



# UNTERSUCHUNGEN ZUR EIGNUNG VON BASALTFASERBÜNDELN FÜR DIE VERWENDUNG IN UHPC

Masterarbeit

an der

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften,

Technische Universität Graz

Juni 2012

Hans Georg Leitinger, BSc

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Freytag

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Viet Tue Nguyen

Labor für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI)

Institut für Betonbau (IBB)

## **Eidesstattliche Erklärung**

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.

Graz, 5.6.2012

Hans Georg Leitinger

## Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinen Betreuern, dem Leiter des Labors für Konstruktiven Ingenieurbau DI Dr. Bernhard Freytag und dem Institutsvorstand für Betonbau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Viet Tue Nguyen für das Aufwerfen der Thematik und die umfangreiche fachliche Betreuung.

Meinen Dank möchte ich auch an die Mitarbeiter des LKI, DI Josef Linder, DI Günter Heinzle und DI Gerhard Santner für die hilfreichen Ratschläge richten.

Für die Unterstützung bei der Durchführung der Materialprüfung gilt mein Dank auch Ing. Uwe Fülöp, Reinhard Holzschuster und Hannes Koitz sowie Huy Hoang Kim.

Auch Mgr. Dr. Artur Deditius für die Ermöglichung der mikroskopischen Aufnahmen sowie DI Dr. Joachim Juhart für die Unterstützung insbesondere bei der Untersuchung der Oberflächenbenetzung ein Danke.

Zu Dank verpflichtet bin ich auch DI Johann Loibnegger, dem Leiter der Versuchsanstalt für Bautechnik, der HTBLVA Ortweinschule Graz sowie Herrn Peter Rupp für das Bereitstellen von für die Versuchsdurchführung notwendigen Schalformen und Spannzeugen.

Für die humorvollen Momente, die interessanten Fachgespräche sowie die gute Zusammenarbeit bei so manchen Projekten während meiner Studienzeit, möchte ich mich bei meinen Kollegen aus dem Verkehrswesenzeichensaal, insbesondere bei Ivo Raissakis, Peter Joachim Heinrich und Hanns Schinner recht herzlich bedanken.

Besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei meinen Eltern Hans und Melitta Leitinger bedanken, dafür dass sie mir die Absolvierung dieses Studiums ermöglicht haben, mir immer zur Seite gestanden sind, meinem Vater für den fachlichen Rat und meiner Mutter für den familiären Rückhalt.

## Kurzfassung

Ultrahochfester Beton (UHPC) ermöglicht aufgrund der erreichbaren hohen Druckfestigkeiten das Herstellen von wesentlich schlankeren Bauteilen im Vergleich zu Normalbeton. Die Zugfestigkeit kann aber im Gegensatz zur Druckfestigkeit nur unterproportional gesteigert werden. Auch ein duktileres Materialverhalten kann mit UHPC nicht erzielt werden. Das Beimengen von Fasern verschiedenster Materialbasis bei der Herstellung hat in der Vergangenheit zu einer deutlichen Verbesserung der Zugfestigkeit und der Duktilität geführt.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden Basaltfaserbündel mit dem Ziel, deren Wirkung auf die Eigenschaften von UHPC festzustellen, in einem umfassenden Versuchsprogramm am Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Graz untersucht. Die Faserbündel wurden von der Asamer Basaltic Fibers GmbH hergestellt. Besonderes Interesse galt dem Zugtragverhalten und den Verarbeitungseigenschaften des Betons.

Es wurde die axiale Zugfestigkeit sowie die Biegezugfestigkeit der hergestellten Probekörper geprüft. Um die Faserverbundfestigkeit bestimmen zu können, wurden Ausziehversuche durchgeführt. Für eine Eignung in der Baupraxis war nicht zuletzt auch dem Einfluss der Faserzugabe auf die Verarbeitungseigenschaften des Betons genügend Aufmerksamkeit zu schenken. Neben den Frischbetonprüfungen wurden hier auch Untersuchungen zur Oberflächenbenetzung des Fasermaterials durchgeführt.

Es stellte sich heraus, dass der Zusammenhalt der Basaltfaserbündel bei der Betonherstellung nicht gegeben ist und in der Folge die Verarbeitbarkeit nicht den Anforderungen der Baupraxis entspricht. Eine Steigerung der Zugfestigkeit konnte zwar erwirkt werden, ein erwünschtes duktileres Materialverhalten blieb aber aus.

Die Verstärkung von UHPC mit den untersuchten Basaltfaserbündeln ist aufgrund des Auflörens der Faserbündel während des Mischprozesses derzeit noch nicht in der Praxis anwendbar. Es wurde jedoch gezeigt, dass bei Zusammenhalt der Einzelfasern ein duktileres Materialverhalten erzielt werden kann.

## **Abstract**

Ultra High Performance Concrete (UHPC) makes possible the production of much thinner components in comparison to normal concrete due to the high compressive strength achievable. The tensile strength can only be increased at a lower rate in contrast to the compressive strength. Also ductile material behavior cannot be achieved with UHPC. In the past admixture of fibers of various materials had led to a significant improvement in tensile strength and ductility.

As part of this thesis basaltic fiber bundles were tested in a comprehensive experimental program at the “Labor für Konstruktiven Ingenieurbau” of the Graz University of Technology, aiming at the determination of their effect on the properties of UHPC. The fiber bundles were manufactured by the Asamer Basaltic Fibers GmbH. The tensile carrying behavior and the workability of the concrete were of particular interest.

The axial tensile strength and the flexural tensile strength of the prepared samples were tested. To be able to determine the bond strength pull out tests were carried out. For the aptitude in building practice, the influence of fiber addition on the workability of concrete plays an important role. In addition to these fresh concrete tests, investigations about surface wetting of fiber materials were carried out.

It was found out that the cohesion of fiber bundles is not given during the mixing process. Although an increase in tensile strength could be obtained, a desirable ductile material behavior did not occur.

The reinforcement of UHPC with the basaltic fiber bundles studied is not yet applicable in practice because of insufficient cohesion between single fibers in the mixing process. It was found out, however, that with cohesion between single fibers a ductile material behavior can be achieved.

<b>0</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
0.1	Problemstellung	1
0.2	Zielsetzung und Methodik	2
0.3	Aufbau der Arbeit	3
<b>1</b>	<b>Stand des Wissens</b>	<b>4</b>
1.1	Ultra High Performance Concrete (UHPC)	4
1.1.1	Technologie (1)	4
1.1.2	Festbetoneigenschaften	4
1.1.3	Herstellung	6
1.2	Fasermaterialien	11
1.2.1	Stahlfasern	11
1.2.2	Carbonfasern	12
1.2.3	Glasfasern	12
1.2.4	Kunststofffasern	12
1.2.5	Textilbewehrung	12
1.3	Wirkungsweise der Fasern im UHPC	14
1.3.1	Allgemeines	14
1.3.2	Verbundverhalten zwischen Faser und Matrix	17
1.3.3	Spannungs-Rissöffnungsbeziehung der Einzelfaser	20
1.3.4	Spannungs-Rissöffnungsbeziehung des Faserbetons	23
1.3.5	Faserorientierung	25
1.3.6	Faserwirksamkeit	28
<b>2</b>	<b>Verwendete Materialien</b>	<b>30</b>
2.1	Basaltmakrofasern	30
2.1.1	Herstellungsprozess	30
2.1.2	Faserschlankheit	31
2.2	Ultrahochfester Beton (UHPC)	32
2.2.1	Rezeptur	32
<b>3</b>	<b>Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit</b>	<b>34</b>
3.1	Allgemeines	34
3.2	Mischen und Verarbeiten, Vorversuche	35
3.2.1	Beton 1,25 Vol.-% und 16mm Faserlänge	36
3.3	Mischen und Verarbeiten Hauptversuche	37
3.3.1	Beton 1,25 Vol.-% und 8 mm Faserlänge	37
3.3.2	Beton 1,25 Vol.-% und 12 mm Faserlänge	37
3.3.3	Ergebnisse	37
3.4	Untersuchung der Oberflächenbenetzung	40
3.4.1	Allgemeines	40

3.4.2	Theoretische Grundlagen.....	42
3.4.3	Versuchsdurchführung .....	47
3.4.4	Messergebnisse .....	54
3.4.5	Resümee .....	55
<b>4</b>	<b>Festbetonprüfung .....</b>	<b>56</b>
<b>4.1</b>	<b>Vorversuche zur Untersuchung der Schubfestigkeit.....</b>	<b>56</b>
4.1.1	Versuchsaufbau .....	56
4.1.2	Versuchsdurchführung .....	58
<b>4.2</b>	<b>Axiale Zug-, Biegezug- und Druckfestigkeit .....</b>	<b>62</b>
4.2.1	Basaltfaserbetonmatrix 1,25 Vol.-% und 16 mm Faserlänge (Basaltfaserstandardrezeptur) .....	64
4.2.2	Basaltfaserbetonmatrix 1,25 Vol.-% und 16 mm Faserlänge (+20 % FM, 20 Sec. rütteln)66	
4.2.3	Basaltfaserbetonmatrix 1,25 Vol.-% und 16 mm Faserlänge (Erhöhung des W/B Wertes auf 0,30).....	66
4.2.4	Zwischenresümee .....	66
4.2.5	Basaltfaserbetonmatrix 1,25 Vol.-% und 8 mm Faserlänge.....	67
4.2.6	Basaltfaserbetonmatrix 1,25 Vol.-% und 12 mm Faserlänge.....	68
4.2.7	Zwischenresümee .....	70
4.2.8	0-Beton .....	73
4.2.9	Stahlfaserbeton 2,50 Vol.-% und 6 mm Faserlänge .....	74
4.2.10	Carbonfaserbeton 2,0 Vol.-% und 9 mm Faserlänge.....	76
4.2.11	Zusammenfassung der axialen Zugfestigkeitseigenschaften in [N/mm <sup>2</sup> ].....	77
4.2.12	Zusammenfassung der maximalen Biegezugfestigkeitseigenschaften in [N/mm <sup>2</sup> ]...	78
4.2.13	Zusammenfassung der maximalen Druckfestigkeitseigenschaften in [N/mm <sup>2</sup> ] .....	80
4.2.14	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	81
4.2.15	Berechnung der Biegezugfestigkeit mit der n-Ziffern-Methode.....	81
<b>4.3</b>	<b>Faserausziehversuche .....</b>	<b>84</b>
4.3.1	Ausziehversuche Basaltfasern .....	84
4.3.2	Ausziehversuche Stahlfasern.....	86
4.3.3	Ausziehversuche Carbonfasern .....	88
4.3.4	Zusammenfassung der Ausziehfestigkeiten in [N/mm <sup>2</sup> ].....	89
<b>5</b>	<b>Mikroskopische Untersuchungen.....</b>	<b>90</b>
<b>5.1</b>	<b>Lichtmikroskop.....</b>	<b>90</b>
<b>5.2</b>	<b>Rasterelektronenmikroskop .....</b>	<b>92</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>99</b>
<b>6.1</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>99</b>
<b>6.2</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>105</b>
<b>7</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>106</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>106</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>109</b>

## **0 Einleitung**

### **0.1 Problemstellung**

Ultrahochfeste Betone (UHPC) kommen im Bauwesen noch selten zum Einsatz, da ein wirtschaftlicher Einsatz gegenwärtig kaum möglich ist. Außerdem existieren in Österreich noch keine Normen und Richtlinien für UHPC. Der Sachstandsbericht „Ultrahochfester Beton“ vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton stellt lediglich eine Orientierungshilfe dar. Für die Anwendung in der Baupraxis ist deshalb eine bauaufsichtliche Zulassung erforderlich.

UHPC erlaubt aufgrund der hohen Druckfestigkeiten von über  $150 \text{ N/mm}^2$  die Ausführung von wesentlich schlankeren Bauteilen als bei üblichen Stahlbetonbauwerken. Man kann also die Druckfestigkeit eines C 25/30 um mehr als das 6 - fache steigern, wobei man bei der Steigerung der Zugfestigkeit nur etwa eine Verdreifachung erzielt. Wenn man sich den Vergleich mit der rechnerischen Druck- und Zugfestigkeit bei Normalbeton vor Augen führt, klaffen diese Werte schon um den Faktor Zehn auseinander.

Um nun trotz dieses größer werdenden Unterschiedes zwischen Druck- und Zugfestigkeit eine gute Querschnittsausnutzung erzielen zu können, bieten sich Stahleinlagen oder Fasern unterschiedlichster Materialien als Bewehrung an. Der Einsatz von Stahlfasern im UHPC stand bereits in der Vergangenheit im Mittelpunkt einiger wissenschaftlicher Arbeiten. Die Zugfestigkeit konnte so gegenüber dem faserlosen UHPC erfolgreich gesteigert werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Wirkung von Basaltfaserbündeln, die in dieser Arbeit als Makrofasern bezeichnet werden, in UHPC. Diese Makrofasern bestehen aus Einzelfasern, die durch eine Schlichte miteinander verklebt sind. Die Einzelfasern werden Basalt, einem vulkanischen Gestein als Ausgangsmaterial produziert.

Für die Herstellung des in dieser Arbeit eingesetzten Fasermaterials zeigt sich die Firma Asamer Basaltic Fibers GmbH, ein Tochterunternehmen der europäischen Baustoffgruppe Asamer verantwortlich.

## 0.2 Zielsetzung und Methodik

Ziel der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen ist, mit der Verwendung von Basaltfaserbündeln in UHPC eine Steigerung der Zugfestigkeit, vor allem aber eine Verbesserung der Duktilität von UHPC zu erzielen. Auch die Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons sollten eine praxistaugliche Verwendung zulassen.

Die Asamer Basaltic Fibers GmbH produziert Basaltfaserbündel (Rovings), die entsprechend den im theoretischen Teil dieser Arbeit beschriebenen geometrischen Anforderungen gerecht werden. Die Untersuchung der Verarbeitungseigenschaften sowie der axialen Zugfestigkeit und der Biegezugfestigkeit des basaltfaserbewehrten UHPC stehen im Mittelpunkt dieser Arbeit, um eine Aussage über die Eignung von Basaltfaserbündel in ultrahochfestem Beton (UHPC) machen zu können.

Auch die Druckfestigkeit und die Verbundfestigkeit des produzierten Basaltfasermaterials werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht. Die Durchführung der Versuche erfolgt mit Abstufung der Faserschlankheit der Basaltfaserbündel.

Im Detail war die Untersuchung folgender Punkte geplant:

- Einfluss der Faserschlankheit auf die Zugfestigkeit von UHPFRC
- Einfluss des Fasergehaltes auf die Zugfestigkeit von UHPFRC
- Einfluss des Fasergehaltes und der Faserschlankheit auf die Verarbeitbarkeit von UHPFRC

Um die gewonnen Erkenntnisse mit konkurrierenden Fasermaterialien vergleichbar zu machen und Bezugsgrößen zu erhalten, werden dieselben Versuche mit Carbonfaserbündeln sowie Stahleinzelfasern durchgeführt.

**0.3 Aufbau der Arbeit**

In Kapitel 1 soll dem Leser ein allgemeiner Überblick über den Stand der Technik gegeben werden, speziell über die Eigenschaften von UHPC und UHPFRC, über die in der Baupraxis eingesetzten Fasermaterialien und deren Wirkungsweise in Verbund mit der UHPC-Matrix.

Das Kapitel 2 beschreibt die im Versuch eingesetzten Fasermaterialien, die verwendete Betonrezeptur und vorbereitende Berechnungen, die zur optimalen Fasergeometrie führen. In diesem Kapitel steht im Mittelpunkt, die Faserschlankeheit so zu optimieren, dass die gewünschten Duktilitätseigenschaften des Materials in der Versuchsreihe erreicht werden können.

Das Kapitel 3 handelt über die durchgeführten Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit des Basaltfaserbetons. Neben der Frischbetonprüfung wurden in diesem Kapitel auch ergänzende Untersuchungen theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit, besonders hinsichtlich der Oberflächenbenetzung der getesteten Fasermaterialien durchgeführt.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Durchführung der Festbetonprüfungen und der Gegenüberstellung der erzielten Festigkeitswerte.

In Kapitel 5 werden die Oberflächen und Bruchflächen der Prüfkörper mittels mikroskopischer Aufnahmen analysiert. Zur Veranschaulichung wurden Aufnahmen mit Licht- bzw. Elektronenrastermikroskop durchgeführt.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der durchgeführten Materialprüfungen zusammengefasst, sowie Vorschläge zur Verbesserung im Hinblick auf eine zukünftige Verwendbarkeit in der Baupraxis gegeben.

## **1 Stand des Wissens**

### **1.1 Ultra High Performance Concrete (UHPC)**

#### **1.1.1 Technologie (1)**

UHPC ist ein sehr gefügedichter Beton, der sowohl als Feinkorn- als auch als Grobkornbeton hergestellt werden kann. Er besteht aus einem feststoffreichen und porenarmen Gefüge mit einem niedrigen Wasseranspruch. Es ist heutzutage möglich, ultrahochfeste Betone mit einem Größtkorn bis zu 16 mm herzustellen. Es können Druckfestigkeiten zwischen 150 und 250 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Das Gefüge des Zementsteins setzt sich aus einer gezielten Auswahl optimal aufeinander abgestimmter Feinstoffe in Verbindung mit einem sehr niedrigen Wasser/Bindemittelwert zusammen. Durch dieses porenarme Gefüge werden die Dichtigkeit, die Festigkeit sowie die Dauerhaftigkeit gesteigert. Dies beruht im Wesentlichen auf 3 Faktoren:

- ein niedriger Wasser/Bindemittel – Wert unter 0,25
- die Verwendung von Zementen und gezielt ausgewählten mineralischen Zusatzstoffen mit einer entsprechenden Korngrößenabstufung, wie Mikrosilika, zur Erzielung einer dichten Kornpackung
- die Steuerung der Verarbeitungskonsistenz durch Beeinflussung mit Zusatzmitteln

Die Zugabe von Fließmitteln ist zwingend erforderlich, um sowohl fließfähige als auch erdfeuchte Frischbetone herstellen zu können.

#### **1.1.2 Festbetoneigenschaften**

UHPC verhält sich bis zu einem Wert von ca. 80 bis 90% der Druckfestigkeit linear elastisch. Für Druckfestigkeiten zwischen 150 und 250 N/mm<sup>2</sup> liegt der Elastizitätsmodul im Bereich zwischen 43.000 und 55.000 N/mm<sup>2</sup>. (2)

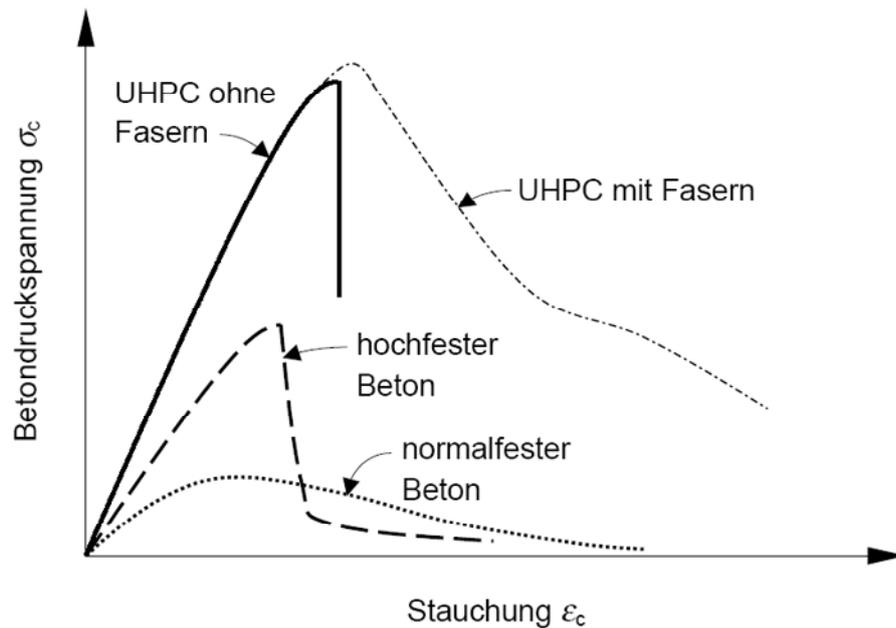


Abbildung 1 Druckspannungs-Dehnungslinien von Normal-, hochfestem und ultrahochfestem Beton (2)

Hinsichtlich der Darstellung der Zugarbeitslinie von UHPFRC, der ja in dieser Arbeit große Aufmerksamkeit geschenkt wird, wird auf Kapitel 1.3 verwiesen.

Ultrahochfeste Betone weisen aufgrund ihres dichten Gefüges einen hohen Widerstand gegen physikalische und chemische Angriffe auf. Allerdings ist das Bruchverhalten sowohl bei Druck-, als auch bei Zugbeanspruchung sehr spröde. Um die Duktilität des Materials zu verbessern, werden dem Gemisch Fasern beigemischt. Die einaxiale Zugfestigkeit der UHPC-Matrix (ohne Faserbeimengung) liegt im Bereich zwischen 7 und 11 N/mm<sup>2</sup>. (2) Wegen der hohen Zementsteinfestigkeit verläuft die Bruchfläche durch die Zuschlagskörner, anstatt wie bei Normalbeton durch die Zementmatrix.

Die Schwindverformung ist nicht durch Last- oder Temperaturbeanspruchung hervorgerufen, sondern einzig durch die Änderung des Wasserhaushaltes. Grundsätzlich lassen sich 4 Schwindverformungen voneinander unterscheiden (3):

- Fröhschwinden (Kapillarschwinden), d.h. Verdunstung von Wasser im noch weichen Zustand
- Trocknungsschwinden, d.h. Verdunstung von Wasser im erhärteten Zustand, es hängt stark von den Umgebungsbedingungen und dem Verhältnis der Oberfläche zum Gesamtvolumen ab
- Autogenes Schwinden, d.h. innere Selbstaustrocknung durch verzögerte Hydratation

- Carbonatisierungsschwinden, d.h. Volumenreduktion durch Abgabe (Verdunstung) von Hydratwasser

Aufgrund des hohen Zement- und Mikrosilikagehaltes und des niedrigen Wasser/Bindemittelwertes (W/B-Wert) übersteigt das autogene Schwinden das Trocknungsschwinden wesentlich. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass bei UHPC-Bauteilen, besonders in Fertigteilwerken, eine geeignete Nachbehandlung in den ersten Stunden nach der Fertigstellung stattfindet.

Die Carbonatisierung in UHPC schreitet vergleichsweise langsam voran, betrifft nur oberflächliche Randzonen und kann deshalb vernachlässigt werden.

Versuche unter isothermischen Bedingungen bei Feinkorn-UHPC (4) haben ergeben, dass im Alter von 28 Tagen das autogene Schwindmaß  $\epsilon_{cas}$  bei 0,9 ‰ liegt. Aufgrund des geringen Trocknungsschwindmaßes von  $\epsilon_{cds}$  ergibt sich ein Endschwindmaß  $\epsilon_{cs\infty}$  von ca. 1‰. Das gesamte Schwindmaß wird geringer, je später die Austrocknung beginnt.

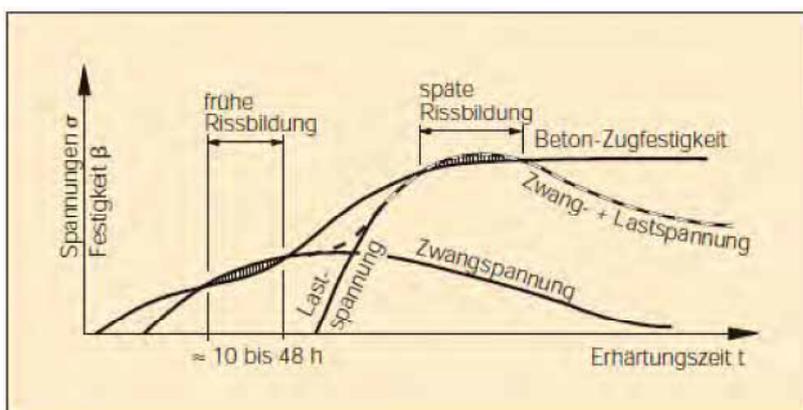


Abbildung 2 Entwicklung der Betonzugfestigkeit sowie Entstehen von Zwang- und Lastspannungen in Bauteilen aus jungem Beton aus (5)

Durch eine Wärmebehandlung am erhärteten Beton kann die Festigkeitsentwicklung zeitlich gerafft stattfinden und das gesamte Schwinden vorweggenommen werden.

### 1.1.3 Herstellung

Für die Herstellung von UHPC werden vorrangig die folgenden Ausgangsstoffe verwendet (1):

- Feine und grobe Gesteinskörnungen (z.B. Quarzsand)
- Zement (C<sub>3</sub>A-arm)

- Silikatstaub, Metakaolin, Feinhüttensande
- Quarzmehl und andere Gesteinsmehle
- Verflüssiger/Fließmittel
- Wasser.

### **Gesteinskörnung**

Je nach Größtkorndurchmesser  $d_g$  wird zwischen Grobkornbeton ( $d_g > 1 \text{ mm}$ ) und Feinkornbeton ( $d_g < 1 \text{ mm}$ ) unterschieden. (1) Um trotz des geringen Wasseranspruches die Verarbeitbarkeit zu gewährleisten, sind insbesondere feine Gesteinskörnungen mit möglichst geringem Wasseranspruch heranzuziehen. Es werden bei der Herstellung zumeist ungebrochene Sande eingesetzt, da durch Bruchflächen der Wasseranspruch erhöht wird und sich zusätzlich negativ auf das Gefüge und somit die Packungsdichte auswirkt.

### **Zement**

In den meisten Veröffentlichungen über UHPC wurde von den fünf Hauptzementarten (CEM I bis CEM V) Portlandzement CEM I als hydraulisches Bindemittel eingesetzt. Die Hauptbestandteile des Zementes stellen die Klinkermaterialien  $C_2S$ ,  $C_3S$ ,  $C_3A$  und  $C_4AF$  dar. In der Vergangenheit hat sich die Verwendung von  $C_3A$ -armen bzw.  $C_3A$ -freien Zementen (HS-Zemente) als vorteilhaft erwiesen.  $C_3A$ -freie Zemente haben einen geringeren Wasseranspruch und reduzieren somit die erforderliche Menge an Zusatzmitteln bei gleicher Verarbeitbarkeit. Ebenfalls wird dadurch die sekundäre Ettringitbildung reduziert. Diese geht mit einer Volumenzunahme einher und führt zu Spannungen im erhärteten Beton. Als Folge kann es zu Treiberscheinungen am Beton kommen.

### **Mikrosilika**

Sie sind die feinsten Bestandteile des Betons mit einer Korngröße von 0,1 bis 0,3  $\mu\text{m}$ . Sie bestehen zu 96% aus amorphem, puzzolanisch reagierendem Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ), enthalten reaktionsfähige Kieselsäure und erhärten deshalb hydraulisch mit Kalk und Wasser. (6) Einerseits verbessern sie dadurch die Packungsdichte, zum anderen reagieren sie mit dem Calciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , welches sich nachteilig auf die Zementfestigkeit auswirkt und bilden gefügedichte C-S-H-Phasen. Da der Zementgehalt im Vergleich zu Normalbetonen höher ist, bleiben genug Alkalireserven für den Korrosionsschutz der Bewehrung übrig. Außerdem wird durch den Einsatz

von Mikrosilika die Kapillarporosität reduziert und somit auch der Karbonatisierungsfortschritt eingeschränkt. Der Einsatz von Mikrosilika ist aber mit einer Senkung des PH-Wertes verbunden.

### **Gesteinsmehl (Quarzmehl)**

Für die Herstellung ultrahochfester Betone kommen vorwiegend fein gemahlene, kristalline Quarze zum Einsatz. Die alternative Verwendung von Kalksteinmehlen ist eher selten. Quarzmehle bestehen zu 98% aus kristallinem Siliziumoxid ( $\text{SiO}_2$ ). Der Partikeldurchmesser liegt zwischen dem Zementkorndurchmesser und dem Korndurchmesser der Mikrosilika. Um eine maximale Reaktivität des Betons zu erzielen, sollte der Korndurchmesser zwischen 5 und 25  $\mu\text{m}$  liegen und ein Silikat/Zementverhältnis von 0,62 ist anzustreben, wobei zu den Silikaten sowohl das Quarzmehl als auch der Silikatstaub anzurechnen sind. (1)

Die inneren anorganischen Bestandteile der Gesteinsmehle reagieren unter normalen Bedingungen nicht mit Zement und Wasser, außer bei Anwendung einer Wärmebehandlung können diese auch einen festigkeitssteigernden Beitrag leisten.

Aufgrund des geringen Wasser/Bindemittelwertes (W/B-Wert) wird die Verarbeitbarkeit durch einen höheren Leimgehalt verbessert. Der geringe Wassergehalt führt dazu, dass es nicht zur vollständigen Reaktion der Zementkörner kommt. Die Zementpartikel hydratisieren nur oberflächlich, und es bleiben Zementpartikel innerhalb der Hydratationsprodukte bestehen. Das Volumen des nicht hydratisierten Zementes kann man durch Quarzmehl ersetzen, ohne dabei einen Festigkeitsverlust des Betons zu bewirken. Der Wassergehalt bleibt dabei unverändert. Voraussetzung dafür ist die Verwendung eines feinkörnigen Zementes, um die vollständige Hydratation sicherzustellen. Bei der Verwendung großer Zementkörner bildet sich um das Zementkorn eine ausgeprägte Hydratationsschicht, die das Fortschreiten der Reaktion in das Korninnere verhindert.

### **Verflüssiger/Fließmittel**

Um trotz des geringen W/B-Wertes eine Verarbeitung des Frischbetons möglich zu machen, ist der Einsatz von Fließmitteln erforderlich.

Ihre Wirkung beruht darauf, dass sie an den Oberflächen der nicht bzw. kaum hydratisierten Zementprodukte sorbiert werden. Dabei verändert sich die Ladungsverteilung an der Oberfläche der Zementkörner und es kommt zur elektrostatischen Abstoßung. Außerdem wird mit der Zugabe von Fließmitteln die Oberflächenspannung von Wasser herabgesetzt und die Zementkörner werden oberflächlich besser mit Wasser benetzt. Die meisten Fließmittel auf Basis von

Polycarboxylatether (PCE) bewirken eine beträchtliche Wassereinsparung. Bei der im Rahmen der Versuchsdurchführung verwendeten Rezeptur wurde ein solches Fließmittel verwendet.

Ziel der Mischungsberechnung ist es, eine möglichst hohe Packungsdichte zu erzielen, die einen wesentlichen Einfluss auf die erzielbare Betonfestigkeit ausübt. Frühere Untersuchungen von Fuller, Thompson und Andreasen haben die Packung von Betonzuschlägen im Kreisscheibenmodell simuliert. Mischungsberechnungen ultrahochfester Betone basieren auf den dort gewonnenen Erkenntnissen.

Ein optimaler Füllereffekt ergibt sich gem. (4) unter der Voraussetzung, dass das Verhältnis zwischen den feineren und den gröberer Teilchen maximal 0,315 beträgt.

$$\frac{x_{max,fein}}{x_{max,grob}} < 0,315 \quad [1.1]$$

Ist das Verhältnis kleiner, ist der Füllereffekt ebenfalls gegeben, allerdings sind weitere Feinteilchen zur Hohlräumfüllung notwendig.

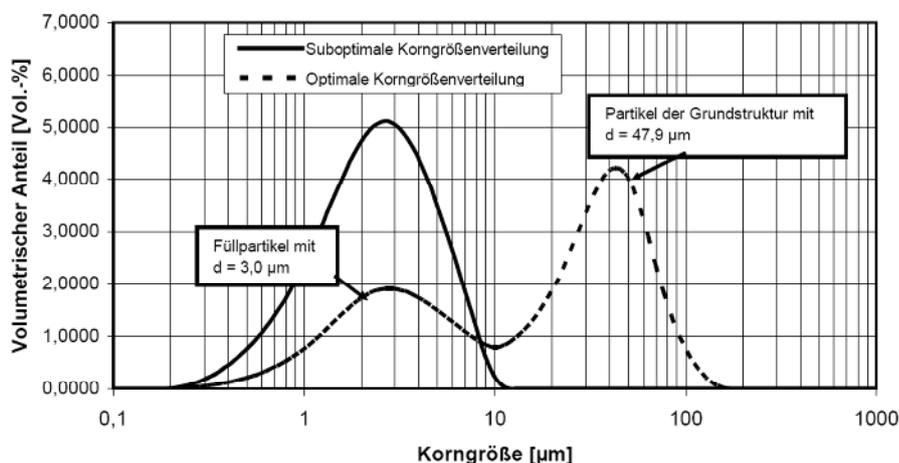


Abbildung 3 Korngrößenverteilungen für optimale und suboptimale Materialzusammensetzung (4)

Aus Abbildung 3 geht hervor, dass ein mittlerer Korndurchmesser der Grundstruktur von 47,9 µm und der Füllpartikel von 3,0 µm zur optimalen bimodalen Mischung führt.

Versuche bei Feinkornbetonen (4) haben ergeben, dass bei konstantem W/Z-Wert sowie gleichbleibender Leim- und Fließmittelmenge die optimale Fließfähigkeit des Betons bei einem Mikrosilikagehalt von 135 kg/m<sup>3</sup> erzielt wird.

Zum Erreichen hoher Druckfestigkeiten wird beim Normalbeton der W/Z-Wert zugrunde gelegt. Dies genügt bei der UHPC-Technologie nicht mehr, es ist zusätzlich der volumenbezogene Faser-Feinstteilwert  $w/F_v$  des Bindemittelleims zu betrachten. Er ist ein indirektes Maß für die mit Wasser zu füllenden Resthohlräume im Beton.

$$\frac{w}{F_v} = \frac{w}{(z + \text{Feinkorn})} \quad [1.2]$$

Feinstteile haben einen Korndurchmesser unter 0,125 mm.

Aus Abbildung 4 geht hervor, dass bei einem  $w/F_v$ -Anteil von 0,44 bei Feinkornbeton die Druckfestigkeit ein Maximum aufweist.

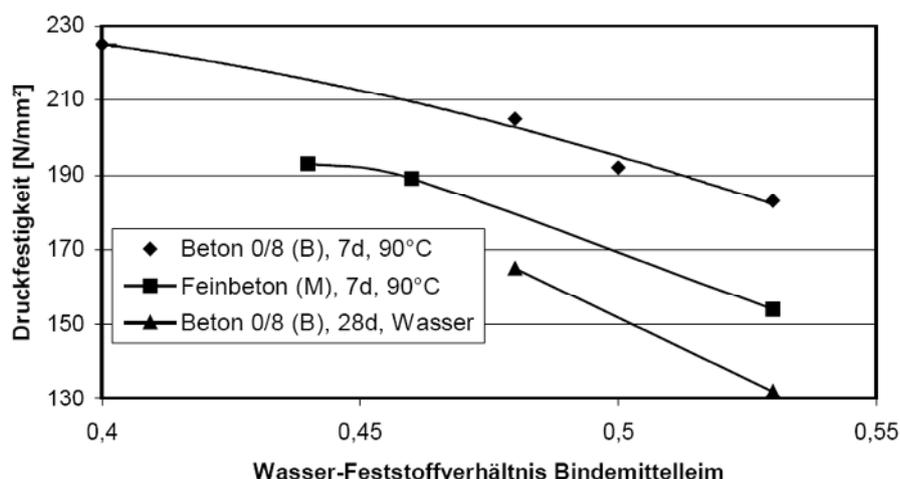


Abbildung 4 Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Wasser-Feststoffverhältnis des Bindemittelleims (4)

Der Zementgehalt üblicher Feinkornbetone liegt zwischen 700 und 900 kg/m³. Ersetzt man Teile des Zementes durch Quarzmehl bis zu einem gewissen Grad, haben Versuche keine Abminderung der Druckfestigkeit ergeben. (4) Zu hohe Zementgehalte führen zu einer Zunahme der Hydratationswärme und größeren Schwind- und Kriechverformungen.

## 1.2 Fasermaterialien

Aufgrund der Forderung nach mehr Duktilität sowie der Steigerung der Zugtragfähigkeit von UHPC werden dem Beton Fasern zugegeben. Wesentliche Anforderungen an das Fasermaterial sind, dass es zu keinem Bruch während des Mischvorganges kommt und entsprechend hohe Zugfestigkeiten vorausgesetzt werden.

Ein kurzer Überblick über die gebräuchlichsten Fasern in UHPC soll an dieser Stelle gegeben werden:

### 1.2.1 Stahlfasern

Stahlfasern sind die am häufigsten eingesetzten Fasern in UHPC. Die Materialeigenschaften entsprechen den Anforderungen für die Verwendung in UHPC. Sie weisen einen hohen E-Modul, eine hohe Zugfestigkeit sowie hohe Bruchdehnung auf. Ihre Anwendung hat sich in der Praxis bei Normalbetonen bereits vielfach bewährt. Stahlfaserbewehrter Beton bewirkt eine Verbesserung des Zugtragverhaltens, des Schwindverhaltens sowie der Brucheigenschaften.

Die sich einstellende oberflächennahe Korrosion bei witterungsungeschützten Bauteilen hat keine Auswirkung auf die Dauerhaftigkeit des Betons, vielmehr wird das ästhetische Erscheinungsbild der Betonoberfläche dadurch beeinträchtigt. (2) Die Verwendung von Edelstahlfasern kann hier Abhilfe schaffen. Durch spitze Fasern an der Oberfläche ist ein Verletzungsrisiko gegeben und somit ist die Anwendung eingeschränkt. Auch die Oberflächenbearbeitung wird dadurch erschwert.

Um die Duktilitätseigenschaften von UHPC zu verbessern, werden auch diesem Stahlfasern beigemischt. Das Material wurde schon in einigen Bauwerken eingesetzt, wobei das Entwicklungsstadium noch nicht abgeschlossen ist. Versuche mit bis zu 12 mm langen Fasern und Fasergehalten bis zu 4 Vol.-% haben ergeben, dass Biegezugfestigkeiten bis zu 50 N/mm<sup>2</sup> erreichbar sind. (4)

Für die Verwendung in normalfesten Betonen werden Stahlfasern oft profiliert oder mit Endhaken produziert, um die Verbundeigenschaften zu verbessern. Die Verbundbedingungen in UHPC sind dagegen so gut, dass glatte Stahldrahtfasern verwendet werden können. (2) Übliche Abmessungen von hochfesten Stahldrahtfasern für die Verwendung in UHPC haben Durchmesser von 0,15 bis 0,20 mm und Längen zwischen 6 und 25 mm. Hergestellt werden Stahldrahtfasern aus kaltem gezogenem Walzdraht, der auf die entsprechende Länge zugeschnitten wird.

### 1.2.2 Carbonfasern

Carbonfasern können aus verschiedenen Ausgangsmaterialien produziert werden, meist kommen Polyacrylnitrilfasern (PAN) bei der Produktion zum Einsatz. Durch Variation der Parameter bei der Herstellung (z.B. durch Veränderung der Temperatur), können die Materialeigenschaften (E-Modul, Zugfestigkeit) dem Einsatzzweck entsprechend adaptiert werden. (7)

Carbonfasern bleiben bei hohen Temperaturen sowie im alkalischen Milieu beständig. Sie haben eine sehr hohe Festigkeit sowie einen hohen E-Modul in Faserachse, normal zur Faserachse sind die Kennwerte deutlich geringer, was zu erhöhter Bruchgefahr während des Mischvorganges führen kann. (7)

### 1.2.3 Glasfasern

AR-Glasfasern werden in sehr kleinen Durchmessern (0,01 bis 0,02 mm) hergestellt. Aufgrund des geringen Durchmessers und der hohen Verbundfestigkeit ist die relativ hohe Zugfestigkeit (1500 – 3700 N/mm<sup>2</sup>) bei in Normalbeton gebräuchlichen Faserlängen frühzeitig erreicht und es kommt statt zu dem gewünschten Ausziehen der Faser zum Bruch.

### 1.2.4 Kunststofffasern

Vorrangig werden Fasern aus Polypropylen, Polyacrylnitril, Polyvinylalkohol, Polyethylen und Polyamiden verwendet.

Polypropylenfasern verhindern, dass der UHPC im Brandfall aufgrund des hohen Dampfdrucks schlagartig versagt, weil dadurch bei Brandlastbeaufschlagung winzige Kanäle zur Druckentlastung geschaffen werden. (8) Die Fasern beeinflussen aber die Verarbeitungseigenschaften des Betons nachteilig. Der Fasergehalt ist deshalb mit 0,3 – 0,6 Vol.-% begrenzt. Bei Polyacrylalkoholfasern konnte ein sehr gutes Nachbruchverhalten erzielt werden. (1)

### 1.2.5 Textilbewehrung

Bei textilbewehrten Betonen werden Garne/Rovings als flächige Strukturen im Beton verarbeitet, um eine optimale Ausnutzung im Bauteil zu erzielen. Diese entstehen dabei aus einer Vielzahl von gebündelten endlosen Hochleistungsfasern, wie z.B. aus alkaliresistenten Glas- oder Carbon-, aber auch aus Basaltfasern. Gegenüber Kurzfasern ergeben sich damit bei gleichen Fasergehalten höhere Festigkeiten, durch die gezielte Ausrichtung in einzelne Richtungen.

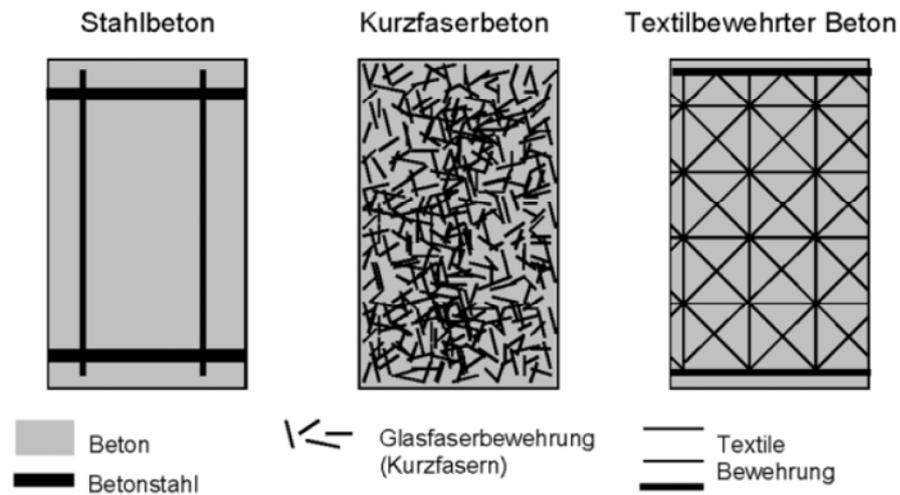


Abbildung 5 Bewehrungssysteme für Beton (9)

Die Fadenmaterialien werden vorzugsweise in Spulenform produziert. Die Feinheit der hergestellten Garne wird in tex [g/km] angegeben und ist von der Filamentanzahl, dem mittleren Filamentdurchmesser sowie der Faserstoffdichte abhängig.

## 1.3 Wirkungsweise der Fasern im UHPC

### 1.3.1 Allgemeines

Die Wirkung von Faserbeton hängt im Wesentlichen von den 3 Faktoren:

- dem Fasergehalt,
- der Fasergeometrie und
- der Faserorientierung ab.

Die Ausrichtung der Fasern im Beton ist im Regelfall 3-dimensional, sie kann aber bei der Herstellung durch die Betonierichtung oder die Schalungsänder beeinflusst werden.

Eine signifikante Steigerung der Zugtragfähigkeit ist erst oberhalb eines gewissen Fasergehaltes, dem sogenannten kritischen Fasergehalt, erkennbar. Er ist vergleichbar mit der Mindestbewehrung von Stahlbetonbauteilen.

Der kritische Fasergehalt für lange, zur Zugkraft parallele Fasern wird folgendermaßen bestimmt:  
(2)

$$\rho_{krit} = \frac{f_{ct} - \sigma_{c,cr}}{f_{ft} - \sigma_{c,cr}} \quad [1.3]$$

mit

$f_{ct}$  Zugfestigkeit der Betonmatrix

$\sigma_{c,cr}$  Zugspannung in der Betonmatrix, bei Erreichen der Zugfestigkeit des Faserverbundwerkstoffes

$f_{ft}$  Zugfestigkeit der Fasern

Bei kurzen, beliebig orientierten Fasern, wo die Zugtragfähigkeit durch den Faserverbund bestimmt wird, ergeben sich wesentlich höhere kritische Fasergehalte.

Bei unterkritischem Fasergehalt wird der Bruchprozess durch Bildung eines einzigen Makrorisses charakterisiert, bei überkritischem Fasergehalt kommt es zu einer Mehrfachrissbildung.

Die Übertragung von Zugkräften in der Rissprozesszone nimmt mit steigender Rissbreite ab. Wachsen die Risse bis zu einer kritischen Rissbreite an, entstehen Makrorisse. Bei unbewehrtem Beton können über Makrorisse keine Kräfte mehr übertragen werden, bei Faserbewehrung hingegen schon.

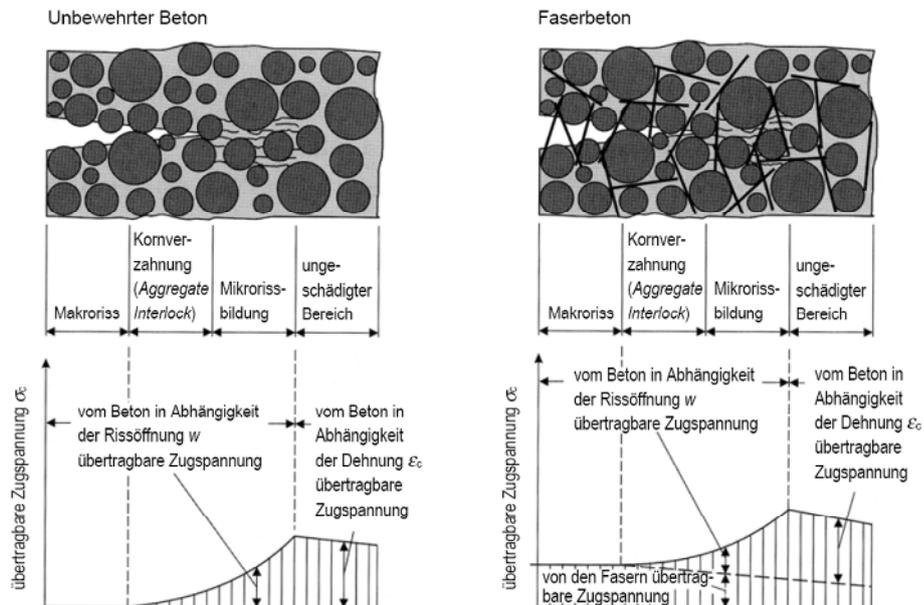


Abbildung 6 Übertragbare Zugspannungen in Abhängigkeit von der Rissöffnung bei unbewehrtem/bewehrtem Beton (2)

Um den Entfestungsverlauf von zugbeanspruchten Betonen darzustellen, eignet sich die Spannungs-Rissöffnungsbeziehung. Während bei Feinkorn-UHPC ein linearer Entfestungsverlauf zu beobachten ist, verzeichnet Grobkorn-UHPC eine bilineare Spannungs-Rissöffnungsbeziehung. Die Fläche unter der Entfestungskurve entspricht der notwendigen Bruchenergie zur vollständigen Bauteiltrennung.

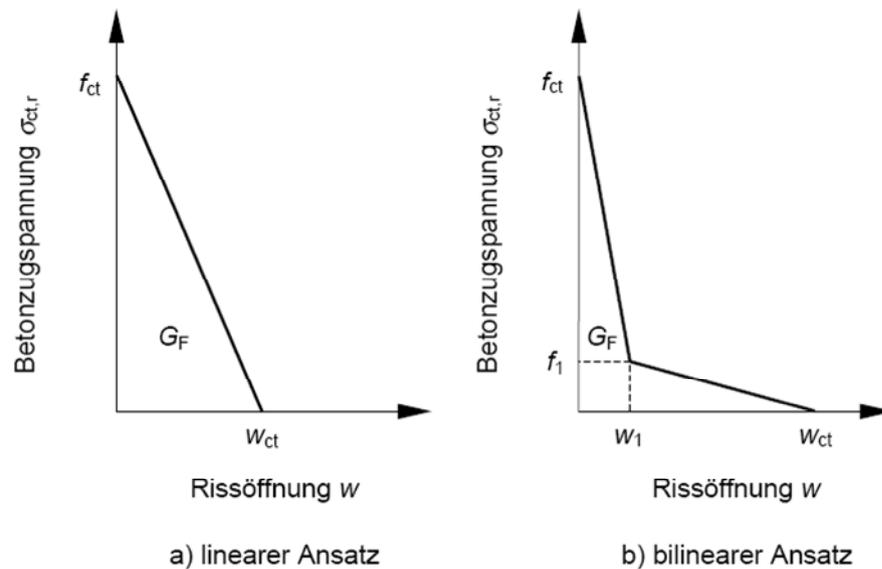


Abbildung 7 Ansätze zur Beschreibung des Entfestigungsverlaufes (2)

Die Fähigkeit des Betons bei größeren Rissbreiten Zugkräfte übertragen zu können wirkt sich positiv auf die Duktilität des Materials aus. Grobkorn-UHPC verhält sich weniger spröde als Feinkorn-UHPC, da bei wesentlich größeren Rissbreiten durch Verzahnung der groben Zuschlagskörner noch immer eine Übertragung von Zugkräften stattfinden kann.

Die Fasern im Beton können das Entstehen von Makrorissen verzögern oder auch gänzlich verhindern. Dies erfolgt mit Aufteilung der zur Rissbildung führenden Energie auf mehrere Rissprozesszonen.

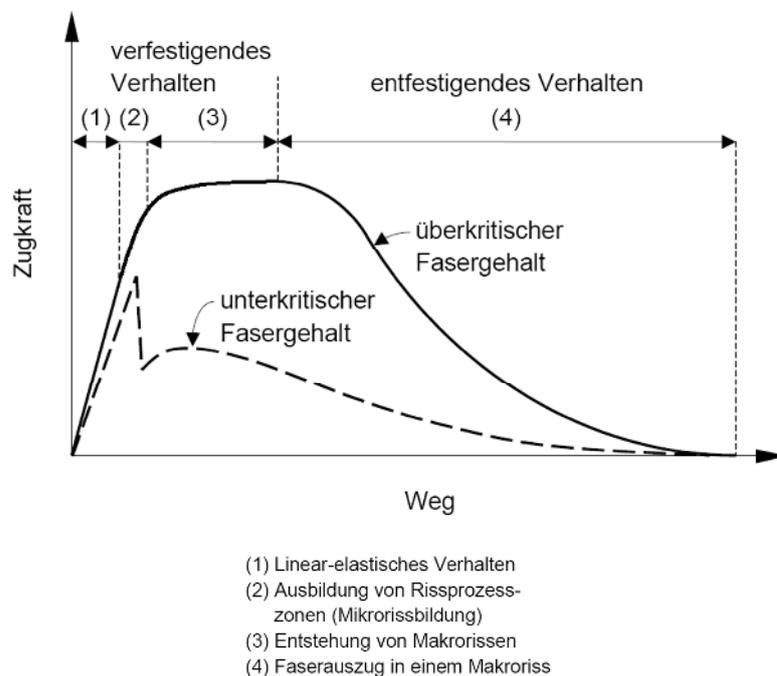


Abbildung 8 Last-Verformungsverhalten in Abhängigkeit vom Fasergehalt (2)

Das Erreichen der Zugtragfähigkeit des Faser-UHPC kann auf 2 Arten erfolgen:

- durch „Faserreißen“, d.h. die Zugfestigkeit der Faser ist erreicht, oder durch
- Verbundversagen des Faser-Matrix-Verbundes.

Es ist aus Gründen der Duktilität auf jeden Fall ein Herausziehen der Faser (Verbundversagen) anzustreben. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit ist es daher von Bedeutung, dass ein Faser-Matrix-Verbundversagen vor dem Erreichen der Faserzugfestigkeit eintritt. Um dies zu erreichen, haben die Fasern geometrische Vorgaben zu erfüllen. Das  $l/d$ -Verhältnis bzw. Schlankheit  $\lambda$  der Fasern ist somit nach oben hin zu begrenzen.

### 1.3.2 Verbundverhalten zwischen Faser und Matrix

Grundsätzlich kann bei Fasern mit glatter Oberfläche zwischen Haftverbund und Reibverbund unterschieden werden.

Von einem Scherverbund spricht man nur bei profilierten Oberflächen, wie z.B. bei Rippentorstahl.

Der Haftverbund ist bedingt durch die chemische Adhäsion in der Kontaktzone zwischen Faser und Matrix. In der Faseraktivierungsphase wirkt über die gesamte Einbindetiefe der Faser im Beton der

Haftverbund. Wird die Haftverbundfestigkeit überschritten, löst sich die Faser von der Betonmatrix lokal und der Reibverbund wird über bestimmte Länge aktiviert.

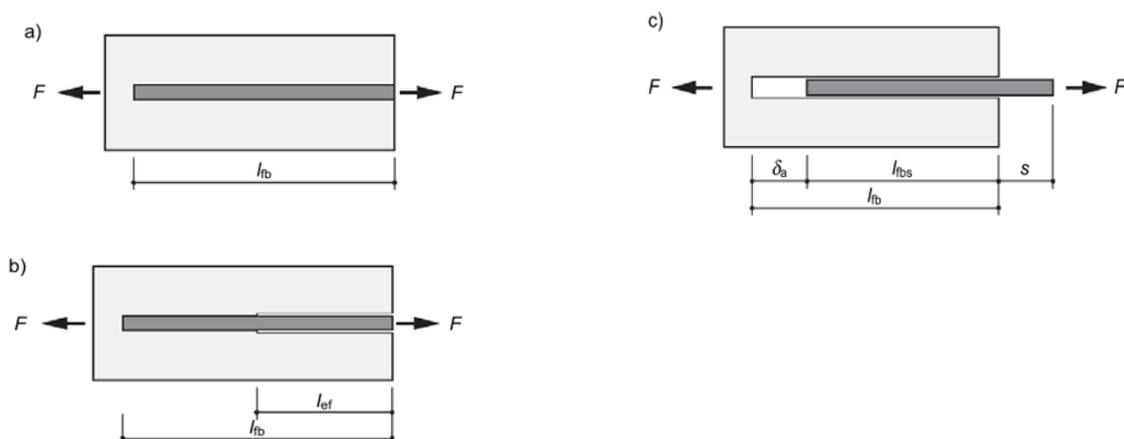
Damit es zu einem Reibverbund kommen kann, sind ein Reibungskoeffizient und eine Normalkraft erforderlich. Die Reibung ergibt durch die Verzahnung zwischen Beton und Faser im mikroskopischen Bereich, die Normalkraft entsteht durch das Schwinden des Betons. Die Faser wird somit durch den umgebenden Beton mit einer Normalkraft beansprucht.

Mit zunehmender Ausziehkraft setzt sich der Ausfall der Haftverbundfestigkeit fort, bis über die gesamte Fasereinbindetiefe nur noch der Reibverbund aktiviert ist.

Die mittlere Verbundspannung kann durch die erforderliche Ausziehkraft ermittelt werden und auch mit dem gemessenen Schlupf in der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung grafisch in Relation gebracht werden. Die mittlere Verbundspannung errechnet sich zu:

$$\tau_{bm} = \frac{F}{d_f \pi l_b} \quad [1.4]$$

Entsprechend aufwendige Versuchsaufbauten sind erforderlich, um bei Faserauszug zwischen Haft- und Reibverbund unterscheiden zu können, deshalb wird vereinfacht oft nur die Verbundfestigkeit mit der maximalen Ausziehkraft bestimmt.



- a) Faseraktivierung: Haftverbund
- b) Faseraktivierung: Haft- und Reibverbund
- c) Faserauszug: Reibverbund

Abbildung 9 Verbundverhalten einer Einzelfaser (2)

Der Mittelwert der Verbundfestigkeit zwischen UHPC und Stahlfasern liegt bei etwa  $11 \text{ N/mm}^2$  (2). Da das Verbundverhalten von Basaltfasern im Beton, insbesondere bei Basaltmakrofasern, bislang noch weitgehend unerforscht ist, kann man sich hier auch nicht auf bereits bekannte Verbundfestigkeiten stützen.

Ausgehend von der Annahme, dass das Verbundverhalten der in dieser Arbeit untersuchten Rovings aus Basaltfasern dem Verhalten von textilen Filamenten aus Rovings ähnelt, bezieht man sich hier auf bekannte Werte aus der Fachliteratur anderer nichtmetallischer Fasern.

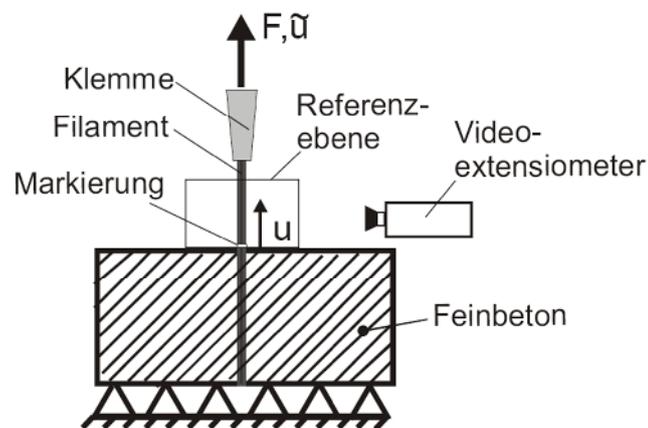


Abbildung 10 Pull-Out-Versuche am Einzelfilament (10)

Es wurden Pull-out-Versuche der Einzelfilamente aus AR-Glas und Carbon durchgeführt (10). Die Filamente wurden dazu aus einer Feinkornbetonmatrix gezogen. Gemessen wurde der Schlupf und die Zugkraft.

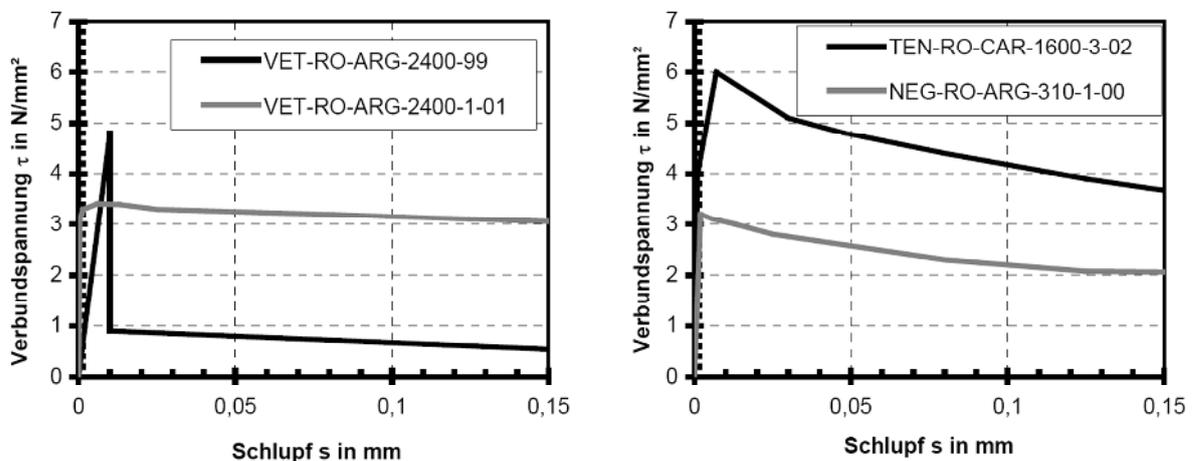


Abbildung 11 Verbundspannungs-Schlupfbeziehung von Einzelfilamenten (10)

Im linken Diagramm wurden 2 Filamente aus AR-Glas gegenübergestellt. Die beiden Filamente entstammen verschiedenen Chargen. Während das eine Filament einen ausgeprägten Adhäsionsverbund und einen vergleichsweise kleinen Reibverbund aufweist, ist das andere Filament durch einen starken Reibverbund charakterisiert.

Im rechten Diagramm sind ein Carbon- sowie ein AR-Glasfilament dargestellt. Hieraus geht hervor, dass die Verbundspannung mit größer werdendem Schlupf allmählich abnimmt. Das Carbonfilament weist eine knapp doppelt so hohe Verbundfestigkeit auf, wie das Filament aus AR-Glas.

Die maximale Verbundfestigkeit wird deshalb bei geringerem Schlupf erreicht, weil Haft- und Reibverbund dort noch gemeinsam wirken. Eine Relativverschiebung zum Erreichen der Haftverbundfestigkeit ist nicht notwendig.

Aus diesen Versuchsergebnissen wird für die Basaltfaserbündel eine Verbundfestigkeit im Bereich zwischen 3 und 6 N/mm<sup>2</sup> abgeschätzt. Die Wirkung Verbundfestigkeit wird aus Gründen der Einfachheit gleichmäßig verteilt über die ganze Faserlänge angenommen.

Die Schlankheit  $\lambda$  der zu testenden Faserbündel auf das Verhältnis zwischen Zugfestigkeit und Verbundfestigkeit des Fasermaterials abzustimmen.

### 1.3.3 Spannungs-Rissöffnungsbeziehung der Einzelfaser

Hier soll speziell das Verhalten parallel in Zugrichtung beanspruchter Einzelfasern betrachtet werden. Aus den Erkenntnissen dieses Kapitels lässt sich in weiterer Folge auf das Zugtragverhalten von Faserbeton schließen.

In der **Faseraktivierungsphase** wird die über einen Riss zu übertragende Zugkraft einzig von der Faser aufgenommen. Die Zugkräfte werden über den Faser-Matrix-Verbund entlang der Verbundlänge als Verbundkräfte in die Matrix übertragen. Entlang der Verbundlänge entstehen in Abhängigkeit des Verhältnisses der Dehnsteifigkeiten Dehnungsunterschiede zwischen Faser und Beton. Am Ende der Lasteinleitungslänge herrscht starrer Verbund zwischen Faser und Matrix. Die Lasteinleitungslänge entspricht hier der aktivierten Länge und wird mit  $l_{ef}$  bezeichnet.

Der Dehnungsunterschied zwischen Faser und Matrix in den aktivierten Längen entspricht der Rissbreite.

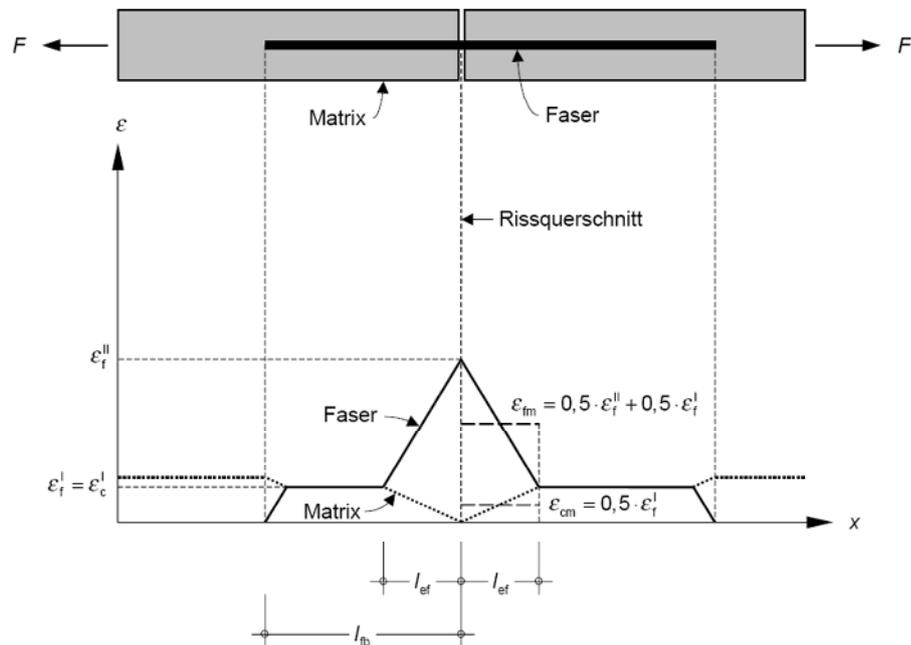


Abbildung 12 Verzerrungsverläufe in der Faseraktivierungsphase (2)

mit

- $\varepsilon_f^{\text{II}}$  Faserdehnung im Riss (Zustand II)
  - $\varepsilon_f^{\text{I}}$  Faserdehnung am Ende der Lasteinleitungslänge (Zustand I)
  - $\varepsilon_c^{\text{I}}$  Betondehnung am Ende der Lasteinleitungslänge (Zustand I)
- Es gilt:  $\varepsilon_f^{\text{I}} = \varepsilon_c^{\text{I}}$

Bei steigender Zugbeanspruchung wachsen die Lasteinleitungslängen vom Rissufer her auf beiden Seiten des Risses sukzessive an, bis die kürzere Einbindelänge der Faser erreicht ist. Es herrscht nur im Punkt A (siehe Abbildung 13) noch starrer Verbund.

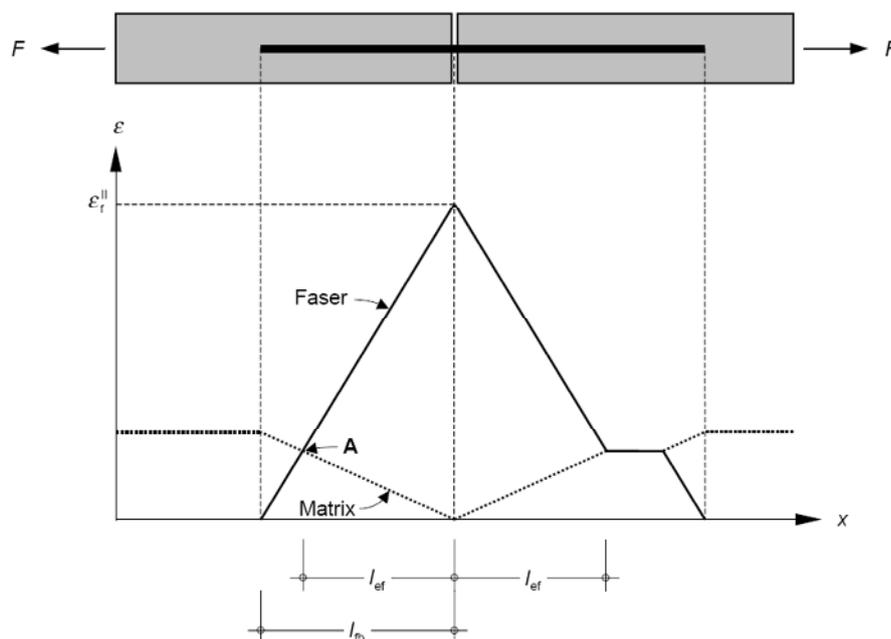


Abbildung 13 Verzerrungsverläufe beim Übergang Aktivierungsphase – Auszugsphase (2)

Der Zusammenhang zwischen Zugkraft in der Faser  $\sigma_{f0}$  und übertragbarer Verbundkraft beim Übergang von der Aktivierungsphase zur Auszugsphase  $\tau_f$  ergibt sich durch die Bedingung, dass die Verbundfestigkeit zwischen Faser und Beton erreicht ist für kreisförmige Faserquerschnitte zu:

$$\frac{d^2 \pi}{4} \cdot \sigma_{f0} = d \cdot l \cdot \pi \cdot \tau_f \quad [1.5]$$

Die Gefahr des schlagartigen Versagens des Faserbetons bei Erreichen der Faserzugfestigkeit  $f_t$  vor der Verbundfestigkeit  $\tau_f$ , lässt sich durch Begrenzen der Schlankheit der Faser, d.h. des Verhältnisses der Länge zum Durchmesser der Faser ( $l/d$ ), vermeiden. Unter der Bedingung, dass die Faser beidseitig des Risses jeweils zur halben Faserlänge einbindet und der Annahme einer gleichmäßigen Verbundspannung ergibt sich die Grenzschlankheit  $\lambda_{lim}$  bzw. das  $l/d$ -Verhältnis für kreisförmige Faserquerschnitte zu:

$$\lambda_{lim,f} = \frac{f_t}{2 \cdot \tau_f} \quad [1.6]$$

mit:

$f_t$  Zugfestigkeit des Fasermaterials

$\tau_f$  Verbundfestigkeit zwischen Faser und Matrix

In der **Faserauszugsphase** wird die Faser auf der Seite der kürzeren Einbindetiefe aus der Matrix herausgezogen. Die Ausziehkraft nimmt proportional zur kleiner werdenden Einbindetiefe ab.

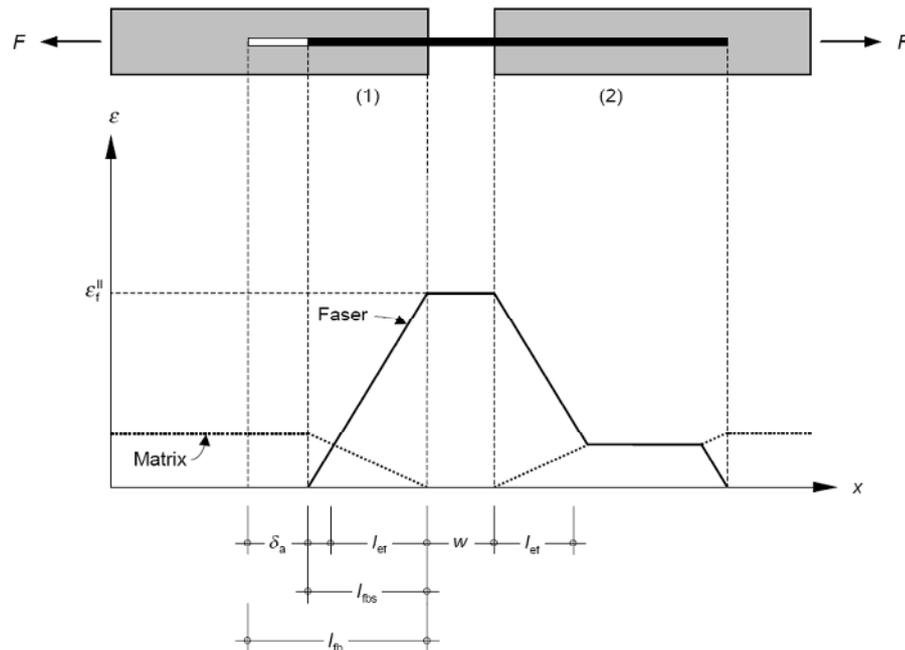


Abbildung 14 Verzerrungsverläufe in der Faserauszugsphase (2)

Die Rissbreite setzt sich nun aus der der Relativverschiebung zwischen Faser und Matrix und dem Ausziehweg zusammen. Die Faserspannung sinkt mit geringer werdender Einbindetiefe bis zum vollständigen Auszug. Dann entspricht die Rissbreite dem Ausziehweg.

#### 1.3.4 Spannungs-Rissöffnungsbeziehung des Faserbetons

Die Einbindelängen der Fasern beidseitig eines entstehenden Risses im Faserbeton sind mit der gleichen Auftretenswahrscheinlichkeit zwischen 0 und der Faserlänge  $l_f$  verteilt. Es wird deshalb in den Berechnungen von einer fiktiven Einbindelänge von  $l_f/2$  ausgegangen.

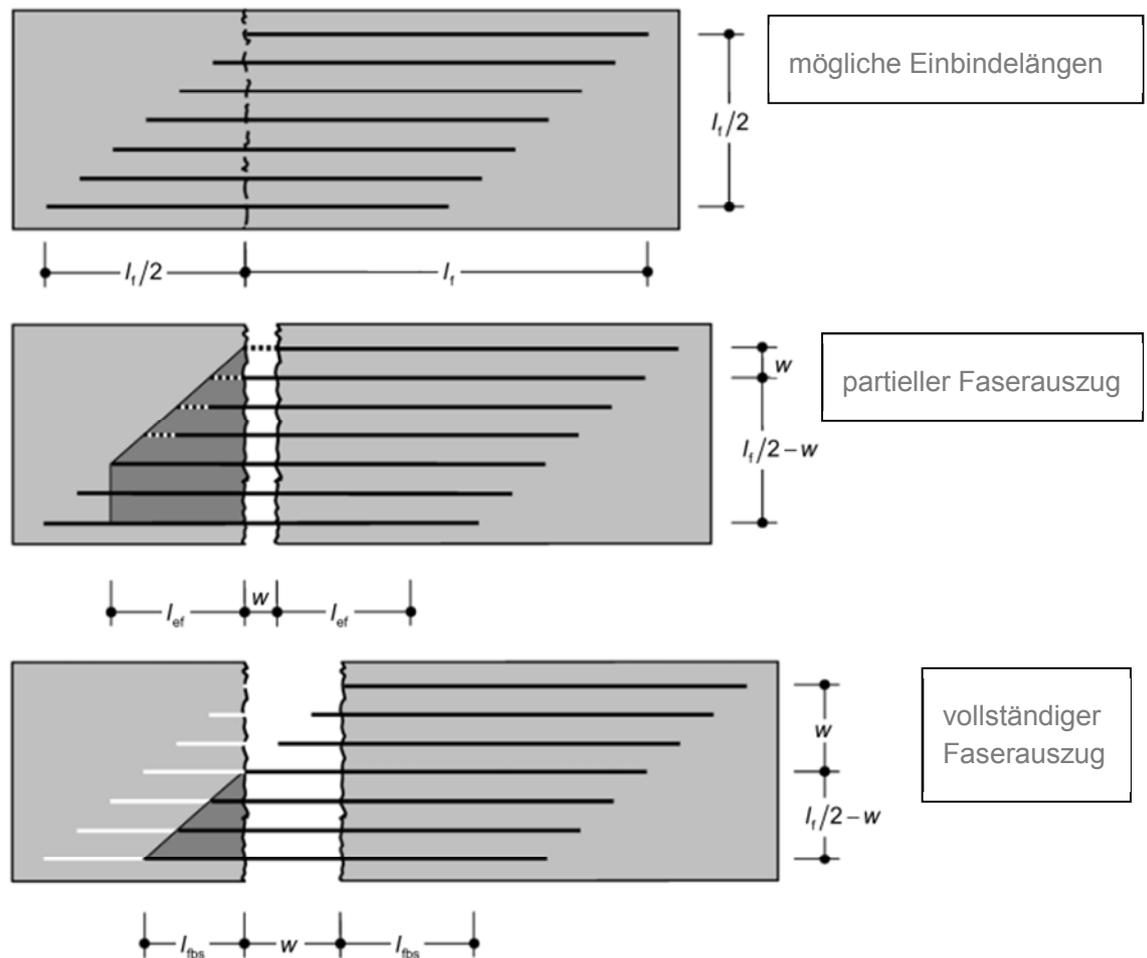


Abbildung 15 Faserbeton mit parallelen in Zugrichtung ausgerichteten Fasern (2)

Abbildung 15 veranschaulicht, wie bei konstanter Rissbreite über den Querschnitt, Fasern mit kürzerer Einbindetiefe bereits ausgezogen werden, während sich länger einbindende Fasern noch in der Aktivierungsphase befinden. Die Rissbreite des Faserbetons beim Auszug ist identisch mit der Rissbreite der als letztes ausgezogenen Faser - also der symmetrisch im Riss befindlichen Faser - und kann somit stellvertretend als solche für den Faserbeton berechnet werden.

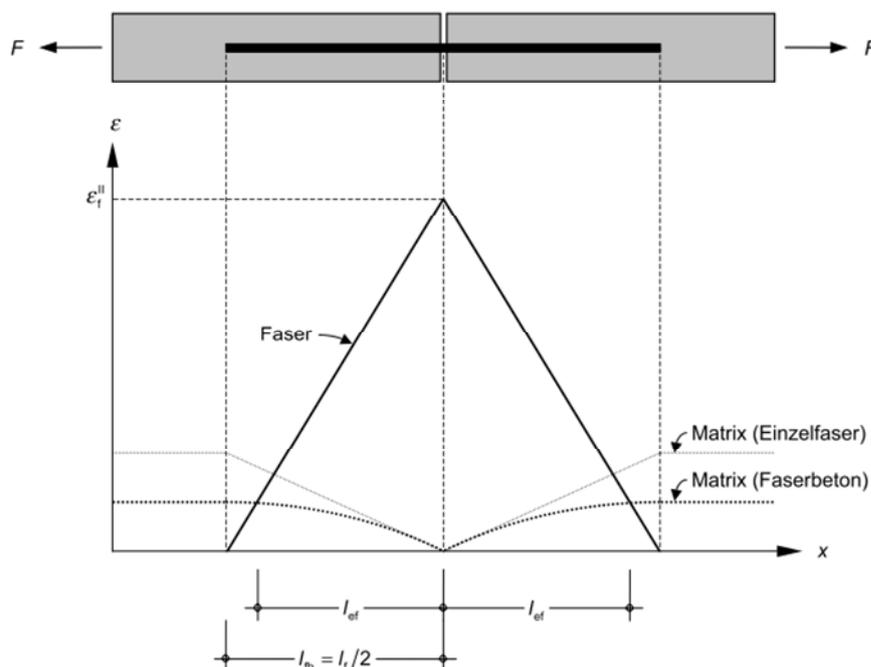


Abbildung 16 Verzerrungsverlauf des Faserbetons (2)

In Abbildung 16 sind die Verzerrungsverläufe von Fasern und Beton für den Verbundwerkstoff dargestellt. Für den Faserbeton ergibt sich allerdings anstatt eines linearen – wie bei der Einzelfaser – ein parabelförmiger Verzerrungsverlauf. Das ist dadurch zu begründen, dass die Zahl der im Verbund liegenden Fasern proportional zum Rissufer abnimmt. Die Betondehnung reduziert sich im Vergleich zur Einzelfaser auf die Hälfte.

### 1.3.5 Faserorientierung

Neben dem Zugtragverhalten der Einzelfaser, den Verbundeigenschaften und dem Faservolumenanteil, hat die Faserorientierung einen wesentlichen Einfluss auf das Zugtragverhalten des Faserbetons. Die Fasern richten sich grundsätzlich 3-dimensional in der Betonmatrix aus, dies kann aber durch Maßnahmen bei der Herstellung (z.B. durch Veränderung der Betonierrichtung) beeinflusst werden. Aber auch die Bauteilgeometrie spielt in die Orientierung wesentlich mit ein. Lange Fasern tendieren dazu, sich in Betonierrichtung anzupassen (siehe Abbildung 18). Im Bereich von Schalungsrändern oder an freien Oberflächen ist von einer 2-dimensionalen Faserorientierung auszugehen.

Deshalb empfiehlt Behloul, innerhalb des beeinflussten Bereiches den Faserorientierungsfaktor  $\eta$  auf den Mittelwert zwischen dem Orientierungsfaktor im unbeeinflussten Bereich dem 2-

dimensionalen Bereich anpassen. Der beeinflusste Bereich erstreckt sich auf die halbe Faserlänge  $l_f/2$ . (11)

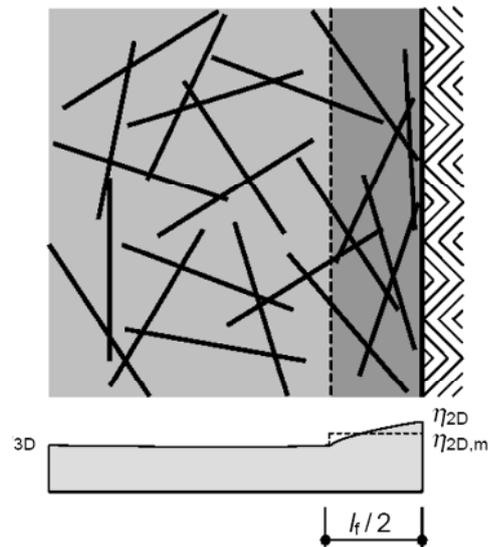


Abbildung 17 Faserorientierung an Grenzflächen und Verlauf des Faserorientierungsfaktors (12)

Die Zusammensetzung des Betons (Größtkorn, Konsistenz) übt auch Einfluss auf die Faserorientierung aus. Der Einfluss der Verdichtung ist nur bei sehr geringen Fasergehalten von Relevanz. (11)

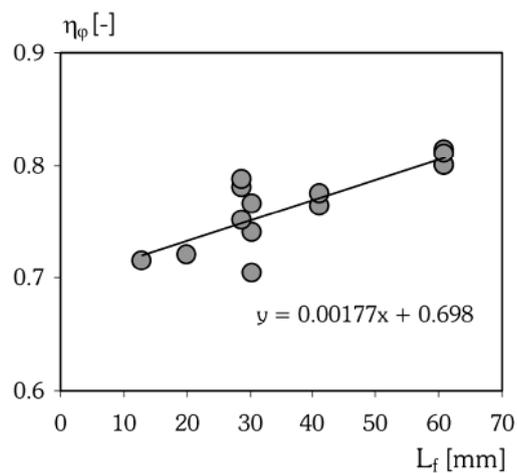


Abbildung 18 Zusammenhang zwischen Faserlänge und Orientierungsbeiwert (13)

Die Auswirkung der Faserorientierung auf das Zugtragverhalten des Betons wird durch den **Faserorientierungsbeiwert** charakterisiert. Dieser entspricht dem Verhältnis der in Zugrichtung projizierten Faserlänge zur tatsächlichen Faserlänge.

Der Neigungswinkel der Faser zur Ausziehrichtung beschreibt also den Auszieh Widerstand, da die Wahrscheinlichkeit, dass mehr Fasern die Bruchfläche schneiden am Größten ist, wenn die Fasern orthogonal zur Bruchfläche (d.h. in Beanspruchungsrichtung) orientiert sind. Hinsichtlich der Aufnahme äußerer Beanspruchungen wären 1 - dimensional, in Zugrichtung orientierte Fasern am effektivsten, da bei 2 - oder 3 - dimensionaler Orientierung nur ein Teil der Fasern ihre volle Wirksamkeit erlangen kann.

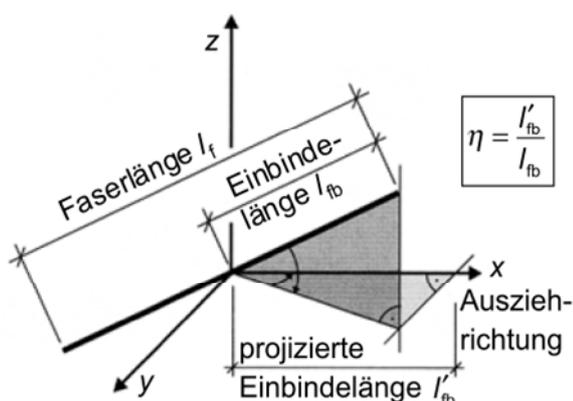


Abbildung 19 Geometrische Interpretation des Faserorientierungsbeiwertes (2)

Die Feststellung der Faserorientierung kann auf verschiedenste Arten erfolgen. Die Anwendung von magnetischen Methoden ist auf Stahlfasern begrenzt. Bei optischen Methoden kann entlang von Schnittflächen aufgrund der Querschnittsform der durchgeschnittenen Fasern auf die Orientierung geschlossen werden. Je nach Anschnittswinkel würde sich für kreisrunde Fasern bei einer senkrecht zur Schnittfläche verlaufenden Faserorientierung ein kreisförmiger Faserquerschnitt, bei einem größeren Winkel zwischen Faserorientierung und Schnittfläche ein entsprechender elliptischer Querschnitt ergeben. Auch diese Methode scheidet bei den Basaltfaserbündeln aus, da sie einen unregelmäßigen und bandartigen Querschnitt aufweisen.

Der Faserorientierungsbeiwert liegt zwischen 0 und 1. (Wert 1: alle Fasern richten sich in Richtung  $\varphi$  aus; Wert 0: alle Fasern richten sich orthogonal zur Richtung  $\varphi$  aus). (14)

Der Faserorientierungsbeiwert  $\eta$  hat direkten Einfluss auf die Berechnung der Faserbetonspannung:

Die mittlere Fasertension im Riss  $\sigma_{mf,0,r}$  ist bei vollständiger Faseraktivierung nur halb so groß wie die Fasertension der Einzelfaser und formuliert sich folgendermaßen: (2)

$$\sigma_{mf,0,r} = \frac{\tau_f \cdot l_f}{d_f} \quad [1.7]$$

Multipliziert man die mittlere Fasertension im Riss mit dem Fasergehalt  $\rho_f$  und dem Faserorientierungsbeiwert  $\eta$  erhält man die theoretische maximale Betonspannung  $\sigma_{cf,0}$ : (2)

$$\sigma_{cf,0} = \eta \cdot \rho_f \cdot \frac{\tau_f \cdot l_f}{d_f} \quad [1.8]$$

Es wurde auch, dass bei steigendem Fasergehalt die Betonspannung nur unterproportional zunimmt. Dies ist auf die gegenseitige Beeinflussung der Fasern beim Ausziehen zurückzuführen. (2)

### 1.3.6 Faserwirksamkeit

Nicht nur die Faserorientierung, auch die Faserwirksamkeit hat Einfluss auf das Tragverhalten von Faserbeton.

Einerseits wird durch das Faserausziehen von schräg zur Rissebene einbindenden Fasern Umlenkkräfte erzeugt, die wiederum eine höhere Reibung und damit verbunden höheren Auszieh widerstand bewirken. Es kann dadurch das Faserreißen vor dem Ausziehen stattfinden. Andererseits kann es – insbesondere wenn die Fasern die Rissebene in spitzem Winkel durchstoßen – zum Abplatzen des angrenzenden Betonkeiles zwischen Faser und Rissebene kommen.

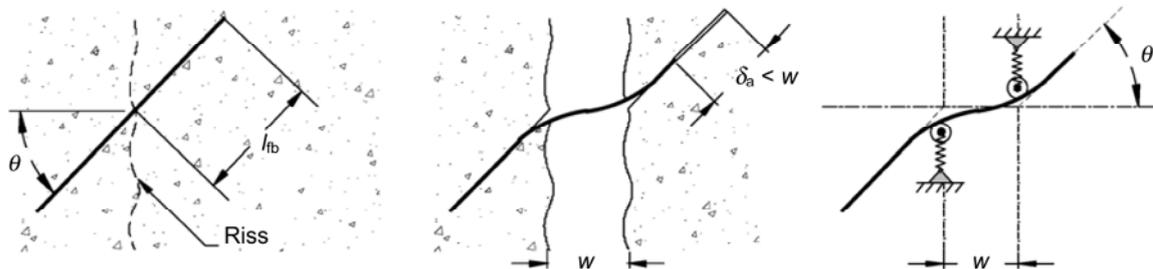


Abbildung 20 Umlenkung einer geneigt zur Rissrichtung verlaufenden Faser (2)

Markovic untersuchte das Verhalten des Ausziehwerstandes von Fasern in Abhängigkeit von der Orientierung und kam zur Erkenntnis dass der Ausziehwerstand mit größer werdendem Ausziehwinkel zunimmt. Andere experimentelle Untersuchungen von Rasmussen führten wiederum zu gegenteiligen Ergebnissen und zwar zu einer Abnahme der Faserwirksamkeit bei größer werdender Faserneigung. (2)

Der Einfluss der Faserwirksamkeit findet im Faserwirksamkeitsbeiwert  $g$  Berücksichtigung. Er gibt das Verhältnis der Ausziehkraft einer in einem bestimmten Winkel zur Faserachse beanspruchten Faser zu einer, in Faserachse beanspruchten Faser an. Jungwirth setzt die Faserwirksamkeit in Abhängigkeit zur Orientierung (2):

2 - dimensionale Faserorientierung:	$g = \sqrt{0,75}$	[1.9]
--	-------------------	-------

3 - dimensionale Faserorientierung:	$g = 0,75$	[1.10]
--	------------	--------

Legt man die Ergebnisse von Markovic zugrunde, wäre der Faserwirksamkeitsbeiwert  $g$  größer als 1. Pfyf beschreibt wiederum die Faserwirksamkeit als unabhängig vom Neigungswinkel mit  $g = 1$ .

Erweitert man die Gleichung [1.10] entsprechend um den Faserwirksamkeitsbeiwert  $g$  erweitert sich die Faserbetonspannung  $\sigma_{cf,0}$  wie folgt:

$$\sigma_{cf,0} = \eta \cdot g \cdot \rho_f \cdot \frac{\tau_f \cdot l_f}{d_f} \quad [1.11]$$

## 2 Verwendete Materialien

### 2.1 Basaltmakrofasern

Basaltfasern werden aus der Schmelze des anorganischen Materials Basalt hergestellt und eignen sich aufgrund der hohen chemischen und mechanischen Widerstandsfähigkeit für die Verwendung in UHPC. Da Basaltfasern nur in sehr kleinen Durchmessern (10 – 20  $\mu\text{m}$ ) hergestellt werden können, ist bei der Verwendung der Einzelfasern in UHPC noch keine ausreichende Duktilität erzielbar. Deshalb hat sich das LKI der TU Graz gemeinsam mit der Firma Asamer Basaltic Fibers GmbH zur Aufgabe gemacht, Faserbündel (Rovings) aus Basaltfasern herzustellen, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden.

Faserbündel (Rovings) bestehen aus Bündeln von Einzelfasern, die durch eine Schlichte aneinander haften. Man kann also die Faserbündel als Verbundwerkstoff von Faser und Schlichte ansehen, wobei die Einzelfasern die tragende Funktion übernehmen und die Schlichte den Verbund zwischen den Einzelfasern ermöglicht.

In der Vergangenheit wurden der Technischen Universität Graz bereits Basaltfaserbündel seitens der Asamer Basaltic Fibers GmbH geliefert und am Labor für Konstruktiven Ingenieurbau getestet, allerdings mit unbefriedigendem Ergebnis, da sich die Fasern während des Mischvorganges auflösten. Die Verbundwirkung des Klebermaterials im feuchten, alkalischen Milieu unter mechanischer Einwirkung durch den Mischprozess war also nicht gegeben.

Voraussetzung zur Eignung des Materials für die Verwendung in UHPC ist also, dass das Verbundmaterial im feuchten, alkalischen Milieu unter mechanischer Beanspruchung durch den Mischvorgang in seiner Wirkung nicht beeinträchtigt sein darf.

#### 2.1.1 Herstellungsprozess

Voraussetzung für die Herstellung ist die Verwendung von feuchte- und alkalibeständiger Schlichte. Die Rovings werden hierfür in Epoxidharz, flüssiges Polypropylen oder Kleber auf Elastomerbasis getränkt und anschließend in die erforderlichen Einzelfaserlängen geteilt. (2)

Die Asamer Basaltic Fibers GmbH kann die Einzelfasern in einer Bandbreite zwischen 10  $\mu\text{m}$  und 30  $\mu\text{m}$  herstellen. Diese bilden zusammen mit der Schlichte die Makrofaser. Dazu werden 200 Einzelfäden im Querschnitt verarbeitet. Bedingt durch die Produktionseinrichtung kann lediglich der Durchmesser der Einzelfasern, nicht aber die Anzahl der die Bündel bildenden Mikrofasern verändert werden.

Mit den entsprechenden Ziehwerkzeugen kann der Durchmesser der Einzelfaser beeinflusst werden. Im Durchmesserbereich zwischen 10 µm und 20 µm ist die Materialflexibilität hoch. Größere Einzelfaserdurchmesser führen zu einer schlechteren Biegsamkeit der Fasern sowie einer glasartigen Struktur.

Für die Feststellung der Verwendbarkeit des Fasermaterials für den Gebrauch in UHPFRC hinsichtlich des Strangdurchmessers wurde eine Materialprobe an das LKI entsandt. Nach Lieferung des Fasermaterials wurde allerdings festgestellt, dass das gelieferte Fasermaterial einen stark bandartigen Querschnitt mit variierenden Querschnittsbreiten im Bereich 1 bis 2,5 mm aufweist und Querschnittshöhen im Bereich des Einzelfaserdurchmessers von 12 µm.

Seitens des LKI wurde bei dem von der Asamer Basaltic Fibers GmbH hergestellten Strang nach geringer Verdrillung mit einer Schiebelehre der Durchmesser im Bereich um 130 bis 150 µm festgestellt. Dies entspricht den erwarteten Vorstellungen des Durchmessers.

Die Faserlängen können im Herstellungsprozess als Vielfaches von 4 mm abgestuft produziert werden.

### 2.1.2 Faserschlankheit

Ausgehend von der abgeschätzten Verbundfestigkeit von Basalt und UHPC (aus Kapitel 1.3.2) im Bereich zwischen 3 und 6 N/mm<sup>2</sup> und einer Zugfestigkeit von Basaltfasern von ca. 3.000 bis 3500 MPa nach Angaben der Asamer Basaltic Fibers GmbH errechnet sich die Grenzschlankheit gem. Kapitel 1.3.3 zu:

$$\lambda_{lim,f} = \frac{f_t}{2 \cdot \tau_f} = \frac{3.000}{2 \cdot 6} = 250$$

Die Grenzschlankheit  $\lambda_{lim,f}$  von 250 sollte also nicht überschritten werden.

Die unter Berücksichtigung der ermittelten Grenzschlankheit für die Versuchsdurchführung gewählten Faserlängen liegen bei 8, 12 und 16 mm. Bei einem Strangdurchmesser von 150 µm ergeben sich die Schlankheiten zu 53, 80 und 107. Der Einfluss der Fasergeometrie sowie des Fasergehaltes auf den Frisch- sowie auf den Festbeton soll untersucht werden.

Die Faserschlankheit

$$\lambda_f = \frac{l_f}{d_f} \quad [2.1]$$

liegt dabei in der Regel zwischen 50 und 100. Bei Schlankheiten größer 60 steigt die Gefahr einer Igelbildung beim Mischen (Verklumpung der Fasern), mit der Folge einer ungleichmäßigen Faserverteilung. (2)

## 2.2 Ultrahochfester Beton (UHPC)

### 2.2.1 Rezeptur

Die Rezeptur der UHPC – Mischung ohne Fasern, im Folgenden als 0-Beton oder Standardrezeptur bezeichnet, wurde den Empfehlungen von Huy Hoang Kim entsprechend übernommen.

Das Größtkorn liegt bei 0,8 mm. Die Mischungsherstellung erfolgt mit einem 3-stufigen Horbatmischer. Zuerst wurden Zement, Mikrosilika und Quarzmehl aufgrund der hohen Staubentwicklung mit geringer Drehzahl trocken gemischt, nach Zugabe des Wassers und des Fließmittels wurde die Drehzahl gesteigert. Bei Reduktion auf mittlere Drehzahl erfolgte die Zugabe des Quarzsandes. Als letztes wurden die Fasern bei geringer Drehzahl beigemischt, um das Risiko des Auflösens der Rovings in seine Einzelfasern so gering wie möglich zu halten.

						 TU Graz Graz University of Technology	
Zielfestigkeit	150 MN/m <sup>2</sup>						
Verdichtung	SVB						Labor für Konstruktiven Ingenieurbau
Verdichtungsdauer	-						
Gesamtmenge	1.5 Liter						
Herstelldatum:	12.12.2011						
Lufttemperatur							
Zielsetzfließmaß	≥ 750 mm						0-Beton (ohne Fasern)
Einsatzstoff			Gehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	Stoffraum [dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]		Ansatz:	1.5 Ltr.
Luftporengehalt in V%=Luftg.		2.0 %	--	20.0	mit trockenem Ausgangsstoffen	Berücksichtigung des Wassers in Zuschlägen	
CEM I 42,5 R HS	z		725	237.7	1.09 kg		1.088 kg
Sika® Silicoll P	MS	18.00 %	131	56.7	0.20 kg		0.196 kg
MIKRO-DORSILIT® 110	QM	53.90 %	391	148.6	0.59 kg		0.586 kg
Wasser w/z-Wert	w	0.25	181	158.9	0.24 kg		0.238 kg
<b>Zusatzmittel</b>							
Sika® ViscoCrete®-20 Gold	FM	4.40 %	31.9	30.09	0.048 kg		0.048 kg
<b>Leim (Vol.%)</b>				<b>652.0</b>			
<b>Basaltfasern</b>							
	SF	0.00 Vol.-%	0.0	0.0	0.00 kg		0.000 kg
<b>Gesteinkörnung</b>							
I. DORSILIT® Nr.8 0.3-0.8 mm		100.0 %	922	348.0	1.38 kg		1.383 kg
II.		0.0 %	0	0.0	0.00 kg		0.000 kg
III.		0.0 %	0	0.0	0.00 kg		0.000 kg
<b>Summe Zuschlag</b>		100 %					
<b>Beton</b>			2359	1000.0	<b>Setzfließmaß (mm)</b>		
w/z-Wert			0.250		Vw/Vp =	0.409	
w/b-Wert (w/(z+SFA))			0.212				
<b>Rohdichten</b>							
		ρ <sub>d</sub>					ρ <sub>d</sub>
1 DORSILIT® Nr.8 0.3-0.8 mm		2.650	Wassergehalt= 0.00%	CEM I 42,5 R HS			3.050
2 0			Wassergehalt= 0.00%	Sika® Silicoll P			2.300
3 0			Wassergehalt= 0.00%	MIKRO-DORSILIT® 110			2.630
4 Basaltfasern		2.900		Sika® ViscoCrete®-20 Gold			1.060
<b>Anmerkung:</b>							
I. Horbat-Mischer				CEM + MS + QM	Mischdauer (Sec)	Wirbler	Teller
					30	100 RPM (St. 2)	langsam
II. Probekörper				Wasser + FM	360 (4 Min)	450 RPM (St. 2)	langsam
						Erhöh. Stufe 3	
1 Setztrichter	0.34			Körnung + Basaltfasern	360 (3 Min)	100 RPM (St. 2)	langsam
3 Prismen: 160x40x40 mm	0.77						
4 Knochen	0.32						
Summe	1.43			Säubern	60	-	-
				Entleerung	-	-	-

Abbildung 21 0-Beton

### 3 Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit

#### 3.1 Allgemeines

Für die Versuchsdurchführung stehen die Basaltmakrofasern, produziert von der Firma Asamer Basaltic Fibers GmbH zur Verfügung. Die Fasern sind in den Längen zwischen 8, 12 und 16 mm und im Durchmesser der Einzelfaser von 15 bis 30  $\mu\text{m}$  abgestuft. Allerdings weisen die Rovings mit 30  $\mu\text{m}$  Filamentdurchmesser ein schlechteres Verbundverhalten der Fasern untereinander sowie eine geringere Biegsamkeit auf. Eine Versuchsdurchführung mit den gedruckten Bündeln scheint deshalb nicht zielführend zu sein. Das Hauptaugenmerk wird auf die schlankeren Faserbündel mit 15  $\mu\text{m}$  Filamentdurchmesser gelegt.

Zu Beginn war die Durchführung der Versuche mit Fasergehalten von 0.5, 0.75, 1.0 und 1.25 Vol.-% geplant. Es sollte auch der Einfluss des Fasergehaltes auf die Betoneigenschaften untersucht werden. Die Vorversuche der Festbetonprüfung wurden mit 1,25 Vol.-% Fasergehalt durchgeführt und führten zu einem schlagartigen Versagen. Dieses Problem kann mit einem geringeren Fasergehalt nicht gelöst werden. Deshalb wurden alle Prüfungen des Basaltfaserbetons mit 1,25 Vol.-% Fasergehalt durchgeführt.

Das Hauptaugenmerk bei den Versuchen ist auf die Rovings mit 15  $\mu\text{m}$  Filamentdurchmesser gerichtet. Die Rovings sollten bei einem kreisartigen Querschnitt einen Durchmesser von 150  $\mu\text{m}$  aufweisen – so lautete die Anforderung an die Produktion, allerdings weist der gelieferte Querschnitt eine stark bandartige Struktur, die eher einem Rechteckquerschnitt gleicht, auf.

Die Querschnittshöhe der Rovings wird von dem Einzelfilamentdurchmesser geprägt, in konkreten Fall wurden 12  $\mu\text{m}$  Filamentdurchmesser mit einem Messschieber festgestellt. Die Querschnittsbreite variiert im Bereich um 1 bis 2,5 mm, in Abhängigkeit von der Anzahl der zusammenhängenden Einzelfasern. Die Idealvorstellungen der Fläche bei einem Kreisquerschnitt mit einem Durchmesser von 150  $\mu\text{m}$  liegen bei ca. 18.000  $\mu\text{m}^2$ . Mit der gegebenen Geometrie liegt, ausgehend von einem Rechteckquerschnitt, die Fläche im Bereich zwischen 10.000 und 25.000  $\mu\text{m}^2$ . Die theoretisch ideale Fläche liegt also inmitten dieser Bandbreite.

Die Rezeptur des UHPC wird gemäß den Empfehlungen von Huy Hoang Kim, wissenschaftlicher Mitarbeiter des Institutes für Betonbau, übernommen. Die Durchführung der Festbetonprüfungen erfolgt für die Versuche 10 Tage nach Prüfkörperherstellung, für die Ausziehversuche 8 Tage nach der Herstellung.

### 3.2 Mischen und Verarbeiten, Vorversuche

Da Recherchen von vergleichswisen wissenschaftlichen Arbeiten (7) mit ähnlichen Mischversuchen (z.B. mit Carbonfasern) ergeben haben, dass die Verarbeitbarkeit des Betons insbesondere bei höheren Fasergehalten ( $> 1$  Vol.-%) nur erschwert möglich ist, und erst ab diesem Schwellenwert ein signifikant gesteigertes Potential der Zugfestigkeitseigenschaften im Vergleich zum faserlosen UHPC festgestellt werden kann, werden die Vorversuche mit dem in der Versuchsreihe geplanten höchsten Fasergehalt von 1,25 Vol.-% durchgeführt.

Vom Verfasser der vorliegenden Arbeit wurde bei der Versuchsdurchführung von anderen Forschungsprojekten am Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der TU Graz (LKI) beobachtet, dass bei Stahlfasergehalten von 2,5 Vol.-% eine vernünftige Verarbeitung durchaus noch erfolgen kann. Bei Carbonfasern liegt nach Erfahrungen von Huy Hoang Kim der grenzwertige Fasergehalt für die Verarbeitbarkeit etwas darunter, bei max. 2%.

Es werden auch die längsten zur Verfügung stehenden Fasern (16 mm) in den Vorversuchen eingemischt, um quasi das „Worst-Case-Szenario“ hinsichtlich der Verarbeitung durchzuspielen und Maßnahmen zu setzen, diese zu verbessern.

Zum Unterschied zu Carbon- oder Stahlfasern, sei allerdings angemerkt, dass die Biegsamkeit der eingesetzten feinen Basaltfasern wesentlich größer ist. Aufgrund der unterschiedlichen Materialbasis, ist auch davon auszugehen, dass die Oberflächenbeschaffenheit und die Grenzflächenspannungen zwischen Fasermaterial und dem Anmachwasser voneinander abweichen.

Deshalb kann eine Obergrenze des Fasergehaltes für die Verarbeitbarkeit nicht über alle Materialien hinweg festgelegt werden.



Abbildung 22 Horbat-Mischer



Abbildung 23 Feststellung des Ausbreitmaßes

### 3.2.1 Beton 1,25 Vol.-% und 16mm Faserlänge.

Die Verarbeitbarkeit des nach Standardrezeptur hergestellten Betons ist aufgrund der geringen Fließfähigkeit nur beschränkt möglich. Das Einbringen des Betons in die Formen kann nur mit Hilfe von Spachteln und Kellen erfolgen, sodass das gesamte Volumen der Prüfkörper mit Beton gefüllt ist. Das Ausbreitmaß beträgt hier 13,0 cm bei einem unteren Innendurchmesser des Hägermann-Setztrichters von 10 cm.

Die Vergrößerung der Fließmittelzugabe kann auch nur eine kaum merkliche Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften bewirken.

Bei einer weiteren Versuchsreihe wurde der Fließmittelanteil des 0-Betons um 20% erhöht und die Proben nach dem Einfüllvorgang in die Formen für 30 Sekunden auf eine Rüttelplatte gestellt und mit geringer Intensität verdichtet. Das Ausbreitmaß dieses Betons vergrößerte sich nur geringfügig gegenüber dem 0-Beton auf 13,7 cm.

Nach Faserzugabe ist dieser Beton nicht mehr selbstverdichtungsfähig, im Gegensatz zum faserlosen 0-Beton.

Bei einer dritten Versuchsreihe wurden die Fasern vor Einbringen in den Mischer angefeuchtet und der W/Z-Wert des 0-Betons von 0,25 auf 0,30 erhöht. Ein Teil des Anmachwassers wurde somit erst mit der Faserzugabe in die Mischung eingetragen. Auch hier ist eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit im Vergleich zur Standardrezeptur kaum gegeben. Das Ausbreitmaße wurde mit 14,3 cm festgestellt.

Da sich die Frischbetoneigenschaften zum 0-Beton nur unwesentlich verbessern, ist es nach Ansicht des Verfassers am besten, für die weitere Versuchsdurchführung die 0-Betonrezeptur anzuwenden.

Da der Einsatz eines Rüttlers bessere Ergebnisse im Bereich der später durchgeführten Festbetonprüfung lieferte, erwies sich das Rütteln in den Vorversuchen für sinnvoll und soll auch in den weiteren Versuchen Anwendung finden.

### **3.3 Mischen und Verarbeiten Hauptversuche**

#### **3.3.1 Beton 1,25 Vol.-% und 8 mm Faserlänge.**

Besonders bei 8 mm Faserlänge wurde eine bessere Verarbeitbarkeit des Betons, gegenüber 12 mm langen Fasern bei gleichem Fasergehalt, festgestellt. Die Herstellung erfolgte gem. Standardrezeptur. Das Ausbreitmaß beträgt 14,5 cm.

#### **3.3.2 Beton 1,25 Vol.-% und 12 mm Faserlänge.**

Die Eigenschaften der Verarbeitbarkeit liegen hier zwischen den Eigenschaften der Betone mit 8 mm und 16 mm Faserlänge. Das Ausbreitmaß beträgt 13,1 cm.

Aus den Frischbetonprüfungen lässt sich ableiten, dass die Verarbeitbarkeit aufgrund der geringfügig höheren Fließfähigkeit des Frischbetons, verdeutlicht durch das höhere Ausbreitmaß, bei kürzeren Faserlängen, aber gleichem Faseranteil leichter erfolgen kann.

#### **3.3.3 Ergebnisse**

Beim 0-Beton ohne Faserzugabe liegt das Ausbreitmaß vergleichsweise bei 22,50 cm.

Mischungstyp	Ausbreitmaß [cm]	Anmerkung
0-Beton (faserlos)	22.5	Hägermann Setztrichter
Basalt 1.25 Vol.-%, 16 mm	13.0	
Basalt 1.25 Vol.-%, 16 mm +20% FM	13.7	
Basalt 1.25 Vol.-%, 16 mm (W/Z = 0.30)	14.3	
Basalt 1.25 Vol.-%, 12 mm	13.1	
Basalt 1.25 Vol.-%, 8 mm	14.5	
Stahl DORSICEM 2.5 Vol.-%, 6 mm	20.0	ASTM-Konus
Carbon NANODUR 2.0 Vol.-%, 9 mm	18.0	Hägerman

Tabelle 1 Mittlere Ausbreitmaße der untersuchten Mischungen

Nach dem Mischvorgang konnte festgestellt werden, dass die Faserbündel in ihrer ursprünglichen Form den Mischprozess nicht überstehen. Es kommt fast zu einem vollständigen Auflösen der Faserbündel in seine Einzelfasern. Nur vereinzelt sind Faserbündel, die sich aber auch teilweise aufgelöst haben, erhalten geblieben. Die Feststellung wurde durch Auswaschen des Frischbetons gemacht, die später durchgeführten makroskopischen Aufnahmen der Betonbruchflächen bestätigen dies. Selbst bei einer geringen Mischintensität (Stufe 1) nach Zugabe der Fasern, kann diesem Problem nicht Abhilfe geschafft werden.



Abbildung 24 Frischbeton mit den aufgelösten Faserbündeln

Zum Unterschied zu den getesteten Stahl- oder Carbonfaserbetonen sind die Verarbeitungseigenschaften des Basaltfaserbetons am schlechtesten, was wiederum den für die Verarbeitbarkeit zumutbaren Fasergehalt gering hält.

Es gibt 3 mögliche Gründe, woran die Ursache des geringen Ausbreitmaßes des Basaltfaserbetons liegen könnte:

- durch das Auflösen der Faserbündel in seine Einzelfasern vergrößert sich die mit Wasser zu benetzende Oberfläche. Durch die erhöhte Wasseraufnahme des Fasermaterials wird die Verarbeitbarkeit erschwert.
- Die Benetzungseigenschaften des Basaltfasermaterials sind entsprechend höher, als bei vergleichbaren Fasern anderer Materialbasis.
- Die hohe Nachgiebigkeit bzw. Biegsamkeit des Fasermaterials im Vergleich mit biegesteiferen Fasern (z.B. Stahlfasern) erschwert die Verarbeitbarkeit.

Um die ersten beiden Gründe näher zu betrachten, wurde eine Versuchsreihe in Kapitel 3.4 durchgeführt.

### 3.4 Untersuchung der Oberflächenbenetzung

#### 3.4.1 Allgemeines

Bei UHPFRC sind die Beschaffenheit der Fasern und der Fasergehalt entscheidend für die Festbetoneigenschaften, aber im Hinblick auf einen praxistauglichen Materialeinsatz ist nicht zuletzt den Verarbeitungseigenschaften genügend Aufmerksamkeit zu schenken.

Bei einem Fasergehalt von bereits 1,25 Vol.-% war bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Mischversuchen eine praxistaugliche Verarbeitbarkeit bereits nicht mehr gegeben. Bei den getesteten Carbonfasern liegt der kritische Fasergehalt, bei dem eine wirtschaftliche Verarbeitung noch möglich ist, wesentlich höher, im Bereich um 1,5 bis 2,0 Vol.-%, bei Stahlfasern bis 2,5 Vol.-%.

Dies kann einerseits durch die Faserschlankheit (das  $l/d$ -Verhältnis) beeinflusst werden. Durch das Auflösen der Rovings im Zuge des Mischprozesses werden die Schlankheit und damit die zu benetzenden Oberflächen der Einzelfasern relativ hoch.

Schließlich vergrößerte sich die zu benetzende Faseroberfläche durch das Auflösen der Faserbündel während des Mischprozesses um ein Vielfaches. Im Folgenden soll die spezifische zu benetzende Faseroberfläche je Betonkubatur in  $[\text{cm}^2/\text{m}^3]$  für die eingesetzten Fasertypen veranschaulicht werden. Diese errechnet sich in Abhängigkeit von der Fasergeometrie und des Fasergehaltes. Die Stirnflächen der Fasern werden in der Oberflächenberechnung nicht berücksichtigt, da ihr Einfluss auf die Gesamtoberfläche vernachlässigbar klein ist.

Fasertyp	Querschnitt	Oberfläche [ $\text{mm}^2/\text{mm}$ ]	Faservolumen [ $\text{mm}^3/\text{mm}$ ]	Oberfläche je Faservolumen [ $\text{mm}^2/\text{mm}^3$ ]	Oberfläche je Betonvolumen bei 1 Vol.-% Fasergehalt [ $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ]
<b>Basaltfaserbündel vor Auflösen</b>	1 mm x 12 $\mu\text{m}$	2.0240	0.0120	169	<b>1.69</b>
<b>Basaltfaserbündel nach Auflösen</b>	$\varnothing$ 12 $\mu\text{m}$	0.0377	0.0001	333	<b>3.33</b>
<b>Basaltfaserbündel mit Kreisquerschnitt</b>	$\varnothing$ 150 $\mu\text{m}$	0.4712	0.0177	27	<b>0.27</b>
<b>Carbonfaserbündel</b>	1.3 mm x 0.3 mm	3.2000	0.3900	8	<b>0.08</b>
<b>Stahlfasern</b>	$\varnothing$ 0.175 mm	0.5498	0.0241	23	<b>0.23</b>

Tabelle 2 Darstellung der Faseroberfläche in Bezug zur Betonkubatur unter Zugrundelegung eines einheitlichen Fasergehaltes von 1 Vol.-%

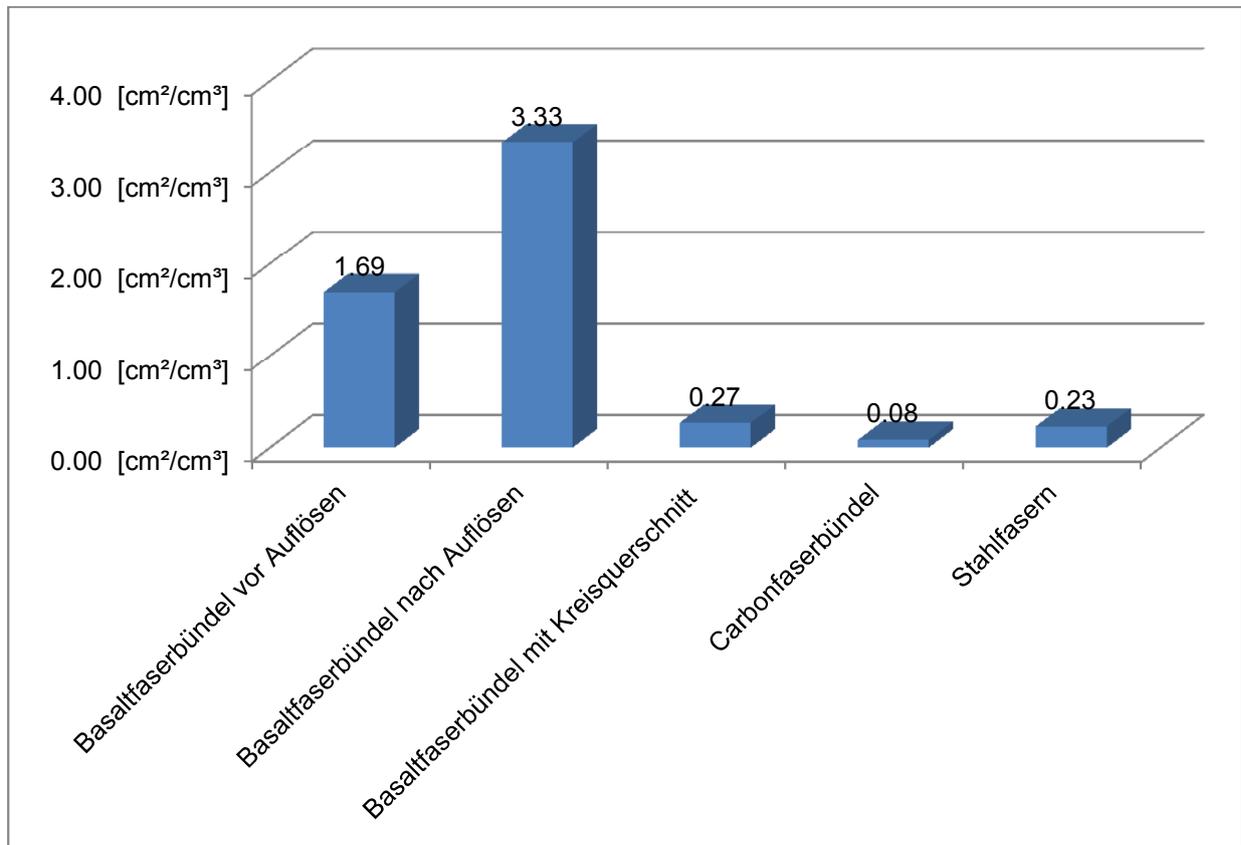


Abbildung 25 Faseroberfläche in [cm²/cm³] in Bezug zur Betonkubatur bei einem einheitlichen Fasergehalt von 1 Vol.-%

Selbst die Basaltfaserbündel vor dem Auflösen haben noch eine relativ große Oberfläche im Vergleich zu den Carbonfaserbündeln- bzw. den Stahlfasern. Durch das Auflösen der Bündel in seine Einzelfasern kommt es zu einer Verdoppelung der zu benetzenden Oberfläche.

Würden die Basaltfasern in einem kreisförmigen Querschnitt hergestellt werden und wäre die Stabilität der Einzelfasern untereinander durch eine geeignete Schlichte gegeben, so wäre die zu benetzende Oberfläche nur ca. 16% der Oberfläche des gelieferten bandartigen Querschnittes. Ein kreisförmiger Querschnitt würde also das Oberflächen/Volumenverhältnis optimieren.

Die Carbonfaserbündel weisen ein optimales Oberflächen/Volumenverhältnis auf. Auch die Oberfläche der Stahlfasern ist im Vergleich zu den Basaltfaserbündeln verhältnismäßig gering.

Um eine vergleichbare Gegenüberstellung der spezifischen Faseroberflächen je Betonkubatur zu schaffen, sind diese in Abbildung 25 unter Zugrundelegung eines einheitlichen Fasergehalts von 1 Vol.-% dargestellt.

Um eine Aussage über die Wirkung der Oberflächenbenetzung von Basaltrovings gegenüber einer Wasser-/Fließmittelmischung bzw. auch destilliertem Wasser machen zu können, wurde zu diesem Thema eine abschließende Versuchsreihe durchgeführt.

### 3.4.2 Theoretische Grundlagen

Als **Adhäsion** wird im physikalischen Sinn die Anziehung zwischen den Molekülen zweier verschiedener Stoffe bezeichnet, im Gegensatz dazu bewirkt die Kohäsion eine Anziehungskraft zwischen zwei gleichartigen Molekülen.

Wasser kann als Flüssigkeitsbrücke zwischen Poren und Partikeln sehr hohe Haftkräfte verursachen, die bei vollständiger Trocknung verloren geht. Der Verbund zwischen UHPC mit Stahl, Carbon oder Basalt stellt eine reine Festkörperbrücke dar, Wasser als Flüssigkeitsbrücke ist hier mit hoher Wahrscheinlichkeit als Haftmechanismus auszuschließen. (5)

Die Adhäsionskräfte werden durch molekulare Wechselwirkungen zweier unterschiedlicher Materialien begründet und treten in Form von Normal- aber auch Tangentialkräften in Erscheinung. Die Normalkräfte sind für die gegenseitige Anziehung von Bedeutung. Um die Körper voneinander zu trennen ist die Adhäsionskraft aufzubringen. (5)

Wird eine Feststoffoberfläche mit einem Flüssigkeitstropfen in Kontakt gebracht, unterscheidet man zwischen 3 möglichen Arten der Benetzung (15):

- Der Tropfen breitet sich auf der Oberfläche dermaßen aus, dass er nicht zu erkennen ist. Man spricht hier von **vollständiger Benetzung**.
- Der Tropfen verbreitert sich auf der Oberfläche, bleibt aber als solcher zu erkennen. Man spricht hier von **normaler Benetzung**.
- Der Tropfen perlt auf der Oberfläche ab und bleibt als solcher erhalten, es findet hier **keine Benetzung** statt.

Dieses Verhalten zwischen festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen wird durch Grenzflächeneffekte hervorgerufen. Es spielt hier das Verhalten von Kohäsion und Adhäsion eine Rolle und die gemeinsame Vektorsumme, die resultierende Kraft, eine Rolle. Zwischen der Grenzfläche des Körpers und der Tangentialebene der Flüssigkeit bildet sich somit ein Winkel  $\alpha$  aus (15). Dieser Winkel wird als Kontaktwinkel bezeichnet.

Dieser Zusammenhang ist durch Formulierung des Kräftegleichgewichtes in der Young'schen Gleichung (16) festgehalten:

$$\cos(\theta) = \frac{\sigma_S - \gamma_{S,L}}{\sigma_L} \quad [3.1]$$

$$\sigma_S = \gamma_{S,L} + \sigma_L \cdot \cos(\theta) \quad [3.2]$$

$\gamma_{S,L}$  Grenzflächenspannung zwischen Festkörper und Flüssigkeit

$\sigma_S$  Oberflächenspannung des Festkörpers (= Grenzflächenspannung zwischen Festkörper und Gas)

$\sigma_L$  Oberflächenspannung der Flüssigkeit (= Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Gas)

$\theta$  Kontaktwinkel

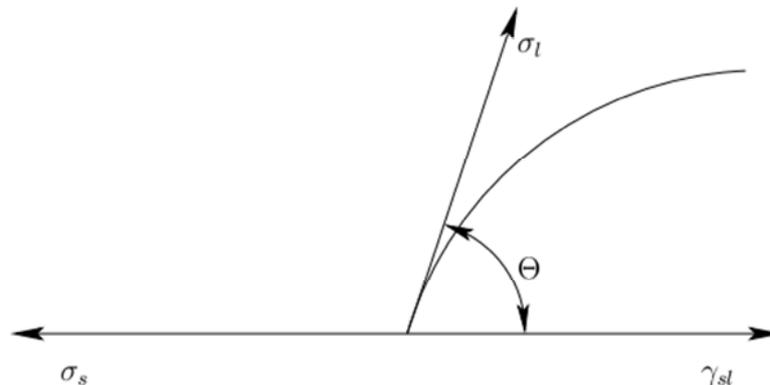
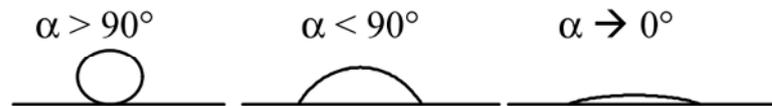


Abbildung 26 Beziehung des Kontaktwinkels und den Oberflächenenergien von Flüssigkeit  $\sigma_S$  und Feststoff  $\sigma_L$  sowie Grenzflächenspannung  $\gamma_{SL}$  am Beispiel eines Flüssigkeitstropfens (16)

Der **Kontaktwinkel**, also der Winkel zwischen Festkörperoberfläche, der Oberfläche des Flüssigkeitstropfens und der Atmosphäre ist das Resultat des Einstellens des horizontalen Kräftegleichgewichtes der drei angreifenden Kräfte  $\gamma_{S,L}$ ,  $\sigma_S$  und  $\sigma_L$ . Von Benetzung spricht man dann, wenn der Kontaktwinkel kleiner als  $90^\circ$  ist, oder gegen  $0^\circ$  geht. Ist der Kontaktwinkel größer als  $90^\circ$  findet keine Benetzung statt. (15)



### 27 Benetzungsverhalten am Beispiel eines Tropfens (15)

Die **Oberflächenspannung** ist eine Eigenschaft von Flüssigkeiten, die mit der Kohäsion von Molekülen zusammenhängt. Innerhalb der Flüssigkeit wirken auf die Moleküle allseitig wirkende Kräfte gleicher Größe, sodass die Summe aller Kräfte gleich 0 ist. (15)

Durch die Gasmoleküle an der Oberfläche von Flüssigkeiten werden diese Kräfte dort nicht kompensiert, d.h. auf die Oberflächenmoleküle wirken Kräfte, die vor allem ins Innere gerichtet sind. Daher ist jede Flüssigkeit bestrebt eine möglichst kleine Oberfläche einzunehmen. Die kleinste Oberfläche ist in einer kugelförmigen Gestalt erreicht. Eine Vergrößerung der Oberfläche bedeutet, diese Kräfte zu überwinden. Die Kraft, die der Oberflächenvergrößerung entgegenwirkt, ist die Oberflächenspannung  $\sigma = W / A$ . Sie wird in der Einheit [N/m] oder [J/m<sup>2</sup>] angegeben. Zur Vergrößerung der Oberfläche um  $A$  muss die Arbeit verrichtet  $W$  werden, die dem Produkt aus Oberflächenspannung  $\sigma$  und Oberflächenvergrößerung  $A$  entspricht. (15)

Die Oberflächenspannung wird durch Verunreinigungen empfindlich herabgesetzt und nimmt auch mit zunehmender Temperatur ab. Ab Erreichen der kritischen Temperatur verschwindet das Phänomen der Oberflächenspannung. (17)

Bringt man eine Flüssigkeit mit einem Festkörper in Kontakt, wird diese Oberflächenspannung auch in der Grenzschicht wirksam. Diese Spannung wird dann **Grenzflächenspannung**  $\gamma_{S,L}$  genannt. Die Grenzflächenspannung nimmt mit größer werdender Anziehungskraft zwischen den beiden Stoffen ab. Auch das Verhältnis der Oberflächenspannungen ( $\sigma_S, \sigma_L$ ) zueinander ist entscheidend für die Benetzung. (15)

Der **Kontaktwinkel**  $\gamma$  lässt sich durch die Methode der Randwinkelmessung feststellen. Es handelt sich hierbei um ein optisches Verfahren. Der Kontaktwinkel wird in der vorliegenden Arbeit zur Untersuchung des Benetzungsverhaltens der Fasern gemessen. Die Methode des liegenden Tropfens eignet sich nur beim Vorhandensein von Versuchskörpern mit ebenen Oberflächen. Der Kontaktwinkel stellt sich auch am 3 - Phasenpunkt am Rand von Flüssigkeitsoberflächen zu vertikalen Bauteilen ein.

Welcher Winkel sich einstellt, hängt von den Oberflächenspannung der beteiligten Materialien ab. Gemessen wird die Neigung der Tangente am Tripelpunkt. Hier treffen die drei beteiligten Phasen: Flüssigkeit, Feststoff und umgebende Raumluft aufeinander.

Man unterscheidet zwischen statischen und dynamischen Methoden zur Kontaktwinkelmessung. Während in der Versuchsdurchführung der vorliegenden Arbeit nur statische Messmethoden zur Anwendung kommen, wird bei der dynamischen Methode, der liegende Tropfen mit einer Spritze kontinuierlich vergrößert und der **Fortschreitewinkel** gemessen. Dieser ist üblicherweise größer als bei statischen Verfahren. Wird das Tropfenvolumen wieder verringert, kann der **Rückzugswinkel** gemessen werden, dieser gibt Auskunft über die makroskopische Rauigkeit der untersuchten Oberfläche. (16)

Bei größerer Oberflächenspannung der Flüssigkeit ist die Krümmung der Oberfläche, die sich zu einem vertikal begrenzenden Feststoff hin ausbildet geringer, unter der Voraussetzung, dass der Kontaktwinkel am Tripelpunkt zu einem Feststoff mit unveränderter Oberflächenspannung festgestellt wird. Unter dieser Annahme ist also die Oberflächenspannung der Flüssigkeit in Abbildung 28 bei Darstellung 1 größer als bei Darstellung 2.



Abbildung 28 Flüssigkeiten mit größerer (1) und geringerer (2) Oberflächenspannung (17)

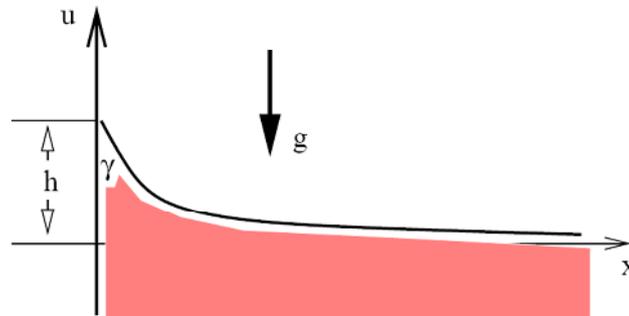


Abbildung 29 Anstieg an vertikaler Wand (18)

In Abbildung 29 liegt der Randkontaktwinkel zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$ , man spricht hier von Kapillartransaktion. Steigt der Winkel auf über  $90^\circ$  an, kommt es zu einem Absinken der Flüssigkeit entlang einer vertikalen Feststoffbegrenzung (Kapillardepresseion). (18)

Oberflächenenergie kann basierend auf der Art der molekularen Wechselwirkung, in dispersive und polare Anteile geteilt werden. Die Summe der beiden Anteile ergibt die Oberflächenenergie des jeweiligen Materials. Es können nur die dispersiven Anteile eines Mediums (z.B. Feststoff) mit den dispersiven Anteilen eines anderen Mediums (z.B. Flüssigkeit) miteinander agieren. Dasselbe gilt für die polaren Anteile. Das **Verfahren nach OWRK** (Owens, Wendt, Rabel und Kaelble) berücksichtigt eben jeden dieser beiden Anteile in der Berechnung.

Das heißt, wenn eine unpolare Flüssigkeit auf eine polare Oberfläche gesetzt wird, können nur die dispersiven Anteile der Oberflächenspannungen miteinander wechselwirken. Der dispersive Anteil der Flüssigkeit wird durch den Index D, der polare Anteil durch den Index P angezeigt. Sind bei zwei verschiedenen Flüssigkeiten die dispersiven und polaren Anteile der Oberflächenenergien bekannt, können durch Messung der Kontaktwinkel mit Hilfe einer Regressionsanalyse die Anteile der Oberflächenenergien des Feststoffes ermittelt werden. (16)

$$\gamma_{S,L} = \sigma_S + \sigma_L - 2 \cdot \left( \sqrt{\sigma_{D,S} \cdot \sigma_{D,L}} + \sqrt{\sigma_{P,S} \cdot \sigma_{P,L}} \right) \quad [3.3]$$

- $\gamma_{S,L}$  Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Feststoff
- $\sigma_S$  Oberflächenspannung des Feststoffes
- $\sigma_L$  Oberflächenspannung der Flüssigkeit
- $\sigma_{D,i}$  Dispersiver Anteil der Oberflächenenergie
- $\sigma_{P,i}$  Polarer Anteil der Oberflächenenergie

$$\sigma_i = \sigma_D + \sigma_P \quad [3.4]$$

Mit Hilfe der Wetting Envelope lässt sich vorhersagen, ob eine Flüssigkeit eine Oberfläche benetzen wird. Es ist eine besondere Darstellung des polaren und dispersiven Anteils der Oberflächenenergie eines Festkörpers.

Bei der Berechnung der Wetting Envelope wird die Methode nach OWRK umgekehrt angewandt. Es sind nicht wie bei der Methode nach OWRK die polaren und dispersiven Anteile der Oberflächenenergien der Flüssigkeiten sondern die polaren und dispersiven Anteile der Oberflächenenergie des Feststoffes bekannt. Es werden dann in der Folge unter Annahme eines sich einstellenden Kontaktwinkels von  $0^\circ$  die polaren und dispersiven Anteile der Oberflächenenergie einer theoretischen Flüssigkeit bestimmt. Liegt die jeweilige Flüssigkeit innerhalb der Kurve, wird die Oberfläche vollständig benetzt, liegt sie außerhalb, nicht. (16)

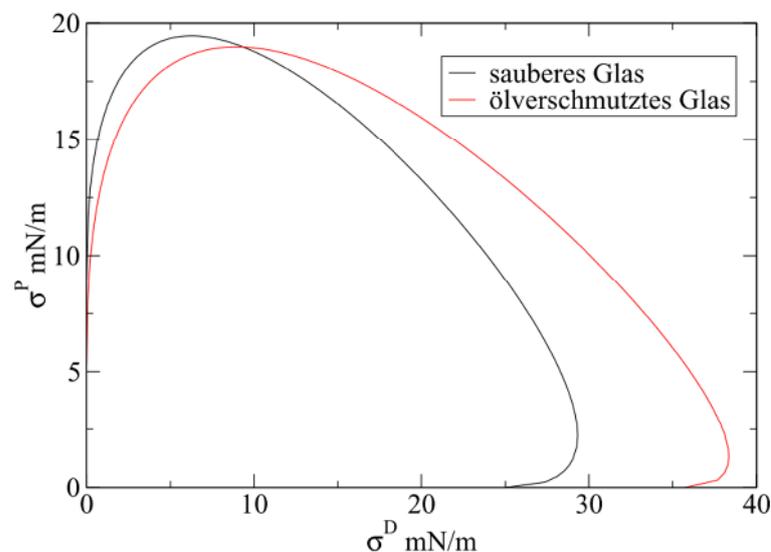


Abbildung 30 Wetting Envelope (16)

### 3.4.3 Versuchsdurchführung

Im Versuch soll eruiert werden, ob ein Zusammenhang zwischen dem Kontaktwinkel des Fasermaterials mit der Wasser-/Fließmittelmischung (im Verhältnis 5:1, den realen Bedingungen entsprechend) bzw. mit destilliertem Wasser und den in Kapitel 3 festgestellten Verarbeitungseigenschaften des Betons besteht. Hierzu sollen die Fasern der drei untersuchten

Materialien in die Flüssigkeiten eingetaucht werden und der Winkel des sich ausbildenden Adhäsionstrichters durch Auswertung fotografischer Aufnahmen gemessen werden.

Je größer sich der Kontaktwinkel zwischen der Flüssigkeit und dem Feststoff ausbildet, desto höher sind die zwischenmolekularen Wechselwirkungen und in weiterer Folge erhöht sich der Wasserbedarf des Fasermaterials im Frischbeton, was wiederum mit einer Verschlechterung der Verarbeitungseigenschaften einher geht.

Die Versuchsdurchführung erfolgt unter Anwendung der Methode der optischen Kontakt- bzw. Randwinkelmessung. Hierzu wurden Aufnahmen mit einer digitalen Spiegelreflexkamera mit Makroobjektiv gemacht und der Kontaktwinkel mittels Auswertung der Aufnahmen am Computer gemessen.

Als Fließmittel wurde das Produkt Visco Crete Gold der Firma SIKA verwendet. Um das Ergebnis mit anderen wissenschaftlichen Werken vergleichbar zu machen, wurde dieser Versuch auch mit destilliertem Wasser durchgeführt.

Es wurde ein Messgefäß mit einem Inhalt von 1,0 Litern bis zum oberen Rand gefüllt und mit Hilfe eines verstellbaren Stativs mit befestigtem Kragarm wurden die in den Festigkeitsprüfungen eingesetzten Fasertypen (Basaltrovings, Carbonrovings und Stahleinzelfasern) zwischen 2 dünne Stahlplättchen eingeklemmt und unter den Flüssigkeitsspiegel eingetaucht. Auf die Stahlplättchen wurde ein Streifen Millimeterpapier geklebt, um bei der Auswertung einen Größenbezug ableiten zu können.

Mit einer digitalen Spiegelreflexkamera mit manueller Fokussierung, Type Nikon D70s, wurde der sich einstellende Adhäsionstrichter zwischen Flüssigkeit und dem jeweiligen Fasermaterial fotografisch festgehalten. Die Aufnahmen wurden in einem spitzen Winkel von ca. 10° von oben zur Wasseroberfläche gemacht. Hierzu wurde die Kamera auf einem Stativ befestigt. Als neutraler Hintergrund diente eine Mehrschichtplatte aus Holz mit dunkler Oberfläche.

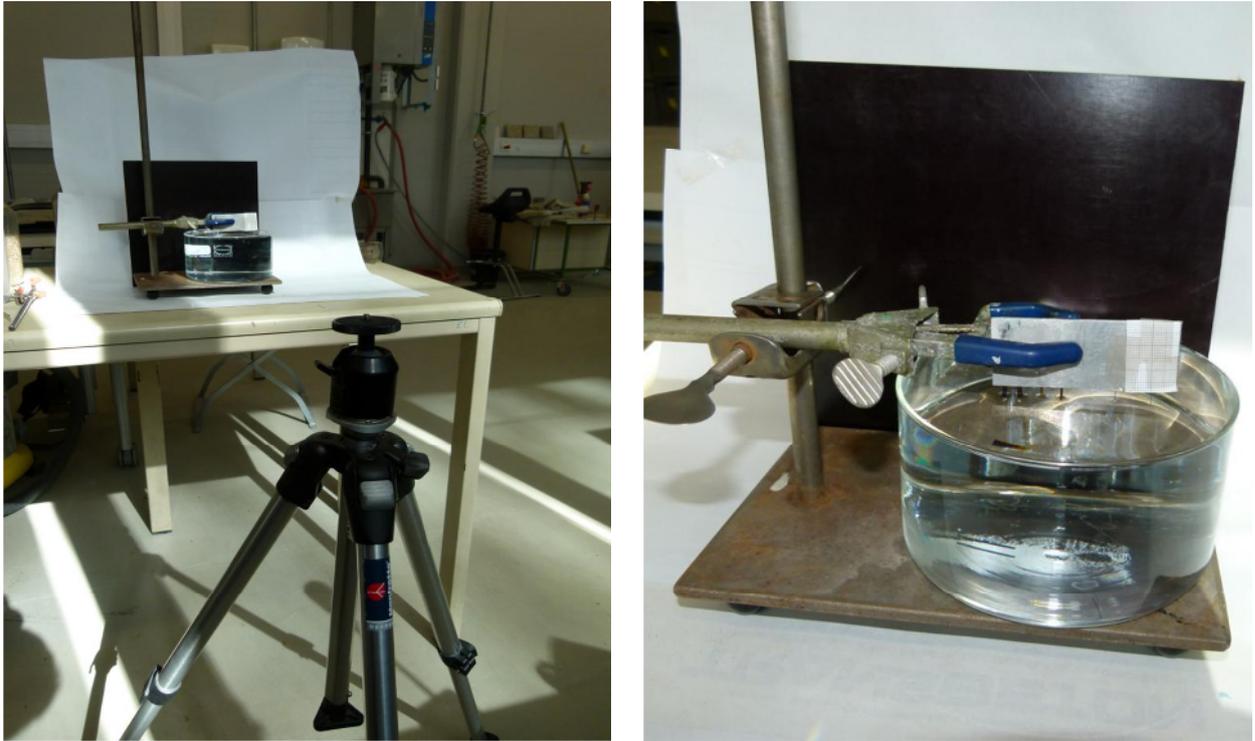


Abbildung 31 Versuchsaufbau

Bei den Abbildungen mit den Basaltfasern ist deutlich erkennbar, dass diese in der Ansicht nach unten hin deutlich schlanker werden. Hierbei handelt es sich aber nicht um eine Verzerrung sondern um eine Beeinflussung der Fasern im Bereich der oberen Einspannung. Die Fasern wurden zur Fixierung zwischen zwei Stahlplättchen geklemmt. An der Messstelle in Höhe der Wasseroberfläche haben die Faserränder der Basaltfasern aber wieder eine vertikale Ausrichtung. Dies fand bei der Feststellung des Kontaktwinkels bereits Berücksichtigung.

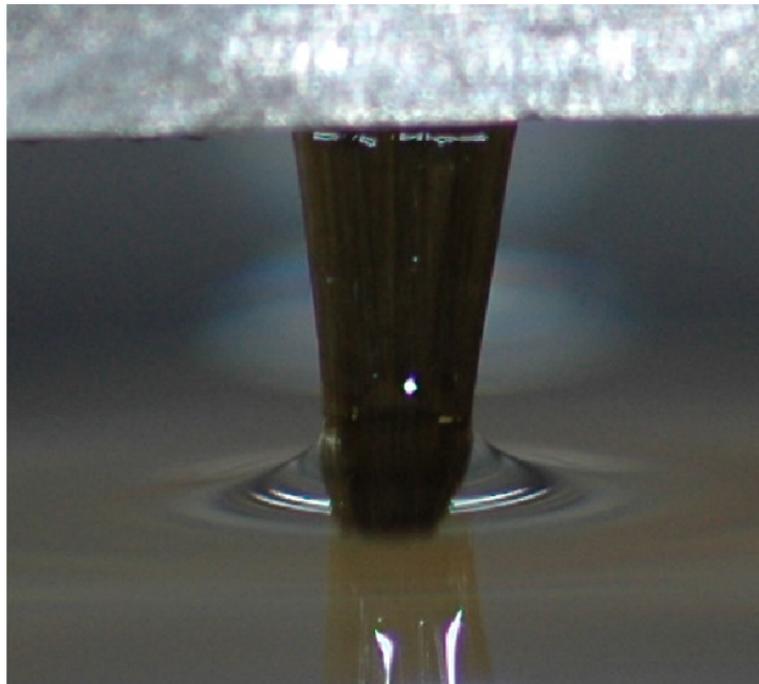


Abbildung 32 Kontaktwinkel Basaltfaserbündel - destilliertes Wasser

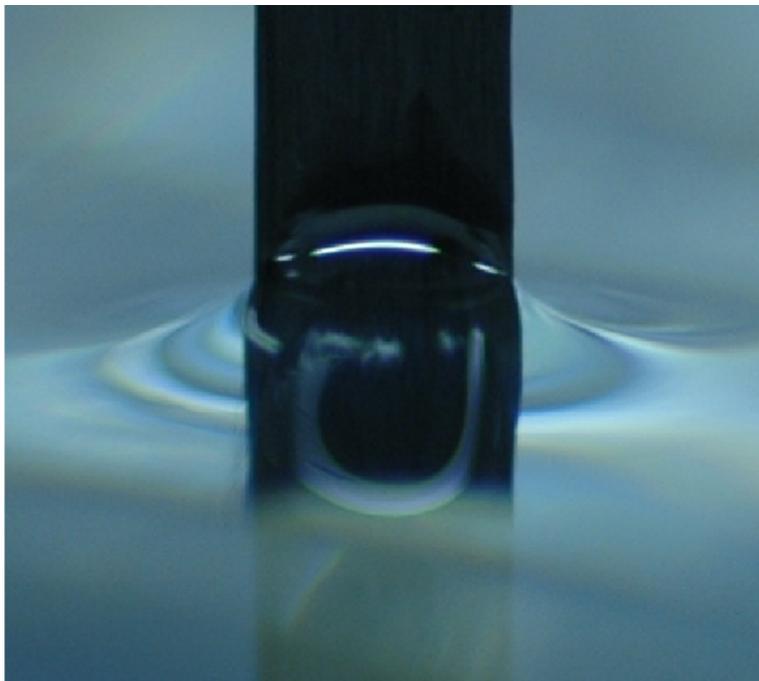


Abbildung 33 Kontaktwinkel Carbonfaserbündel – destilliertes Wasser



Abbildung 34 Kontaktwinkel Stahlfaser – destilliertes Wasser

Aufgrund der geringen Durchmesser der getesteten Stahlfasern von 0,2 mm kann der Randkontaktwinkel nicht gemessen werden. Es können hier lediglich die Konturen des sich ausbildenden Adhäsionstrichters erkannt werden. Anhand der Aufnahmen kann man aber nicht feststellen, in welche Richtung sich der Adhäsionstrichter ausbildet.

Der Kontaktwinkel könnte also durchaus den  $90^\circ$  - Winkel überschreiten. Deshalb wird die Grenzflächenspannung zwischen destilliertem Wasser und Stahl und im Folgenden der Kontaktwinkel  $\gamma_S$  rechnerisch abgeschätzt:

Als Eingangsgrößen sind die Oberflächenenergien von Stahl und destilliertem Wasser aus Recherchen wissenschaftlicher Literatur (5) bekannt. Für die Berechnung ist es notwendig, die Oberflächenenergie des Materials  $\sigma_i$  in einen dispersiven  $\sigma_D$  und einen polaren Anteil  $\sigma_P$  zu unterscheiden.

Oberflächenenergie von destilliertem Wasser:

$$\sigma_W = 72,8 \frac{MN}{m} \quad \sigma_{D,W} = 21,8 \frac{MN}{m} \quad \sigma_{P,W} = 51,0 \frac{MN}{m}$$

Oberflächenenergie von Stahl:

$$\sigma_{St} = 25 \frac{MN}{m} \quad \sigma_{D,St} = 25 \frac{MN}{m} \quad \sigma_{P,St} = 0 \frac{MN}{m}$$

Berechnung der Grenzflächenspannung zwischen Stahl und Wasser mit dem polaren und dem dispersiven Anteil der Oberflächenenergie verschiedener Materialien gem. Formel [3.3]:

$$\gamma_{W,st} = 25 + 72,8 - 2 \cdot (\sqrt{25 \cdot 21,8} + \sqrt{0 \cdot 51}) = 51,11 \frac{MN}{m}$$

Über die Young'sche Beziehung zwischen der Grenzflächenspannung an einem 3-Phasenpunkt und dem Kontaktwinkel, lässt sich der Kontaktwinkel  $\theta$  gem. Formel [3.1] wie folgt ableiten.

$$\theta = \arccos \frac{(25 - 51,11)}{72,8} = 111^\circ$$

Der Kontaktwinkel errechnet sich zu  $111^\circ$  und übersteigt somit den  $90^\circ$ -Winkel. Es müsste also bei den Stahlfasern zu einem Absinken der Flüssigkeit entlang der Faser kommen und sich somit Kapillardepression einstellen.

Diese Erkenntnis ist eine Erklärung für die bessere Verarbeitbarkeit von Beton mit Stahlfasern im Vergleich zu Beton mit Basalt- oder Carbonfaserbündeln bei gleicher Oberfläche, da Stahlfasern rechnerisch eine geringere Oberflächenbenetzung aufweisen.

Um das Berechnungsergebnis des Kontaktwinkels zwischen Stahl und destilliertem Wasser auf Plausibilität überprüfen zu können, soll der Kontaktwinkel von Glas und destilliertem Wasser hier rechnerisch abgeschätzt werden. Das Rechenergebnis soll den aus der Literatur bekannten Werten gegenübergestellt werden. Der Kontaktwinkel destilliertes Wasser – Glas wird auch deshalb errechnet, da aufgrund derselben Materialbasis von Glas und den Basaltfasern Ähnlichkeiten beim Kontaktwinkel vermutet werden.

Oberflächenenergie von Glas nach (5):

$$\sigma_G = 57,6 \frac{MN}{m} \quad \sigma_{D,G} = 32,9 \frac{MN}{m} \quad \sigma_{P,G} = 24,7 \frac{MN}{m}$$

Oberflächenenergie von destilliertem Wasser:

$$\sigma_W = 72,8 \frac{MN}{m} \quad \sigma_{D,W} = 21,8 \frac{MN}{m} \quad \sigma_{P,W} = 51,0 \frac{MN}{m}$$

Die Grenzflächenspannung  $\gamma_{W,G}$  errechnet sich damit nach Formel [3.3] zu:

$$\gamma_{W,G} = 57,6 + 72,8 - 2 \cdot \left( \sqrt{32,9 \cdot 21,8} + \sqrt{24,7 \cdot 51} \right) = 5,85 \frac{MN}{m}$$

Der Kontaktwinkel  $\theta$  leitet sich somit wie folgt nach Formel [3.1] ab:

$$\theta = \arccos \frac{(\sigma_G - \gamma_{W,G})}{\sigma_W}$$
$$\theta = \arccos \frac{(57,6 - 5,85)}{72,8} = 45^\circ$$

Zwischen destilliertem Wasser und Glas stellt sich rechnerisch also ein Kontaktwinkel von  $45^\circ$  ein.

Praktische Untersuchungen (5) haben einen Kontaktwinkel zwischen Glas und destilliertem Wasser von  $55^\circ$  ergeben, der Kontaktwinkel hat sich bei Verwendung einer Wasser-/FM-Mischung auf  $40^\circ$  reduziert.

### 3.4.4 Messergebnisse

Bei der Messung der Kontaktwinkel wurde festgestellt, dass bei der Wasser-/ Fließmittelmischung (zu gleichen Anteilen, wie im 0-Beton) der Kontaktwinkel im Vergleich zu destilliertem Wasser kleiner wird.

Das Fließmittel verbessert die Verarbeitbarkeit des Faserbetons insofern, da es die Oberflächenspannung herabsetzt und somit eine bessere Benetzung der Zementpartikel stattfinden kann. Auch die innere Reibung zwischen den einzelnen Betonkomponenten wird dadurch verringert. (19)

Diese Wirkung wird durch den geringer werdenden Kontaktwinkel in der Versuchsreihe bestätigt.

Im Folgenden sollen Messergebnisse, Rechenergebnisse und Vergleichswerte aus der Literatur in einer Tabelle zusammenfassend gegenübergestellt werden.

MATERIAL	KONTAKTWINKEL $\gamma$ [°]	
	Destilliertes Wasser	Wasser- /FM-Mischung
<b>MESSERGEBNISSE</b>		
<b>Basaltrovings</b>	<b>38</b>	<b>28</b>
<b>Carbonrovings</b>	<b>42</b>	<b>29</b>
<b>Stahleinzelfasern</b>	-	-
<b>VERGLEICHSWERTE</b>		
<b>Glas vgl. (5)</b>	<b>55</b>	<b>40</b>
<b>Glas (errechnet nach 3.4.3)</b>	<b>45</b>	-
<b>Stahl (errechnet nach 3.4.3)</b>	<b>111</b>	-

Tabelle 3 Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen

Der gemessene Kontaktwinkel der Carbonrovings liegt geringfügig über dem Kontaktwinkel der Basaltrovings. So gesehen haben also die Basaltfasern alleine aufgrund ihrer Oberflächenbenetzung geringfügig bessere Voraussetzungen für die Verarbeitbarkeit als die Carbonfasern.

Dieses Ergebnis ist auch ein Hinweis darauf, dass die bei den Mischversuchen festgestellte schlechtere Verarbeitbarkeit der Faserbetonmatrix mit den Basaltrovings nicht durch die Oberflächeneigenschaften der Basaltrovings sondern vielmehr durch die Vergrößerung der zu benetzenden Oberfläche beim Auflösen der Rovings in seine Einzelfasern verursacht wird. Der Zusammenhalt der Carbonrovings während des Mischens erwies sich im Vergleich zu den Basaltrovings als viel besser.

### 3.4.5 Resümee

Zusammenfassend kann in diesem Kapitel festgestellt werden, dass sowohl die Oberflächenbenetzung als auch die Größe der zu benetzenden Oberfläche Einfluss auf die Verarbeitungseigenschaften von Faserbeton hat. Durch die in diesem Kapitel gewonnenen Erkenntnisse ist nun nachvollziehbar, warum Stahlfasern bei hohen Fasergehalten im Vergleich zu Carbonfasern bessere Verarbeitungseigenschaften erzielen. Dies ist auf die Eigenschaften der Oberflächenbenetzung zurückzuführen, da die Benetzung bei Stahl wesentlich geringer ist.

Das Ergebnis der Kontaktwinkelmessungen bringt keinen großen Unterschied zwischen den Basalt- und den Carbonfasern, was wiederum den Hinweis gibt, dass nicht nur die Oberflächenbenetzung das Kriterium für die Verarbeitungseigenschaften darstellt. Denn zwischen den Basalt- und den Carbonfasern konnten hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Ausbreitmaß gravierende Unterschiede festgestellt werden. Die Ursache hierfür muss wiederum im Größenunterschied der zu benetzenden Oberfläche liegen.

Folglich kann man daraus schließen, dass die Vergrößerung der zu benetzenden Oberflächen den Haupteinfluss auf die Verarbeitbarkeit ausübt. Schließlich vergrößerte sich der Umfang bei Auflösen der 150 µm dicken Makrofasern in 200 Einzelfasern von 0,47 mm auf 7,54 mm um das 16-fache, legt man – wie im konkreten Fall vorliegend – einen bandartigen Querschnitt mit einer mittleren Breite von 1 mm und einer Höhe von 12 µm zugrunde, von 2,05 auf 7,54 mm um beinahe das 4-fache.

Die spezifische zu benetzende Oberfläche unter Berücksichtigung der getesteten Fasergehälter vergrößerte sich durch das Auflösen der Basaltfaserbänder um das Doppelte und ist damit 25 mal größer als beim getesteten Carbonfaserbeton bzw. 6 mal größer als beim Stahlfaserbeton. Würden die Basalteinzelfasern in einen kompakten, kreisförmigen Querschnitt integriert, reduziert sich die zu benetzende Oberfläche im Vergleich zu den Basaltfaserbändern auf ca. 15% und wäre somit noch kleiner als beim Stahlfaserbeton.

## 4 Festbetonprüfung

### 4.1 Vorversuche zur Untersuchung der Schubfestigkeit

#### 4.1.1 Versuchsaufbau

Nicht nur die Zug- und Druckfestigkeit von basaltfaserverstärktem UHPC sowie das Ausziehverhalten von Fasern unter Zugbeanspruchung sollte getestet werden, sondern auch das Ausziehverhalten unter latenter Rissuferverschiebung.

Damit eine Aussage hierüber gemacht werden kann, bietet sich die Durchführung von Torsionsversuchen an.

Um eine effiziente Versuchsdurchführung zu ermöglichen, wurden Vorversuche mit bereits vorhandenen stahlfaserbewehrten zylindrischen Bohrkernen aus den UHPC-Fertigmischungen CeraCem (Sika) und Ductal (Lafarge) durchgeführt. Die Zylinder weisen einen Durchmesser von 104 mm und Längen von ca. 44 cm.

Das Bruchbild bei Probekörpern mit kreisrundem Querschnitt zeichnet sich bei Torsionsversagen durch im 45°-Winkel zur Querschnittsachse verlaufende Rissbildung ab.

Ziel der Vorversuche ist es bei einem lokal mit einer Kerbe geschwächten Querschnitt die Bruchfläche in einen Kreisquerschnitt zu bringen. Nach dieser Überlegung sollte sich dann die Bruchfläche normal zur Querschnittsachse einstellen. Man könnte somit das Versagensverhalten der Faserbetonmatrix unter Schubbeanspruchung ermitteln.

Die Aufbringung des Torsionsmomentes erfolgt mit der Torsionsdrehmaschine. Für die Durchführung der Versuche können nur zylindrische Prüfkörper in die Prüfmaschine eingebaut werden. 3 Kardangelenke und eine Aufhängung sorgen dafür, dass es zu keiner ungewollten Einleitung eines Biegemomentes kommt, was die Ergebnisse verfälschen würde.



Abbildung 35 Torsionsdrehmaschine

In die zu prüfenden Zylinder wird ein Torsionsmoment eingeleitet, dessen Größe wird mit einer Kraftmessdose dokumentiert. Die Verdrillung wird mit beidseitig der Kerbe befestigten Drähten, deren Verschiebung mit induktiven Wegaufnehmern in ein Signal umgewandelt wird, gemessen.

Die maximale Torsionsschubspannung kreisförmiger Vollquerschnitte errechnet sich zu:

$$\tau_T = \frac{M_T}{W_T} \quad [4.1]$$

Das Torsionswiderstandsmoment ergibt sich zu:

$$W_T = \frac{\pi}{16} \cdot d^3 \quad [4.2]$$

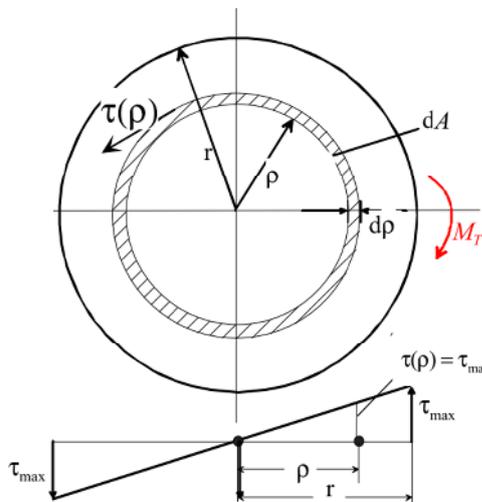


Abbildung 36 Darstellung der Torsionsschubspannungen im Kreisquerschnitt (20)

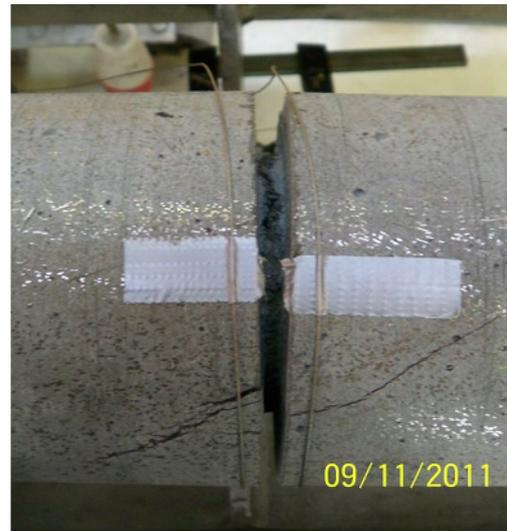


Abbildung 37 Messdrähte beidseitig der Kerbe

#### 4.1.2 Versuchsdurchführung

Zuerst wurden die zwei stahlfaserbewehrten Bohrkern, je einer der Rezepturen Ductal und CeraCem mit einer Steinkreissäge rundum eingeschnitten. Die Prüfkörper wurden dabei unter das, sich in der richtigen Höhenposition befindliche Sägeblatt geführt, bis die Kreismittelpunkte der Probe und des Sägeblattes genau übereinander lagen und in dieser Position um die Achse gedreht.

Die Kerbtiefe der ersten Versuchsreihe wurde mit ca. 6 mm gewählt. Die bearbeiteten Zylinder wurden dann in die Torsionsdrehmaschine eingebaut, sodass sich die Kerbe genau zwischen den beiden Einspannpunkten befand. An beiden Seiten der Kerbe wurde die Verdrehung mit aufgeklebten Messdrähten bestimmt.

Trotz der lokalen Querschnittsschwächung breitete sich die entstehende Bruchfläche nach nur kurzem Verlauf in der Kerbe auf den nicht geschwächten Querschnitt aus.



Abbildung 38 Verlauf der Bruchfläche bei 6 mm Kerbtiefe (CeraCem links und Ductal rechts)

Beim Ductal-Prüfkörper wurde neben der höheren Festigkeit auch ein duktileres Nachbruchverhalten festgestellt, als bei der CeraCem-Probe.

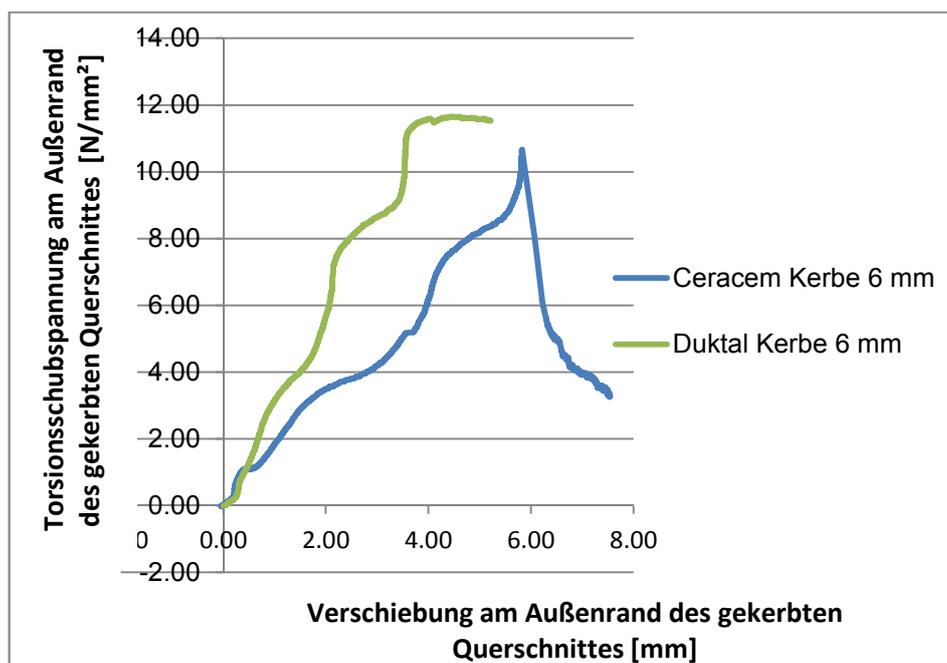


Abbildung 39 Spannungs-Dehnungslinie des Torsionsdrehversuches bei 6 mm Kerbtiefe

In Abbildung 39 sowie in Abbildung 41 gelten die dargestellten Torsionsschubspannungen für den Außenrand des durch die Einkerbung geschwächten Querschnittes, die dargestellte Verschiebung stellt die gemessene Wegdifferenz, die sich beidseitig der Kerbe an der Zylinderoberfläche einstellt, umgerechnet auf den Kerbeninnenradius dar.

Um das gewünschte Ergebnis herbeizuführen, wurden zwei weitere Prüfkörper jeder Mischung untersucht, um festzustellen, ob eine tiefere Kerbe einen wesentlichen Einfluss auf das Bruchverhalten hat. Die Kerbtiefe wurde diesmal mit 18 mm gewählt.

Auch hier trat das gewünschte Ergebnis nicht ein. Die Bruchfläche bildete sich zwar anfangs in der Kerbe aus und verlief auch über eine größere Länge dort, als in den zuvor durchgeführten Versuchen mit der geringeren Einschnitttiefe, breitete sich dann wiederum mit einem Winkel von ca. 45° auf den nicht geschwächten Querschnitt aus.

Hier konnte eine wesentlich höhere Torsionsschubfestigkeit des Ductal-Prüfkörpers, aber dafür eine rascher abfallende Nachbruchfestigkeit beobachtet werden. Die Festigkeitswerte des CeraCem Prüfkörpers sowie der Verlauf der Spannungsdehnungslinie haben in der zweiten Versuchsreihe sich nur unwesentlich geändert.

Die Entstehung der Bruchfläche aufgrund ihrer Beschaffenheit ist nach wie vor auf das typische Hauptzugversagen zurückzuführen und nicht wie erhofft, auf ein reines Scherversagen. Deshalb scheidet diese Methode zur Ermittlung der Auszieheigenschaften des basaltfaserverstärkten Betons unter rissparalleler Schubbeanspruchung aus.

Weitere Untersuchungen wurden aus Zeitgründen nicht durchgeführt.

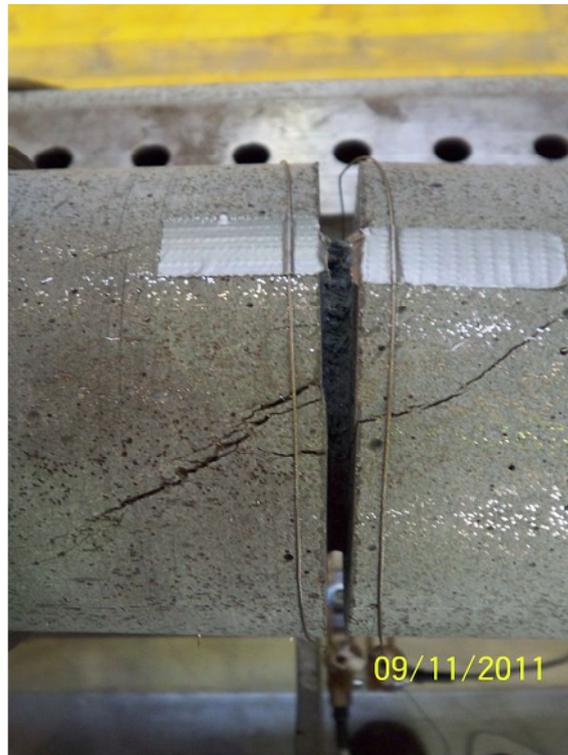


Abbildung 40 Verlauf der Bruchfläche bei 18 mm Kerbtiefe (Ductal)

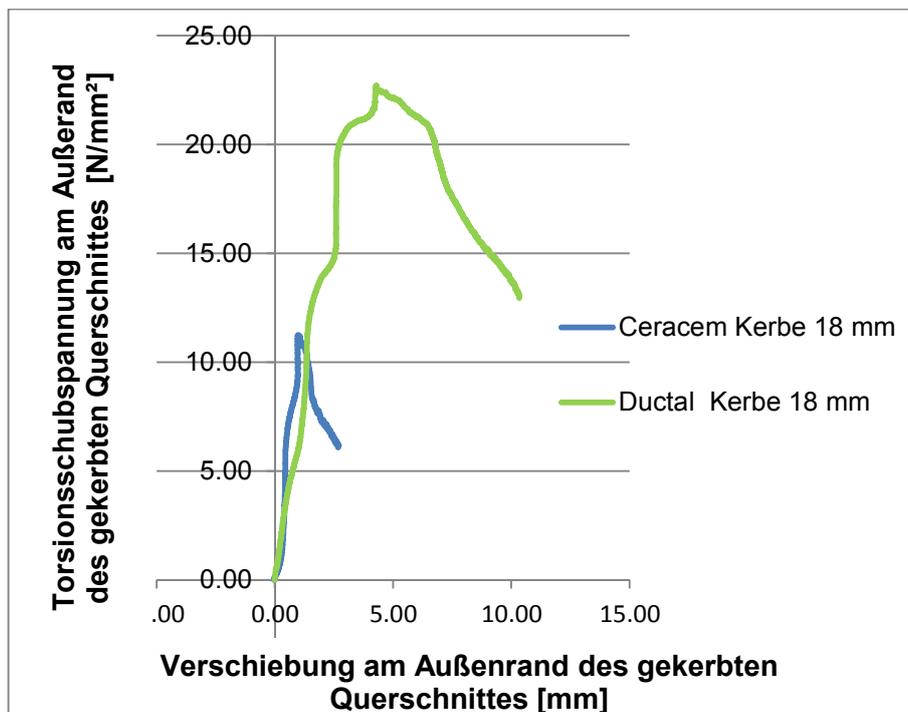


Abbildung 41 Spannungs-Dehnungslinie des Torsionsdrehversuches bei 18 mm Kerbtiefe

## 4.2 Axiale Zug-, Biegezug- und Druckfestigkeit

Bestandteil der Festbetonprüfung war die Ermittlung der axialen Zugfestigkeit, der Biegezugfestigkeit, der Druckfestigkeit sowie des Ausziehverhaltens der Fasern aus der Betonmatrix. Die Versuchsdurchführung erfolgt in Anlehnung an die Zementprüfnorm DIN 196-1.



Abbildung 42 Prismen- und Hundeknochenschalformen

Für die Festbetonherstellung wurden folgende Prüfformen eingesetzt:

- Für die Biegezugversuche wurden mit Prismen gem. DIN 196-1 (Prüfverfahren für Zement) mit den Abmessungen 4x4x16 cm durchgeführt, die nach der Aushärtungszeit einer 3-Punkt-Biegezugprüfung unterzogen wurden. Mit den beiden Hälften wurde anschließend die Druckfestigkeit unter einer Lasteinleitungsfläche von 4x4 cm festgestellt. Für die Biegezugprüfung wurde die Universalprüfmaschine BETA 1000 des LKI eingesetzt. Die Druckprüfung erfolgte mit der Prüfmaschine Toni Technik der TVFA mit 300 kN Maximallast.
- Die Feststellung der axialen Zugfestigkeit erfolgte durch einen hundeknochenförmigen Prüfkörper gem. ASTM C 190/307 mit lokaler Querschnittsverjüngung. An der schwächsten Stelle weist die Form einen Querschnitt von 2,5 x 2,5 cm auf. Auch das Ausziehverhalten wurde mit dieser Form bestimmt. Für die Versuchsdurchführung wurde hier auch die Universalprüfmaschine BETA 1000 des LKI eingesetzt. Das geeignete Spannzeug für die

axialen Zugversuche, aber auch die Biegezugversuche wurde von der HTBLVA Ortweinschule entliehen.



Abbildung 43 Durchführung der Biegezugversuche auf der Universalprüfmaschine BETA 1000



Abbildung 44 Durchführung der Faserausziehversuche auf der Universalprüfmaschine BETA 1000

Die Festbetonprüfungen wurden weggesteuert mit folgenden Prüfungsgeschwindigkeiten durchgeführt:

- Biegezugversuche 0,1 mm/min
- Ausziehversuche 0,1 mm/min
- Axiale Zugversuche 0,1 mm/min

Die Aushärtungszeit betrug bei den durchgeführten Biegezugversuchen, sowie den axialen Zugversuchen und Druckprüfungen 10 Tage, bei den Faserausziehversuchen 7 Tage. Es wurde Bedacht darauf genommen, dass alle Prüfkörper einer Versuchsreihe nach derselben Aushärtungszeit geprüft werden, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

Im Mittelpunkt steht hier die Feststellung der Zugfestigkeiten und der Zugarbeitslinie, nicht aber die Bestimmung der Festigkeitsentwicklung von UHPC. Nach praktischen Untersuchungen von Huy Hoang Kim an UHPC Prüfkörpern steigert sich die Druckfestigkeit von Tag 7 ab Herstellung bis zur 28 Tage-Festigkeit um 20%, die Biegezugfestigkeit nur mehr um 10%.

Nach diesen Zeiträumen ist nur mehr eine sehr geringe, vernachlässigbare Steigerung der Festigkeitseigenschaften zu verzeichnen.

Die Versuchsdurchführung gleichartiger Versuche erfolgt nach der gleichen Aushärtungszeit, somit können die Ergebnisse ohne weitere Anpassung miteinander verglichen werden.

Die einzelnen Messergebnisse, um eine Aussage über die Streuung für die axialen Zugversuche sind in Kapitel 4.2.11 festgehalten.

#### **4.2.1 Basaltfaserbetonmatrix 1,25 Vol.-% und 16 mm Faserlänge (Basaltfaserstandardrezeptur)**

Bei den Biegezugversuchen wurde eine mittlere Biegezugfestigkeit von 12,99 N/mm<sup>2</sup> festgestellt. Nach Erreichen der Materialfestigkeit kam es zum schlagartigen Versagen des Prüfkörpers. Erhofft wurde ein möglichst duktiler Nachbruchverhalten mit einem flach abfallenden Ast der Spannungs-Dehnungslinie nach Erreichen der Höchstlast.

Auch bei Prüfung der axialen Zugfestigkeit kam es zum schlagartigen Versagen. Es konnte eine mittlere axiale Zugfestigkeit von 5,27 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden.

Die mittlere Druckfestigkeit dieser Versuchsreihe wurde mit 103,92 N/mm<sup>2</sup> festgestellt.

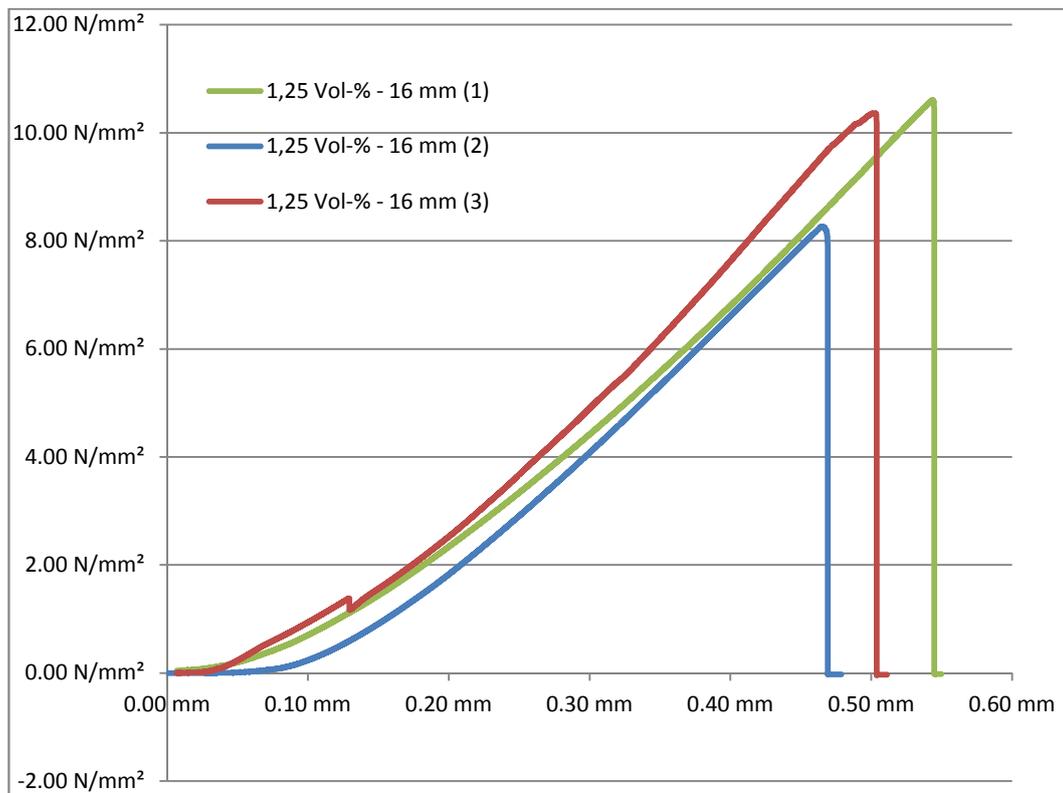


Abbildung 45 Biegezugspannung 1,25 Vol.-% /16 mm

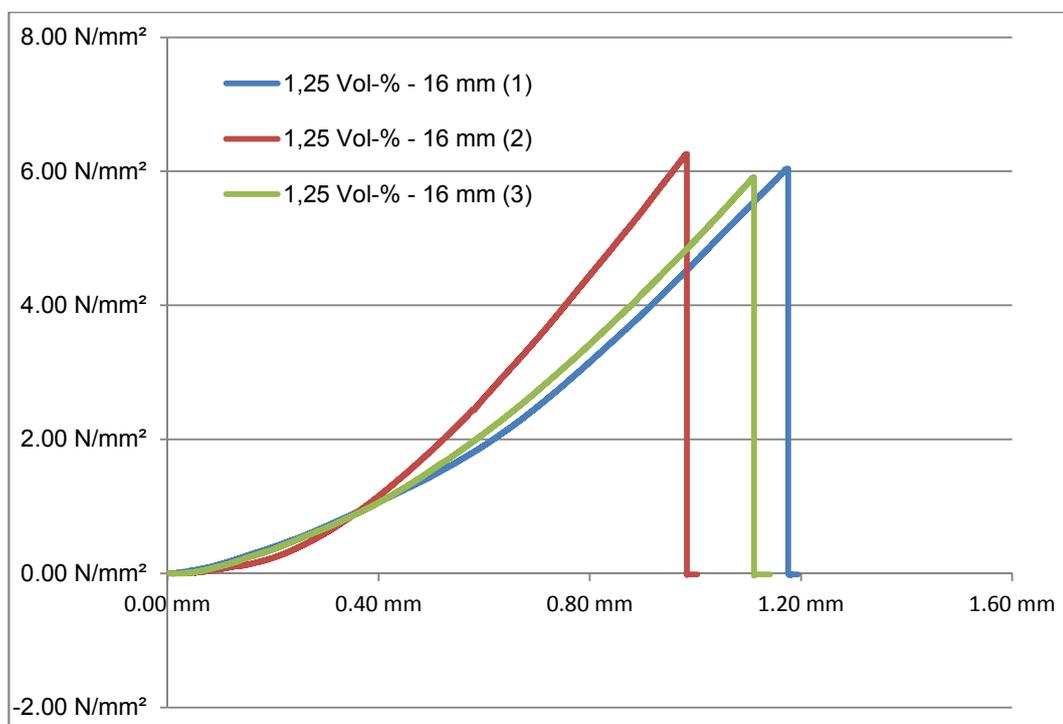


Abbildung 46 Axiale Zugspannung - 1,25 Vol.-% /16 mm

#### **4.2.2 Basaltfaserbetonmatrix 1,25 Vol.-% und 16 mm Faserlänge (+20 % FM, 20 Sec. rütteln)**

Bei der Mischung mit dem um 20% erhöhten Fließmittelgehalt sowie der zusätzlichen Rüttelverdichtung nach dem Einfüllen in die Formen (UHPC-sollte selbstverdichtend wirken) wurde eine um 5 % geringfügig reduzierte mittlere Biegezugfestigkeit von 12,31 N/mm<sup>2</sup> festgestellt. Auch die mittlere Druckfestigkeit hat sich um 4 % auf 99,60 N/mm<sup>2</sup> reduziert.

Hingegen konnte die Zugfestigkeit bei den axialen Zugversuchen um 16 % gegenüber der Standardrezeptur auf 6,09 N/mm<sup>2</sup> gesteigert werden, die axiale Zugfestigkeit hat sich also entgegengesetzt entwickelt. Die Streuung war relativ gering.

Eine Steigerung der Fließmittelzugabe bewirkt also eine geringfügige Reduktion der Festigkeit.

#### **4.2.3 Basaltfaserbetonmatrix 1,25 Vol.-% und 16 mm Faserlänge (Erhöhung des W/B Wertes auf 0,30)**

Im Vergleich zur Standardrezeptur ergibt sich hier eine um 20% reduzierte Druckfestigkeit von 82,88 N/mm<sup>2</sup>, die mittlere Biegezugfestigkeit verkleinert sich um 22% auf 9,75 N/mm<sup>2</sup> die mittlere axiale Zugfestigkeit vergrößert sich aber überraschenderweise um 15% auf 6,07 N/mm<sup>2</sup>. Auch hier hat sich die axiale Zugfestigkeit entgegen der Biegezugfestigkeit erhöht.

Noch stärker als bei einer Fließmittelzugabe verschlechtern sich die Festigkeitseigenschaften bei Erhöhung des W/B-Wertes.

#### **4.2.4 Zwischenresümee**

Aufgrund dieses unbefriedigenden Ergebnisses des schlagartigen Versagens der bisher beschriebenen Vorversuche, wurde das Versuchsprogramm hingehend abgeändert, indem jetzt nur mehr der maximale Fasergehalt (1,25%) für jede Faserlänge (8, 12 und 16 mm) untersucht wird.

In der ursprünglich geplanten Versuchsdurchführung war geplant, 4 Fasergehälter zwischen 0,5% und 1,25% mit den 3 zu Verfügung stehenden Rovinglängen auf deren Eigenschaften zu untersuchen. Allerdings ist es nicht zu erwarten, dass sich durch geringere Fasergehälter die Ergebnisse zum Positiven beeinflussen lassen.

Eine Steigerung des Fließmittelgehaltes sowie des W/B-Wertes hat zu keiner wesentlichen Verbesserung, weder bei den Verarbeitungseigenschaften noch bei den Festigkeiten geführt, es wird im Weiteren mit den Standardrezepturen (Faserbetonmatrix ohne Variation von Fließmittel- bzw. Fasergehalt) operiert.

#### 4.2.5 Basaltfaserbetonmatrix 1,25 Vol.-% und 8 mm Faserlänge.

Die Druckfestigkeit ergibt sich zu 119,35 N/mm<sup>2</sup> nach 10 Tagen, eine Steigerung von 15% gegenüber der 16 mm Standardrezeptur, die Biegezugfestigkeit zu 8,83 N/mm<sup>2</sup> (-32 %) und die axiale Zugfestigkeit zu 5,64 N/mm<sup>2</sup> (+7%).

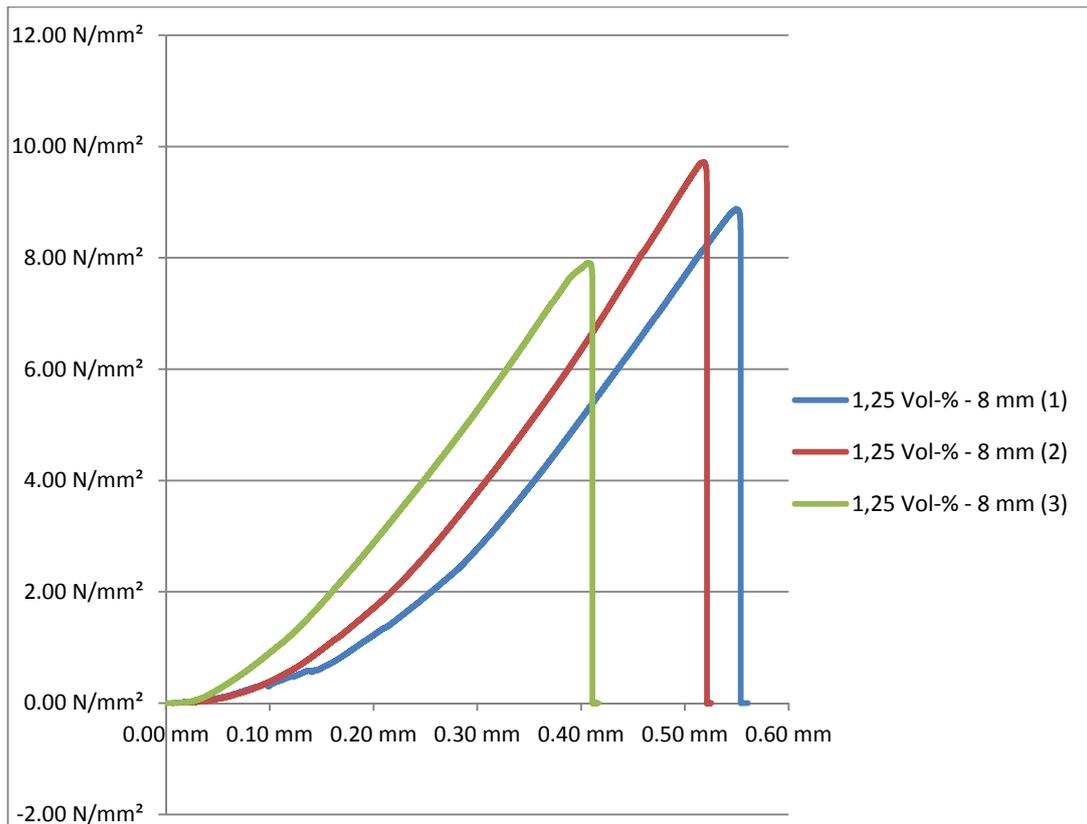


Abbildung 47 Biegezugspannung 1,25/8

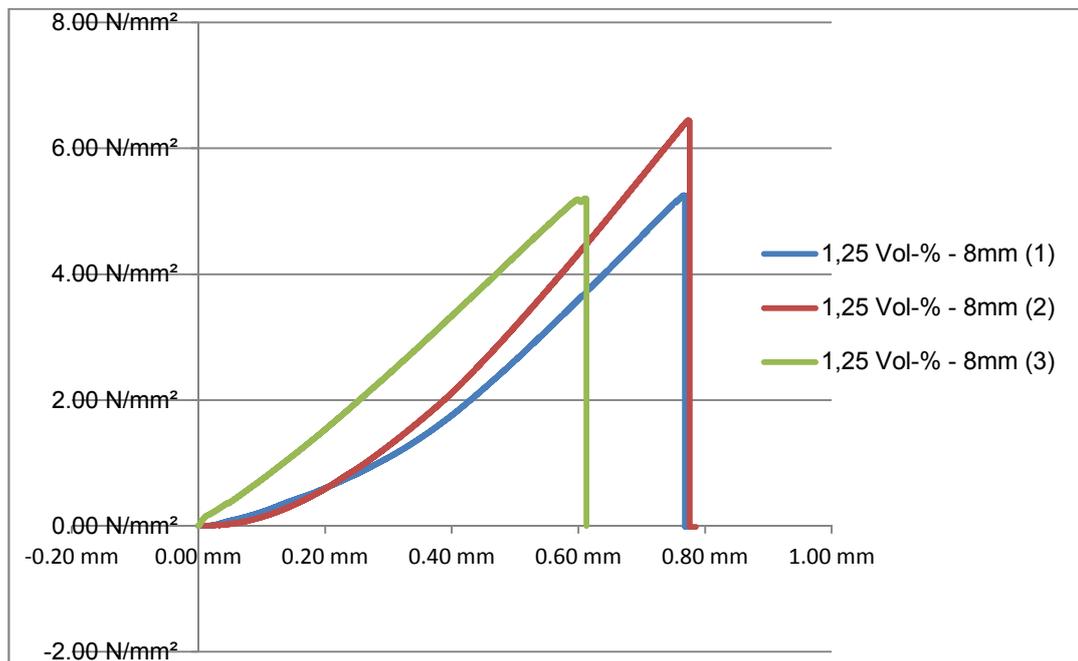


Abbildung 48 Axiale Zugspannung 1,25/8

#### 4.2.6 Basaltfaserbetonmatrix 1,25 Vol.-% und 12 mm Faserlänge.

Bei der Druckfestigkeit von  $119,40 \text{ N/mm}^2$  (+15% gegenüber der 16 mm Standardrezeptur) wurde hier der Maximalwert der gesamten Versuchsreihe erreicht. Allerdings konnten die Werte für die Zugfestigkeiten nicht dementsprechend gesteigert werden. Die Biegezugfestigkeit liegt bei  $9,13 \text{ N/mm}^2$  (-30%) und die axiale Zugfestigkeit konnten mit  $5,20 \text{ N/mm}^2$  festgestellt werden (-1%).

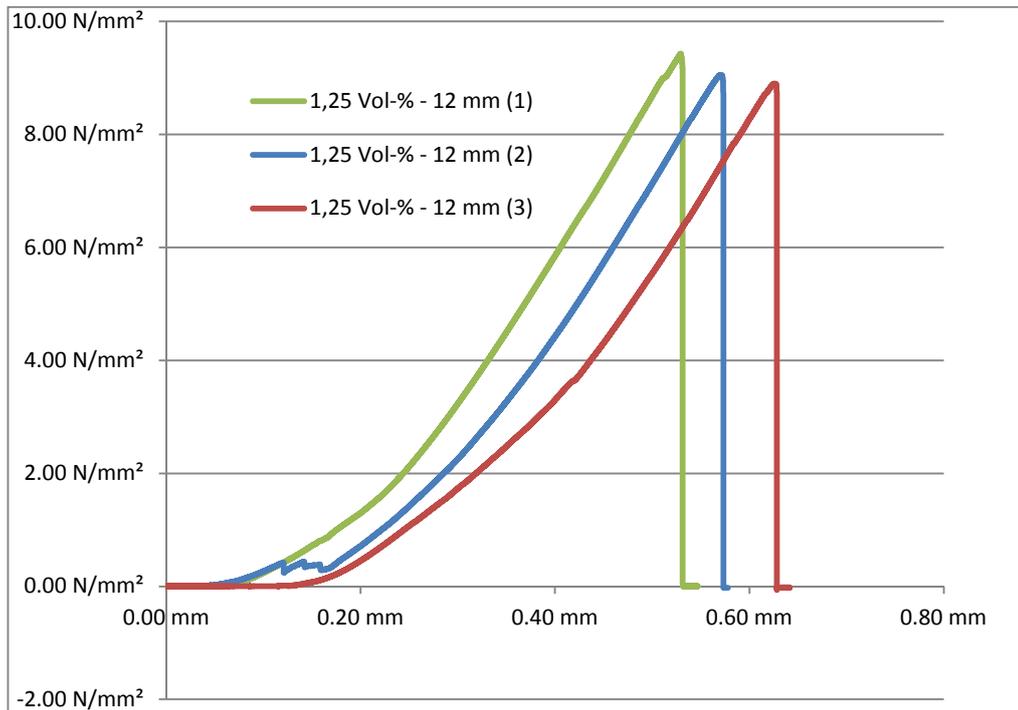


Abbildung 49 Biegezugspannung 1,25/12

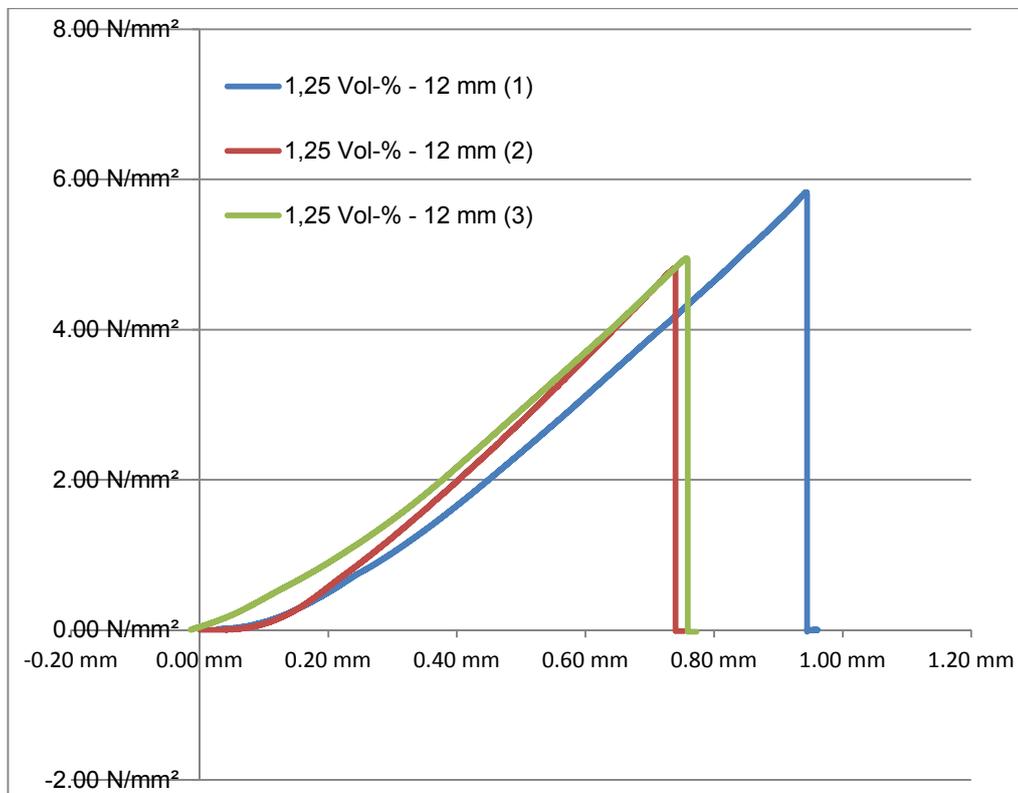


Abbildung 50 Axiale Zugspannung 1,25/12

#### 4.2.7 Zwischenresümee

Aufgrund der Streuungen der Versuchsergebnisse kann nicht eine Faserlänge als die optimale festgelegt werden. Das liegt wahrscheinlich auch daran, dass die Fasern nicht ausgezogen werden, sondern in der Nähe der Betonbruchebene (aber nicht unmittelbar in der Betonbruchebene) abreißen. Erst bei einem Ausziehen der Faser würde die Faserlänge ins Spiel kommen.

Das Versuchsergebnis wirft auch die Frage auf, warum kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der axialen Zugfestigkeit und der Biegezugfestigkeit ableitbar ist.

Durch lokale Vergrößerung der Spannungs-Dehnungslinien der Biegezugprüfungen soll durch Vergleich im linear steigenden Bereich und im Bereich kurz vor dem Versagen eruiert werden, ob eine Faseraktivierung vor dem Versagen eintritt.

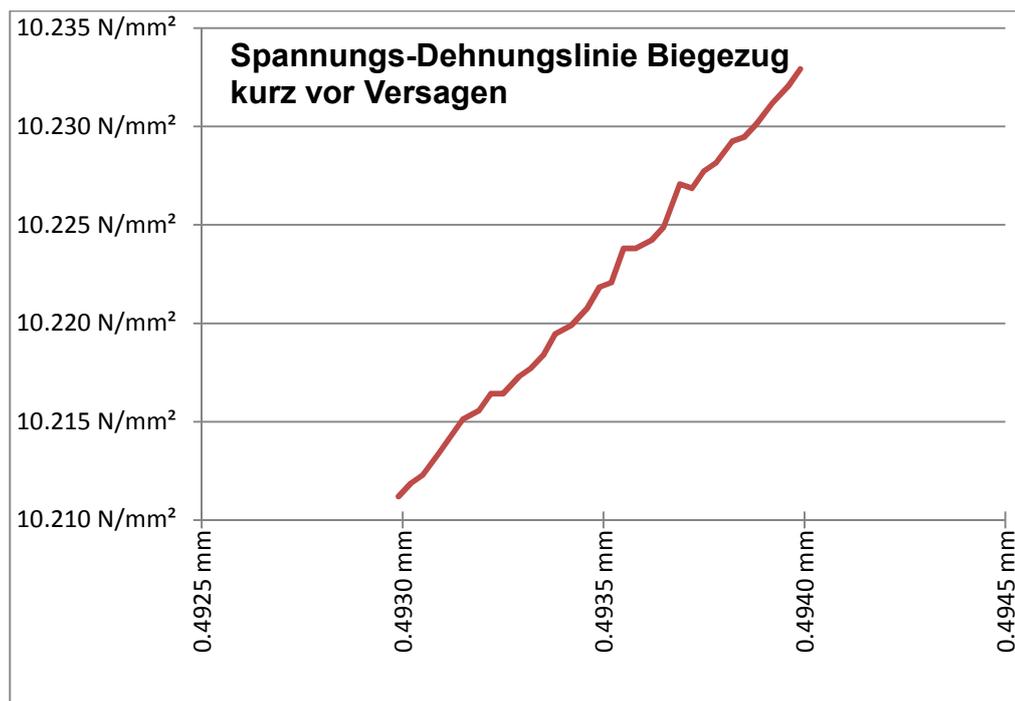


Abbildung 51 Spannungs-Dehnungslinie Biegezug kurz vor Versagen

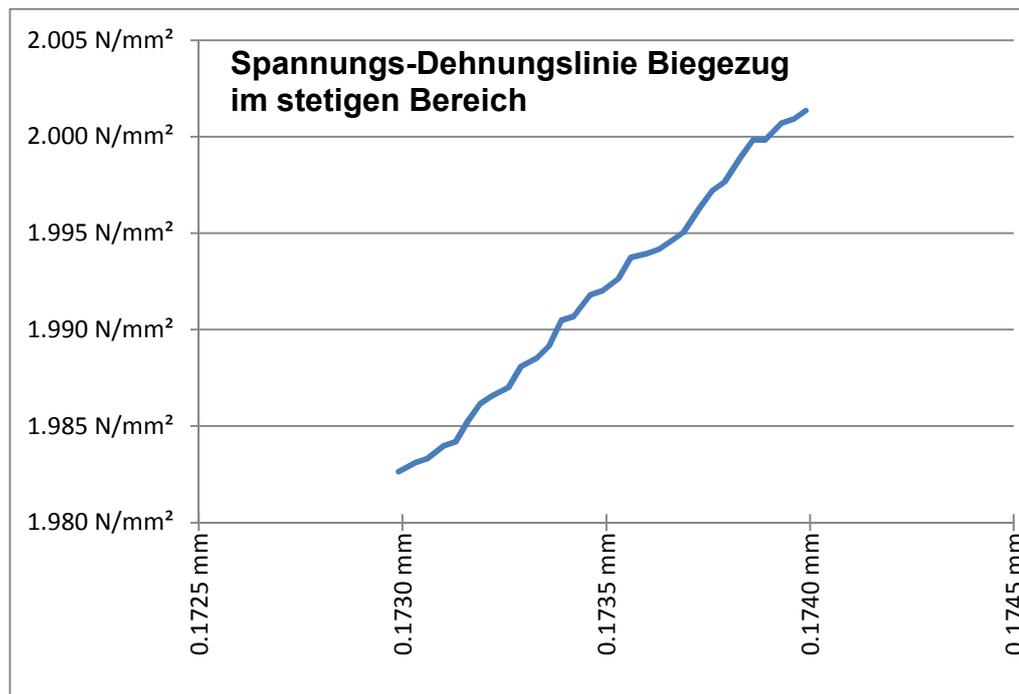


Abbildung 52 Spannungs-Dehnungslinie Biegezug im stetigen Bereich

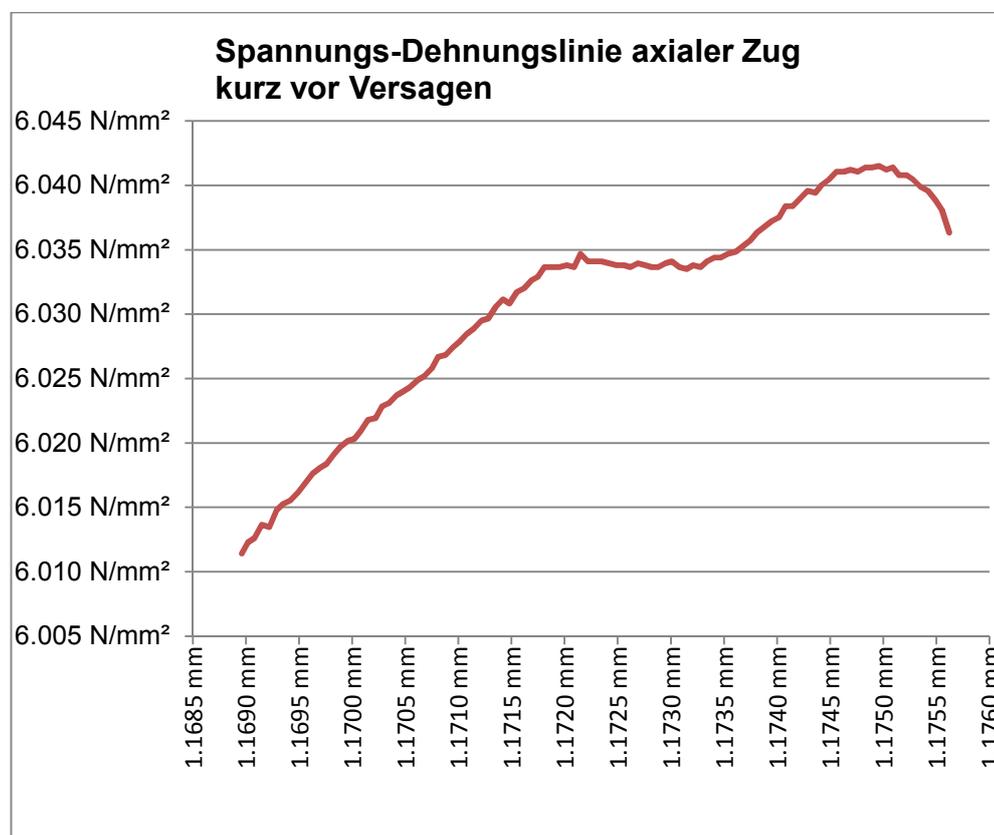


Abbildung 53 Spannungs-Dehnungsverlauf axialer Zug kurz vor Versagen

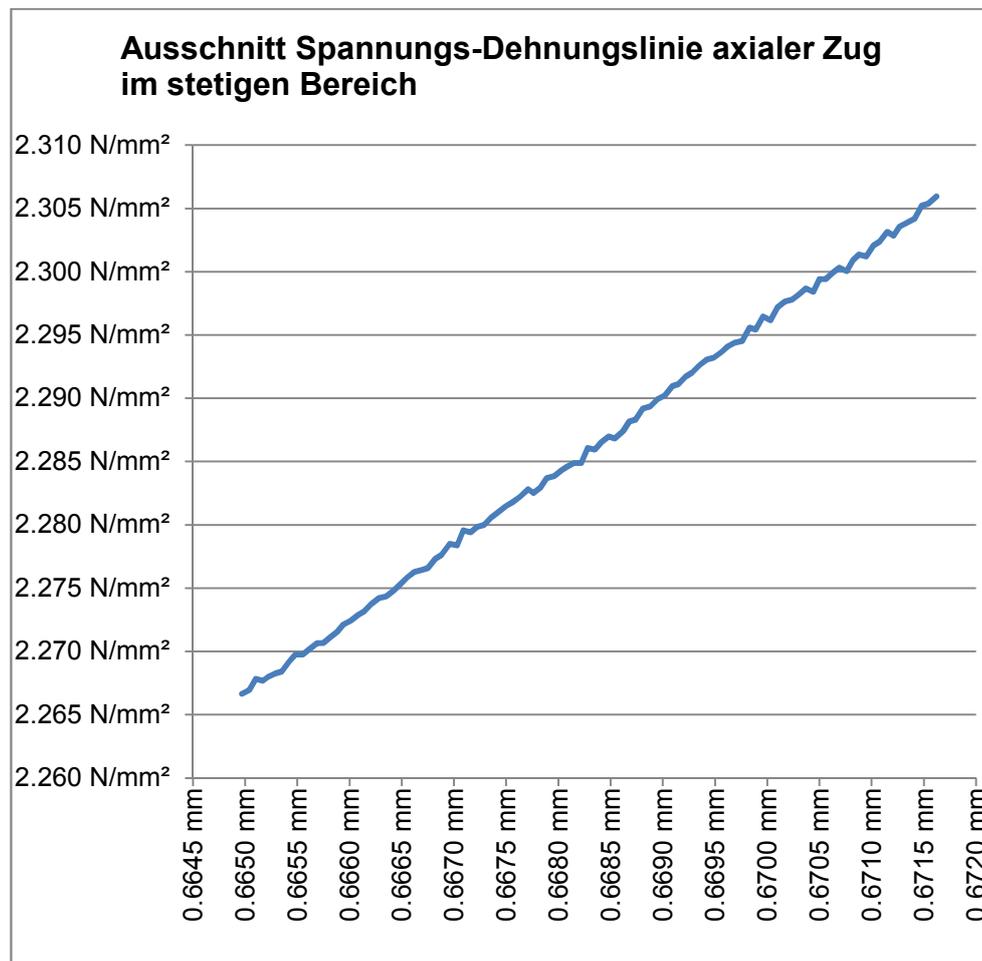


Abbildung 54 Spannungs-Dehnungslinie axialer Zug im stetigen Bereich

Bei Vergleich von Abbildung 51 (Biegezugspannungs-/dehnungslinie kurz vor dem Versagen) mit Abbildung 52 (Biegezugspannungs-/dehnungslinie im stetigen Bereich) und Abbildung 53 (axiale Zugspannungs-/dehnungslinie kurz vor dem Versagen) mit Abbildung 54 (axiale Zugspannungs-/dehnungslinie im stetigen Bereich) können bei der qualitativen Betrachtung (Beobachtung von Stetigkeit und Steigungswinkel) keine wesentlichen Unterschiede festgestellt werden.

Einzig beim axialen Zugversuch kann kurz vor dem Versagen für ein sehr kleines Wegstück eine lokale Abflachung der Spannungs-/Dehnungslinie festgestellt werden.

In Anbetracht der Tatsache, dass sich der Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie des Betons sowohl bei den axialen Zugversuchen als auch bei den Biegezugversuchen bei Betrachtung in vergrößertem Maßstab nicht wesentlich ändert, wird davon ausgegangen, dass eine Faseraktivierung vor dem plötzlichen Versagen nicht eintritt.

#### 4.2.8 0-Beton

Um die Ergebnisse der Basaltfaserbetonmatrix mit den Ergebnissen von faserlosem UHPC vergleichen zu können, der unter denselben Randbedingungen hergestellt wird, wurde auch eine faserlose UHPC-Mischung (0-Beton) mit denselben Herstellungs- und Prüfkriterien getestet.

Eine Steigerung der Druckfestigkeit ist durch den Einsatz der Basaltfasern im Beton nicht möglich gewesen. Die Druckfestigkeit des 0-Betons liegt im Bereich des getesteten Basaltfaserbetons, allerdings konnte sowohl eine erhöhte Biegezugfestigkeit, als auch eine höhere axiale Zugfestigkeit des basaltfaserbewehrten Betons gegenüber dem 0- Beton festgestellt werden. Beide Zugfestigkeiten der Basaltfaserbetone mit den verschiedenen Faserlängen lagen höher im Vergleich zum 0-Beton, die Biegezugfestigkeit zwischen 24 % und 82 % und die axiale Zugfestigkeit zwischen 26% und 47 %.

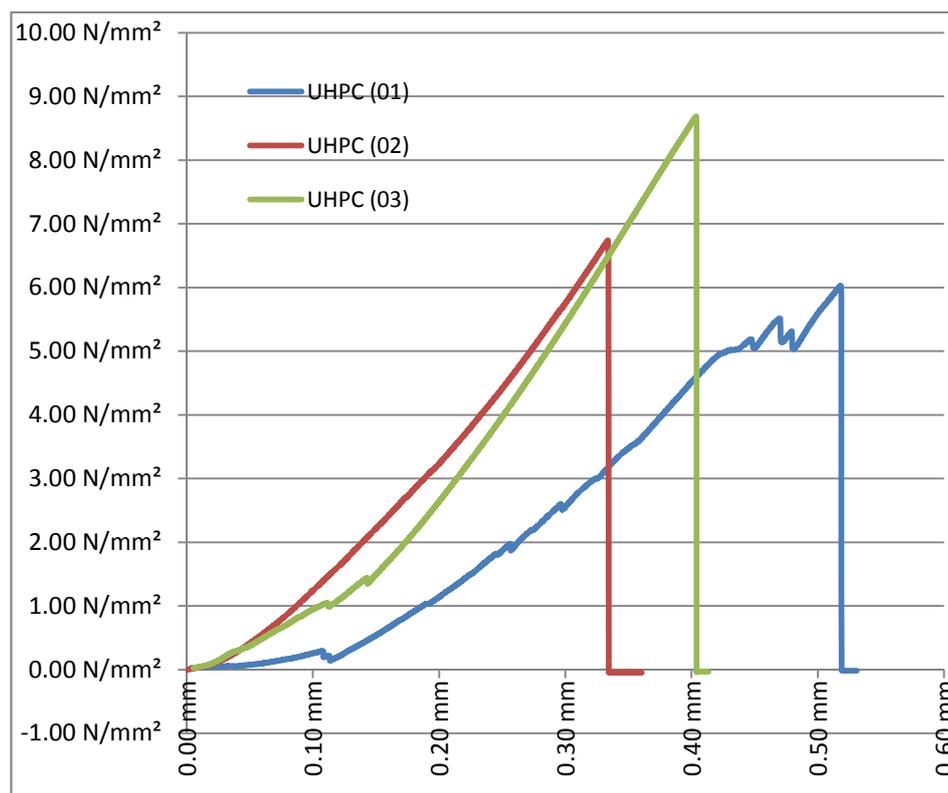


Abbildung 55 0-Beton Biegezugfestigkeit

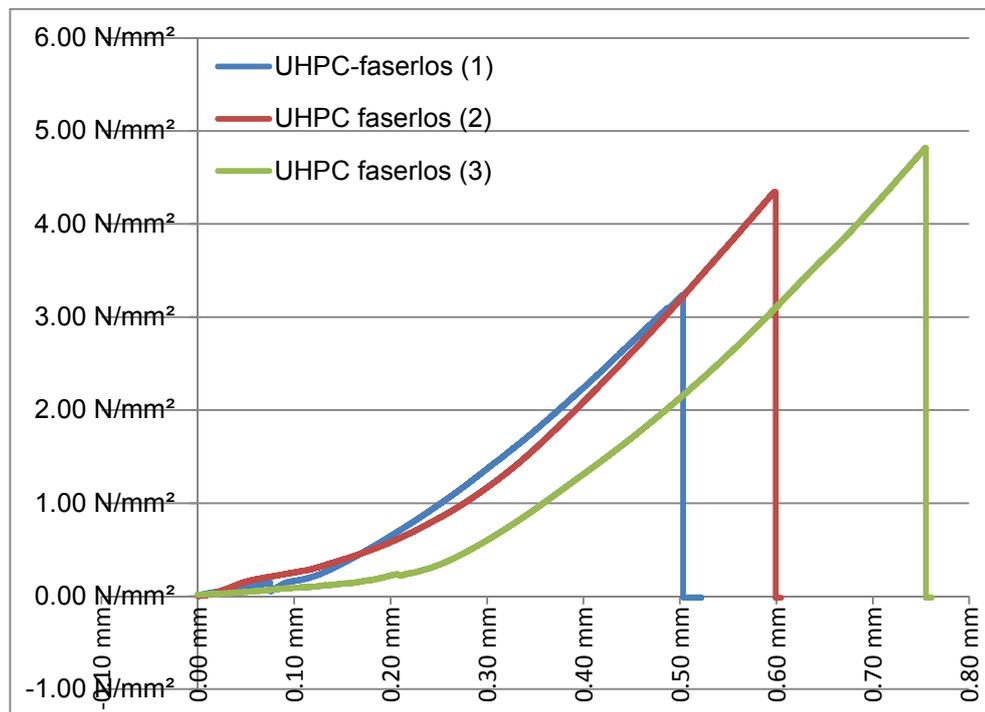


Abbildung 56 0-Beton axiale Zugfestigkeit

#### 4.2.9 Stahlfaserbeton 2,50 Vol.-% und 6 mm Faserlänge

Um auch mit anderen Fasertypen einen Vergleich ziehen zu können, wurden dieselben Versuche auch mit stahlfaserbewehrtem Beton durchgeführt. Hierzu wurde von einer anderen Versuchsreihe der für die Prüfungen notwendige Beton abgezweigt. Es muss an dieser Stelle allerdings erwähnt werden, dass es sich bei der Betonrezeptur nicht um die bisher eingesetzte UHPC-Standardrezeptur handelt, sondern um eine DORSICEM Fertigmischung. Die Stahlfasern wiesen eine Länge von 6 mm und einen Durchmesser von 0,175 mm auf bei einem Fasergehalt von 2,5 Vol.-%.

Hinsichtlich Zugfestigkeit und Nachbruchverhalten wies die Stahlfaserbetonmatrix wesentlich bessere Eigenschaften auf. Die mittlere erreichte Biegezugfestigkeit der Versuchsreihe liegt bei 23,75 N/mm<sup>2</sup> (+83% gegenüber der Basaltfaserstandardrezeptur) und die mittlere axiale Zugfestigkeit bei 7,03 N/mm<sup>2</sup> (+34%).

Die Resultate der Druckfestigkeit waren allerdings weniger zufriedenstellend, lag diese nur bei 89 N/mm<sup>2</sup> und somit nur bei 75 % der mittleren Druckfestigkeit des 0-Betons. Dies ist allerdings dadurch zu begründen, dass die Prüfflächen der getesteten Stahlfaserbetonproben eine gewisse

Unebenheit aufwies, was wiederum zu niedrigeren und damit nicht unmittelbar vergleichbaren Ergebnissen führt.

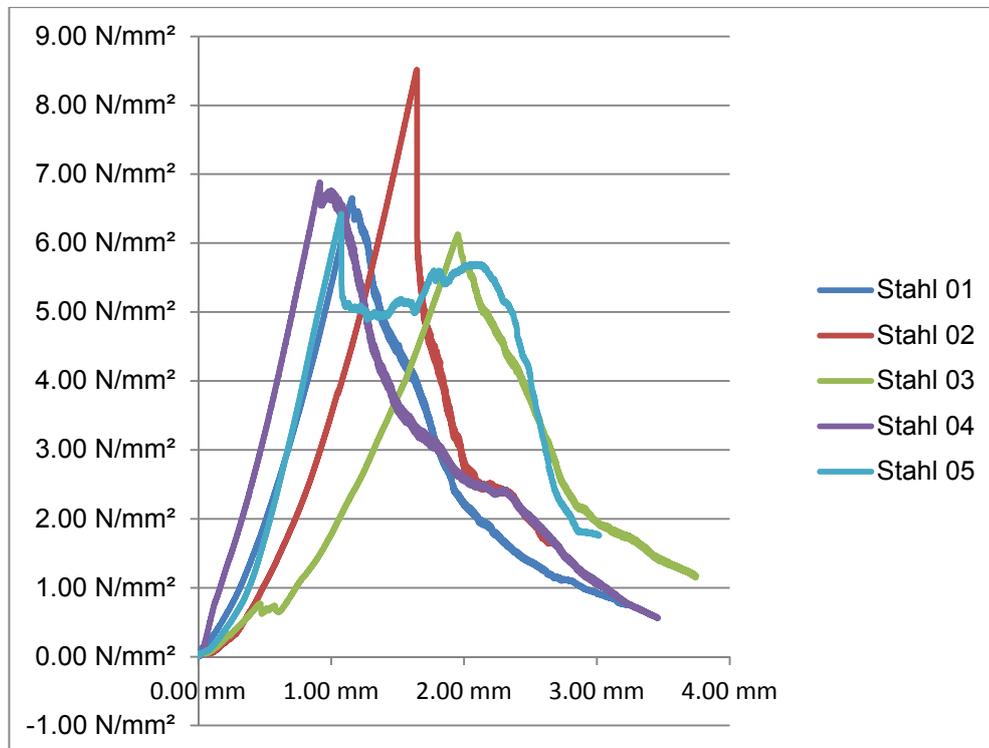


Abbildung 57 Stahlfaserbeton axiale Zugfestigkeit 2,50 Vol.-% / 6mm

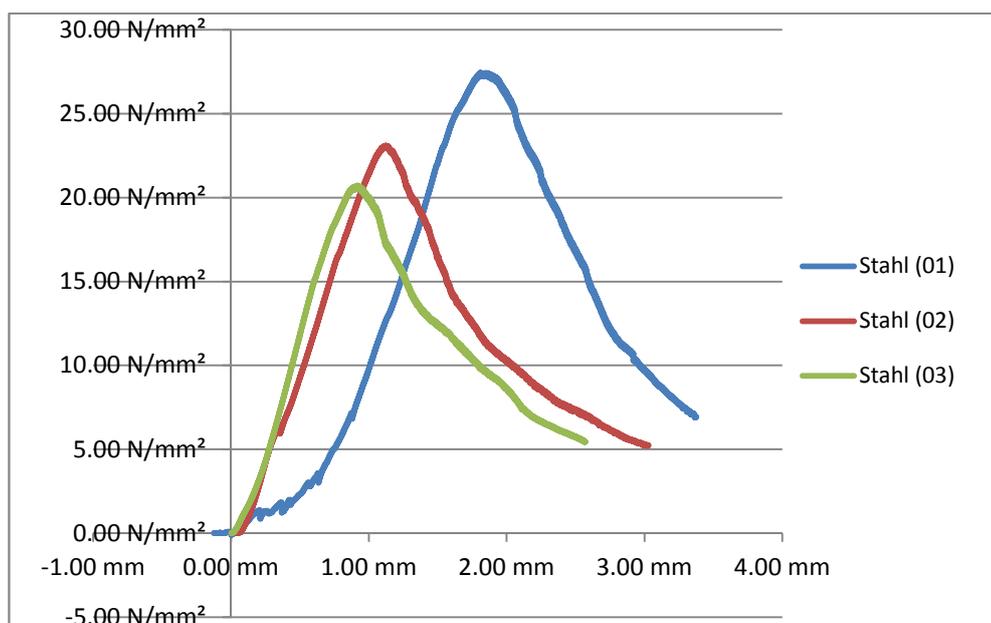


Abbildung 58 Stahlfaserbeton Biegezugfestigkeit 2,50 Vol.-% / 6mm

#### 4.2.10 Carbonfaserbeton 2,0 Vol.-% und 9 mm Faserlänge

Auch Referenzversuche mit Carbonfasern wurden durchgeführt. Es handelt sich hierbei um Carbonmakrofasern mit einem annähernd rechteckigen Querschnitt mit einer Höhe von ca. 0,3 mm und einer Breite von ca. 1,3 mm, die Einzelfasern haben einen Durchmesser von 30  $\mu\text{m}$ . Auch hier handelt es beim verwendeten Beton nicht um die Standardrezeptur, sondern um eine NANODUR Fertigmischung. Die eingesetzten Carbonfasern wiesen eine Länge von 9 mm auf und der Fasergehalt lag bei 2 Vol.-%. Es muss hier erwähnt werden, dass auch die Carbonrovings den Mischprozess nicht unbeschadet überstanden haben. Es ist hier auch zum teilweisen Auflösen der Rovings gekommen, allerdings sind vergleichsweise viele Bündel in ihrer ursprünglichen Form erhalten geblieben.

Die Versuche mit den Carbonfasern wurden von Huy Hoang Kim durchgeführt.

Es wurde lediglich nur ein vergleichbarer Biegezugversuch mit der in der Zementprüfnorm DIN 196-1 definierten Prismenform 4x4x16 durchgeführt. Die Biegezugfestigkeit liegt mit 13,95 N/mm<sup>2</sup>, 7% über der mittleren Biegezugfestigkeit der Basaltfaser-Standardrezeptur (16 mm, 1,25%)

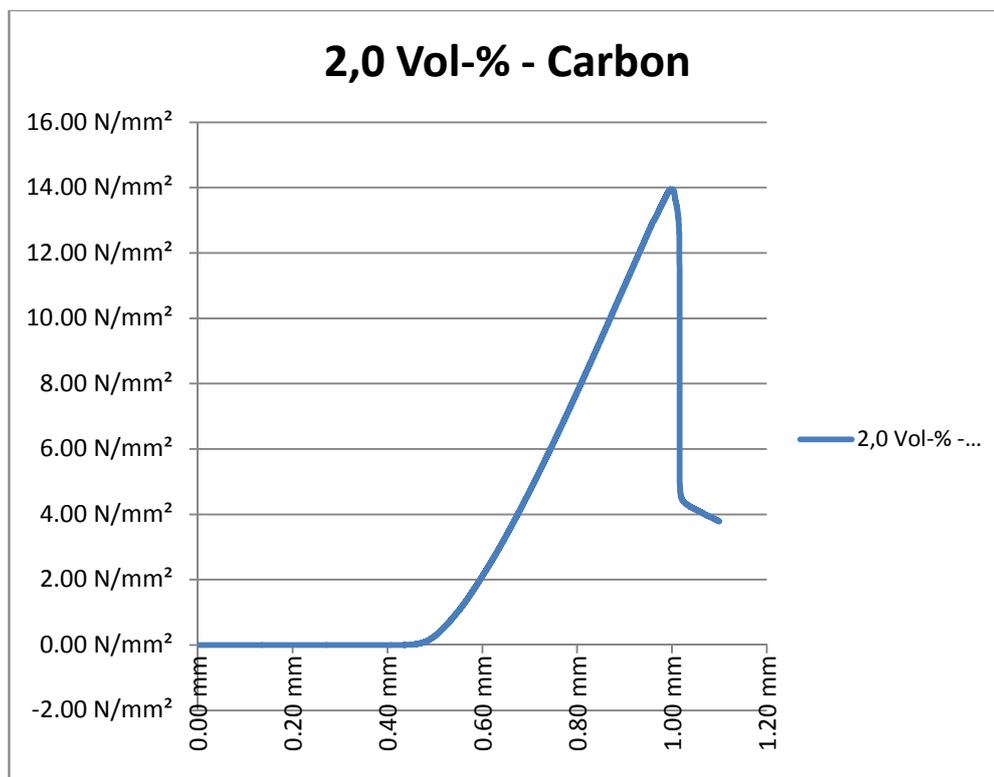


Abbildung 59 Carbonfaserbetonmatrix (9 mm, 2% - Biegezugfestigkeit)

Das Spannungs-Wegdiagramm zeigt einen radikalen Spannungsabfall nach Erreichen der Höchstlast, ein schlagartiges Versagen bleibt hier aber aus. Eine Restfestigkeit von ca. 30% der Höchstlast stellt sich nach dem Spannungsabfall ein.

Axiale Zugversuche mit Hundeknochenformen sowie Druckfestigkeitsprüfungen wurden mit den Carbonfasern nicht durchgeführt.

#### 4.2.11 Zusammenfassung der axialen Zugfestigkeitseigenschaften in [N/mm<sup>2</sup>]

Axiale Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	0-Beton	Basalt 8 mm, 1,25%	Basalt 12 mm, 1,25%	Basalt 16 mm, 1,25%	Basalt 16 mm, 1,25% (60mg)	16 mm, 1,25% (Fasern vorher angefeuchtet; W/Z 0.30)	Stahl DORSICEM 6 mm, 2,5%
1	3.24	5.26	5.83	4.838	6.136	6.04	6.65
2	4.35	6.45	4.82	5.678	6.034	6.26	8.52
3	4.82	5.21	4.95	5.281	6.098	5.91	6.13
4							6.88
5							6.43
6							7.58
<b>Mittelwert</b>	<b>4.14</b>	<b>5.64</b>	<b>5.20</b>	<b>5.27</b>	<b>6.09</b>	<b>6.07</b>	<b>7.03</b>
<b>Verhältnis</b>	<b>100%</b>	<b>136%</b>	<b>126%</b>	<b>127%</b>	<b>147%</b>	<b>147%</b>	<b>170%</b>
<b>Aushärtungszeit in Tagen</b>	10	10	10	10	10	10	10

Tabelle 4 Zusammenstellung der erreichten axialen Maximalzugspannungen in [N/mm<sup>2</sup>]

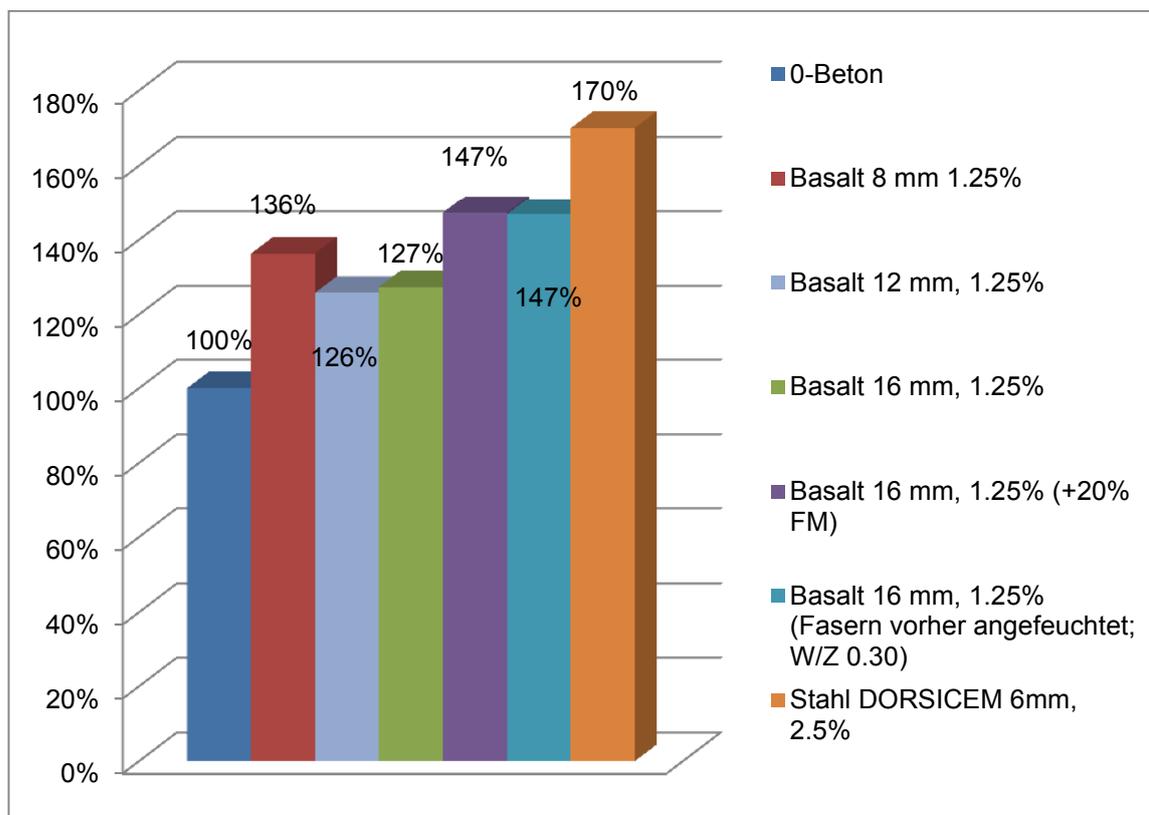


Abbildung 60 Zusammenfassung der maximalen, axialen Zugfestigkeiten im Säulendiagramm

#### 4.2.12 Zusammenfassung der maximalen Biegezugfestigkeitseigenschaften in [N/mm<sup>2</sup>]

Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	0-Beton	Basalt 8 mm, 1.25%	Basalt 12 mm, 1.25%	Basalt 16 mm, 1.25%	Basalt 16 mm, 1.25% (+20% FM)	Basalt 16 mm, 1.25% (Fasern anfeuchten, W/Z: 0.30)	Stahl DORSICEM 6mm, 2.5%	Carbon NANODUR 6mm, 2.0%
1	6.03	8.88	9.43	12.02	13.32	10.61	27.44	13.95
2	6.74	9.72	9.05	11.77	12.81	8.26	23.09	
3	8.69	7.90	8.90	15.17	10.8	10.37	20.72	
<b>Mittelwert</b>	<b>7.15</b>	<b>8.83</b>	<b>9.13</b>	<b>12.99</b>	<b>12.31</b>	<b>9.75</b>	<b>23.75</b>	<b>13.95</b>
<b>Verhältnis</b>	<b>100 %</b>	<b>124 %</b>	<b>128 %</b>	<b>182 %</b>	<b>172%</b>	<b>136%</b>	<b>332%</b>	<b>195%</b>
<b>Zeit [d]</b>	10	10	10	10	10	10	10	8

Tabelle 5 Zusammenstellung der erreichten maximalen Biegezugspannungen in [N/mm<sup>2</sup>]

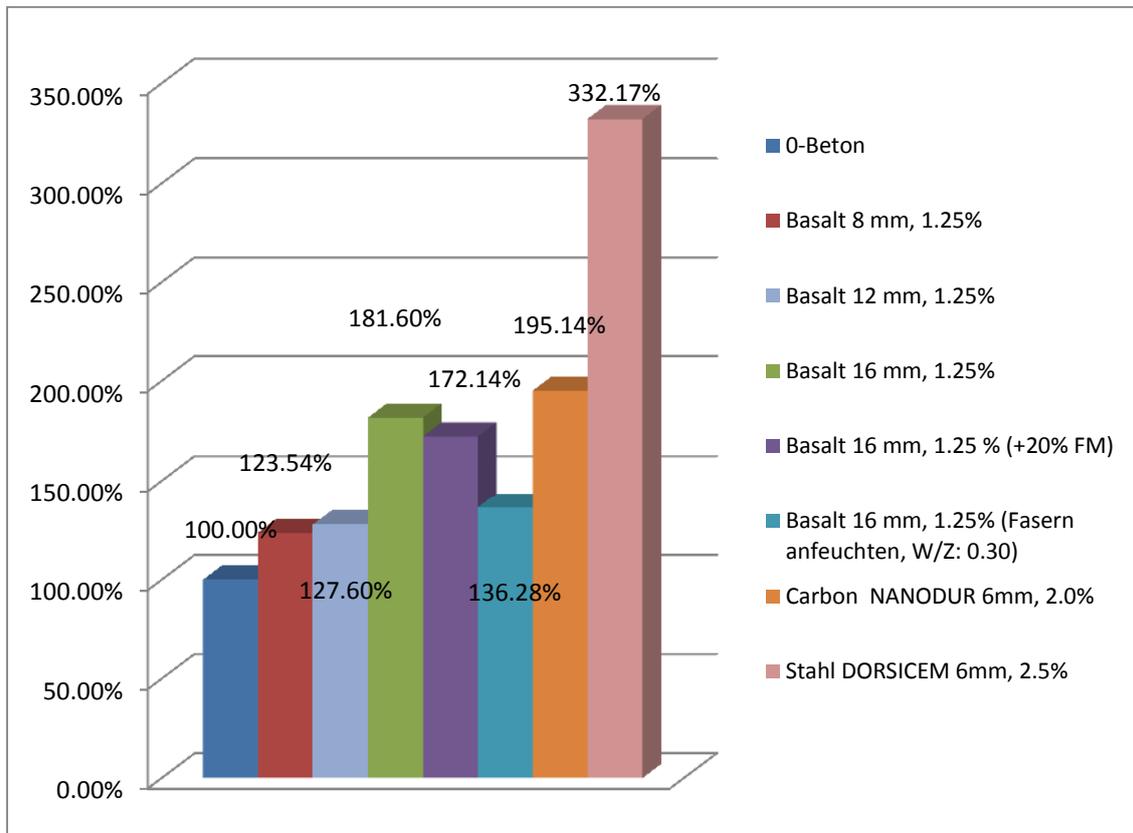


Abbildung 61 Zusammenfassung der maximalen Ausziehfestigkeiten im Säulendiagramm

4.2.13 Zusammenfassung der maximalen Druckfestigkeitseigenschaften in [N/mm<sup>2</sup>]

Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	0-Beton	Basalt 8 mm, 1.25%	Basalt 12 mm, 1.25%	Basalt 16 mm, 1.25%	Basalt 16 mm, 1.25 % (+20% FM)	Basalt 16 mm, 1.25% (Fasern anfeuchten, W/Z: 0.30)	Stahl DORSICEM 6mm, 2.5%
1	129	127	117	106	90	76	82
2	124	108	134	113	104	101	95
3	110	106	115	111	86	63	104
4	109	137	111	112	108	92	74
5				80	99		
6				101	110		
<b>Mittelwert</b>	<b>118</b>	<b>119</b>	<b>119</b>	<b>104</b>	<b>100</b>	<b>83</b>	<b>89</b>
<b>Verhältnis</b>	<b>100%</b>	<b>101%</b>	<b>101%</b>	<b>88%</b>	<b>85%</b>	<b>70%</b>	<b>75%</b>
<b>Zeit [d]</b>	10	10	10	10	10	10	10

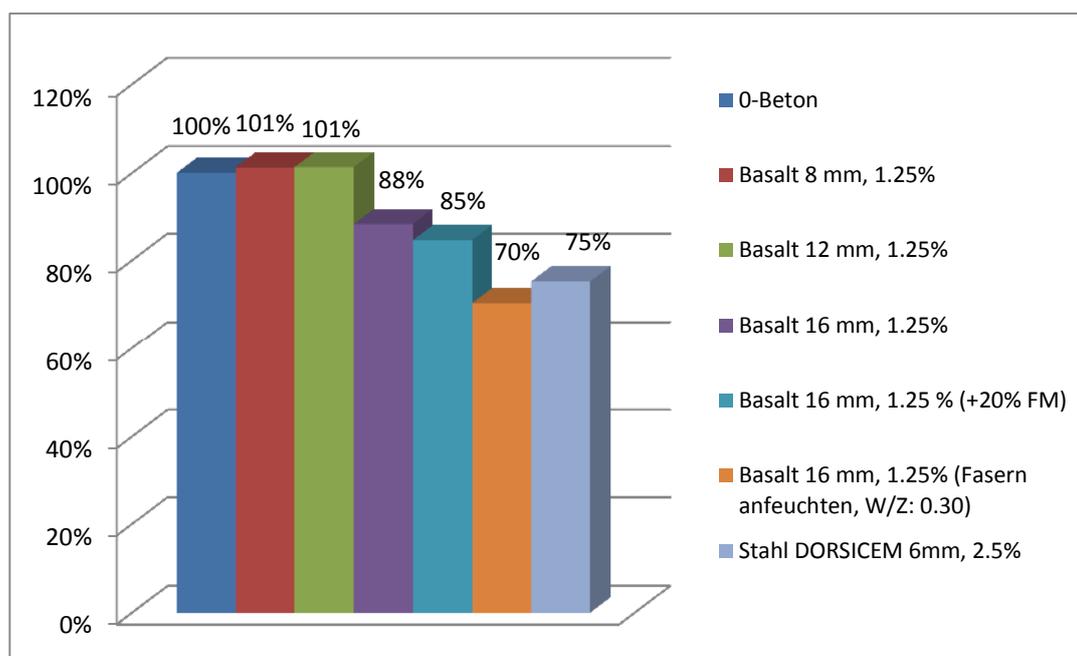
Tabelle 6 Zusammenstellung der erreichten Druckfestigkeiten [N/mm<sup>2</sup>]

Tabelle 7 Zusammenfassung der maximalen Druckfestigkeiten im Säulendiagramm

#### 4.2.14 Zusammenfassung der Ergebnisse

Aufgrund des quasi nicht vorhandenen Nachbruchverhaltens eignen sich die Basaltfaserbündel in ihrer derzeitigen Beschaffenheit nicht für die praxistaugliche Verwendung in UHPC.

Die Ursache dieses Problems wird dem schlechten Zusammenhalt der Basaltfaserbündel während des Herstellungsprozesses zugeschrieben. Um ein duktileres Nachbruchverhalten zu erzielen, muss die Verbundfuge Faser/Betonmatrix versagen, bevor die Zugfestigkeit der Faser in der Betonmatrix erreicht wird. Deshalb ist die Schlankheit der Fasern bzw. der Faserbündel nach oben zu begrenzen. Dieses Kriterium wird von der Basalteinzelfaser mit 12 µm Durchmesser nicht erfüllt, wohl aber von den bestellten Basaltfaserbündeln, was der Durchführung der Untersuchungen an Faserbündeln erklärt.

Die Rovings in ihrer optimierten Geometrie haben den Mischungsprozess allerdings nicht schadlos überstanden und es kam zu einer Auflösung fast aller Bündel in ihre Einzelfasern.

Das l/d-Verhältnis bzw. die Schlankheit  $\lambda$  der Einzelfasern liegt je nach Faserlänge bei einem Einzelfaserdurchmesser von ca. 12 µm je nach Faserlänge (8-16 mm) zwischen 670 und 1 333 und somit in einer Größenordnung, wo aufgrund des geringen Querschnittes im Verhältnis zur Verbundfläche ein Querschnittsversagen vor dem Verbundversagen eintritt.

Positiv zu erwähnen ist, dass sich sowohl die axiale Zugfestigkeit als auch die Biegezugfestigkeit im Vergleich zum 0-Beton entsprechend gesteigert hat. Eine signifikante Steigerung der Druckfestigkeit konnte nicht erzielt werden, war aber auch nicht Ziel dieser Arbeit.

#### 4.2.15 Berechnung der Biegezugfestigkeit mit der n-Ziffern-Methode

Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass es durch die Faserzugabe zu einer Steigerung der Zugfestigkeit ohne Faseraktivierung gekommen ist, sprich eine Mobilisierung des Verbundes zwischen Faser und Matrix hat nicht stattgefunden. Ob die Steigerung der Biegezugfestigkeit durch den höheren E-Modul der Basaltfasern im Vergleich zum UHPC nach Faserzugabe auch rechnerisch nachvollziehbar ist, wird mit Hilfe der n-Ziffern-Methode untersucht:

Als n gilt das Verhältnis der E-Moduln:

$$n = \frac{E_F}{E_{b,0}} \quad [4.3]$$

$E_F$  = E-Modul der Basaltfasern (95 GPa) nach (2)

$E_{b,0}$  = E-Modul des UHPC (50 GPa) nach (4)

$$n = \frac{E_F}{E_{b,0}} = \frac{95}{50} = 1,9$$

Als Bezugskörper für die Berechnung dient der in den Versuchen eingesetzte Zementprüfkörper gem. DIN 196-1 mit den Abmessungen 4x4x16 cm.

Aus den Querschnittsflächen der Materialien  $A_B$  (Betonquerschnittsfläche)  $A_F$  (Faserquerschnittsfläche) und der n-Ziffer lässt sich die fiktive Fläche des Verbundquerschnittes  $A_{v,0}$  ableiten:

$$A_F = 4^2 \cdot 1,25\% = 0,2 \text{ cm}^2 \quad A_B = 4^2 - 0,2 = 15,8 \text{ cm}^2$$

$$A_{v,0} = A_F + \frac{A_B}{n_0} \quad [4.4]$$

$$A_{v,0} = 0,2 + \frac{15,8}{1,9} = 8,52 \text{ cm}^2$$

Die einzelnen Trägheitsmomente der Materialien  $I_B$  und  $I_F$  und des Verbundquerschnittes  $I_{v,0}$  errechnen sich zu:

$$I_B (I_F) = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad [4.5]$$

$$I_F = \frac{4 \cdot 4^3 \cdot 1,25\%}{12} = 0,267 \text{ cm}^4$$

$$I_B = \frac{4 \cdot 4^3}{12} = 21,33 \text{ cm}^4$$

$$I_{v,0} = I_F + \frac{I_B}{n_0} \quad [4.6]$$

$$I_{v,0} = 0,267 + \frac{21,33}{1,9} = 11,49 \text{ cm}^4$$

Aus den Querschnittswerten und dem einwirkenden Biegemoment  $M_v$  lassen sich die Biegezugspannungen ableiten.

**Für den Verbundquerschnitt:**

$$\sigma_F \text{ Zugspannung in der Faser} \quad \sigma_F = \frac{M_v}{I_{v,0}} \cdot z_v \quad [4.7]$$

$$\sigma_F = \frac{M_v}{11,49} \cdot 2 = 0,174 \cdot M_v$$

$$\sigma_{B,v} \text{ Zugspannung im Beton} \quad \sigma_{B,v} = \frac{1}{n_0} \cdot \frac{M_v}{I_{v,0}} \cdot z_v \quad [4.8]$$

$$\sigma_{B,v} = \frac{1}{1,9} \cdot \frac{M_v}{11,49} \cdot 2 = 0,092 \cdot M_v$$

**Für den Betonquerschnitt (ohne Fasern):**

$$\sigma_{B,0} \text{ Zugspannung im Beton} \quad \sigma_{B,0} = \frac{M_v}{I_B} \cdot z_B \quad [4.9]$$

$$\sigma_{B,0} = \frac{M_v}{I_B} \cdot z_B = \frac{M_v}{21,33} \cdot 2 = 0,094 \cdot M_v$$

Zuletzt erfolgt die Berechnung der Veränderung der Betonzugspannung durch Faserzugabe:

$$\sigma = 1 - \frac{\sigma_{B,v}}{\sigma_{B,0}} = 2,13 \%$$

Aus der Berechnung ergibt sich unter Berücksichtigung der angenommenen E-Moduln für die Materialien und einem zu Grunde gelegten Fasergehalt von 1,25 % eine theoretische Steigerung der Biegezugfestigkeit von 2,13 % im Vergleich zum 0-Beton.

Die in den Versuchen erzielte Steigerung der Biegezugfestigkeit liegt aber im Mittel bei ca. 45%, also deutlich darüber. Die Steigerung der Zugfestigkeit durch Zugabe der Fasern kann demnach bis jetzt nicht abschließend erklärt werden.

### 4.3 Faserausziehversuche

#### 4.3.1 Ausziehversuche Basaltfasern

Um das Tragverhalten von Faserbündeln, die sich nicht auflösen aufzuzeigen, wurden Ausziehversuche zur Bestimmung der Verbundfestigkeit durchgeführt.

Zur Ermittlung des Faser-Beton-Verbundverhaltens der Basaltfaserbündel wurden diese mit derselben Einbindetiefe beidseitig in Hundeknochenformen eingebracht und dann aus der UHPC Matrix ausgezogen. Die Kraftübertragung erfolgt in Achsrichtung der Fasern.

Um eine Zugkraftübertragung über den Beton zu verhindern und somit die gesamte eingeleitete Zugkraft über die Fasern abzuleiten, wurden Hartschaumtrennstreifen verwendet und die Rovings in die eingeschnittenen Streifen eingefädelt.



Abbildung 62 Prüfkörperherstellung für die Basaltfaserausziehversuche



Abbildung 63 Hergestellte Prüfkörper für die Basaltfaserausziehversuche

Es wurden bei 6 Prüfkörpern je 10 Faserbündel in die Trennstreifen eingefädelt. Die Anordnung wurde in Anlehnung an die von Huy Hoang Kim durchgeführten Versuche festgelegt. Für die Versuchsdurchführung wurden die 16 mm langen Basaltfasern herangezogen, um bei einer Hartschaumstreifenbreite von 4 mm noch eine beidseitige Einbindetiefe der Fasern in den Beton von 6 mm erreichen zu können. Das Ausgießen der Schalung erfolgte mit der faserlosen UHPC-Mischung (0-Beton).

Der Beton konnte ohne Störung der axialen Ausrichtung der leicht biegsamen Basaltrovings eingebracht werden.

Die beobachtete Streuung der erreichten Verbundfestigkeiten bei den Basaltrovings war relativ groß. Der Durchmesser der Rovings bzw. die Anzahl der Einzelfasern im Bündel ist nicht immer konstant und durch das Einfädeln der Fasern in die Schnittfläche kann es auch leichter zu Störungen des Fasergefüges kommen, da ein starrer Verbund zwischen den Einzelfasern nicht gegeben ist.

Auch der Verlauf der Last-/Wegbeziehung bei den Ausziehversuchen weist eine besondere Form mit einem Lastabfall nach Erreichen der Maximallast, aber einer abermaligen Laststeigerung, bis ein zweiter Hochpunkt erreicht ist und die Spannung danach wieder abfällt. Es wurde beobachtet, dass der zweite Spannungshochpunkt bei den meisten Versuchen den ersten nicht übersteigt.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Ausziehprüfungen mit mehreren Faserbündeln durchgeführt wurden und die Faserbündel zu unterschiedlichen Zeitpunkten aktiviert worden sind. Da die Basaltfaserbündel in ihrer Beschaffenheit eher biegewich sind, kann es hier leichter zu unterschiedlichen Aktivierungszeitpunkten bzw. Aktivierungswegen kommen, was in der Folge Unregelmäßigkeiten in der Last/Wegbeziehung nach sich zieht. Bei vergleichsweisen starren Materialien, wie z.B. Stahlfasern, waren diese Unregelmäßigkeiten entsprechend gering.

Die Ergebnisse für die Verbundfestigkeit liegen aus diesem Grund etwas niedriger als wenn alle Fasern zeitgleich aktiviert würden.

Es ist aber nicht davon auszugehen, dass durch die Materialbiegsamkeit Rückschlüsse auf die Zugfestigkeit des Fasermaterials gezogen werden können.



Abbildung 64 Hundeknochenform - ausgezogene Basaltrovings – 6 mm Einbindetiefe

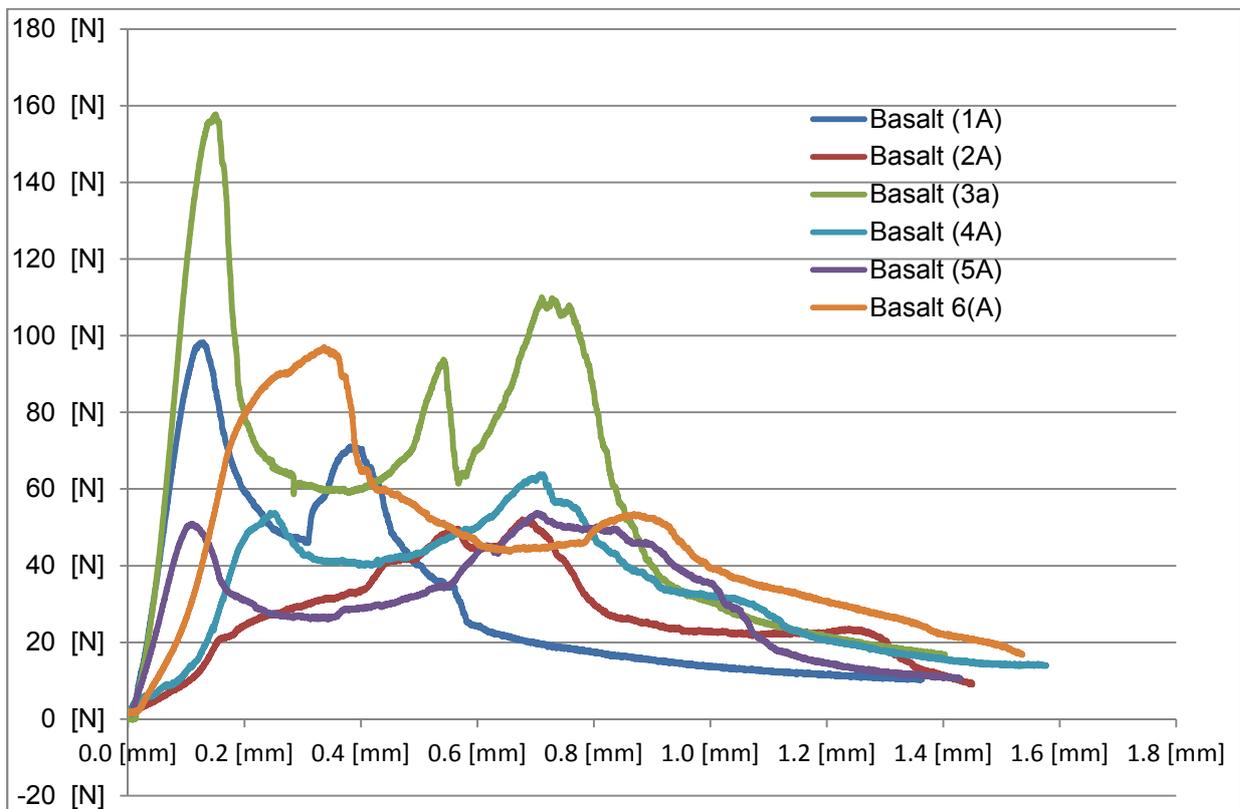


Abbildung 65 Last-/Wegbeziehung für Ausziehversuche von Basaltrovings

Bei einem Durchmesser von 150  $\mu\text{m}$  und einer Einbindelänge von 6 mm wird eine Verbundspannung im Bereich zwischen ca. 2 - 5  $\text{N}/\text{mm}^2$  erreicht.

Wird die Verbundspannung unter Zugrundelegung der tatsächlichen bandartigen Struktur als Rechteckquerschnitt mit einer Höhe von 12  $\mu\text{m}$  und einer durchschnittlichen Breite von 1,0 mm ermittelt, liegt die Verbundspannung zwischen ca. 0,5 und 1,2  $\text{N}/\text{mm}^2$  aufgrund des stark vergrößerten Umfang-/Flächenverhältnisses.

#### 4.3.2 Ausziehversuche Stahlfasern

Dieselben Versuche wurden mit Stahlfasern, welche den Basaltrovings von der Geometrie ähnlich sind, durchgeführt. Hierfür kamen glatte Stahlfasern mit einer Länge von 20 mm und einem Durchmesser von 0,2 mm zum Einsatz. Um die Faser-Beton-Verbundlänge von 6 mm beizubehalten, wurde der Hartschaumfasertrennstreifen mit einer größeren Breite von 8 mm zugeschnitten. Es wurden in jeden der 3 Prüfkörper 10 Stahlfasern pro Querschnitt eingesetzt. Die Durchführung der Prüfung erfolgte analog zu den Basaltfaserausziehversuchen.



Abbildung 66 Prüfkörper vor bzw. nach Durchführung der Ausziehversuche

Die Last-/Wegbeziehung ist dermaßen charakterisiert, dass sich die Maximallast nach annähernd linearer Steigerung bei allen 3 Prüfungen auf demselben Niveau mit geringer Streuung einstellt und sich der Reibungsverbund als flach abfallender Ast mit geringer werdender Einbindetiefe ausbildet. Der qualitative Verlauf der Last-/Wegbeziehung bleibt hier über die Versuchsreihe unverändert.

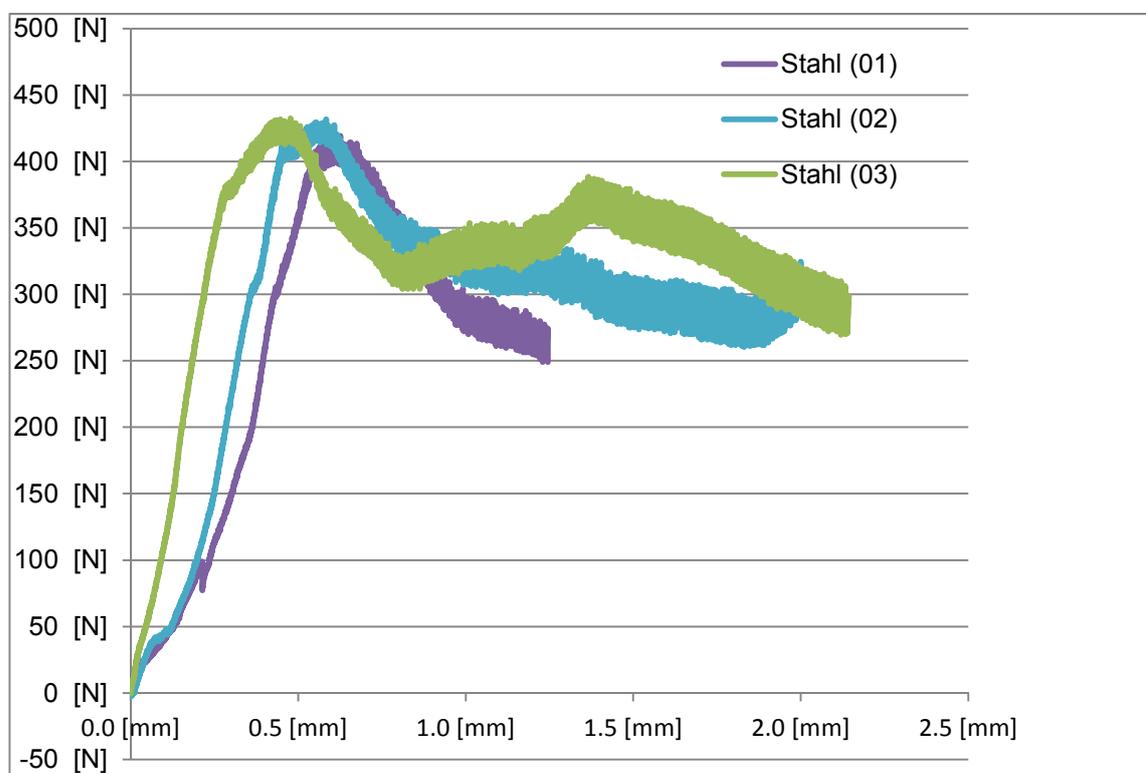


Abbildung 67 Last-/Wegbeziehung für Ausziehversuche von Stahlfasern

Bei 0,2 mm Faserdurchmesser und 6 mm Verbundlänge wird eine Verbundspannung im Bereich von ca. 11 N/mm<sup>2</sup> erreicht.

#### 4.3.3 Ausziehversuche Carbonfasern

Die Ausziehversuche wurden von Huy Hoang Kim durchgeführt und vom Verfasser ausgewertet. Die Verbundlänge beträgt hier 7 mm. Es handelt sich hierbei um Carbon – Faserbündel der Firma SGL Group, bei der Versuchsdurchführung wurden wiederum 10 Rovings in den Querschnitt eingelegt.

Die Einbindelänge der Carbonfasern war mit 7 mm geringfügig größer, als bei den Basalt- bzw. Stahlfasern (6 mm). Bei den getesteten 6 Prüfkörpern erfolgt das Auftreten der höchsten Verbundkraft annähernd bei derselben Maximalkraft. Danach reduziert sich die aufnehmbare Kraft circa auf die Hälfte, von dort an fällt die Verbundkraft mit steigendem Weg relativ flach ab. Die Streuung der Verbundfestigkeiten bei den Carbonfaserbündeln ist also verhältnismäßig gering.

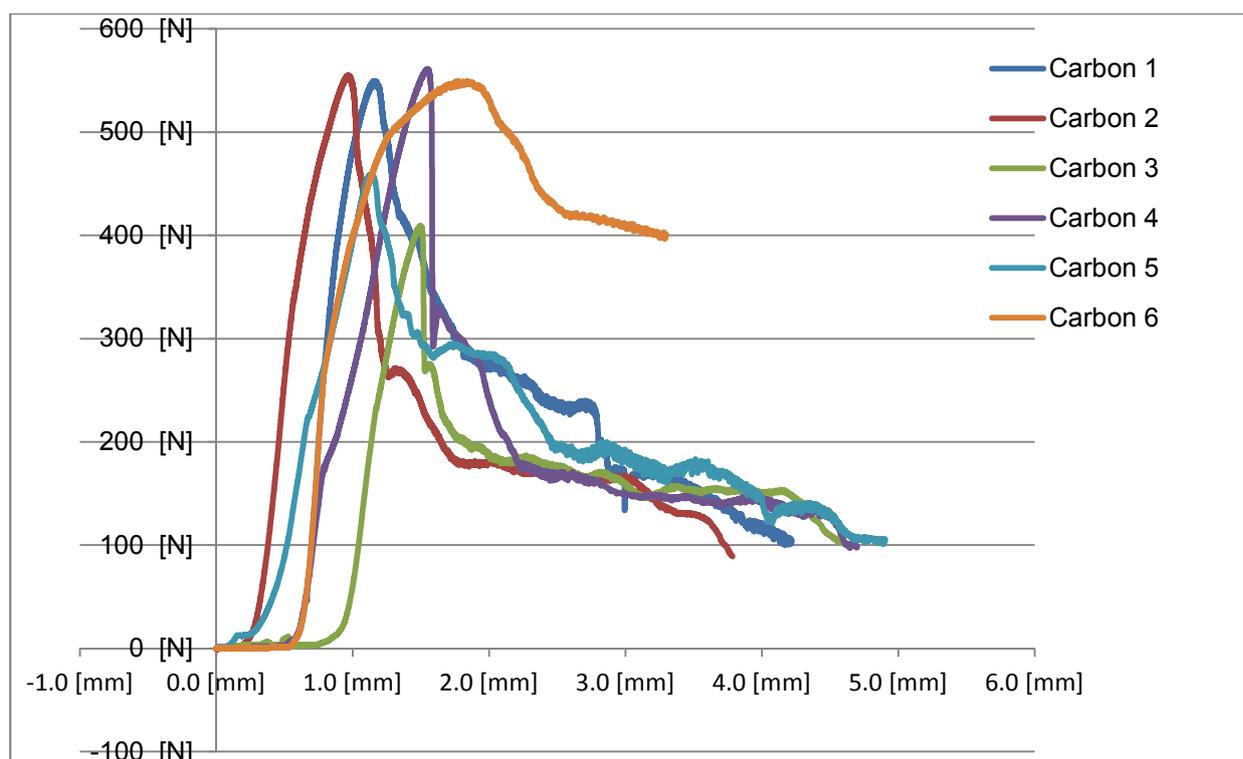


Abbildung 68 Last-/Wegbeziehung für Ausziehversuche von Carbonfasern

Die errechnete Verbundspannung liegt hier bei ca. 2,3 N/mm<sup>2</sup>.

#### 4.3.4 Zusammenfassung der Ausziehfestigkeiten in [N/mm<sup>2</sup>]

	Maximale Verbundspannung [N/mm <sup>2</sup> ]														
Material	Basaltfasern						Stahlfasern			Carbonfasern					
Versuchsnummer	B1	B2	B3	B4	B5	B6	S1	S2	S3	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]	3.48	1.84	5.58	2.26	1.90	3.43	11.1	11.5	11.5	2.45	2.48	1.83	2.50	2.05	2.40
Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	3.08						11.35			2.29					

Tabelle 8 Zusammenstellung der erreichten maximalen Verbundspannungen in [N/mm<sup>2</sup>]

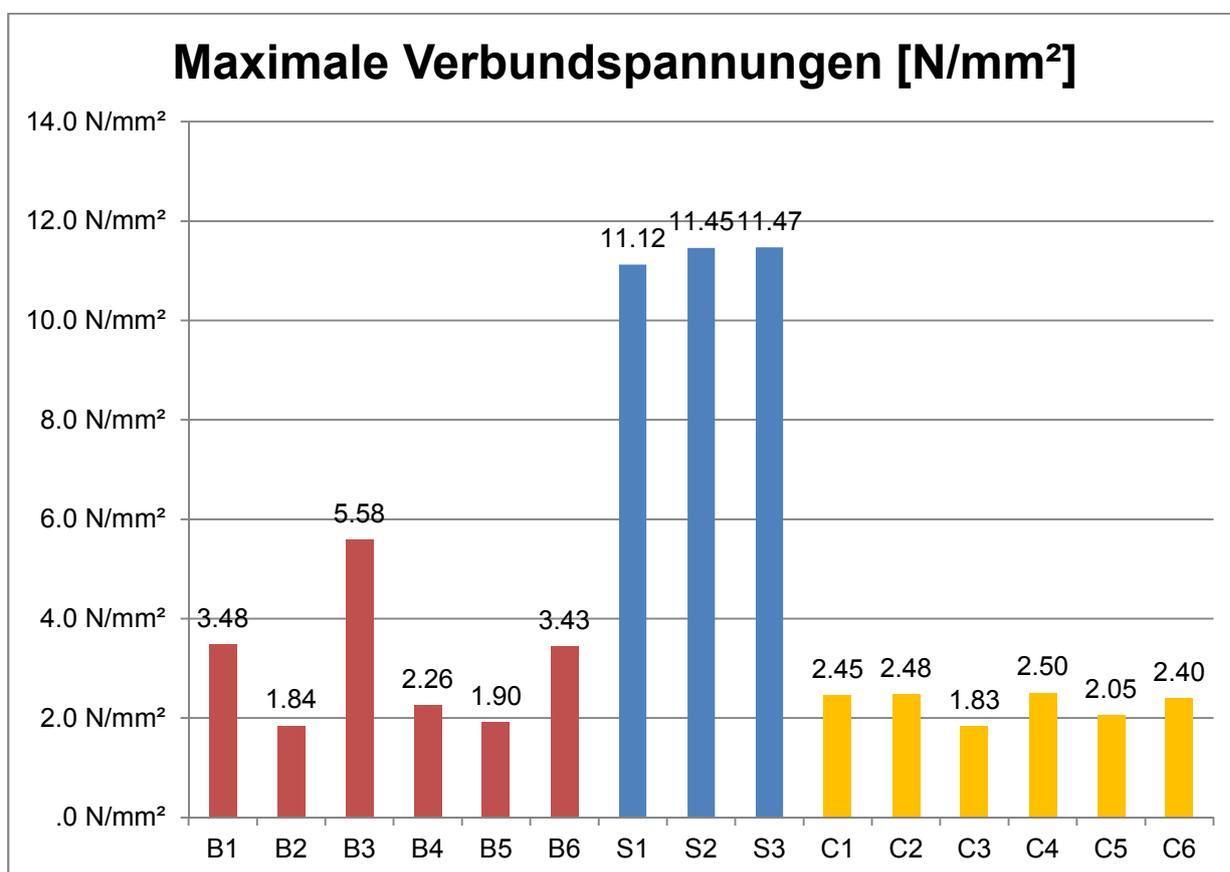


Abbildung 69 Zusammenfassung der maximale Ausziehfestigkeiten (B = Basalt, S = Stahl, C = Carbon) im Säulendiagramm

Die größte Verbundfestigkeit wurde somit bei den Stahlfasern mit ca. 11 N/mm<sup>2</sup> festgestellt.

Die Streuung bei den Carbon- und Stahlfasern ist deshalb geringer als bei den Basaltfaserbündeln, da die Basaltrovings im Verhältnis biegeweicher sind.

## 5 Mikroskopische Untersuchungen

### 5.1 Lichtmikroskop

Da sich bei Betrachtung der Bruchfläche mit freiem Auge die Basaltfaserbündel farblich kaum von der UHPC-Matrix unterscheiden und die aufgelösten Einzelfasern aufgrund ihres geringen Durchmessers nicht erkennbar sind, wurden mikroskopische Beobachtungen der Bruchflächen durchgeführt. Zunächst wurden Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop des Institutes für Angewandte Geowissenschaften der TU Graz gemacht.



Abbildung 70 Lichtmikroskop Leica DG 300

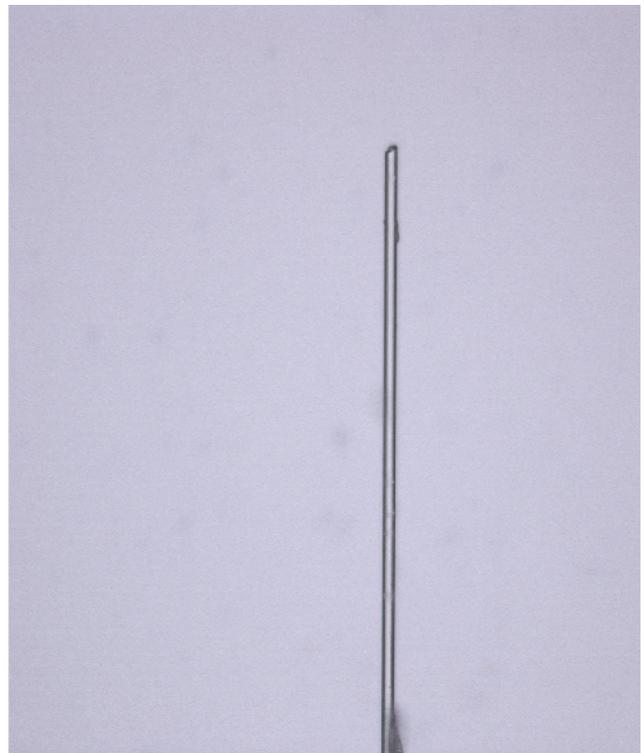


Abbildung 71 Einzelfaser im Lichtmikroskop

Die Faserbündel wurden unter dem Lichtmikroskop Type Leica DG 300 untersucht. Dadurch konnte man gut erkennen, dass diese eine amorphe, glasartige Struktur aufweisen. Der Durchmesser der Einzelfaser wurde durch das Auflegen von Schablonen mit ca. 10 Mikrometern bestätigt. Es wurde auch festgestellt, dass bruchartige Strukturen den Querschnitt einiger Einzelfasern durchlaufen, allerdings nur dann, wenn es zuvor zu einem versuchsweisen Knicken der Faser gekommen ist.

Die Prüfkörper wurden in Richtung der Hauptbruchebene betrachtet. So konnte festgestellt werden, dass die Fasern geringfügig aus dem Beton herausragen und somit nicht in der Bruchebene abbrechen, sondern kurz davor bzw. dahinter.

Noch besser kann dies bei den durchgeführten Aufnahmen am Elektronenrastermikroskop beobachtet werden. Größtenteils handelt es sich hierbei um Einzelfasern, vereinzelt auch um Faserbündel, die während des Mischprozesses nicht bzw. nur teilweise getrennt wurden.

Für die Untersuchungen unter dem Lichtmikroskop war eine Zerkleinerung der zerstörten Prüfkörper mit einer Betonkreissäge erforderlich, da die maximale Höhe eines mikroskopisch zu betrachtenden Objektes unter dem Lichtmikroskop nicht mehr als einen Zentimeter betragen darf.

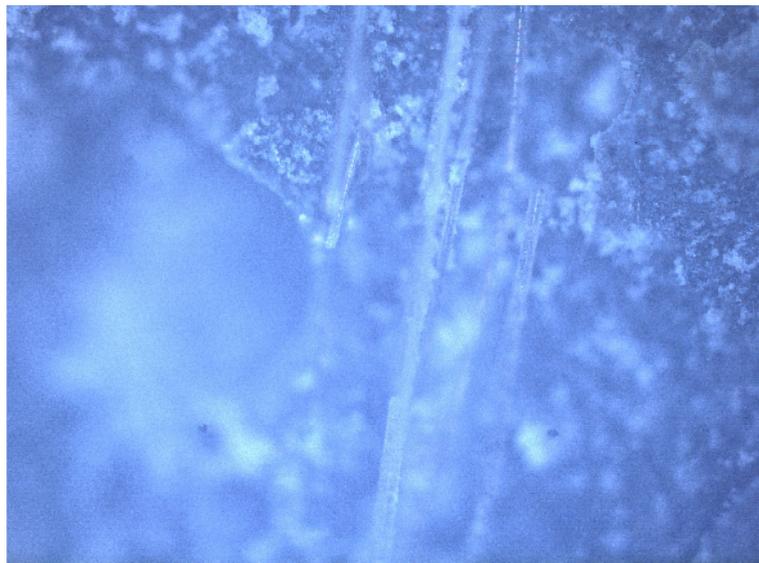


Abbildung 72 Ansammlung von Fasern - Draufsicht auf die Bruchfläche



Abbildung 73 Abgebrochene Fasern - Blick in Richtung Bruchflächenebene

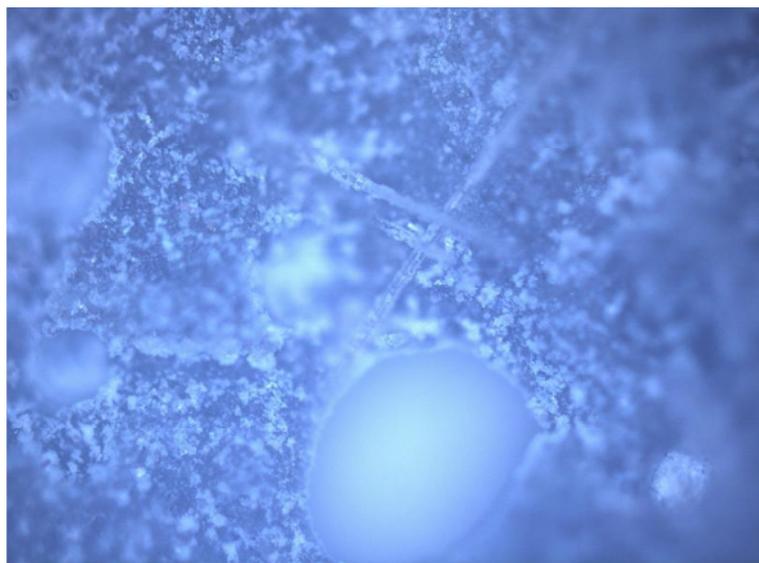


Abbildung 74 Ansammlung von Einzelfasern (willkürliche Orientierung) und Luftporen

## 5.2 Rasterelektronenmikroskop

Da die mit dem Lichtmikroskop erzeugten Aufnahmen qualitativ nicht zufriedenstellend waren, wurden am Institut für Erdwissenschaften, Bereich Mineralogie und Petrologie der Karl Franzens Universität Graz, detailliertere mikroskopische Untersuchungen mit einem Elektronen-Rasterelektronenmikroskop Typ JSM 6310 durchgeführt.

Dafür wurden die Proben mit einer Kohlenstoffschicht überzogen, damit die im Zuge der mikroskopischen Untersuchungen auf die Probe treffenden Elektronen an der Oberfläche abfließen können. Verzichtet man auf eine solche Beschichtung, oder bringt man sie nicht ganz vollständig auf, entstehen lokale Aufladungen, die als Reflexionen in der Aufnahme in Erscheinung treten. Für das Aufbringen der Beschichtung dient eine automatische Bedampfungsanlage, Typ BALTEC MCS 010.



Abbildung 75 Elektronen-Rastermikroskop

Typ JSM 6310

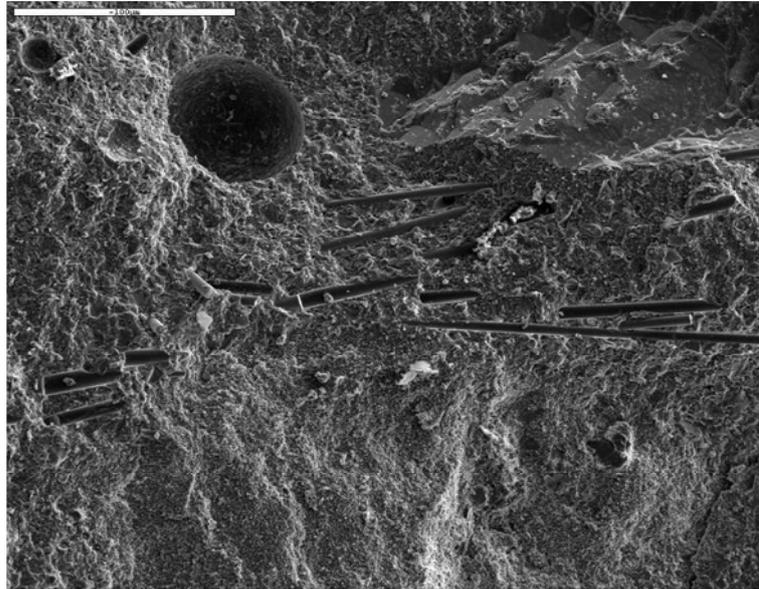


Abbildung 76 Bedampfungsanlage

Typ BALTEC MCS 010

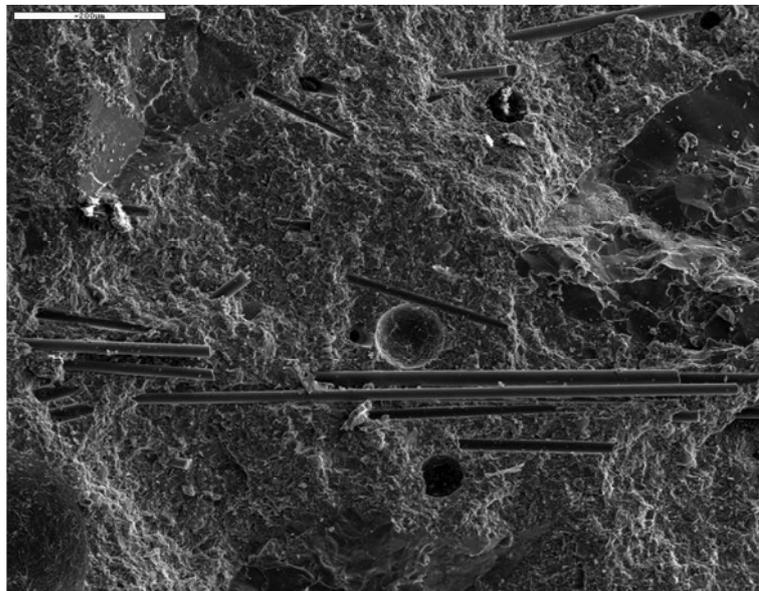
Auf den Aufnahmen des Elektronen-Rastermikroskops, kann eine Betrachtung der Bruchflächen noch viel detaillierter erfolgen. Trotz Unebenheiten in der Bruchfläche ist eine scharfe Darstellung des gesamten Aufnahmebereiches möglich.

In Abbildung 77 ist ein Bild über die typische Faserverteilung in den Prüfkörpern ersichtlich. Die in die Mischung eingebrachten Rovings haben sich größtenteils aufgelöst und richten sich, betrachtet man einen lokalen Ausschnitt, größtenteils in eine Richtung aus. Der Beton weist Luftporen mit Durchmessern um ca. 50  $\mu\text{m}$  auf.



**Abbildung 77** Typische Faserverteilung in der Bruchfläche

Wie aus Abbildung 78 hervorgeht, haben sich vereinzelt, allerdings in sehr geringem Ausmaß, Rovings nicht immer vollständig in ihre Einzelfasern aufgelöst.



**Abbildung 78** Vereinzelt Auffinden von Rovings

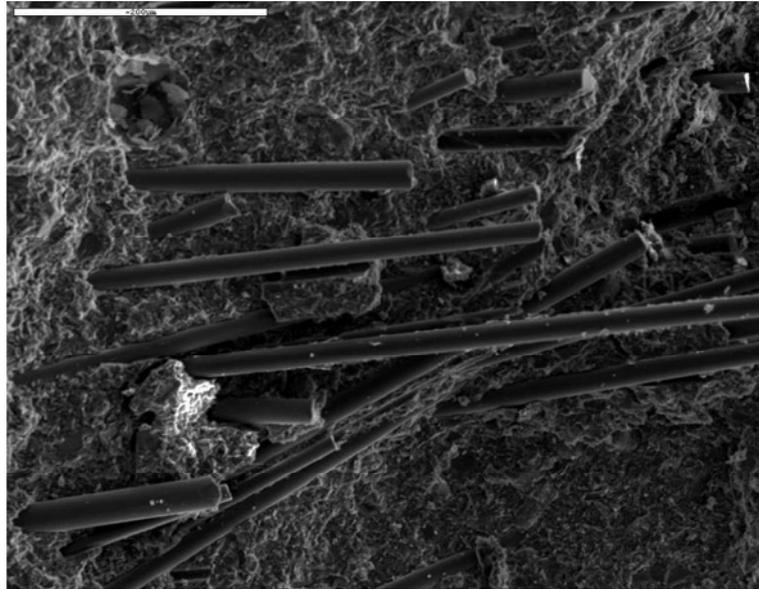


Abbildung 79 Bruchstelle der Fasern vor oder hinter der Betonbruchfläche

Beobachtet man die Bruchfläche mit freiem Auge ist nicht ersichtlich, ob die Fasern vor oder in der Betonbruchfläche versagen. Nicht einmal das Vorhandensein der Fasern im Beton kann mit Sicherheit festgestellt werden. Das rührt daher, dass sich die im Beton verarbeiteten Fasern farblich kaum mehr vom Beton unterscheiden.

Aus der mikroskopischen Betrachtung (Abbildung 79) geht aber eindeutig hervor, dass die Fasern nicht in derselben Ebene wie der Beton abbrechen, wie man an den herausstehenden Einzelfaserstutzen bzw. den Negativabdrücken im Beton feststellen kann.

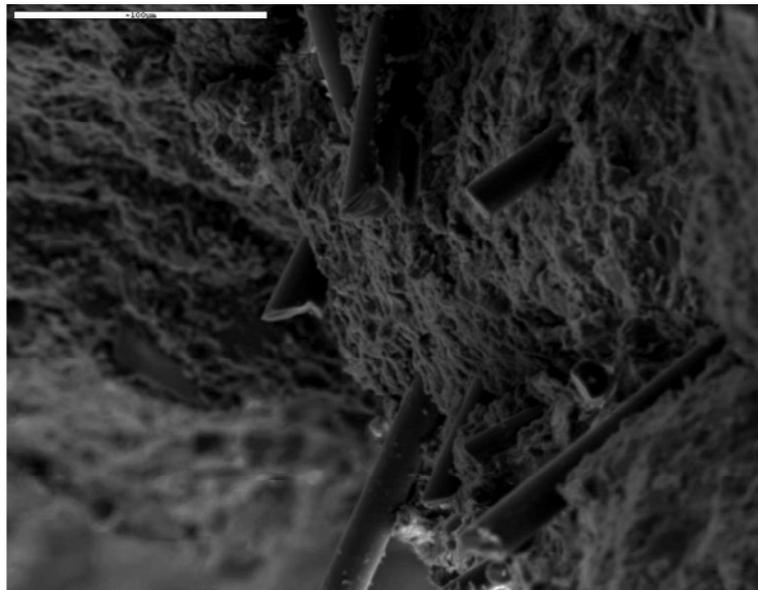


Abbildung 80 Herausstehende Faserstumpfe entlang der Betonbruchstelle

Es wurde auch die Faserausrichtung entlang der Schalkanten untersucht. Man kann deutlich erkennen, dass sich die Fasern im unmittelbaren Nahbereich der Schalkanten auch parallel zu dieser ausrichten.

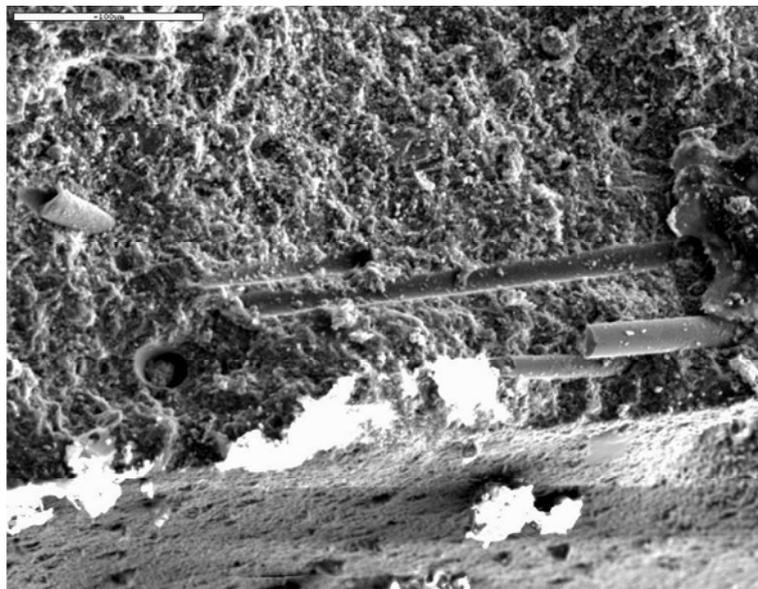


Abbildung 81 Faserausrichtung entlang Schalkante

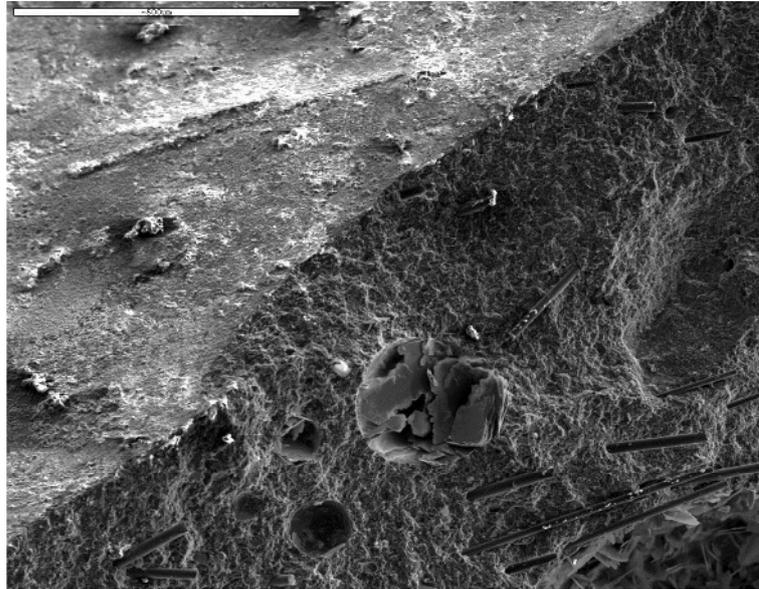


Abbildung 82 Kantenausbildung zwischen Schal- und Bruchfläche

Auch die Faserausrichtung im Bereich von Luftporen wurde untersucht. Bei den mikroskopischen Betrachtungen wurde festgestellt, dass sich die Fasern größtenteils tangential an die Luftporenoberfläche anschmiegen, nicht aber die Luftporen durchkreuzen.

Vereinzelt durchlaufen Fasern die Luftporen, allerdings wenn, dann nur am Rande des Porenraumes bzw. vereinzelt ragen kurze Faserendstümpfe, in den Porenraum hinein.

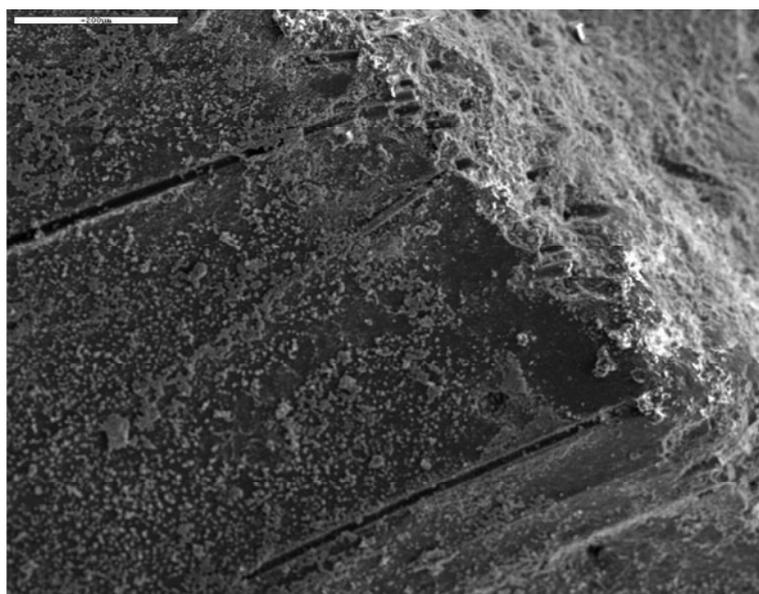
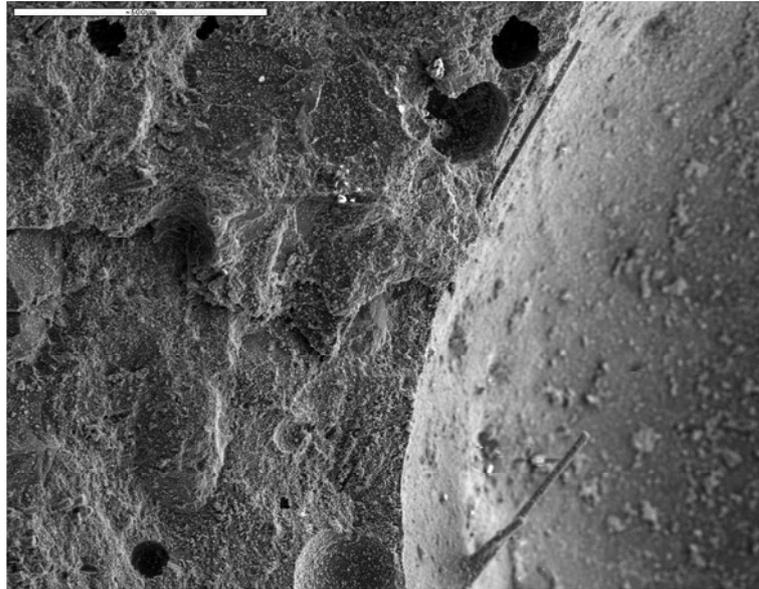


Abbildung 83 Faserausrichtung entlang der Luftporenoberfläche



**Abbildung 84 Kantenausbildung Bruchfläche – Luftpore**

Auch die mit der Betonkreissäge geschnittenen Flächen der Prüfkörper wurden untersucht. Allerdings konnte bei Betrachtung dieser Schnittflächen nicht zwischen Fasern und Beton unterschieden werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Zusammenfassung

Zielsetzung dieser Arbeit ist es, die von der Asamer Basaltic Fiber GmbH zur Verfügung gestellten Faserbündel aus Basalt auf deren Eignung für die Verwendung in UHPC zu prüfen. Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Versuchsprogramm zusammengestellt, bestehend aus Frischbeton- und Festbetonprüfungen sowie mikroskopischer Betrachtung der Bruchflächen und Untersuchung der Oberflächenbenetzung des Fasermaterials. Um die dort gewonnen Erkenntnisse mit konkurrierenden Fasermaterialien vergleichbar zu machen und Bezugsgrößen zu erhalten, wurden dieselben Versuche mit Carbonmakrofasern sowie Stahleinzelfasern durchgeführt.

In Vorbereitung auf die Prüfung wurden der Asamer Basaltic Fiber GmbH Vorgaben für das zu liefernde Fasermaterial übermittelt, um das Versuchsergebnis zu optimieren. Die Vorgaben wurden nach ausführlichem Studium theoretischer Grundlagen des Wirkens von Fasern in UHPC ermittelt und waren speziell auf die Geometrie der Rovings bezogen.

Die Begrenzung der Schlankheit sollte ein Verbundversagen zwischen Makrofaser und UHPC-Matrix noch vor dem Querschnittsversagen der Faser sicherstellen, um ein duktilen Bruchverhalten zu erzielen. Die Basaltfasern weisen laut Herstellerangaben eine Zugfestigkeit von rund 3.000 MPa auf. Werte für die Verbundfestigkeit zwischen Basalt und UHPC sind bislang nicht bekannt gewesen und wurden anhand von Versuchsergebnisse mit vergleichsweisen textilen Gelegen aus alkaliresistentem Glas und Carbon abgeschätzt. Somit konnte die Grenzschlankheit ermittelt werden.

Seitens der Asamer Basaltic Fiber GmbH können Einzelfasern nur in einem Durchmesser bis maximal 30 µm produziert werden. Die produzierbare Stückzahl an Einzelfasern in einem Roving ist derzeit mit 200 festgelegt. Als variabler Parameter kann lediglich der Einzelfaserdurchmesser verändert werden. Der Zusammenhalt zwischen den Einzelfasern bei den gelieferten Faserbündeln mit 30 µm Einzelfaserdurchmesser war nicht gegeben. Die Makrofasern mit 12 µm Einzelfaserdurchmesser hinterließen nach augenscheinlicher Prüfung einen deutlich besseren Eindruck hinsichtlich Zusammenhalt der Einzelfasern und Duktilität.

Die der Prüfung unterzogenen Fasern hatten einen Einzelfaserdurchmesser von 12 µm. Mit einer Anzahl von 200 Einzelfasern je Roving ergäbe sich somit ein theoretischer Makrofaserdurchmesser von 150 µm. Die gelieferten Rovings entsprachen jedoch nicht den theoretischen Idealvorstellungen, statt eines kreisförmigen Querschnittes lag ein bandartiger

Querschnitt mit Breiten im Bereich zwischen ca. 1 - 2 mm und einer Höhe von 12  $\mu\text{m}$ , dem Einzelfaserdurchmesser entsprechend, vor. Die mittlere Querschnittsfläche bleibt so mit rund 0,018  $\text{mm}^2$  unverändert, die Oberfläche vergrößert sich so aber um das 6-fache.

Getestet wurden 3 verschiedene Faserlängen von 8, 12 und 16 mm. Der Hersteller kann bei der Produktion ein Vielfaches von 4 mm Faserlänge herstellen. Die Schlankheiten der Rovings errechnen sich somit zu 53, 80 und 107, weit unter der Grenzschlankheit, die mit ca. 250 ermittelt wurde.

Der für die Einmischung der Basaltfasern verwendete UHPC wurde nach einer „klassischen Rezeptur“, durch Zugabe von Zement, Mikrosilika, Quarzmehl und Quarzsand mit 0,8 mm Größtkorndurchmesser sowie Wasser und Fließmittel hergestellt.

Die getesteten Stahlfasern wurden in einer DORSICEM-Fertigmischung verarbeitet. Der Faserdurchmesser der glatten Stahlfasern beträgt 0,2 mm und die Faserlänge 20 mm.

Bei den in den Referenzversuchen eingesetzten Carbonfasern mit einer Länge von 9 mm handelt es sich auch um Rovings. Der Einzelfaserdurchmesser beträgt hier 30  $\mu\text{m}$ . Sie weisen eine Höhe von ca. 0,3 mm sowie eine Breite von 1,3 mm auf. Die Herstellung erfolgte analog durch Huy Hoang Kim. Es wurde hier einen NANODUR-Rezeptur verwendet.

Die ersten Frischbetonprüfungen wurden mit den längsten Rovings und dem höchsten Fasergehalt durchgeführt. Trotz geringer Mischintensität nach Zugabe der Fasern kam es zum Auflösen der Rovings in seine Einzelfasern, nur vereinzelt konnten Faserbündel bestehen bleiben. Die Beständigkeit der Faserbündel während des Mischvorganges ist also nicht gewährleistet.

Das Ausbreitmaß wurde mit Hilfe eines Hägermann-Setztrichters festgestellt und war im Vergleich zu den geprüften Carbon- und Stahlfaserbetonen entsprechend geringer. Das Einfüllen des Basaltfaserbetons in die Prüfformen konnte nur mit Hilfe von Spachteln erfolgen, und das trotz eines vergleichsweise geringen Fasergehaltes von 1,25 Vol.-%. Die praxistaugliche Verarbeitung war also unter den gegebenen Umständen nicht gewährleistet.

Durch Erhöhung des Fließmittelgehaltes und in einem weiteren Mischversuch auch des W/B-Wertes konnte allerdings keine wesentliche Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften erzielt werden.

Auch der Einsatz der 8 und 12 mm langen Basaltrovings brachte hinsichtlich Verarbeitbarkeit keine wesentliche Verbesserung.

Es wurden Biegezug-, axiale Zugversuche, Faserausziehversuche sowie Druckfestigkeitsprüfungen durchgeführt. Anfangs angedachte Schubversuche unter Verwendung einer Torsionsdrehmaschine brachten kein zufriedenstellendes Ergebnis in den Vorversuchen, da statt des erhofften Schubversagens der getesteten Zylinder, die Versagensform auf ein Zugversagen zurückzuführen war.

In den Festbetonprüfungen sollten die Festigkeiten, insbesondere die axiale Zugfestigkeit und die Biegezugfestigkeit der Faser-/Betonmatrix in Abhängigkeit von der Faserlänge sowie das Faserausziehverhalten festgestellt werden. Hier wurden auch Referenzproben mit Carbonfasern und Stahlfasern geprüft.

Die Biegezugversuche wurden mit Prismen entsprechen der DIN EN 196-1 (Prüfverfahren für Zement) und die axialen Zugversuche sowie die Ausziehversuche mit hundeknochenförmigen Prüfkörpern gem. ASTM C 190/307 durchgeführt.

Die Prüfung der Ausziehfestigkeit erfolgte 7 Tage nach der Herstellung, die der Biegezug-, axialen Zug-, sowie Druckfestigkeit nach 10 Tagen. Alle Prüfungen wurden weggesteuert mit einem Maschinenweg von 0,1 mm/min durchgeführt.

Bei der Basaltfaserbetonmatrix mit dem Fasergehalt von 1,25 Vol.-% konnte bei keiner der getesteten Faserlängen eine duktile Versagensform festgestellt werden. Nach Erreichen der Maximallast kam es sowohl bei den Biegezugversuchen als auch bei den axialen Zugversuchen zum schlagartigen Versagen. Das erwünschte duktile Nachbruchverhalten blieb somit aus.

Die axiale Zugfestigkeit der Basaltfaserbetonmatrix konnte im Vergleich zum faserlosen UHPC (0-Beton) um bis zu 47 % gesteigert werden. Es war eine Tendenz zu höheren axialen Zugfestigkeiten bei den längeren Fasern feststellbar. Bei der Stahlfaserbetonmatrix konnte allerdings eine Zunahme der Zugfestigkeit um 70 % im Vergleich zum faserlosen UHPC sowie ein duktiler Nachbruchverhalten erzielt werden.

Auch bei den Biegezugfestigkeiten wurde eine Festigkeitssteigerung des Basaltfaserbetons gegenüber dem 0-Beton von bis zu 81 % verzeichnet. Die Tendenz zu höheren Festigkeiten bei größeren Faserlängen konnte auch hier festgestellt werden.

Die Biegezugfestigkeit beim Carbonfaserbeton führte zu einer Festigkeitssteigerung von 95 % zum 0-Beton. Hier kam es nach Erreichen der Höchstlast zu einem raschen Spannungsabfall bis zu einer Restfestigkeit von ca. 30% der Maximallast. Das Maß der Duktilität war auch hier nicht zufriedenstellend.

Bei den stahlfaserbewehrten Proben wurde eine Biegezugfestigkeit von 331 % zum 0-Beton erreicht, hier war das Nachbruchverhalten gut ausgeprägt.

Bei den Betondruckprüfungen konnte durch Faserzugabe keine wesentliche Steigerung der Druckfestigkeit erzielt werden. Es wurde festgestellt, dass mit der Steigerung des Fließmittelgehaltes und des W/B-Wertes ein hoher Festigkeitsverlust bis zu 30 % einhergeht.

Bei den durchgeführten Ausziehversuchen wurden je 10 Fasern derselben Materialbasis in Hartschaumstreifen eingelegt und beidseitig in einer Hundeknochenform ausbetoniert. Die Verbundlängen betragen 6 bzw. 7 mm. Durch Ausziehen wurde eine Verbundfestigkeit von ca. 3 N/mm<sup>2</sup> für die Basaltfasern ermittelt, die Verbundfestigkeit der Carbonfasern lag deutlich darunter mit 2,3 N/mm<sup>2</sup>, die Stahlfasern hingegen erreichten eine deutlich höhere Verbundfestigkeit von 11,4 N/mm<sup>2</sup>.

Unter genauer Betrachtung der Spannungs-/Dehnungslinien der axialen Zugversuche sowie der Biegezugversuche konnten keine Anzeichen einer Faseraktivierung vor dem Bruch festgestellt werden. Mit Hilfe der n-Ziffern-Methode wurde eine nachträgliche rechnerische Prognose der Steigerung der Biegezugfestigkeit durch Beimengung der Basaltfasern in Relation zum 0-Beton berechnet. In den Versuchen wurden deutlich höhere Laststeigerungen realisiert.

Da die Basaltfasern in der Bruchfläche mit freiem Auge nicht ersichtlich waren und so auch keine Aussage über die Stabilität von Rovings im Beton gemacht werden konnten, wurden mikroskopische Aufnahmen, zuerst mit einem Lichtmikroskop vom Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Graz, zur besseren Veranschaulichung in der Folge mit einem Raster-Elektronenmikroskop vom Institut für Erdwissenschaften der Karl Franzens Universität Graz gemacht.

Die Fasern waren auf den mikroskopischen Aufnahmen deutlich zu erkennen, bis auf wenige Rovings lösten sich die Bündel in seine Einzelfasern auf. Die Bruchstelle der Einzelfasern lag auch meist nicht in der Ebene der Betonbruchfläche, sondern davor bzw. dahinter. Anzeichen einer anfänglichen Faseraktivierung konnten nicht festgestellt werden. Deutlich zu erkennen war eine Ausrichtung der Fasern parallel zu den Schalrändern im Randbereich.

Die Untersuchung der Oberflächenbenetzungseigenschaften erfolgte um einen Zusammenhang mit der Verarbeitbarkeit des Frischbetons herstellen zu können. Die maßgebende messbare Größe der Oberflächenbenetzung eines Feststoffes mit Wasser ist der Kontaktwinkel.

Zur Feststellung der Kontaktwinkel der zu prüfenden Fasermaterialien wurden die Faserstümpfe in destilliertes Wasser getaucht und das Benetzungsverhalten fotografisch festgehalten. Die aus den Aufnahmen gemessenen Werte wurden entsprechend mit Literaturwerten gegenübergestellt.

Damit der praktische Einfluss des Benetzungsverhaltens der Fasern im Beton nicht zu kurz kommt, wurde derselbe Versuch mit einer Wasser-/Fließmittelmischung durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass sich der Kontaktwinkel durch die Fließmittelzugabe verkleinerte und somit beweist, dass die die Oberflächenspannung der Flüssigkeit reduziert wird.

Der festgestellte Kontaktwinkel der Basaltfasern liegt geringfügig unter dem Kontaktwinkel der Carbonfasern. Vom Einfluss der Oberflächenspannung dürften also die Unterschiede in der Verarbeitbarkeit des Frischbetons nicht allzu groß sein. Bei Basalt liegt der Kontaktwinkel von destilliertem Wasser bei ca.  $38^\circ$ , dieser verringert sich um rund  $10^\circ$  bei Verwendung einer Wasser-/Fließmittelmischung. Bei Carbonfasern kommt es hingegen zu einer Reduktion von  $42^\circ$  auf  $29^\circ$ .

Bei den Stahlfasern konnte optisch kein Kontaktwinkel festgestellt werden, denn die Stahlfasern wiesen nur einen Durchmesser von etwa 0,2 mm auf, es waren lediglich die Konturen des sich ausbildenden Adhäsionstrichters erkennbar. Deshalb wurde mit Literaturwerten der Oberflächenspannungen von Stahl und destilliertem Wasser der theoretische Kontaktwinkel rechnerisch ermittelt. Dieser errechnete sich zu  $111^\circ$ , d.h. es kommt zur Kapillardepression bzw. zu einem negativen Spreizdruck.

Diese Erkenntnis könnte sich mit als Ursache für die deutlich besseren Verarbeitungseigenschaften von stahlfaserbewehrtem Frischbeton erweisen.

In Anbetracht der durchgeführten Untersuchungen erreichten die Basaltmakrofasern für die Verwendung in UHPC kein zufriedenstellendes Ergebnis.

Die Zugfestigkeit konnte zwar gesteigert werden, doch es kam zu einem schlagartigen Versagen nach Erreichen der Höchstlast. Auch die Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons sind nicht zufriedenstellend, da die Masse zu zäh für eine vernünftige Verarbeitung ist.

Aufgrund des Auflösens der Faserbündel in die Einzelfasern während des Mischvorganges kommt es zu einer Vergrößerung der Oberfläche um ein Vielfaches. Der Wasserbedarf des Fasermaterials steigt somit stark an und erschwert die Verarbeitbarkeit entsprechend. Durch das Auflösen der

Faserbündel vergrößert sich auch die Faserschlankheit um ein Vielfaches, mit steigender Schlankheit steigt auch das Risiko einer Igelbildung.

Die Oberflächenbenetzung des Fasermaterials kann nach den durchgeführten Untersuchungen also nicht als maßgebendes Kriterium für die schlechten Verarbeitungseigenschaften bezeichnet werden, denn bei Carbonrovings mit ähnlichen Eigenschaften der Oberflächenbenetzung ist ein wesentlich größeres Ausbreitmaß ermittelt worden.

Eine praxistaugliche Verwendung ist also im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit nicht gegeben.

Nicht nur die Verarbeitungseigenschaften werden durch das Auflösen der Rovings nachteilig beeinflusst, auch die Festbetoneigenschaften brachten ein nicht zufriedenstellendes Ergebnis. Trotz Steigerung der Zugfestigkeit, kam es nach Erreichen der Maximallast zu einem schlagartigen Versagen.

Um die Anforderungen an den Hersteller definieren zu können, wurden die Fasern mit der Vorgabe einer Schlankheit bestellt. Die Schlankheit  $\lambda$  errechnet sich aus dem Verhältnis Zugfestigkeit des Fasermaterials zur Verbundfestigkeit des Faser-/Matrixverbundes. Die Fasern wurden auch den geometrischen Vorgaben entsprechend geliefert, allerdings führte der Mischvorgang zu einem Auflösen der Rovings in die Einzelfasern und somit auch zu einer Vergrößerung der Schlankheit um ein Vielfaches. Je nach Faserlänge liegt die Schlankheit der Einzelfasern zwischen 666 und 1.333 und übersteigt die definierte Grenzschlankheit von 250 um ein Vielfaches.

Dies führt in weiterer Folge wiederum dazu, dass die Zugfestigkeit der Faser noch vor Erreichen der Verbundfestigkeit in der Faser-/Matrix-Verbundfuge erreicht ist. Das Querschnittsversagen tritt also noch vor der Faseraktivierung ein.

## **6.2 Ausblick**

Eine Lösung dieses Problems würde durch die Verwendung einer Schlichte, die einen stabilen Zusammenhalt zwischen den Einzelfasern gewährleistet, gegeben. Die verwendete Schlichte muss alkalibeständig sein und auch für den Einzelfaserverbund unter mechanischer Einwirkung des Mischwerkes sorgen. Somit würden die theoretischen Anforderungen an das Material erfüllt sein. Ob dann eine praxistaugliche Verwendung gegeben ist, muss durch eine Versuchsanordnung geprüft werden.

Für eine praxistaugliche Verwendung ist auch zu empfehlen, Fasern mit einer einheitlichen Geometrie zu erzeugen, damit die Streuung des Umfang-/Querschnittsflächenverhältnisses nicht zu groß wird. Dies erleichtert eine Prognose der erreichbaren Zugfestigkeiten.

Nahezulegen wäre, die Geometrie der Fasern als kreisförmigen Querschnitt auszubilden, um so eine kompakte, sämtlichen im Herstellungsprozess auftretenden Einwirkungen trotzende, Querschnittsform zu erzielen.

## 7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Mittlere Ausbreitmaße der untersuchten Mischungen .....	38
Tabelle 2 Darstellung der Faseroberfläche in Bezug zur Betonkubatur unter Zugrundelegung eines einheitlichen Fasergehaltes von 1 Vol.-% .....	40
Tabelle 3 Ergebnisse der Kontaktwinkelmessungen .....	54
Tabelle 4 Zusammenstellung der erreichten axialen Maximalzugspannungen in [N/mm <sup>2</sup> ] .....	77
Tabelle 5 Zusammenstellung der erreichten maximalen Biegezugspannungen in [N/mm <sup>2</sup> ] .....	78
Tabelle 6 Zusammenstellung der erreichten Druckfestigkeiten [N/mm <sup>2</sup> ].....	80
Tabelle 7 Zusammenfassung der maximalen Druckfestigkeiten im Säulendiagramm .....	80
Tabelle 8 Zusammenstellung der erreichten maximalen Verbundspannungen in [N/mm <sup>2</sup> ].....	89

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Druckspannungs-Dehnungslinien von Normal-, hochfestem und ultrahochfestem Beton (2) .....	5
Abbildung 2 Entwicklung der Betonzugfestigkeit sowie Entstehen von Zwang- und Lastspannungen in Bauteilen aus jungem Beton aus (5) .....	6
Abbildung 3 Korngrößenverteilungen für optimale und suboptimale Materialzusammensetzung (4).....	9
Abbildung 4 Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Wasser-Feststoffverhältnis des Bindemittelleims (4).....	10
Abbildung 5 Bewehrungssysteme für Beton (9).....	13
Abbildung 6 Übertragbare Zugspannungen in Abhängigkeit von der Rissöffnung bei unbewehrtem/bewehrtem Beton (2) .....	15
Abbildung 7 Ansätze zur Beschreibung des Entfestigungsverlaufes (2).....	16
Abbildung 8 Last-Verformungsverhalten in Abhängigkeit vom Fasergehalt (2) .....	17
Abbildung 9 Verbundverhalten einer Einzelfaser (2).....	18
Abbildung 10 Pull-Out-Versuche am Einzelfilament (10) .....	19
Abbildung 11 Verbundspannungs-Schlupfbeziehung von Einzelfilamenten (10).....	19
Abbildung 12 Verzerrungsverläufe in der Faseraktivierungsphase (2) .....	21
Abbildung 13 Verzerrungsverläufe beim Übergang Aktivierungsphase – Auszugsphase (2) .....	22
Abbildung 14 Verzerrungsverläufe in der Faserauszugsphase (2) .....	23
Abbildung 15 Faserbeton mit parallelen in Zugrichtung ausgerichteten Fasern (2) .....	24
Abbildung 16 Verzerrungsverlauf des Faserbetons (2).....	25
Abbildung 17 Faserorientierung an Grenzflächen und Verlauf des Faserorientierungsfaktors (12).....	26
Abbildung 18 Zusammenhang zwischen Faserlänge und Orientierungsbeiwert (13) .....	26
Abbildung 19 Geometrische Interpretation des Faserorientierungsbeiwertes (2) .....	27
Abbildung 20 Umlenkung einer geneigt zur Rissrichtung verlaufenden Faser (2) .....	29
Abbildung 21 0-Beton .....	33
Abbildung 22 Horbat-Mischer .....	36

Abbildung 23 Feststellung des Ausbreitmaßes .....	36
Abbildung 24 Frischbeton mit den aufgelösten Faserbündeln .....	38
Abbildung 25 Faseroberfläche in [ $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ] in Bezug zur Betonkubatur bei einem einheitlichen Fasergehalt von 1 Vol.-% .....	41
Abbildung 26 Beziehung des Kontaktwinkels und den Oberflächenenergien von Flüssigkeit $\sigma_S$ und Feststoff $\sigma_L$ sowie Grenzflächenspannung $\gamma_{SL}$ am Beispiel eines Flüssigkeitstropfens (16) .....	43
27 Benetzungsverhalten am Beispiel eines Tropfens (15) .....	44
Abbildung 28 Flüssigkeiten mit größerer (1) und geringerer (2) Oberflächenspannung (17) .....	45
Abbildung 29 Anstieg an vertikaler Wand (18) .....	46
Abbildung 30 Wetting Envelope (16) .....	47
Abbildung 31 Versuchsaufbau .....	49
Abbildung 32 Kontaktwinkel Basaltfaserbündel - destilliertes Wasser .....	50
Abbildung 33 Kontaktwinkel Carbonfaserbündel – destilliertes Wasser .....	50
Abbildung 34 Kontaktwinkel Stahlfaser – destilliertes Wasser .....	51
Abbildung 35 Torsionsdrehmaschine .....	57
Abbildung 36 Darstellung der Torsionsschubspannungen im Kreisquerschnitt (20) .....	58
Abbildung 37 Messdrähte beidseitig der Kerbe .....	58
Abbildung 38 Verlauf der Bruchfläche bei 6 mm Kerbtiefe (CeraCem links und Ductal rechts) .....	59
Abbildung 39 Spannungs-Dehnungslinie des Torsionsdrehversuches bei 6 mm Kerbtiefe .....	59
Abbildung 40 Verlauf der Bruchfläche bei 18 mm Kerbtiefe (Ductal) .....	61
Abbildung 41 Spannungs-Dehnungslinie des Torsionsdrehversuches bei 18 mm Kerbtiefe .....	61
Abbildung 42 Prismen- und Hundeknochenschalformen .....	62
Abbildung 43 Durchführung der Biegezugversuche auf der Universalprüfmaschine BETA 1000 .....	63
Abbildung 44 Durchführung der Faserausziehversuche auf der Universalprüfmaschine BETA 1000 .....	63
Abbildung 45 Biegezugspannung 1,25 Vol.-% /16 mm .....	65
Abbildung 46 Axiale Zugspannung - 1,25 Vol.-% /16 mm .....	65
Abbildung 47 Biegezugspannung 1,25/8 .....	67
Abbildung 48 Axiale Zugspannung 1,25/8 .....	68
Abbildung 49 Biegezugspannung 1,25/12 .....	69
Abbildung 50 Axiale Zugspannung 1,25/12 .....	69
Abbildung 51 Spannungs-Dehnungslinie Biegezug kurz vor Versagen .....	70
Abbildung 52 Spannungs-Dehnungslinie Biegezug im stetigen Bereich .....	71
Abbildung 53 Spannungs-Dehnungsverlauf axialer Zug kurz vor Versagen .....	71
Abbildung 54 Spannungs-Dehnungslinie axialer Zug im stetigen Bereich .....	72
Abbildung 55 0-Beton Biegezugfestigkeit .....	73
Abbildung 56 0-Beton axiale Zugfestigkeit .....	74
Abbildung 57 Stahlfaserbeton axiale Zugfestigkeit 2,50 Vol.-% / 6mm .....	75
Abbildung 58 Stahlfaserbeton Biegezugfestigkeit 2,50 Vol.-% / 6mm .....	75
Abbildung 59 Carbonfaserbetonmatrix (9 mm, 2% - Biegezugfestigkeit) .....	76
Abbildung 60 Zusammenfassung der maximalen, axialen Zugfestigkeiten im Säulendiagramm .....	78
Abbildung 61 Zusammenfassung der maximalen Ausziehfestigkeiten im Säulendiagramm .....	79

---

Abbildung 62 Prüfkörperherstellung für die Basaltfaserausziehversuche .....	84
Abbildung 63 Hergestellte Prüfkörper für die Basaltfaserausziehversuche .....	84
Abbildung 64 Hundeknochenform - ausgezogene Basaltrovings – 6 mm Einbindetiefe .....	85
Abbildung 65 Last-/Wegbeziehung für Ausziehversuche von Basaltrovings .....	86
Abbildung 66 Prüfkörper vor bzw. nach Durchführung der Ausziehversuche .....	87
Abbildung 67 Last-/Wegbeziehung für Ausziehversuche von Stahlfasern .....	87
Abbildung 68 Last-/Wegbeziehung für Ausziehversuche von Carbonfasern .....	88
Abbildung 69 Zusammenfassung der maximale Ausziehfestigkeiten (B = Basalt, S = Stahl, C = Carbon) im Säulendiagramm .....	89
Abbildung 70 Lichtmikroskop Leica DG 300 .....	90
Abbildung 71 Einzelfaser im Lichtmikroskop .....	90
Abbildung 72 Ansammlung von Fasern - Draufsicht auf die Bruchfläche .....	91
Abbildung 73 Abgebrochene Fasern - Blick in Richtung Bruchflächenebene .....	92
Abbildung 74 Ansammlung von Einzelfasern (willkürliche Orientierung) und Luftporen .....	92
Abbildung 75 Elektronen-Rastermikroskop .....	93
Abbildung 76 Bedampfungsanlage .....	93
Abbildung 77 Typische Faserverteilung in der Bruchfläche .....	94
Abbildung 78 Vereinzelt Auffinden von Rovings .....	94
Abbildung 79 Bruchstelle der Fasern vor oder hinter der Betonbruchfläche .....	95
Abbildung 80 Herausstehende Faserstumpfe entlang der Betonbruchstelle .....	96
Abbildung 81 Faserausrichtung entlang Schalkante .....	96
Abbildung 82 Kantenausbildung zwischen Schal- und Bruchfläche .....	97
Abbildung 83 Faserausrichtung entlang der Luftporenoberfläche .....	97
Abbildung 84 Kantenausbildung Bruchfläche – Luftpore .....	98

---

**9 Literaturverzeichnis**

1. **Deutscher Ausschuss für Stahlbeton.** *Sachstandsbericht - Ultrahochfester Beton.* Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2008.
2. **Leutbecher, Torsten.** *Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem Ultrahochfesten Beton (UHPC); Dissertation.* Kassel : s.n., 2007.
3. **König, Holschemacher, Dehn.** *Faserbeton, Innovationen im Bauwesen, Beiträge aus Praxis und Wissenschaft.* Leipzig : s.n., 2002.
4. **Fehling, Schmidt, Teichmann, Bunje, Bornemann und Middendorf.** Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Betone (UHPC). *Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau.* 2005, Bd. Heft 1.
5. **Juhart, Joachim.** *Adhäsion von UHPC an Stahl und Glas; Dissertation.* Villach : s.n., 2011.
6. **J., Maydl P. Tritthart.** *Baustofflehre GL Vorlesung Skriptum.* Graz : Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, Technische Universität Graz, 2006.
7. **Pirker, Eva Maria.** *Einfluss des Fasergehaltes auf die Eigenschaften von ultrahochfestem carbonfaserverstärkten Beton; Masterarbeit.* Graz : s.n., 2011.
8. **Schmidt, Fehling, Teichmann, Bunje, Bornemann.** *Ultra-Hochfester Beton: Perspektive für die Betonfertigteilindustrie.* s.l. : Universität Kassel, 2003.
9. **Hegger, Will, Kurchbach, Jesse.** Tragverhalten von textilbewehrtem Beton - Verbund, Rissbildung und Tragverhalten. *Beton- und Stahlbetonbau.* 2004, Bd. Heft 6.
10. **Bruckermann, Oliver.** *Zur Modellierung des Zugtragverhaltens von textilbewehrtem Beton; Dissertation.* Aachen : s.n., 2007.
11. **Lüftenegger, Markus.** *Ermittlung der Stahlfaserorientierung an scheibenartigen Bauteilen aus ultrahochfestem Beton und des Einflusses unterschiedlicher Herstellungsmethoden, Diplomarbeit.* Graz : s.n., 2007.
12. **Jungwirth, Jörg.** *Zum Zugtragverhalten von Zugbeanspruchten Bauteilen aus Ultra-Hochleistungs-Faserbeton.* Lausanne : s.n., 2006.
13. **Steffen, Gründwald.** *Performance-based design of self-compacting concrete.* Delft : s.n., 2004.
14. **Schell, Schuler, Schladitz.** Richtungsanalyse von Fasern in Betonen auf Basis der Computer-Tomographie. *Beton und Stahlbeton.* 2010, Bd. Heft 2.
15. **Kontaktwinkel.** Das Labor für zahnärztliche Werkstoffkunde und Biomaterialforschung - Humboldt Universität Berlin. [Online] [Zitat vom: 24. 05 2012.] <http://www.charite.de/zwbmf/>.
16. **Hlawacek, Gregor.** *Kontakwinkelmessung.* 2005. S. 11. Seite 2,3.
17. **Stoffeigenschaften, Imeter - Messsystem für Stoffeigenschaften.** [Online] [Zitat vom: 03. 04 2012.] [http://www.unimeter.net/interim/4\\_OberflSpannung\\_A.htm](http://www.unimeter.net/interim/4_OberflSpannung_A.htm).
18. **Miersemann, Erich.** Kapillarflächen, Mathematisches Institut Universität Leipzig. [Online] [Zitat vom: 03. 04 2012.] [www.math.uni-leipzig.de/~miersemann/saw06pre.pdf](http://www.math.uni-leipzig.de/~miersemann/saw06pre.pdf).

19. **Palecki, Susanne.** *Hochleistungsbeton unter Frost-Tau-Wechselbelastung.* s.l. : Cuvillier Verlag Göttingen, 2006.
20. **Universität Paderborn.** Fakultät für Maschinenbau. [Online] [Zitat vom: 01. 06 2012.] [mb-s1.upb.de/LTM/TME/Vorlesung/Kapitel\\_10-7.PDF](http://mb-s1.upb.de/LTM/TME/Vorlesung/Kapitel_10-7.PDF).
21. Swiss Composite. [Online] 17. 11 2011. [www.swiss-composite.ch/pdf/I-Basalt-Fasern-Gewebe.pdf](http://www.swiss-composite.ch/pdf/I-Basalt-Fasern-Gewebe.pdf).