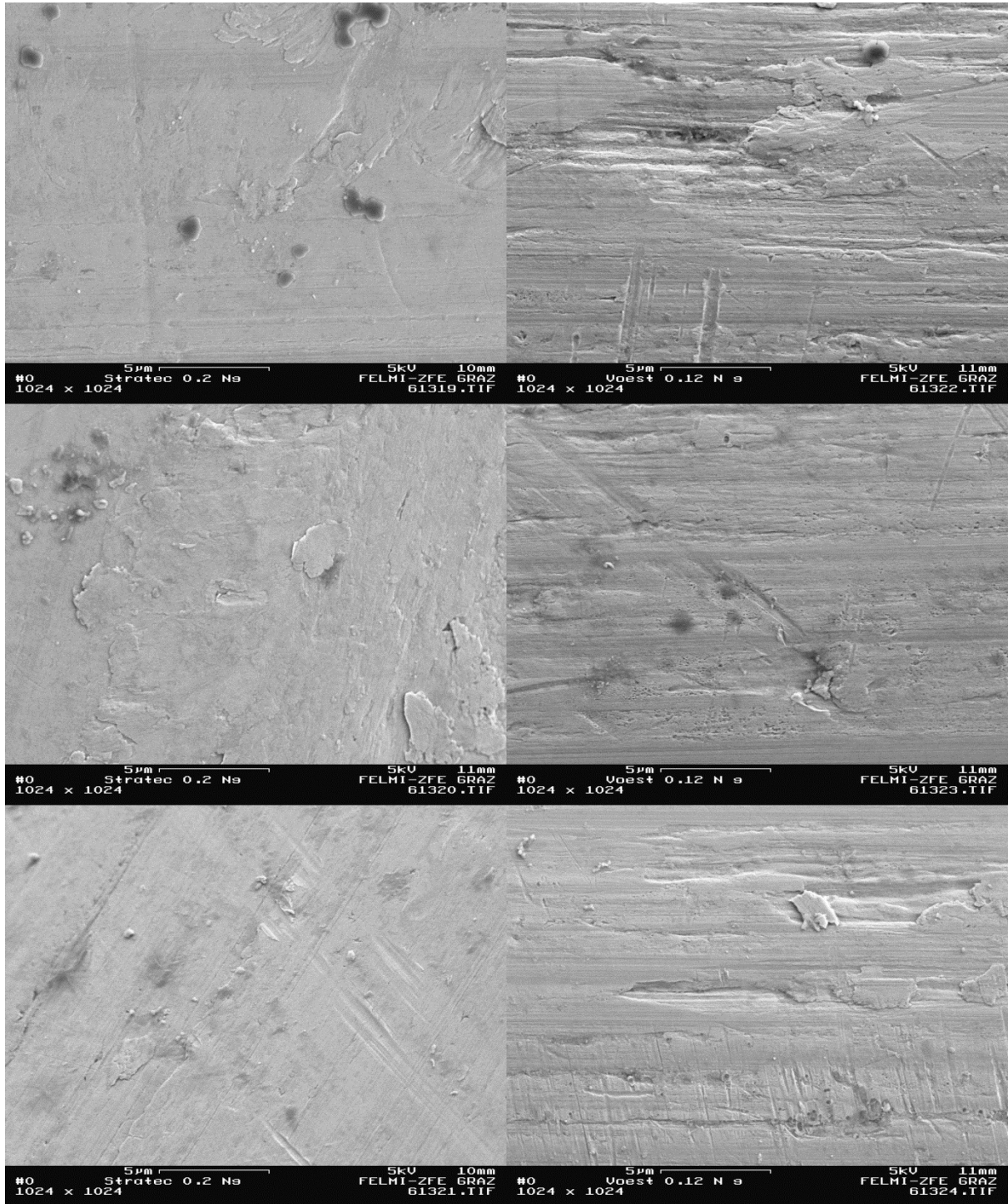


Gereinigt

Übersicht

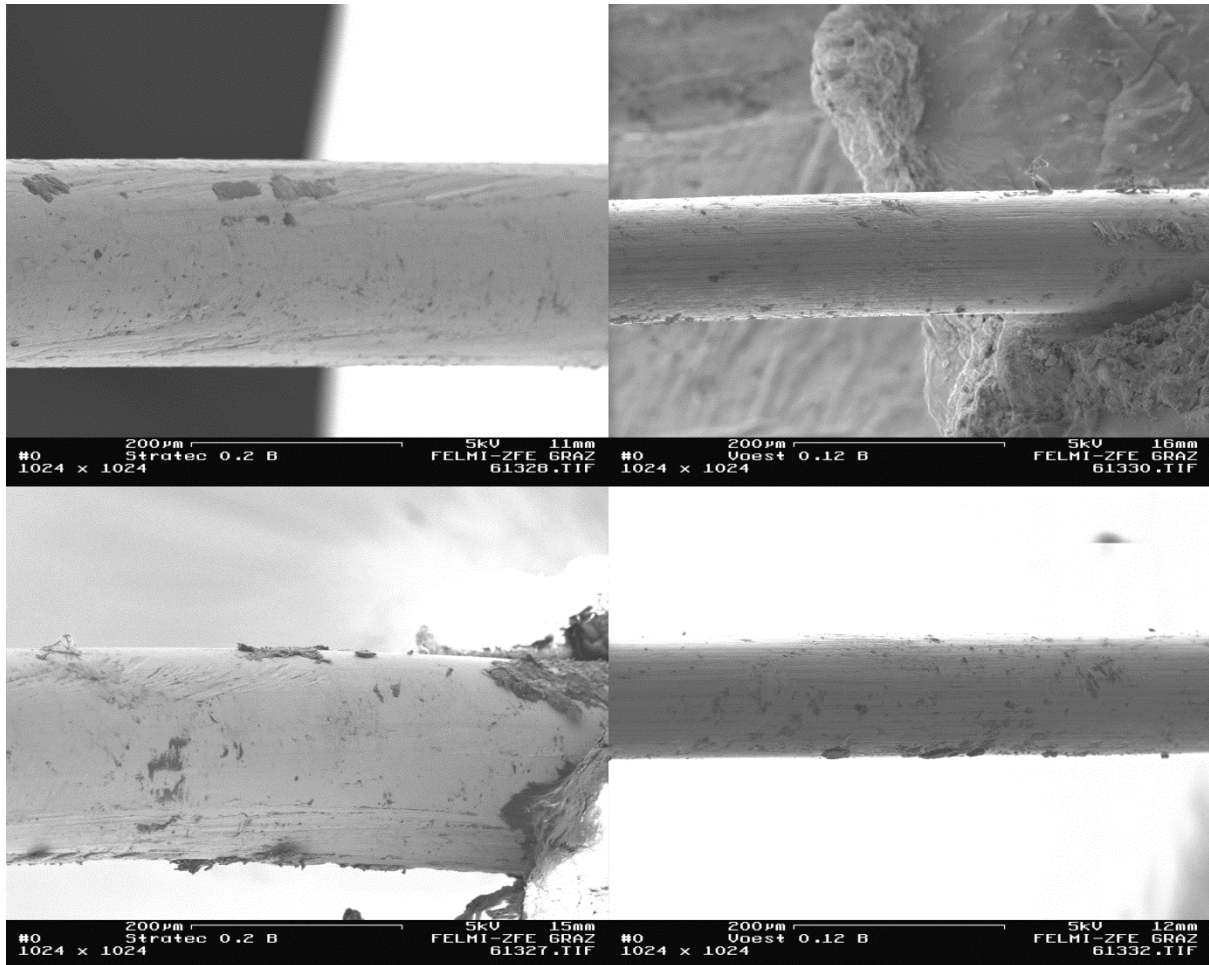


Detail



Freigelegt

Übersicht



Detail

