

Sascha Henner, BSc

**Experimentelle Untersuchungen und Weiterentwicklung
der Feel Fiber Stahlfasern**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

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

Institut für Betonbau

Bmstr. Dipl.-Ing. Dr. techn. Philipp Hadl

Dipl.-Ing. Michael Huß

Graz, Mai 2017

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

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

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

Datum/ Date

Unterschrift/ Signature

Danksagung

Einleitend bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Ing.- Nguyen Viet Tue, welcher es mir ermöglicht hat, diese Arbeit am Institut für Betonbau der TU Graz durchzuführen. Besonderer Dank gebührt meinen Betreuern Herrn Dipl.-Ing. Michael Huß und Herrn Bmstr. Dipl.-Ing. Dr.techn. Philipp Hadl, die mir das in dieser Arbeit behandelte Thema vorgeschlagen haben und in unzähligen Diskussionen immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind.

Weiters danke ich auch den Mitarbeitern des Labors für konstruktiven Ingenieurbau und der TVFA, ohne deren Mithilfe die Versuche bestimmt nicht so reibungslos abgelaufen wären. Stellvertretend möchte ich mich hier bei Herrn Philip Pucher und Herrn Tobias Ederer bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meiner Mutter, welche mir in all den Jahren durch ihre finanzielle Unterstützung das Studium überhaupt erst ermöglicht und mich bei allen Entscheidungen unterstützt hat. Ebenso gilt mein tief verbundener Dank meiner, leider bereits verstorbenen, Großmutter.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei all meinen Freunden, Corpsbrüdern und Studienkollegen, die mich auf meinem bisherigen Lebensweg begleitet und unterstützt haben. Stellvertretend möchte ich hier Oli², Meinhart und Basti nennen, welche für eine Vielzahl für immer unvergesslicher Stunden die Verantwortung tragen.

Kurzfassung

Stahlfaserbeton wird in vielen Bereichen des Bauwesens, von Fundamentplatten über Fertigteile bis hin zum Tunnelbau erfolgreich eingesetzt. Daher ist eine Vielzahl an unterschiedlichen Stahlfaserprodukten am Markt erhältlich. Die Fa. Feel Fiber GmbH produziert eine neuartige und innovative Stahlfaser mit Ankerknoten ohne Endhaken. Das Institut für Betonbau der Technischen Universität Graz ist, seit geraumer Zeit, wissenschaftlicher Begleiter bei der Entwicklung der Feel Fiber Stahlfasern. Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es, den aktuellen Entwicklungsstand abzubilden und weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der Optimierung des Faserdesigns anzustellen.

Die bisherigen Untersuchungen hinsichtlich der Fasertragfähigkeit und Faserverteilung wurden gesammelt, zusammengefasst und ausgewertet. Im Zuge der Arbeit wurden weitere Untersuchungen durchgeführt um die Leistungsfähigkeit der Faser zu optimieren. Zusätzlich wurde ein Verfahren entwickelt um die Oberflächenbeschaffenheit der Faser zu ermitteln.

Aufgrund des Herstellungsprozesses weisen die Fasern unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten auf. Anhand von vorangegangenen Untersuchungen kann vermutet werden, dass die Rauheit der Faser einen bedeutenden Einfluss auf das Tragverhalten der Fasern hat. Daher ist die Oberflächenbeschaffenheit der Faser von großer Bedeutung. Aus diesem Grund wurden Rauigkeitsuntersuchungen mit einem optischen Digitalmikroskop zur Bestimmung der Faseroberfläche durchgeführt. Darauf aufbauend erfolgten Empfehlungen zum zukünftigen Qualitätsmanagement, um eine gleichbleibende Qualität der Fasern zu garantieren.

Durch die Zusammenfassung aller bisher im Zeitraum von Herbst/2015 – April/2017 durchgeführten 4-Punkt-Biegezugversuche entstand eine Übersicht über das bisher durchgeführte Versuchsprogramm. Die Zusammenstellung erfolgte durch eine systematische Auswertung hinsichtlich Faserlänge, Fasermaterial, Ankergröße und Fasermenge. Die Ergebnisse wurden grafisch dargestellt und diskutiert. Empfehlungen für weiterführende Versuche wurden angeführt.

Durchführung, Ergebnisse und Auswertung der eigenen 4-Punkt-Biegezugversuche wurden detailliert dokumentiert. Darunter befinden sich auch die ersten drei Versuchsserien mit Fasern der Großanlage (KWT-Anlage). Bei allen davor durchgeführten Versuchen wurden Fasern aus der Prototypenanlage eingesetzt.

Schlussendlich erfolgte eine Untersuchung der Faserverteilung in bauteilähnlichen Balken. Das Versuchsprogramm variierte hinsichtlich der Faserzugabeart, der Fasermenge und der Einbautechnologie. Aus den hergestellten Balken wurden Platten zur weiteren Untersuchung entnommen. Deren Schnittflächen wurden mittels dem fotooptischem-Verfahrens zur Bestimmung der Faserverteilung untersucht. Die Ergebnisse verdeutlichen die gute Verteilung der Fasern im Beton.

Abstract

Steel fibre concrete has already been used successfully in numerous areas, from foundation slabs to prefabricated parts to tunnel construction. Consequently, a large number of different steel fibre products are available on the market. Feel Fiber GmbH produces a new and innovative steel fibre product with anchor knots. The Institute of Structural Concrete of the University of Technology Graz has been a scientific partner in the development of this steel fibre for quite some time. The task of the present work was to represent the current state of development and to carry out further investigations with regard to the optimization of the fibre design.

The present investigations with regard to fibre carrying capacity and fibre distribution have been collected, summarized and evaluated. Whilst performing the research for this paper, further investigations were performed to optimize the performance of the fibre. In addition, a method was developed to determine the surface roughness of the fibre.

Due to the manufacturing process, the fibres have different surface characteristics. On the basis of previous investigations it can be assumed that the roughness of the fibre has a significant influence on its load bearing behaviour. For this reason, the fibres roughness is of great interest. Therefore, studies concerning the roughness were performed with an optical digital microscope. The surface of the fibres was measured and determined. Subsequently, recommendations were made concerning the future quality management of the fibre product in order to guarantee a consistent quality of such. All tests carried out so far in autumn / 2015 - April / 2017 (4-point flexural tensile tests) were summarized and analysed. The analysis was systematically evaluated with regard to fibre length, fibre material, anchor size and fibre quantity. The results were presented graphically and discussed. Recommendations for further experiments were given. Implementation, results and evaluation of the own 4-point bending tensile tests were documented in detail. Among these results one can find the first three test series with fibres of the large-scale plant (KWT-plant). In all the tests carried out before this, fibres from the prototype plant were used.

Finally, the fiber distribution in structural beams was investigated. The experiments varied in respect to the type of added fiber, to the amount added as well as its manufacturing process. After manufacturing the beams, plates were dissected for further analysis. Their intersections were analysed using a photo-optical method, thus being able to determine the fibre distribution. The results of this study clearly indicate how well the fibres were distributed in the cement.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage und Motivation	1
1.2	Zielsetzung.....	1
1.3	Aufbau der Arbeit	1
2	Stahlfaserbeton – Theoretische Grundlagen	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Wirkungsweise von Stahlfasern.....	4
2.2.1	Gerade Fasern.....	5
2.2.2	Geometrisch verformte Fasern	8
2.3	Fasergehalt.....	10
2.4	Faserorientierung und -verteilung.....	11
2.5	Tragverhalten.....	14
2.5.1	Druckbeanspruchung.....	14
2.5.2	Zug- und Biegezugbeanspruchung	15
2.6	Herstellung, Verarbeitung und Frischbetoneigenschaften	15
2.7	Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Stahlfaserbeton	16
2.7.1	4-Punkt-Biegezugversuche nach DAfStb.....	16
2.7.2	4-Punkt-Biegezugversuche nach ÖVBB-Richtlinie „Faserbeton“	19
3	Fasern der Fa. Feel Fiber GmbH	22
3.1	Herstellung.....	22
3.2	Faserdesign	23
3.3	Wirkungsweise.....	24
3.4	Entwicklungsgeschichte.....	24
4	Untersuchungen zur Rauigkeit	26
4.1	Allgemeines	26
4.2	Grundlagen.....	27
4.2.1	R _Z -Wert.....	29
4.2.2	R _a -Wert.....	29
4.3	Verfahren zur Bestimmung der Faserrauigkeit.....	30
4.4	Ergebnisse.....	31
4.5	Vorschlag zur Qualitätskontrolle	32
5	Untersuchungen zur Tragfähigkeit	33
5.1	Allgemeines	33

5.2	Vorangegangene Biegezugversuche	33
5.3	Eigene Versuche	36
5.3.1	Versuchsprogramm.....	37
5.3.2	Versuchsaufbau und Durchführung.....	38
5.3.3	Versuchsergebnisse und Auswertung	39
5.4	Auswertung aller bisherigen Versuchsergebnisse.....	45
5.4.1	Einführung	45
5.4.2	Variation der Ankergröße (Ritzbreite).....	48
5.4.3	Einfluss der Faserlängen.....	50
5.4.4	Einfluss der Fasermenge.....	51
5.4.5	Einfluss des Fasermaterials	52
5.4.6	Vergleich der Fasern der Prototypen- und der KWT-Anlage.....	53
6	Untersuchungen zur Faserverteilung	56
6.1	Einleitung.....	56
6.2	Versuchsprogramm.....	56
6.3	Versuchsaufbau und Durchführung	56
6.3.1	Untersuchung des Frischbetons	57
6.3.2	Untersuchung der Balken	58
6.4	Versuchsergebnisse.....	59
6.4.1	Frischbetonprüfungen.....	59
6.4.2	Faserverteilung in den Balken	61
7	Zusammenfassung.....	65
	Literaturverzeichnis	67
	Anhang	69
	Abbildungsverzeichnis	82
	Tabellenverzeichnis	85

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

Das Institut für Betonbau der Technischen Universität Graz beschäftigt sich seit Jahren intensiv mit dem Baustoff Faserbeton und wurde von der Fa. Feel Fiber GmbH mit der wissenschaftlichen Begleitung und der Optimierung ihres Faserproduktes beauftragt. Die Fa. Feel Fiber GmbH produziert innovative Stahlfasern für verschiedene Anwendungszwecke im Betonbau. Bei dem Produkt handelt es sich um eine gerade Stahlfaser mit flexibel positionierbaren Ankerknoten. Im Vergleich zu bestehenden Konkurrenzfasern für Normalbeton wird kein Endhaken benötigt um die volle Faserkraft aktivieren zu können. Dadurch ist der Einfluss der Fasern auf die Frischbetoneigenschaften als gering zu erwarten, wodurch sich einerseits niedrigere Streuungen im Tragverhalten ergeben und andererseits die Verarbeitung größerer Fasermengen ermöglicht werden sollte.

Die vorliegende Arbeit fasst die bisher am Institut für Betonbau durchgeführten wissenschaftlichen Arbeiten zusammen und stellt den aktuellen Entwicklungsstand dar. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf den 4-Punkt-Biegezugversuchen nach DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [1], der Betrachtung und Bestimmung der Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Faser, sowie der Faserverteilung in bauteilähnlichen Balken.

1.2 Zielsetzung

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit bestand darin, in Zusammenarbeit mit der Fa. Feel Fiber, die Stahlfaser in Hinblick auf Anzahl und Größe ihrer Ankerknoten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Faserlängen sowie Betongüten zu optimieren. Des Weiteren sollte die Vielzahl von Untersuchungen, die bereits im Vorfeld dieser Arbeit durchgeführt wurden, zusammengefasst und interpretiert werden.

Neben den Ankerknoten wirkt sich die Oberflächenrauigkeit der Faser stark auf die übertragbare Faserkraft aus. Zum jetzigen Entwicklungsstand konnte noch nicht eindeutig festgestellt werden, welcher Traganteil dem Anker und welcher dem Verbund zwischen Faser und Betonmatrix zuzuordnen ist. Eine konstante Rauigkeit ist von großer Bedeutung, um eine konstante Qualität der Fasern gewährleisten zu können. Aus diesem Grund soll ein Messverfahren zur Untersuchung der Faserflächenbeschaffenheit entwickelt werden, welches sich werkseitig in das Qualitätsmanagement integrieren lässt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit werden theoretische Grundlagen zusammengefasst, die für ein besseres Verständnis der durchgeführten Untersuchungen beitragen. Darin wird unter anderem auf das Tragverhalten von

Faserbeton, die Wirkungsweise unterschiedlicher Fasertypen sowie auf die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Stahlfaserbeton eingegangen. Des Weiteren entsteht ein Einblick über den Aufbau, die Herstellung und Entwicklungsgeschichte der Faser der Fa. Feel Fiber GmbH.

Anschließend folgen grundlegende Erläuterungen zur Bestimmung der Beschaffenheit von Stahloberflächen. In diesem Kapitel werden des Weiteren die durchgeführten Messungen zur Bestimmung der Faserrauigkeit beschrieben und ausgewertet, wodurch sich ein Vorschlag zum Qualitätsmanagement der Faserproduktion ergibt.

Im darauffolgenden Kapitel wird das Tragverhalten der Feel Fiber Faser in 4-Punkt-Biegeversuchen untersucht. Die zusammengestellten Versuche wurden sowohl am Institut für Betonbau als auch in einer weiteren Forschungseinrichtung (TBR in Bernburg) durchgeführt. Die jeweiligen Ergebnisse werden systematisch ausgewertet, die daraus resultierenden Ergebnisse dargestellt, diskutiert sowie eine Empfehlung für weitere Versuche dargelegt.

Abschließend wird ein Versuchsprogramm zur Beurteilung der Faserverteilung von Feel Fiber Faser in bauteilähnlichen Balken beschrieben. Darin wird die Faserverteilung in Abhängigkeit der Faserzugabeart, der Einbautechnologie, sowie der Fasermenge untersucht. Die daraus erhaltenen Ergebnisse sind grafisch dargestellt und interpretiert.

2 Stahlfaserbeton – Theoretische Grundlagen

2.1 Allgemeines

Seit den 1950er Jahren werden dem Beton bereits Stahlfasern zugegeben, um seine Eigenschaften unter Zugbeanspruchung zu verbessern. [2] Allerdings wird erst seit den 60er Jahren verstärkt am Verbundwerkstoff Faserbeton geforscht. Der Grundgedanke der Faserzugabe war es lt. [3], die klassische Stabstahlbewehrung zu ersetzen. Zu Beginn der Entwicklung stellte die mit der Faserzugabe einhergehende Verschlechterung der Frischbetoneigenschaften und somit dessen erschwerte Verarbeitung ein erhebliches Problem dar. Heute stellt die Zugabe von geringen Fasermengen (20-40 kg/m³) aufgrund der fortgeschrittenen Betontechnologie keine Problematik mehr dar [4].

Neben Stahlfasern werden heutzutage auch Glaser-, Kunststoff-, Textilfasern und andere Fasermaterialien eingesetzt. Bei allen nicht metallischen Fasern ist auf ihre Beständigkeit in der alkalischen Betonmatrix zu achten. Bei Stahlfasern wirkt sich gerade diese alkalische Umgebung positiv aus, da sie die Faser vor Korrosion schützt. In den Versuchen dieser Arbeit wurden ausschließlich Stahlfasern verwendet. Daher wird nur auf diese eingegangen.

Es handelt sich bei Faserbeton um einen Verbundwerkstoff, der aufgrund der großen Streuungen im Nachrisszugtragverhalten nur eine beschränkte Einsatzmöglichkeit hat. Aus den großen Streuungen ergeben sich sowohl niedrigere charakteristische Festigkeiten als auch abgeminderte Sicherheitsbeiwerte. [5]

Neben der Verbesserung des Nachbruchverhaltens entstehen auch weitere positive Eigenschaften durch die Verwendung von Faserbeton. Dazu zählen beispielsweise eine erhöhte Verschleißfestigkeit und Dichtigkeit, aufgrund der reduzierten Rissbreiten sowie verbesserte Eigenschaften bei Stoß und schwelenden Beanspruchungen (z.B. Erdbeben). Im Erdbebenfall weisen insbesondere Knoten von mehrgeschossigen Rahmenkonstruktionen eine Schwachstelle auf. Lt. [6] ist eine Verstärkung dieser Details mit Stahlfasern eine vielversprechende Methode, da durch die Veränderung der Bauteileigenschaften ein duktileres Nachbruchverhalten ermöglicht wird. Ein weiteres Einsatzgebiet stellen Fundament- und Bodenplatten wie Industriefußböden, Kellersohlplatten, Dichtflächen, Pfahlgestützte Bodenplatten und Unterwasserbetonsohlen dar. Des Weiteren wird Faserbeton häufig für die Auskleidung von Tunnelröhren mittels Spritzbeton oder Tübingen eingesetzt. Nachstehend sind noch weitere Baukonstruktionen angeführt, in denen Faserbeton aufgrund seiner verschiedenen positiven Eigenschaften zum Einsatz kommt:

- Schleusen oder Wehre
- Sanierung- und Instandsetzung mittels Aufbeton und Bauteilergänzung
- Silo- und Bunkeranlagen, Müllsilos
- Leit- und Stützwände

2.2 Wirkungsweise von Stahlfasern

Da es sich beim Baustoff Beton um einen Werkstoff aus Zementmörtel und Zuschlagstoffen handelt, entstehen herstellungsbedingt bereits im unbelasteten Beton Mikrorisse. Nach [7] ist die Kontaktzone von Zementstein und Zuschlag die Schwachstelle im Normalbeton. Es entstehen Mikrorisse genau an der Oberfläche des Zuschlagkorns. Wird der Beton nun auf Zug belastet, entwickeln sich aus den bereits vorhandenen Mikrorissen, mit größer werdender Belastung, Makrorisse und der unbewehrte Beton kann schon bei geringer Last abrupt versagen.

Beton verhält sich unter Zugbeanspruchung bis zum Erreichen der Zugfestigkeit annähernd linear. Das beschriebene Verhalten des unbewehrten Betons ist in Abb. 2-1 dargestellt.

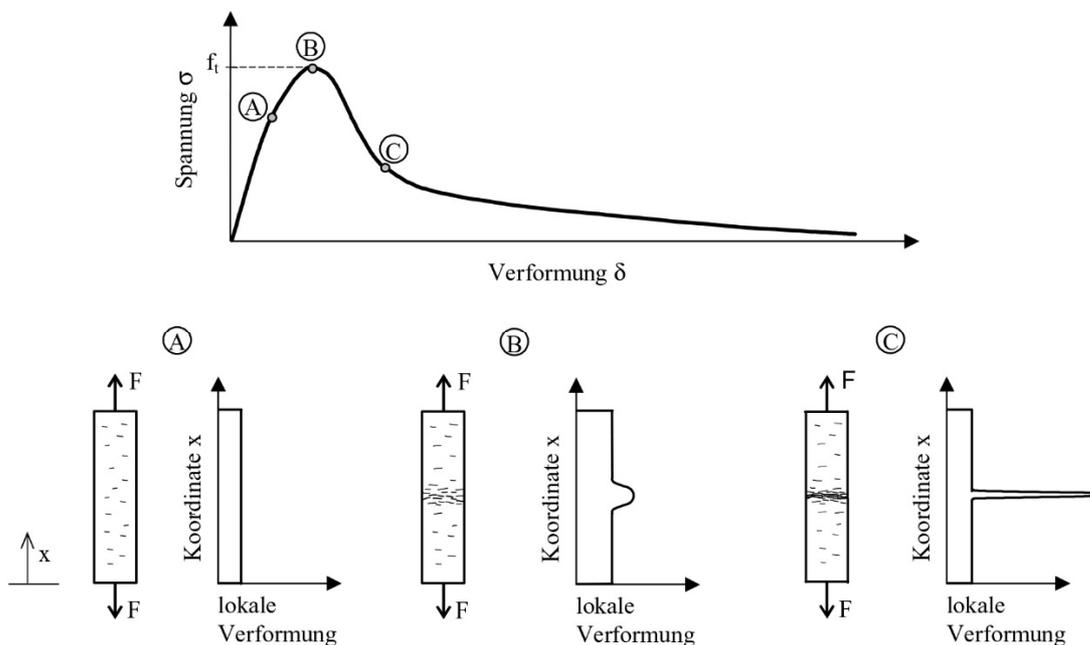


Abb. 2-1 Verhalten von Beton unter Zugbeanspruchung [8]

Nach Entstehen eines Makrorisses nimmt die übertragbare Kraft ab. Wie viel Kraft noch übertragen werden kann ist von der Kornverzahnung der beiden Rissufer abhängig. Durch die Zugabe von Fasern kann einerseits das Öffnen der Mikrorisse verhindert, andererseits können nach Entstehen eines Makrorisses noch Kräfte über den Riss hinweg übertragen werden.

In Abb. 2-2 (links) ist das Verhalten von unbewehrtem Normalbeton unter Zug in Abhängigkeit der Rissbreite dargestellt. Im Bereich des Makrorisses können keine Zugspannungen mehr übertragen werden. Durch die Kornverzahnung und im Bereich der Mikrorissbildung sowie im ungerissenen Bereich können noch Kräfte übertragen werden. Im rechten Bild ist zu erkennen, dass durch die Faserzugabe die übertragbare Zugspannung um die Tragfähigkeit der Fasern erhöht werden kann.

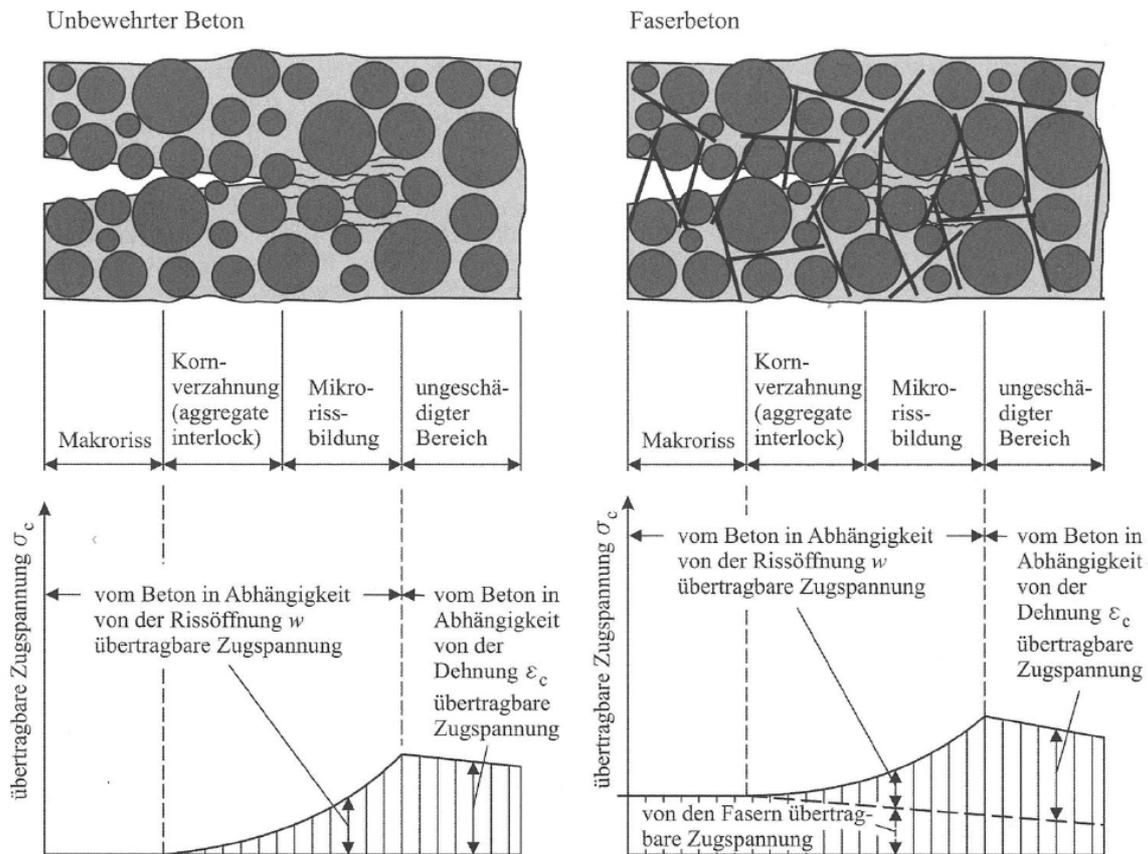


Abb. 2-2 Vergleich der übertragbaren Zugspannung bei unbewehrten Normal- und Faserbeton [9]

Die von den Stahlfasern übertragbare Zugspannung ist von mehreren Faktoren abhängig. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um die Adhäsion (Haftverbund), Reibverbund und dem Formverbund. Nachstehend wird das Tragverhalten von Einzelfasern beschrieben. Dabei wird zwischen geraden und geometrisch verformten Fasern unterschieden. Bei geraden Fasern kommt es zu keinem Formverbund und die Kraft wird nur durch Haft- und Reibverbund übertragen.

2.2.1 Gerade Fasern

Bei geraden Fasern handelt es sich um geometrisch nicht verformte Fasern. Diese Fasern können Kräfte nur über ihre Mantelfläche, jedoch nicht über einen Formverbund übertragen. In Abb. 2-3 sind die drei Phasen des Faserausuges einer geraden Faser aus einer Betonmatrix schematisch dargestellt. Zu Beginn weist die Faser einen durchgängigen Haftverbund mit der sie umgebenden Betonmatrix auf. Mit zunehmender Spannung und Überschreiten der Haftfestigkeit kommt es zu einem sukzessiven Ablösen der Faser aus der Matrix (Debonding). Dieser Vorgang beginnt ausgehend vom Riss in Richtung des Faserendes und geht mit einer Relativverschiebung der Faser zur Matrix sowie dem Lösen des Haftverbundes einher. Die Faser wird aus der Matrix herausgezogen und es entsteht eine Reib-Schlupf-Beziehung. Ist die Faser vollständig von der Matrix abgelöst, so wird sie unter einer konstanten Reibspannung bei zunehmender Rissöffnung, ausgezogen. Die Faserspannung nimmt in dieser Phase kontinuierlich ab. In der Realität sind die Stahlfasern nicht in Krafrichtung orientiert, sondern willkürlich angeordnet.

In [10] wurde gezeigt, dass für das Ausziehen von mehreren Fasern aus einer Betonmatrix mit der Annahme einer starr-ideal plastischen Verbundschubspannungs-Schlupfbeziehung ausreichend genaue Ergebnisse erzielt werden können.

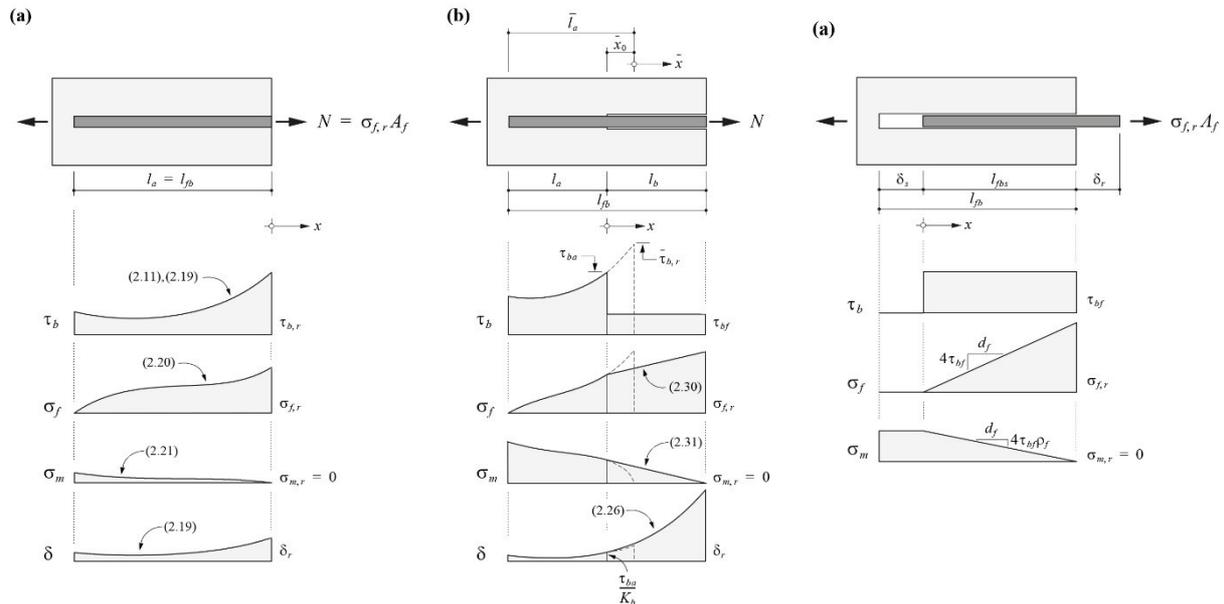


Abb. 2-3 Faseraktivierung: Verlauf der Verbundschubspannungen, der Spannungen in Faser und Matrix und Verlauf der Relativverschiebungen; Haftverbund (links); Haft- und Reibungsverbund (Mitte); Faserauszug: Prinzipskizze und qualitativer Verlauf der Faser- und Matrixspannungen (rechts) [10]

Liegt die Zugspannung in der Faser unter der Faserzugfestigkeit, so wird die Faser ausgezogen. Bei Faserzugspannungen über der Faserzugfestigkeit kommt es zu einem Reißen der Fasern. Letzteres ist unerwünscht und kann durch eine entsprechende Begrenzung der Faserausnutzung vermieden werden. Um dies zu erreichen, muss die in die Faser über die Mantelfläche eingeleitete Kraft kleiner als die vom Faserquerschnitt aufnehmbare Kraft sein. So kann sichergestellt werden, dass die Faser nicht reißt, sondern aus der Betonmatrix ausgezogen wird. Bei einer optimalen Ausnutzung der Faserkapazität ist die Faserspannung genauso groß wie die Zugfestigkeit der Faser.

Unter Annahme eines starr-plastischen Verbundgesetzes ergibt sich die Faserausziehungskraft für Fasern mit Kreisquerschnitt zu [9]:

$$F_{fb} = U_f \cdot l_e \cdot \tau_f = \pi \cdot d_f \cdot l_e \cdot \tau_f \quad (2.1)$$

d_f Faserdurchmesser

l_e Einbindelänge

τ_f Schubverbundfestigkeit zwischen Faser und Matrix

U_f Umfang der Faser

Wird in die Formel für die Faserspannung als Grenzwert die Zugfestigkeit der Faser eingesetzt, so ergibt sich durch Umformen die Kraft bei der die Faser Reißen würde [9]:

$$\sigma_f = \frac{F_{ft}}{A_f} \rightarrow F_{ft} = f_{ft} \cdot \frac{\pi \cdot d_f^2}{4} \quad (2.2)$$

σ_f	Faserspannung
F_{ft}	Faserausziehungskraft
f_{ft}	Zugfestigkeit der Faser
A_f	Querschnittsfläche der Faser

Die aufnehmbare Kraft der Faser hängt stark von der Einbindelänge l_e der Faser ab. Die maximal wirksame Faserlänge beim Auszug kann die halbe Faserlänge nicht überschreiten (siehe Abb. 2-4 links). Da sich aber der Riss statistisch betrachtet nicht immer in der Mitte der Faser befindet (siehe Abb. 2-4 Mitte), ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Einbindelänge, die eine mittlere Einbindelänge von $l_f/4$ zur Folge hat (siehe Abb. 2-4 rechts).

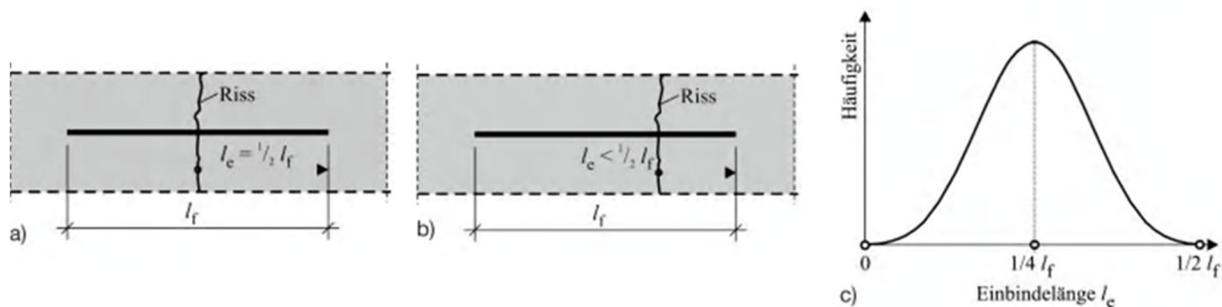


Abb. 2-4 Häufigkeitsverteilung der Einbindelänge l_e [9]

Bei der Gleichsetzung der Formel (2.1) mit (2.2) entsteht der Grenzfall, bei dem die Faser vollständig ausgenutzt ist. Beim Einsetzen der maximal möglichen Einbindelänge $l_e = l_f/2$ ergibt sich durch Umformen die sogenannte kritische Faserlänge l_{crit} , in welcher der zuvor beschriebene Gleichgewichtszustand erreicht wird. [9]

$$l_{crit} = \frac{f_{ft} \cdot d_f}{2 \cdot \tau_f} \quad (2.3)$$

Durch weiteres Umformen der Formel (2.3) ergibt sich die Faserschlankheit, bei der die Faser mit einer Einbindelänge von $l_e = l_f/2$ vollständig ausgenutzt wird [11]:

$$\frac{l_f}{d_f} \leq \frac{f_{ft}}{2 \cdot \tau_f} \quad (2.4)$$

Um eine möglichst effektive Faserausnutzung zu erreichen, sollte die maximale Faserzugspannung so nah wie möglich an der Zugfestigkeit der eingesetzten Faser liegen. Folgende Beziehungen sind daher für Dimensionierung einer Stahlfaser zu beachten. Bei einem Verhältnis von $2 \cdot l_e < l_{crit}$ tritt ein Versagen durch Faserauszug ein. Wenn $2 \cdot l_e = l_{crit}$ ist, herrscht ein Gleichgewicht zwischen Faserspannung und Faserzugfestigkeit. Bei $2 \cdot l_e > l_{crit}$ kommt es zum Faserreißen.

Als ein wichtiger Faktor für die Verarbeitbarkeit des Frischbetons wird lt. [12] das Verhältnis von l_f/d_f genannt. Eine Erhöhung der Faserschlankheit wirkt sich positiv auf den Faserausnutzungsgrad aus, solange es zu keinem Faserreißen kommt. Die Erhöhung der Faserausnutzung hat eine Verschlechterung der Verarbeitbarkeit zufolge. Nach [12] liegt ein günstiger Kompromiss zwischen den Werten 60 und 100 vor. Bei einem Wert >100 kann es beim Mischprozess zu Faserkonzentration und in weiterer Folge zu sogenannten Igelbildungen (Agglomerationen) kommen. [11]

2.2.2 Geometrisch verformte Fasern

Bisher wurde das Verhalten einer geraden, kreisrunden Faser beschrieben. Derartige Fasern kommen hauptsächlich bei UHPC zum Einsatz. In Normalbeton reicht in der Regel die vorhandene Verbundspannung nicht aus, um die Zugfestigkeit einer geraden Faser voll zu aktivieren. Zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Stahlfasern werden diese geometrisch verformt. Hier wirkt sich die Form der verwendeten Faser entscheidend auf den Auszieh Widerstand der Einzelfaser aus. Bei der Verwendung von geometrisch verformten Fasern unterscheiden sich die Versagensmechanismen gegenüber geraden glatten Fasern.

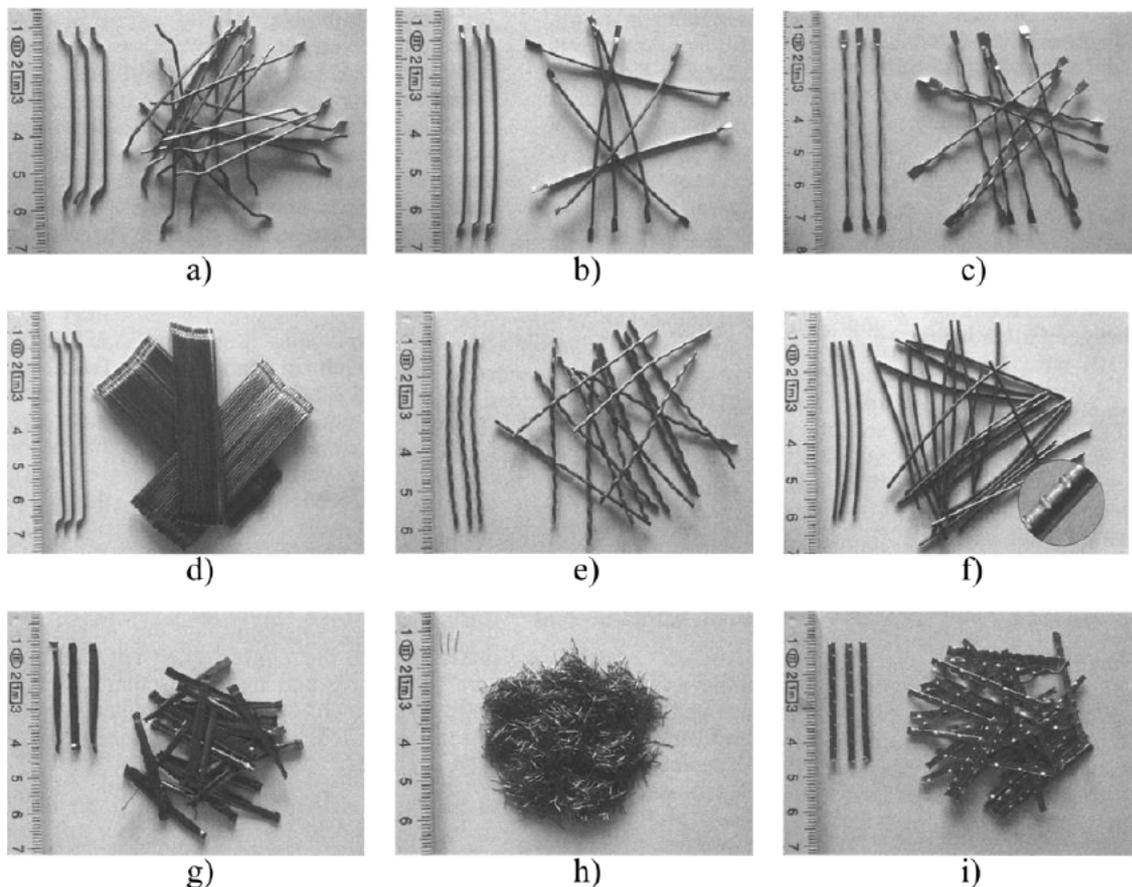


Abb. 2-5 Unterschiedliche Stahlfaserarten [9]

- a) Gerade Stahl Drahtfaser mit gebogenem Endhaken und glatter Oberfläche
- b) Gerade Stahl Drahtfaser mit abgeplattetem Endhaken und glatter Oberfläche

- c) Gewellte Stahldrahtfaser mit abgeplattetem Endhaken und glatter Oberfläche
- d) Gerade Stahldrahtfaser mit gebogenem Endhaken und glatter Oberfläche, verklebt
- e) Gewellte Stahldrahtfaser mit glatter Oberfläche
- f) Gerade Stahldrahtfaser mit profilierter Oberfläche
- g) Spanfaser
- h) Gerade Mikrofaser mit glatter Oberfläche
- i) Blechfaser mit profilierter Oberfläche

Die in Abb. 2-5 dargestellten Stahlfasern stellen eine Übersicht der am Markt erhältlichen Stahlfasern dar. Diese unterscheiden sich in ihrer Geometrie, Durchmesser, Oberflächenbeschaffenheit und Zugfestigkeit voneinander. [9]

Stahldrahtfasern werden üblicherweise in einer Länge von 15 bis 70 mm hergestellt und weisen eine Faserschlankheit zwischen 45 und 100 auf. Die gewählte Faser sollte die 2 bis 4-fache Länge des verwendeten Größtkorndurchmessers aufweisen und sich gut in das Betongefüge integrieren. Sie haben üblicherweise Zugfestigkeiten von 1000 N/mm² bis 1500 N/mm², können für Spezialanwendungen aber auch mehr als 2000 N/mm² aufweisen. [9]

Geometrisch verformte Stahldrahtfasern [Abb. 2-5 a) bis e)] mit Endhaken beeinflussen das Tragverhalten im ungerissenen Zustand nur unwesentlich. Kommt es zur Rissbildung und der Verschiebung der Rissufer, so werden die Fasern aktiviert und das Nachbruchverhalten positiv beeinflusst. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Einbindelänge der Faser eine untergeordnete Rolle spielt. Erst nach Entstehen eines Risses und Verschiebung der Rissufer können die Fasern über die Endhaken aktiviert werden. Hier reicht es aus, wenn der gesamte Endhaken ausreichend tief in die Betonmatrix eingebettet ist, um ein Abplatzen der Matrix zu vermeiden. Durch den Formverbund der Endhaken können nun Zugkräfte über das Rissufer hinweg übertragen werden. Der Ausziehvorgang kann in zwei unterschiedliche Vorgänge unterteilt werden, welche nach einander ablaufen und der in Abb. 2-6 schematisch dargestellt ist. [9]

Der Endhaken wird zuerst aktiviert und plastisch verformt. In Abhängigkeit von Faserfestigkeit, Anzahl der Umlenkpunkte und der umgebenden Betonmatrix entsteht ein Widerstand gegen das Herausziehen. Während der plastischen Verformung des Endhaken entstehen, wie in Abb. 2-6 zu sehen ist, Fließgelenke und es tritt die maximale Ausziehungskraft auf. Nach diesem Vorgang kommt der bereits zuvor beschriebene Reibverbund zu tragen. Der gerade gezogene Endhaken gleitet im Faserkanal. Der auftretende Widerstand ist wesentlich kleiner als zu Beginn des Ausziehvorganges. [9]

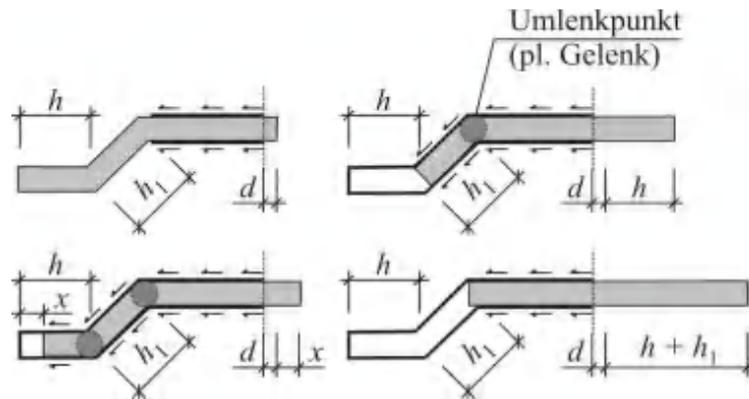
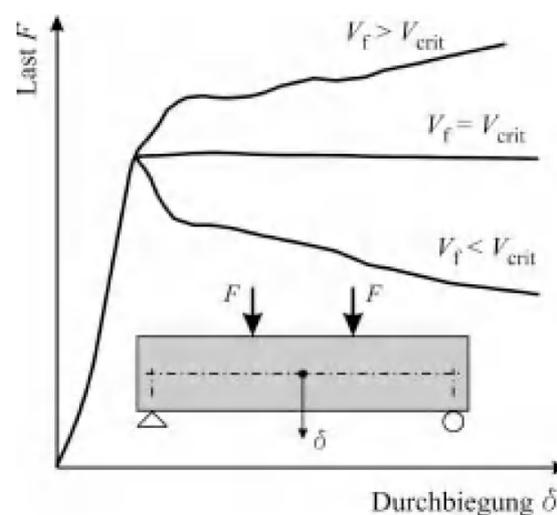


Abb. 2-6 Versagensmechanismus von Endhaken [9]

2.3 Fasergehalt

Nach Entstehen eines Makrorisses wird das Nachrisszugtragverhalten des Bauteils, hauptsächlich durch die Menge und die Wirksamkeit der zwischen den Rissufern vorhandenen Fasern, beeinflusst. Der Fasergehalt wird mit V_f bezeichnet und entweder in kg/m^3 oder in Volumenprozent angegeben. Bei Normalbeton wird der Fasergehalt in kg/m^3 angegeben, während bei UHPC ist die Angabe in Volumenprozent üblich ist. Wenn die Fasern, welche die Rissufer kreuzen, gerade noch in der Lage sind, die auftretenden Zugkräfte zu übertragen, so wird von einem kritischen Fasergehalt V_{crit} gesprochen. Lt. [9] wird für Stahlfasern und Normalbeton ein kritischer Fasergehalt von 0,2 bis 0,3 Vol.-% (entspricht 16 – 24 kg/m^3) angegeben.

In Abb. 2-7 ist das Tragverhalten eines Prüfkörpers in Abhängigkeit seines Fasergehaltes dargestellt. Entspricht der Fasergehalt genau dem kritischen Fasergehalt ($V_f = V_{\text{crit}}$), bleibt deshalb die aufnehmbare Kraft nach der Erstrisslast theoretisch konstant. Steigt der Fasergehalt an ($V_f > V_{\text{crit}}$), so tritt bei größer werdender Verformung eine Laststeigerung auf. Nimmt er ab ($V_f < V_{\text{crit}}$), ist daher nach dem Entstehen eines Makrorisses ein Absinken der Last zu erkennen.


 Abb. 2-7 Kritischer Fasergehalt V_{crit} [9]

Wirksame prozentuale Fläche der vorhandenen Fasern im Betonquerschnitt lt. [9]:

$$A' = \frac{V_f}{\frac{1}{4}\pi d_f^2} \quad (2.5)$$

V_f vorhandener Fasergehalt

d_f Faserdurchmesser

Aufnehmbare Zugspannung im Betonquerschnitt [9]:

$$\sigma'_f = F_V \cdot A' \quad (2.6)$$

$$\sigma'_f = \left(\pi \cdot d_f \cdot \tau_f \cdot \frac{l_f}{4} \right) \cdot \frac{V_f}{\left(\frac{1}{4}\pi d_f^2 \right)} = \tau_f \cdot V_f \cdot \frac{l_f}{d_f} \quad (2.7)$$

F_V aufnehmbare Kraft

σ'_f aufnehmbare Zugspannung

τ_f Schubverbundfestigkeit zwischen Faser und Matrix

l_f Faserlänge

Kritischer Fasergehalt V_{crit} [9]:

$$V_{crit} = \frac{\sigma_{riss}}{\tau_f} \cdot \frac{d_f}{l_f} \quad (2.8)$$

σ_{riss} Rissspannung

Formel (2.8) gilt nur bei geraden Fasern. Die kritische Faserlänge, die Faserschlankheit und die übertragbare Verbundspannung sind immer in Zusammenhang mit dem kritischen Fasergehalt zu betrachten, da sie diesen maßgeblich beeinflussen.

Die theoretisch möglichen Fasergehalte binden sich an herstellungstechnische Einschränkungen wie die Verarbeitbarkeit und Einmischbarkeit. Abhängig vom Fasergehalt und dem verwendeten Fasertyp kann es starke Unterschiede in der Leistungsfähigkeit des Faserbetons geben. Weitere Einflussfaktoren sind die Art und Weise der Faserzugabe, die Bauteilgeometrie, sowie die Frischbetoneigenschaften. Des Weiteren können sich Unregelmäßigkeiten in der Faserverteilung und Orientierung erheblich auf die Leistungsfähigkeit des Faserbetons auswirken. Daher ist es notwendig, die Festbetoneigenschaften am eingesetzten Faserbeton zu überprüfen. [9]

2.4 Faserorientierung und -verteilung

Es ist von großer Bedeutung, dass die Fasern im Querschnitt gleichmäßig verteilt sind. Um eine homogene Verteilung zu erreichen, besteht die Notwendigkeit, alle Komponenten des Betons so auf einander abzustimmen, damit dies auch gewährleistet werden kann. Hier wirken sich einige Faktoren stark auf die Faserverteilung aus. Die Faserlänge muss in einem angemessenen Verhältnis zur Bauteildicke stehen und sollte mindestens die doppelte Länge des Größtkorndurchmessers besitzen. Diese Randbedin-

gung dient dazu, eine Igelbildung zu vermeiden. Wie in Abb. 2-8 zu erkennen ist, wirkt sich der Größtkorndurchmesser des verwendeten Zuschlagstoffes stark auf die Faserverteilung aus. [9] Weitere Faktoren für eine homogene Verteilung sind die Faserzugabemethode und die Mischdauer.

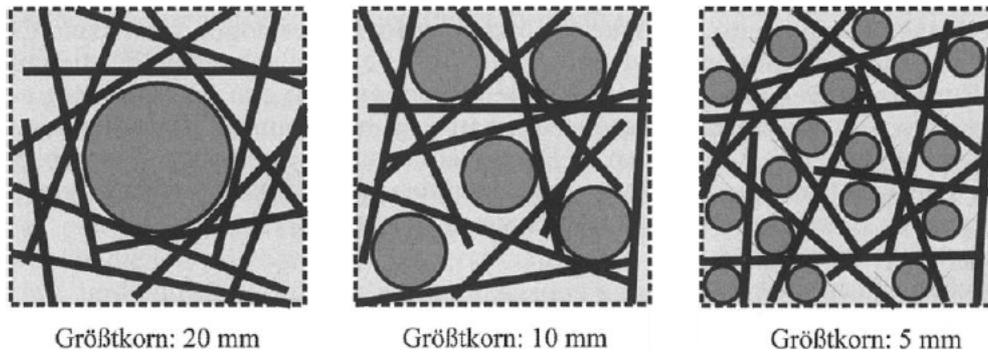
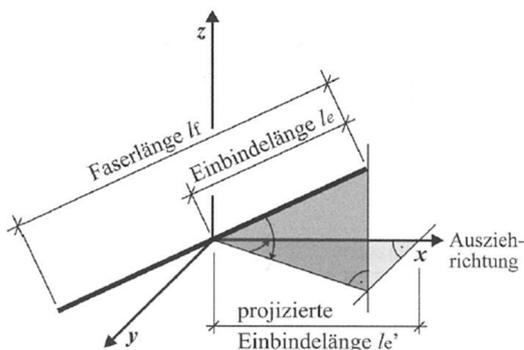


Abb. 2-8 Einfluss der Korngröße auf Faserverteilung, -orientierung und Verarbeitbarkeit [9]

Um die Faserorientierung abzubilden, wurden zahlreiche Untersuchungen angestellt. Zur Beschreibung der Ausrichtung der Fasern in einem Bauteil hat sich der Faserorientierungsbeiwert η etabliert. Dieser ist der Mittelwert der Verhältnisse aller in Belastungsrichtung, projizierten Fasereinbindelängen zu den tatsächlichen Einbindelängen. [13] Umso geringer die Faserorientierung ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Faser den auftretenden Riss kreuzt.



$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{l_{e,i}'}{l_{e,i}} \quad (2.9)$$

n	Anzahl Fasern
l_e'	projizierte Einbindelänge
l_e	Einbindelänge

Abb. 2-9 Definition der Faserorientierung η [9]

In Abb. 2-10 sind eine ein-, zwei- und dreidimensionale Faserorientierung schematisch dargestellt, der zugehörige Faserorientierungsbeiwert ergibt sich nach [10] wie folgt:

- Dreidimensionale Orientierung: 0,5
- Zweidimensionale Orientierung: $\frac{2}{\pi} = 0,637$
- Eindimensionale Orientierung: 1

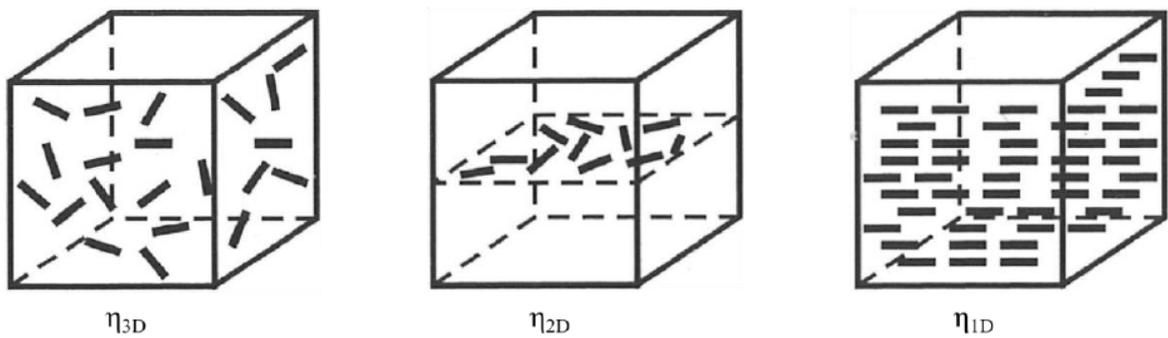


Abb. 2-10 Faserorientierung [9]

Eine Störung der gleichmäßigen dreidimensionalen Orientierung im Raum stellen Schalflächen dar. An solchen Grenzflächen kommt es zu einer starken Ausrichtung der Stahlfasern bis hin zu einer parallelen Ausrichtung und somit zu einem Übergang von einer drei- zu einer zweidimensionalen Verteilung. [14] Dieses Verhalten wird als Randeffect bezeichnet. Er wirkt sich besonders bei kleinen Probekörperabmessungen aus, indem er die mittlere Faserorientierung stark beeinflusst. Der im Randeffect zu tragen kommende Bereich ist in [15] mit einem Abstand von $l_f/2$ zur Randfläche festgelegt worden (siehe Abb. 2-11).

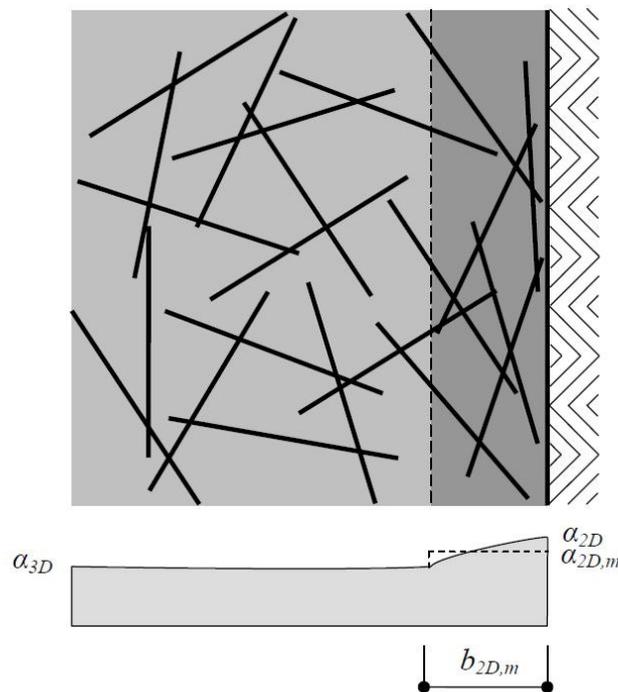


Abb. 2-11 Faserorientierung an Grenzflächen und Verlauf des Faserorientierungsbeiwertes [14]

2.5 Tragverhalten

Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche Arten von Faserbeton. Den sogenannten Stahlfaserbeton und den betonstahlbewehrten Stahlfaserbeton. Stahlfaserbeton hat keine gleichzeitig vorhandene Betonstahlbewehrung und ist der in dieser Arbeit betrachtete Faserbeton. Betonstahlbewehrter Stahlfaserbeton ist zusätzlich zur klassischen Stabstahlbewehrung mit Stahlfasern bewehrt. Wie schon unter Abschnitt 2.2 beschrieben, werden nach Entstehen eines Makrorisses die Zugspannungen nur mehr durch die den Riss kreuzenden Stahlfasern übertragen.

In den nachfolgenden Punkten wird darauf eingegangen, wie sich die Stahlfasern im Beton auf das Tragverhalten auswirken. Dabei wird hinsichtlich den verschiedenen Beanspruchungsarten Druck, Zug bzw. Biegung unterteilt.

2.5.1 Druckbeanspruchung

Bei Druckbeanspruchungen wird die Widerstandsfähigkeit des Stahlfaserbetons hauptsächlich durch die Betonfestigkeit bestimmt, die enthaltenen Stahlfasern haben nur einen geringen Einfluss. Bei der Herstellung kann, bedingt durch die Fasern, ein größerer Anteil an Luftporen entstehen. Diese wirken sich nachteilig auf die Festigkeit aus. Allerdings steht diesem ein positiver Einfluss der Stahlfasern bezüglich Druckfestigkeit und E-Modul gegenüber. Nachstehende Auswirkungen lassen sich lt. [9] feststellen:

- Durch Erhöhung des Fasergehaltes steigen die Druckfestigkeit und die Bruchdehnungen in geringem Maße an.
- Unter einachsiger Druckbeanspruchung oberhalb von 80% der Zylinderdruckfestigkeit lassen sich durch die Zugabe von Stahlfasern leichte Erhöhungen der Steifigkeit beobachten.
- Wie in Abb. 2-12 zu erkennen ist, flacht sich der abfallende Ast der Arbeitslinie mit steigendem Stahlfasergehalt immer mehr ab. Im Vergleich zu Beton ohne Fasern lassen sich beim Faserbeton auch nach überschreiten der Druckfestigkeit und bei verhältnismäßig großen Dehnungen noch hohe Druckspannungen übertragen.
- Ein maßgebender Faktor für die Verbesserung des Nachbruchverhaltens ist die Leistungsfähigkeit der verwendeten Fasern.

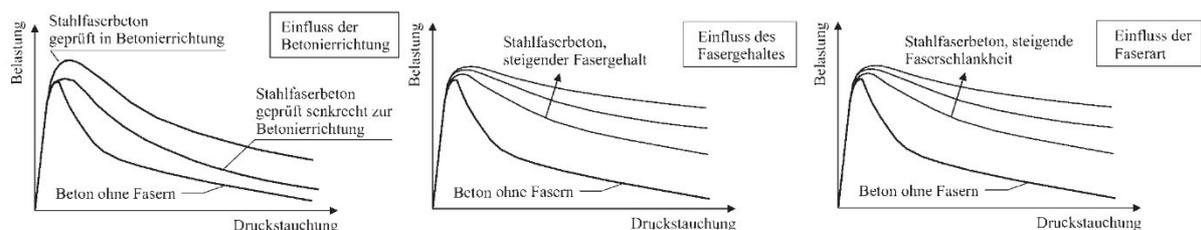


Abb. 2-12 Einflussparameter auf die Arbeitslinie von Stahlfaserbeton unter einachsiger Druckbeanspruchung [9]

2.5.2 Zug- und Biegezugbeanspruchung

Mit zunehmender Belastung auf Zug oder Biegung ist, bis zur Höhe der Erstrisslast, ein lineares Ansteigen des Tragverhaltens zu beobachten. Anschließend wird das Tragverhalten durch die Leistungsfähigkeit der in der Zugzone befindlichen Fasern beeinflusst. Die Höhe der Erstrisslast hängt von der Zugfestigkeit des verwendeten Betons ab, die Stahlfasern kommen erst nach dem Bruch zur Wirkung. Das Nachbruchtragverhalten des Stahlfaserbetons wird durch eine Vielzahl an Faktoren (Fasermenge, -ausrichtung, -art, etc.) beeinflusst. Diese Einflüsse spiegeln sich dann im Nachrisszugtragverhalten wider. [9]

Wie bereits besprochen wirkt sich der kritische Fasergehalt maßgebend auf das Tragverhalten aus. Wird der kritische Fasergehalt überschritten, so steigt die Nachrisszugfestigkeit über die für den Erstriss notwendige Biegezugkraft hinaus an. Die dabei auftretenden Schnittgrößen können von den Fasern aufgenommen werden. Eine Laststeigerung sowie die damit einhergehende Mehrfachrissbildung (Multi-Cracking beziehungsweise Deflection-Hardening) ist möglich. Bei einem Unterschreiten des kritischen Fasergehaltes kann nach dem Erstriss die vorhandene Biegezugkraft nicht aufgenommen werden.

Anzumerken ist, dass ein Deflection-Hardening Verhalten im Biegezugversuch, unter Zugbeanspruchung sowohl zu einem Strain-Softening als auch Strain-Hardening Verhalten führen kann. Hingegen führt ein Deflection-Softening Verhalten im Biegezugversuch zwangsläufig zu einem Strain-Softening Verhalten.

Aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren kann aufgrund der verwendeten Fasern deren Menge und Betonzusammensetzung nicht auf die Tragfähigkeit geschlossen werden. Es ist daher notwendig, eine Prüfung und Klassifizierung der Nachrisszugfestigkeit durch entsprechende Versuche durchzuführen. [9]

In Abschnitt 2.7 wird auf die derzeit in Österreich und Deutschland definierten Richtlinien zur Klassifizierung von Faserbetonen und die dafür eingesetzten 4-Punkt-Biegezugversuch genauer eingegangen.

2.6 Herstellung, Verarbeitung und Frischbetoneigenschaften

Nach [9] sollten durch die Faserzugabe weder die Eigenschaften des Frischbetons noch die des erhärteten Betons nachteilig beeinflusst werden. Allerdings wirkt sich die Zugabe von Stahlfasern immer in einem gewissen Maße auf die Frischbetoneigenschaften aus. Ebenfalls müssen die Fasern eine ausreichende Festigkeit aufweisen, um während dem Einmischen im Beton nicht zerstört zu werden. Stahlfasern, insbesondere solche mit Endhaken, neigen zur Agglomeration miteinander, was ein mechanisches Trennen vor dem Einmischen notwendig macht.

Da sich die Konsistenz des Betons nach Zugabe der Fasern verschlechtert, was sich bei höheren Fasergehalten nachteilig auf die Frischbetonklasse auswirken kann, muss die Ausgangskonsistenz entsprechend gewählt werden. Die Prüfung der Frischbetoneigenschaften erfolgt üblicherweise durch die Ermittlung des Ausbreitmaßes, was in weiterer Folge auch eine Kategorisierung des Betons ermöglicht.

Heute wird Stahlfaserbeton in einer weicheren Konsistenz eingebaut, welches ein Ausbreitmaß im Bereich von 48 bis 55 cm oder weicher bedeutet.

Durch einen steigenden Fasergehalt nimmt der Verdichtungsaufwand proportional zu. Es lässt sich trotz der erhöhten Verdichtungsdauer der Luftporengehalt eines Faserbetons nicht auf den eines Normalbetons reduzieren. Die längere Verdichtungsdauer birgt die Gefahr, dass sich die Fasern, da sie eine höhere Dichte besitzen, nach unten absetzen.

Bei der Bestimmung des Ausbreitmaßes ist der Faserbeton nach Entfernen des Zylinders wesentlich formstabiler als Normalbeton. Durch die Zugabe von Fließmitteln und/oder Verflüssigern können die Frischbetoneigenschaften verbessert werden. Lt. [16] wird eine Reduktion des Ausbreitmaßes von 5-10cm der Werte von Normalbeton empfohlen. Bei der Dosierung des Fließmittels ist stets darauf zu achten, dass es zu keinen Entmischungserscheinungen kommt.

2.7 Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Stahlfaserbeton

2.7.1 4-Punkt-Biegezugversuche nach DAfStb

Die DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [1] definiert zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Stahlfaserbeton 4-Punkt-Biegezugversuche an Standardbiegebalken. Dabei wird der Stahlfaserbeton in Leistungsklassen, anhand seiner charakteristischen Nachrissbiegezugtragfähigkeit bei den nachstehenden Durchbiegungen, unterteilt:

- Durchbiegung $\delta_1 = 0.5$ mm (L1)
- Durchbiegung $\delta_2 = 3.5$ mm (L2)

Die Angabe der Leistungsklasse erfolgt durch den Großbuchstaben L und zwei Zahlen (z.B.: L 1,3/0,8). Wenn es sich um reinen Stahlfaserbeton handelt, dann steht die Leistungsklasse L1 (erste Zahl) für den Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS) und die Leistungsklasse L2 (zweite Zahl) für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS). Über die in [1] angegebenen Beiwerte lässt sich der Bemessungswert der zentrischen Nachrisszugfestigkeit ermitteln, welcher dann zur Bemessung verwendet wird. Diese Berechnung wird nachfolgend genauer erläutert. Des Weiteren lässt er sich verwenden, um die Mindestbewehrung des Betonstahls zu vermindern. [9]

Die verwendeten Versuchskörper weisen die Abmessungen 150 mm x 150 mm x 700 mm auf. In Abb. 2-13 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Die Lagerung und die Krafteinleitung erfolgten über Rollen, um eine horizontale Krafteinleitung zu verhindern. Die Auflager haben einen Abstand von 600 mm. Die aufgebrachte Kraft greift in den Drittelpunkten zwischen den beiden Auflagern an. Die Kraft F wird mittels einer Kraftmessdose gemessen. Die Durchbiegung wird durch zwei Induktive Wegaufnehmer, welche mittig an beiden Seiten des Probekörpers anzubringen sind, gemessen. Die Ergebnisse beider Wegaufnehmer werden gemittelt und ergeben so die Durchbiegung. Eine Darstellung der

erhaltenen Ergebnisse erfolgt in den sogenannten Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven ($\sigma_{eq} = M/W$).

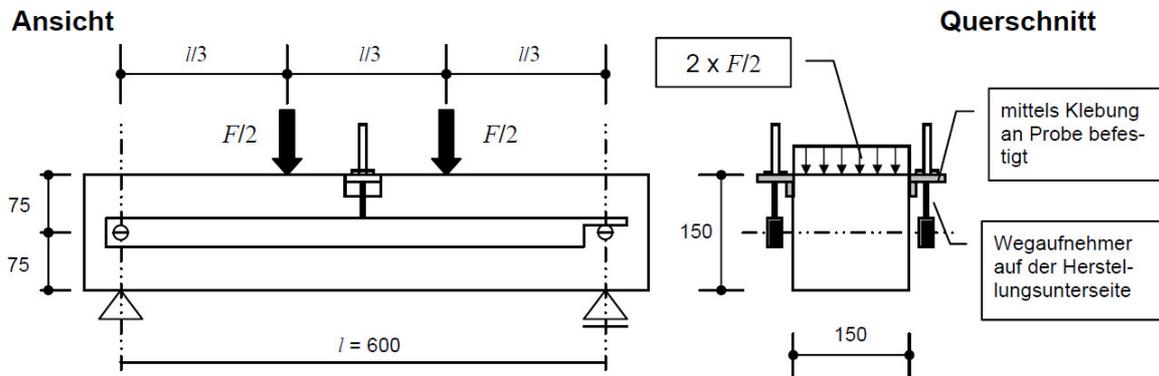


Abb. 2-13 Messvorrichtung zur Ermittlung der Nachrissbiegezugfestigkeiten (Abmessungen in mm) [1]

Anschließend wird mit den nachstehenden Formeln die mittlere Nachrissbiegezugfestigkeit berechnet:

$$f_{cf_{tm,L1}}^f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_{0,5,i} \cdot l}{b_i \cdot h_i^2} \quad (2.10)$$

$$f_{cf_{tm,L2}}^f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_{3,5,i} \cdot l}{b_i \cdot h_i^2} \quad (2.11)$$

Der kleinere Wert aus

$$f_{cf_{tk,Li}}^f = e^{(L f_{cf_{tm,Li}}^f - k_s \cdot L_s)} \leq 0,51 \cdot f_{cf_{tm,Li}}^f \quad (2.12)$$

ergibt die charakteristische Nachrisszugfestigkeit. Bei Streuungen des Tragverhaltens $< 25\%$ wird der rechte Term mit $0,51 \cdot f_{cf_{tm,Li}}^f$ maßgebend. Steigt der Variationskoeffizient über 25% an, so muss der linke Term $e^{(L f_{cf_{tm,Li}}^f - k_s \cdot L_s)}$ berechnet werden. Um diesen Wert zu erhalten, müssen nachfolgende Berechnungsschritte durchgeführt werden.

Dabei stellt $L f_{cf_{tm,Li}}^f$ den Mittelwert der logarithmierten Einzelprüfergebnisse dar.

$$L f_{cf_{tm,Li}}^f = \frac{1}{n} \sum \ln(f_{cf_{tm,Li,i}}^f) \quad (2.13)$$

Unter zu Hilfenahme der nachfolgenden Formel kann anschließend L_s , die Standardabweichung der logarithmierten Einzelprüfergebnisse, berechnet werden.

$$L_s = \sqrt{\frac{\sum (L f_{cf_{tm,Li}}^f - \ln(f_{cf_{tm,Li,i}}^f))^2}{n-1}} \quad (2.14)$$

Der Wert k_s ist der Fraktilefaktor der unbekannt Standardabweichung des 5%-Quantil. Er kann entsprechend der Probenanzahl der Tabelle 2-1 entnommen werden, wobei eine Mindestprobenanzahl von sechs Prüfkörpern vorgeschrieben ist.

Tabelle 2-1 Fraktilefaktor k_s [1]

Probenanzahl n	Fraktilefaktor k_s
6	2,336
9	2,141
12	2,048
15	1,991
20	1,932
25	1,895
100	1,76
∞	1,645

Mit der charakteristischen Nachrissbiegezugfestigkeit $f_{cfuk,Li}^f$ lassen sich nun die Grundwerte der zentrischen Nachrisszugfestigkeit berechnen. Hierzu werden die Beiwerte $\beta_{L1}=0,40$ und $\beta_{L2}=0,25$ wie folgt herangezogen.

$$f_{ct0,L1}^f = f_{cfuk,L1}^f \cdot \beta_{L1} \quad (2.15)$$

$$f_{ct0,L2}^f = f_{cfuk,L2}^f \cdot \beta_{L2} \quad (2.16)$$

In Tabelle 2-2 sind die Leistungsklassen L1 und L2 mit der zugehörigen zentrischen Nachrisszugfestigkeit $f_{ct0,Li}^f$ angeführt.

Tabelle 2-2 Leistungsklassen L1 und L2 für Stahlfaserbeton mit zugehörigen Grundwerten der zentrischen Nachrisszugfestigkeiten

Spalte	1	2	3	4	5	6
	Grundwerte der zentrischen Nachrisszugfestigkeit f_{ct0}^f in N/mm ²					
	Verformung 1		Verformung 2			
Zeile	L1	$f_{ct0,L1}^f$	L2	$f_{ct0,L2}^f$	$f_{ct0,u}^f$	$f_{ct0,s}^f$
1	0	0,16	0	-	-	-
2	0,4	0,16	0,4	0,10	0,15	0,15
3	0,6	0,24	0,6	0,15	0,22	0,22
4	0,9	0,36	0,9	0,23	0,33	0,33
5	1,2	0,48	1,2	0,30	0,44	0,44
6	1,5	0,60	1,5	0,38	0,56	0,56
7	1,8	0,72	1,8	0,45	0,67	0,67
8	2,1	0,84	2,1	0,53	0,78	0,78
9	2,4	0,96	2,4	0,60	0,89	0,89
10	2,7	1,08	2,7	0,68	1,00	1,00
11	3,0	1,20	3,0	0,75	1,11	1,11

^a Nur für flächenhafte Bauteile ($b > 5h$)

^b Für Stahlfaserbeton dieser Leistungsklasse ist eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich

2.7.2 4-Punkt-Biegezugversuche nach ÖVBB-Richtlinie „Faserbeton“

Ähnlich wie bei der DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton werden auch bei der österreichischen Richtlinie für Faserbeton [17] 4-Punkt-Biegezugversuche zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit herangezogen. Die zu verwendenden Probekörper haben die Abmessungen 150 mm x 150 mm x 500 bis 700 mm aufzuweisen. So wie bei der DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton sind mindestens sechs Probekörper herzustellen und zu prüfen.

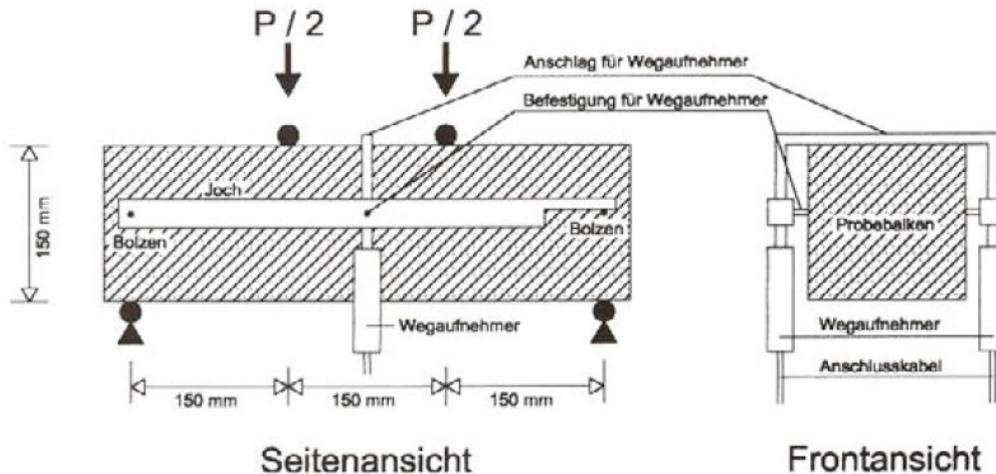


Abb. 2-14 Versuchsaufbau der Biegezugprüfungen nach [17]

Die Spannweite zwischen den Auflagern beträgt 450 mm und die Kräfteinleitungspunkte müssen sich in den Drittelpunkten befinden. Sie sind somit jeweils 150 mm von den Auflagerrollen entfernt. Durch Prüfung von mindestens 6 Balken ergeben sich die sogenannten Last-Nettodurchbiegungskurven, aus welchen die äquivalenten Biegezugfestigkeiten ermittelt werden. Diese unterteilen sich in die Gebrauchstauglichkeit (G) und die Tragsicherheit (T). Die jeweiligen äquivalenten Biegezugfestigkeiten werden für jeden Balken gesondert ermittelt.

- f_{eqs} steht für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und wird bei 0,5 mm Durchbiegung ermittelt
- f_{equ} steht für den Nachweis der Tragsicherheit und lässt sich anhand der Fläche unter der Versuchskurve zwischen 0,5 und 3,0 mm Durchbiegung ermitteln (siehe Abb. 2-15).

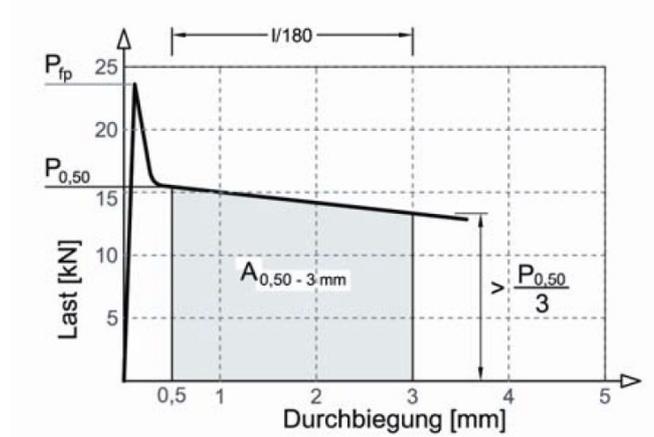


Abb. 2-15 Last-Durchbiegungsdiagramm zur Ermittlung der äquivalenten Biegezugfestigkeit [17]

Die sechs Einzelergebnisse f_{eqs} und f_{equ} müssen noch zu den Mittelwerten f_{eqms} und f_{eqmu} zusammengefasst werden.

Gebrauchstauglichkeit (G)

$$f_{eqms} = \frac{P_{0,50} \cdot l}{b \cdot h^2} = \frac{P_{0,50}}{7500} \quad [N/mm^2] \quad (2.17)$$

Tragsicherheit (T)

$$P_{0,50-3mm} = \frac{A_{0,50-3mm}}{l/180} = \frac{A_{0,50-3mm}}{2,5} \quad [N] \quad (2.18)$$

$$f_{eqmu} = \frac{P_{0,50-3mm} \cdot l}{b \cdot h^2} = \frac{P_{0,50-3mm}}{7500} \quad [N/mm^2] \quad (2.19)$$

Aus den so gewonnenen Mittelwerten ist anschließend eine Berechnung über die Variationskoeffizienten notwendig. Wenn der jeweilige Variationskoeffizient $v \leq 0,25$ ist, werden die zugehörigen charakteristischen äquivalenten Biegezugfestigkeiten mit folgenden Formeln ermittelt.

$$f_{eqks} = 0,51 \cdot f_{eqms} \quad (2.20)$$

$$f_{eqku} = 0,51 \cdot f_{eqmu} \quad (2.21)$$

Sollte der jeweilige Variationskoeffizient $v > 0,25$ sein, so muss die 5%-Fraktile mittels der Werte aus Tabelle 2-3 und den nachstehenden Formeln ermittelt werden.

$$f_{eqks} = f_{eqms} \cdot (1 - (1 - \alpha) \cdot v) \quad (2.22)$$

$$f_{eqku} = f_{eqmu} \cdot (1 - (1 - \alpha) \cdot v) \quad (2.23)$$

Tabelle 2-3 Schwellenwert für $1-\alpha=95\%$ (5%-Fraktile) [17]

Probenanzahl	Schwellenwert für t-Verteilung ($1-\alpha$)
6	1,943
12	1,782
15	1,753
18	1,734
21	1,721
24	1,711
∞	1,645

Mit den charakteristischen äquivalenten Biegezugfestigkeiten f_{eqks} und f_{eqku} werden nun die Faserbetonklassen G und T mittels Verwendung der Tabelle 2-4 und Tabelle 2-5 bestimmt. Um eine entsprechende Klasse zu erreichen, müssen die jeweiligen Mindestwerte der charakteristischen äquivalenten Biegezugfestigkeiten überschritten werden.

 Tabelle 2-4 Faserbetonklassen G nach ÖVBB Richtlinie Faserbeton (f_{eqks} -Gebrauchstauglichkeit)

Faserbetonklasse	Mindestwert der charakteristischen äquivalenten Biegezugfestigkeit für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit f_{eqks} [N/mm ²]
G Sonderklasse	>2,2 unter Angabe von f_{eqks}
G6	1,9
G5	1,6
G4	1,4
G3	1,1
G2	0,9
G1	0,5

 Tabelle 2-5 Faserbetonklassen T nach ÖVBB Richtlinie Faserbeton (f_{eqku} -Tragsicherheit)

Faserbetonklasse	Mindestwert der charakteristischen äquivalenten Biegezugfestigkeit für den Nachweis der Tragsicherheit f_{eqku} [N/mm ²]
T Sonderklasse	>1,9 unter Angabe von f_{eqku}
T6	1,7
T5	1,4
T4	1,2
T3	0,9
T2	0,7
T1	0,4

3 Fasern der Fa. Feel Fiber GmbH

Es handelt sich bei der Stahlfaser der Fa. Feel Fiber GmbH um ein Produkt, welches sich in seiner Herstellung und Funktion von den bereits bekannten Stahlfasern deutlich unterscheidet. Eines der markantesten Merkmale ist die Anordnung sogenannter Ankerknoten entlang der Faser, vorwiegend am Faserende. Die Anzahl, Position und Größe dieser Anker kann variabel und somit je nach Anforderung angepasst werden.

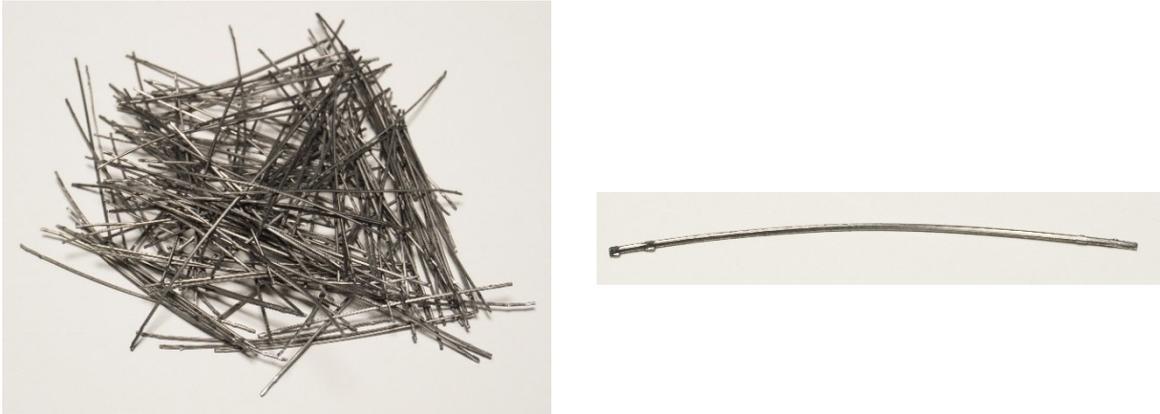


Abb. 3-1 Feel Fiber Faser

3.1 Herstellung

Die Stahlfasern werden aus Bandstahl, mit einer Stärke von ≈ 0.75 mm, mittels des sogenannten Kerb-Walk-Trenn-Verfahrens (KWT) hergestellt. Dieses Verfahren erfährt durch die Fa. Feel Fiber GmbH zum ersten Mal eine industrielle Anwendung und besteht aus mehreren Arbeitsschritten.

Zuerst wird in engen Abständen der Bandstahl mehrfach eingekerbt. Entsprechende Aussparungen dieser Kerbe bilden auf der späteren Stahlfaser die bereits erwähnten Ankerknoten. Die Größe und Anzahl der Anker kann je nach Bedarf angepasst werden. Im nachfolgenden Schritt werden die einzelnen Fasern durch mehrmaliges nach oben und unten Biegen, dem sogenannten „Walken“, solange bearbeitet, bis der Bandstahl an der Kerbe bricht. Dadurch entstehen die einzelnen Stahlfasern.

Die heute üblichen Stahlfasern werden aus Drahtprodukten hergestellt. Das Ausgangsprodukt ist warm gewalzter Draht. Durch sehr aufwändige, wiederholte Zieh- sowie Walzvorgänge und mehrmalige Wärmebehandlung wird daraus die spätere Stahlfaser hergestellt. Damit einhergehend sind ein erheblicher Energieaufwand, erhöhter CO₂ Ausstoß, diverse Materialverluste, Abwasser- und Schlammanfall. Der Vorteil des KWT-Verfahrens liegt in der weniger energie- und kostenaufwendigen Herstellung des Ausgangsmaterials, so wie dem geringeren Aufwand bei der Fertigung der Stahlfasern. All diese Faktoren führen, bei einer Jahresproduktion von 27,750 Tonnen, zu einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes von 3.275 Tonnen. [18]

3.2 Faserdesign

Bedingt durch den, in Abschnitt 3.1 beschriebenen, Herstellungsprozess entsteht eine Faser mit mehreren Seitenflächen welche unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten aufweisen. Wie in Abb. 3-2 im rechten Bild dargestellt, hat die Faser einen achteckigen Querschnitt mit zwei glatten Seiten und zwei rauen Seiten. Die rauerer Seiten entstehen beim Abtrennen der einzelnen Fasern vom Bandstahl. Die unbearbeitete Ober- und Unterseite des Bandstahls wird in dieser Arbeit als glatte Seite der Faser bezeichnet, da sie durch das Herstellungsverfahren nicht bearbeitet bzw. aufgeraut wird. Des Weiteren hat die Faser vier raue Seitenflächen, welche durch das Herstellungsverfahren entstehen. Bei all diesen Oberflächen ist auf eine konstant bleibende Rauigkeit zu achten, da die Oberflächenrauigkeit den bestehenden Verbund zwischen der Betonmatrix und der Stahlfaser und somit auch die Tragwirkung der Faser beeinflusst. Auf diese Problematik wird später in Abschnitt 4 noch genauer eingegangen.

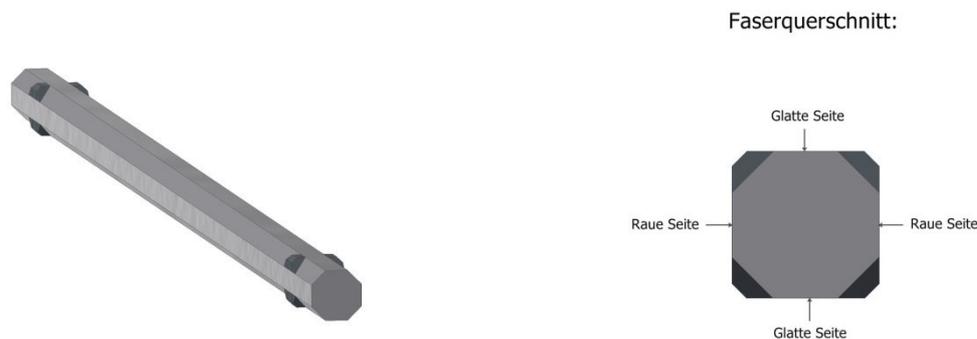


Abb. 3-2 Schematische Darstellung einer Feel Fiber Faser

Die Fasern werden derzeit von der Fa. Feel Fiber GmbH in einer Länge von 33, 50 und 60 mm hergestellt. Dazu standen bisher folgende Stahlgüten zur Verfügung:

- Stahl ST50 mit einer Zugfestigkeit $f_y \approx 1100 \text{ N/mm}^2$
- Stahl C60S mit einer Zugfestigkeit $f_y \approx 1400 \text{ N/mm}^2$
- Stahl C60S-2000 mit einer Zugfestigkeit $f_y \approx 2000 \text{ N/mm}^2$

Ein weiterer Parameter der Faser ist die sogenannte Ritzbreite, welche direkten Einfluss auf die Ankerfläche (grün markiert in Abb. 3-3) nimmt. Die Ritzbreite wird bereits vor dem Trennen der Fasern in einem Kerbvorgang eingestellt. Die Breite der erzeugten Kerbe stellt die Ritzbreite dar, wie in Abb. 3-3 (rechts) zu erkennen ist. Die derzeit eingesetzten Ritzbreiten bewegen sich in einem Bereich von $0 \mu\text{m}$ bis $170 \mu\text{m}$. Je größer die Ritzbreite einer Faser ist, desto kleiner wird die Ankerfläche. Die Auswirkung der Variation dieser Ritzbreite auf das Tragverhalten der Faser wird in Abschnitt 5.4.2 genauer besprochen.

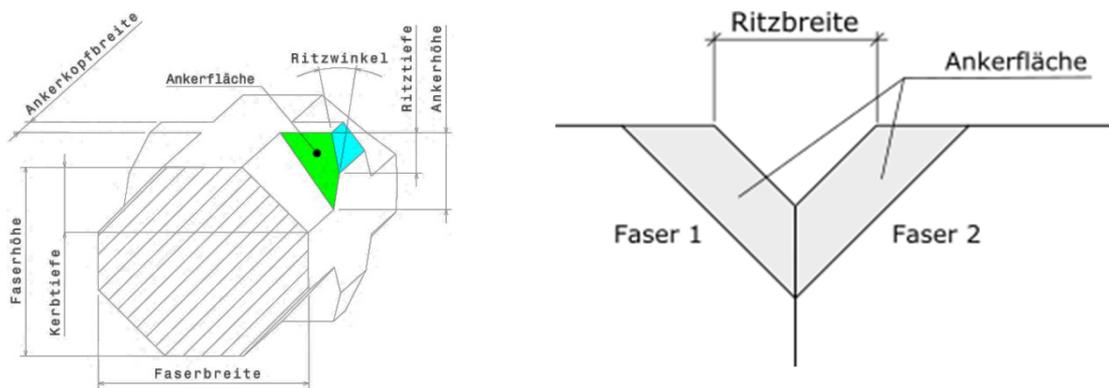


Abb. 3-3 Detaildarstellung des Ankers (links), Ritzbreit (rechts)

3.3 Wirkungsweise

Der Großteil der am Markt befindlichen Stahlfasern hat, bedingt durch den Ziehprozess bei der Herstellung, eine sehr glatte Oberfläche. Durch diesen Umstand reicht der Haft-, und Reibverbund zwischen Betonmatrix und Faser nicht aus um eine ausreichende Kraftübertragung im Normalbeton zu gewährleisten und somit werden zur Verankerung und Übertragung der Kräfte zumeist Endhaken benötigt. Ein sehr großer Vorteil der Feel Fiber Faser besteht darin, dass sie keine derartigen geometrischen Verformungen aufweist.

Fasern, welche geometrisch verformt sind (beispielsweise durch Endhaken), neigen eher zu einer sogenannten Igelbildung als gerade Fasern. Dadurch können die Eigenschaften des Frischbetons und des fertigen Bauteils nachteilig beeinflusst werden. Da die Feel Fiber Faser keine derartigen Geometrieänderungen aufweist, neigt sie in einem wesentlich niedrigeren Ausmaß zu Agglomeration als Konkurrenzprodukte.

Ein weiterer Vorteil besteht in der sehr geringen Beeinflussung der Frischbetoneigenschaften, wodurch sehr hohe Fasermengen problemlos verarbeitet werden können. Des Weiteren ist ein mechanisches Trennen der Fasern vor dem Einbringen in den Beton, wie es in [19] beschrieben wird, nicht notwendig.

3.4 Entwicklungsgeschichte

Das Institut für Betonbau der TU Graz beschäftigt sich seit einigen Jahren mit der Entwicklung der Feel Fiber Faser. Zusätzlich wurde im Jahr 2014 auch das Institut für Bauforschung der RWTH Aachen von der Fa. Feel Fiber GmbH mit der Weiterentwicklung der damals neuartigen Stahlfaser beauftragt. Deren Untersuchungen sind in [20] näher erläutert.

Die Entwicklung der Faser erfolgte hauptsächlich mit einem Beton der Festigkeitsklasse C30/37 und C50/60. Bis Anfang 2017 wurden alle getesteten Fasern auf einer Prototypenanlage hergestellt. Erst ab diesem Zeitpunkt wurde die KWT-Anlage (Großanlage) in Betrieb genommen. Erste Versuchsergebnisse mit Fasern dieser Anlage sind in Kapitel 5.4.6 beschrieben.

In Abb. 3-4 ist das ursprünglich geplante Faserdesign der Fa. Feel Fiber GmbH dargestellt. Es zeigt eine gerade Stahlfaser mit zwei Ankerknoten an jedem Ende. Der jeweils äußere Anker befindet sich ca. 1,5 mm vom Ende entfernt. Die innenliegenden Anker sind in einem Abstand von 3 mm vom äußeren Anker angebracht.

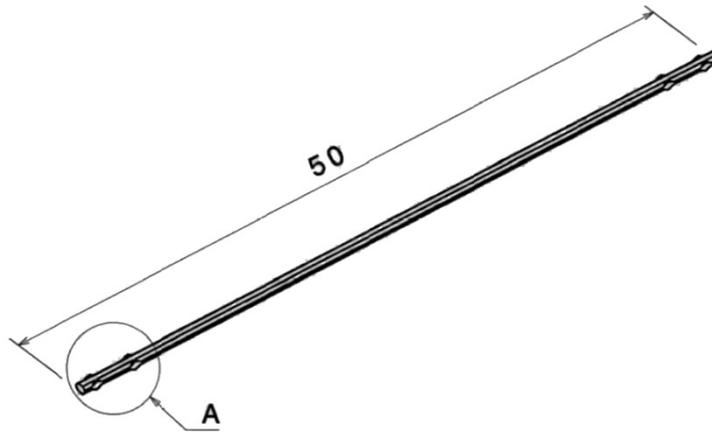


Abb. 3-4 Ursprünglich geplantes Faserdesign © Feel Fiber GmbH

Die in [20] beschriebenen Versuche des Instituts für Bauforschung der RWTH Aachen umfassen Pull-Out-Versuche, Druck- und Biegezugfestigkeitsversuche sowie Kriechversuche. Bei allen Versuchen wurde häufiges Faserreißen festgestellt. Wie sich später herausstellen sollte, lag dieses vermehrt auftretende Faserreißen an einer zu niedrigen Bruchdehnung des verwendeten Stahls.

Die Stahlfasern liegen in Bezug zur Bruchebene zufällig orientiert. Öffnet sich ein Riss, werden daher die Stahlfasern an der Bruchkante gebogen und zu einer Plastifizierung gezwungen. Die damals verwendeten Stahlfasern hatten eine so geringe Bruchdehnung, dass dieses Plastifizieren ein Faserbrechen begünstigte. Des Weiteren wirkte sich die damals eingesetzte Zugfestigkeit von $f_y \approx 900 \text{ N/mm}^2$ ebenfalls nachteilig auf das Tragverhalten der Fasern aus. In späteren Versuchen wurde die Stahlzugfestigkeit auf $f_y \approx 1300 \text{ N/mm}^2$ erhöht. Dies führte bei den in [20] durchgeführten Versuchen zu einem verringerten Faserreißen. Alle damals verwendeten Fasern wiesen einen Durchmesser von 0,75 mm auf, was eine Querschnittsfläche von $\approx 0,44 \text{ mm}^2$ ergab.

Des Weiteren wurde im Zuge des in [20] vorgestellten Forschungsprojektes die Oberflächenrauigkeiten der Faser untersucht. Es erfolgte die Annahme, dass sich die Oberflächenrauigkeit maßgebend auf die Versuchsergebnisse auswirkt. Aufgrund dieser Vermutung wurde die Oberflächenrauigkeit für das vermehrte Faserreißen verantwortlich gemacht und begründete sich auf Versuche, bei denen selbst Fasern ohne Ankerknoten gerissen sind. In späteren Versuchen, bei denen ein Stahl mit einer erhöhten Bruchdehnung zum Einsatz kam, konnte dieses Verhalten nicht mehr beobachtet werden.

4 Untersuchungen zur Rauigkeit

4.1 Allgemeines

Wie bereits beschrieben, erfolgt die Kraftübertragung zwischen Feel Fiber Fasern und dem Beton sowohl durch die Ankerknoten als auch durch den Haft- und Reibverbund entlang der Faser. Aufgrund der Herstellung mit dem sogenannten Kerb-Walk-Trenn-Verfahren entsteht eine Faser mit acht Seitenflächen (siehe Abb. 4-1), die unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten aufweisen. Im Speziellen bei dem Haft- und Reibverbund wirkt sich die Oberflächenrauigkeit nicht unerheblich auf die Leistungsfähigkeit aus, wodurch der Oberflächenbeschaffenheit der Faser eine entsprechende Wichtigkeit zuzuschreiben ist.



Abb. 4-1 Faserdesign mit 2 Endankern (4-Anker-Design)

Von besonderem Interesse ist hier die Fläche, welche beim Trennen der einzelnen Fasern entsteht. Jede Faser besitzt zwei solcher sich gegenüberliegenden Bruchflächen. Bereits mit freiem Auge, beziehungsweise durch ertasten, kann festgestellt werden, dass diese Bruchflächen rauer sind als die restlichen Seitenflächen. Um solche Beobachtungen auch messbar zu machen, wurden im Maschinenbau bereits zahlreiche Methoden entwickelt. In Abschnitt 4.2 wird daher auf die Grundlagen zur Oberflächenbestimmung näher eingegangen. Anhand dieser Grundlagen wurde ein Messverfahren ausgewählt um die einzelnen Oberflächen der Faser zu untersuchen.

Das gewählte Verfahren wird in Abschnitt 4.3 beschrieben und die Ergebnisse der Untersuchungen werden anschließend unter Abschnitt 4.4 dargestellt und diskutiert. Da der Verbund zwischen Faser und Betonmatrix starken Einfluss auf das Ausziehverhalten nimmt, die Traganteile der Ankerknoten sowie des Haft- und Reibverbundes noch nicht eindeutig festgestellt und zugeordnet werden konnten, ist eine gleichbleibende Oberflächenrauigkeit von besonderem Interesse. Zu diesem Zweck wird ein Verfahren zur Beurteilung und Klassifizierung der Rauigkeit benötigt.

4.2 Grundlagen

Die Oberflächenrauheit beschreibt eine geometrische Gestaltabweichung von der idealen Geometrie. Eine ideale Geometrie würde selbst unter dem Mikroskop keine Unebenheiten aufweisen, wohingegen eine reale Geometrie bzw. eine reale Oberfläche immer Unebenheiten aufweisen wird. In Abb. 4-2 ist eine ideale (links) und reale (rechts) Geometrie vereinfacht dargestellt. Sehr unebene Oberflächen können auch ohne aufwendigen Messverfahren beurteilt werden. Als Beispiel sei hier ein Bauteil aus Gussmetall genannt, dessen Oberfläche sich schon beim Ertasten als Rau einstufen lässt.



Abb. 4-2 links: ideale Geometrie rechts: reale Geometrie

Wie die des Gussbauteiles, weist eine maschinell gefertigte Oberfläche ebenfalls Abweichungen von der idealen geometrischen Gestalt auf. In Abb. 4-3 sind einige Beispiele zur Gestaltabweichung von Oberflächen sowie mögliche Ursachen dafür angeführt.

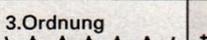
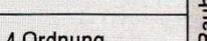
Tabelle 1: Gestaltabweichung von Oberflächen		
Gestaltabweichung	Beispiele	Ursache
1.Ordnung 	Unebenheit Unrundheit	Durchbiegung Führungsfehler
2.Ordnung 	Wellen	Schwingungen
3.Ordnung 	Rauheit	Vorschub
4.Ordnung 		Riefen Schuppen Spanbildung

Abb. 4-3 Gestaltabweichung von Oberflächen [21]

Wie stark die Gestaltabweichungen ausgeprägt sind kann mit dem Mittenrauwert R_a oder durch die gemittelte Rautiefe R_z ausgedrückt werden.

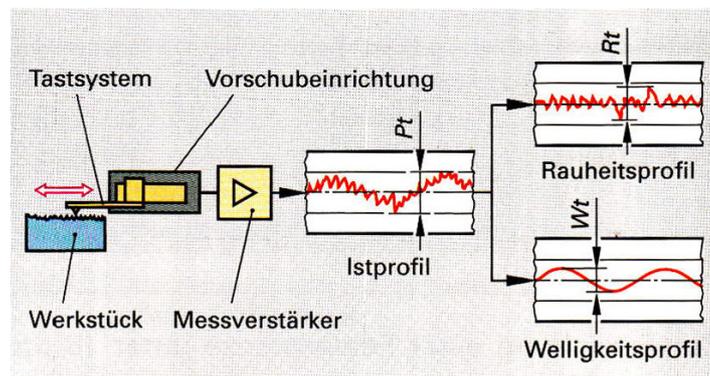


Abb. 4-4 Prinzip eines Tastschnittgerätes [21]

Im Maschinenbau werden Oberflächenrauigkeiten häufig mit dem sogenannten Tastschnittgerät gemessen. Eine schematische Darstellung des Verfahrens ist aus der Abb. 4-4 zu entnehmen. Dieses wandelt die Tastbewegungen einer Diamantspitze in ein elektrisches Signal um. Dieses Signal wird nun elektronisch weiterverarbeitet und ergibt anschließend das ungefilterte Primärprofil (P-Profil), dargestellt in Abb. 4-5. Eine weitere Methode bietet die kontaktlose Messung mittels eines optischen Digitalmikroskops, welches ebenfalls ein Primärprofil als Ergebnis ausgibt. Die nachstehenden Grundlagen und Ausführungen beziehen sich auf das im Maschinenbau übliche Tastschnittverfahren.

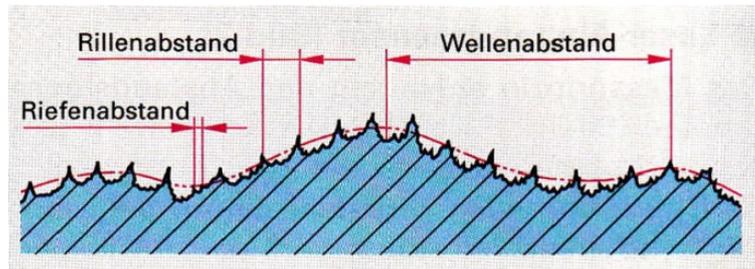


Abb. 4-5 Ertastetes Primärprofil (P-Profil) [21]

Durch Bearbeiten des P-Profiles mit einem Profilfilter wird der kurzwellige Rauheitsanteil von dem Welligkeitsanteil getrennt. Dadurch entstehen zwei weitere Profile, das Rauheitsprofil (R-Profil) und das Welligkeitsprofil (W-Profil). [21]

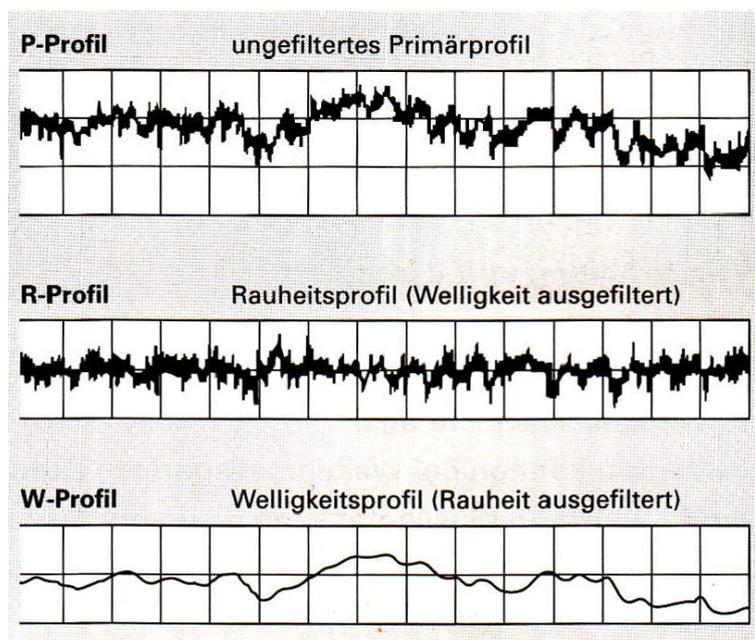


Abb. 4-6 Oberflächen-Profilendiagramme [21]

Aus den in Abb. 4-6 dargestellten Oberflächenprofilen können nun Kenngrößen ermittelt werden.

Die nachfolgend beschriebenen Kenngrößen werden überwiegend aus dem Rauheitsprofil (R-Profil) berechnet. Dieses Profil wird in einem X, Z-Koordinatensystem dargestellt. Hier wird auf die X-Achse die Messstrecke aufgetragen und in die Z-Richtung die Rautiefe.

Die üblichsten Kenngrößen sind die gemittelte Rautiefe R_z , die maximale Rautiefe R_{\max} und der der Mittenrauwert R_a . [21]

- Die gemittelte Rautiefe R_z wird aus dem Mittelwert der Einzelrautiefen Z_1 bis Z_5 gebildet (Abb. 4-7).
- Die maximale Rautiefe R_{\max} gibt die größte Einzelrautiefe der Unterteilten Messstrecke an. In Abb. 4-7 entspricht diese dem Wert Z_3 .
- Der Mittenrauwert (siehe Abb. 4-8) wird, aus der Summe der von Profilabweichungen Z , ober und unterhalb der Mittellinie eingeschlossenen Flächen, gebildet.

4.2.1 R_z -Wert

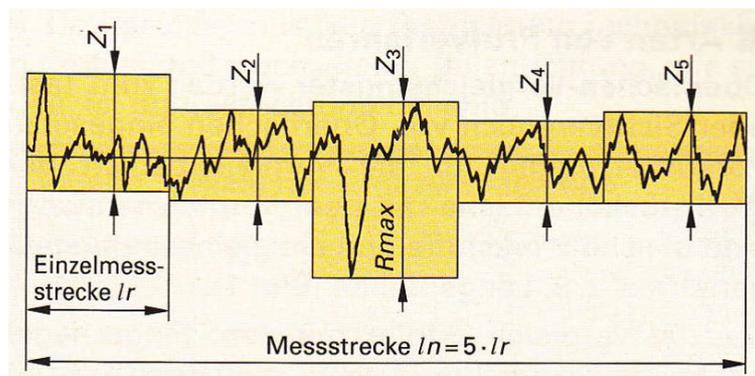


Abb. 4-7 Maximale und gemittelte Rautiefe [21]

$$R_z = \frac{1}{5}(Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5) \quad (4.1)$$

Um die gemittelte Rautiefe R_z zu berechnen muss die Messstrecke l_n in fünf gleiche Teile unterteilt werden. In jedem entstandenen Abschnitt gibt es nun eine Rautiefe Z_i . Diese geht immer vom höchsten bis zum tiefsten Punkt des jeweiligen Abschnittes. Nach (4.1) wird nun der Mittelwert aus den fünf Z -Werten gebildet.

4.2.2 R_a -Wert

Der Mittenrauwert R_a wird anhand des gemessenen Rauheitsprofils (R-Profil) ermittelt.

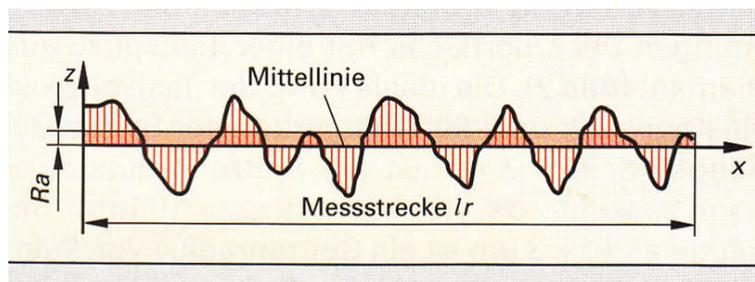


Abb. 4-8 Mittenrauwert R_a [21]

Um den Mittenrauwert R_a zu bestimmen, müssen die Flächen, welche vom Rauheitsprofil mit der X-Achse eingeschlossen werden, aufsummiert werden und anschließend durch die Länge der Messstrecke l_r geteilt werden. Je kleiner der Wert R_a wird, umso feiner ist die Struktur der betrachteten Oberfläche.

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |z(x)| dx \quad (4.2)$$

Die Werte R_a und R_z stehen in keinem mathematischen Zusammenhang. R_z ist Messtechnisch leichter zu ermitteln, aussagefähiger und anschaulicher als R_a . Der R_z Wert ist der häufiger verwendete Wert. Daher wird in dieser Arbeit zur Beurteilung der Oberflächenrauigkeit ebenfalls der R_z -Wert verwendet, da dieser auch aussagekräftiger ist.

4.3 Verfahren zur Bestimmung der Faserrauigkeit

Wie bereits in Abschnitt 3 beschrieben wurde, weist die Feel Fiber Faser drei unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten auf. Von besonderem Interesse sind die als Rau definierten Seiten, welche durch das in Abschnitt 3.1 beschriebene KWT-Verfahren entstehen. Die orthogonal dazu liegenden Seiten werden als Glatt definiert, da sie unbehandelt sind und somit die Oberflächengüte des Ausgangsproduktes aufweisen. Um die Oberflächenrauigkeit dieser Seiten zu definieren, wurden mittels eines optischen Digitalmikroskops die Höhenprofile der einzelnen Faseroberflächen bestimmt.

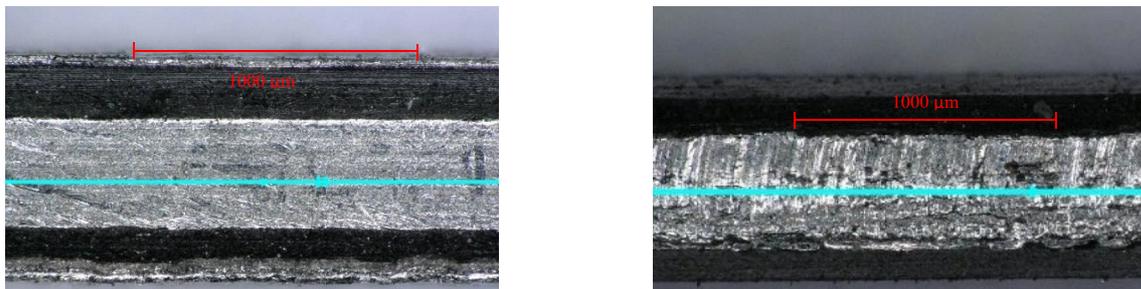


Abb. 4-9 Mikroskopaufnahme der glatten (links) und rauen (rechts) Faserfläche

Um die einzelnen Fasern im Herstellungsprozess voneinander zu trennen, werden sie im Kerb-Walk-Trenn-Verfahren so lange gewalkt, bis sie an der vorgesehenen Stelle auseinanderbrechen. Dies bewirkt eine starke Krümmung der Faser. Diesem Umstand musste in der Untersuchung der Fasern Rechnung getragen werden. Wie auch in Abschnitt 4.2 beschrieben, muss das gemessene Höhenprofil in zwei unterschiedliche Anteile zerlegt werden. Da es sich im untersuchten Fall nicht um ein klassisches Welligkeitsprofil, sondern lediglich um eine Verkrümmung der Faser handelt, genügte es, diese Verkrümmung mittels eines Polynoms zweiter Ordnung anzunähern und somit aus dem Welligkeitsprofil (W-Profil) zu entfernen. Exemplarisch ist dieser Vorgang in Abb. 4-10 dargestellt. Eine mechanische Korrektur dieser Verkrümmung wurde vermieden um keine Beeinflussung der Oberflächenrauigkeit hervorzurufen. Wie bereits beschrieben wird das Rauheitsprofil, für die Ermittlung von R_z , in 5 gleich große Abschnitte unterteilt. In jedem dieser Einzelmessstrecken erfolgte die Ermittlung des jeweiligen $R_{z(i)}$ -Wertes.

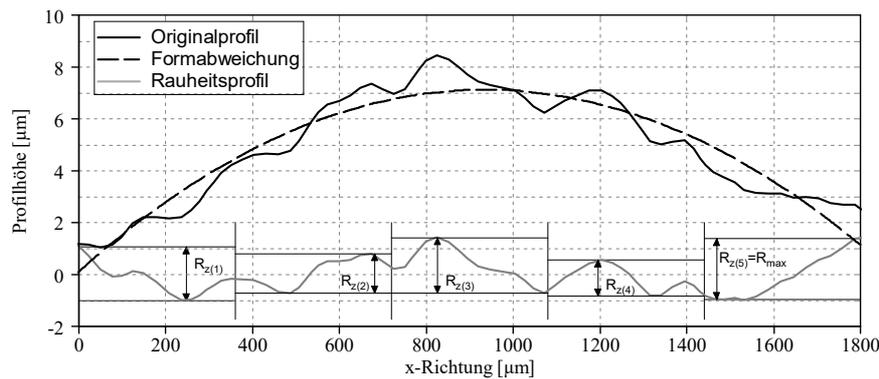


Abb. 4-10 Ermittlung des Rauheitsprofils der glatten Seiten

Anschließend wurde, gemäß den Ausführungen in [22], das arithmetische Mittel aus den fünf $R_{z(i)}$ -Werten gebildet. Der größte Wert dieser Einzelrautiefen wird mit R_{max} bezeichnet.

4.4 Ergebnisse

Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen ergab sich eine Überprüfung von 14 Fasern mit der Stahlgüte C60S und vier Fasern der Stahlgüte ST50. Es wurde darauf geachtet, dass die untersuchten Fasern aus unterschiedlichen Chargen und Faserlängen entnommen wurden. Die ermittelten Kennwerte R_z und R_{max} sind in Tabelle 4-1 dargestellt. Bei jeder untersuchten Faser wurden die Kennwerte sowohl für die raue als auch für die glatte Seite ermittelt.

Tabelle 4-1 Rauigkeitskennwerte von Fasern der Stahlgüte C60S (links) und ST50 (rechts)

C60S	Rauhe Seite		Glatte Seite		ST50	Rauhe Seite		Glatte Seite		
	Nr	R_z -Wert [μm]	R_{max} -Wert [μm]	R_z -Wert [μm]		R_{max} -Wert [μm]	Nr	R_z -Wert [μm]	R_{max} -Wert [μm]	R_z -Wert [μm]
	1	5.2	8.1	2.5	4.8	1	10.8	20.1	2.7	4.3
	2	6.7	11.3	2.8	3.8	2	10.6	16.3	3.5	7.1
	3	7.5	10.7	3.1	5.0	3	6.7	12.2	2.5	4.6
	4	7.1	11.8	2.9	3.9	4	5.7	10.7		
	5	8.8	13.0	4.9	8.5	Mittelwert	8.5	14.8	2.9	5.3
	6	7.0	8.9	2.0	2.4	Standard-abweichung:	2.3	3.7	0.6	1.5
	7	7.9	15.5	2.5	4.5					
	8	9.8	17.7	2.1	4.2					
	9	7.2	8.8	2.0	3.4					
	10	9.0	12.2	2.2	4.5					
	11	11.7	14.4	3.2	6.9					
	12	10.6	15.1	2.2	2.4					
	13	5.9	12.3	2.2	4.4					
	14	5.3	9.4	2.2	3.0					
	Mittelwert	7.8	12.1	2.6	4.4					
	Standard-abweichung:	1.9	2.7	0.8	1.6					

Bei der Untersuchung der rauhen Seite des Materials C60S ergab der Mittelwert der Rautiefe R_z einen Wert von 7.8 μm, was in etwa dem 3-fache Wert der Rautiefe der glatten Seite ($R_z = 2.6$ μm) entspricht.

Die untersuchten Fasern des Materials ST50 ergaben, trotz der wesentlich geringeren Stichprobengröße, ähnliche mittlere Rautiefen (8.5 und 2.9 μm). Um den Unterschied zwischen glatter und rauer Oberfläche zu veranschaulichen wurden in Abb. 4-11 die Rauheitsprofile von beiden Flächen exemplarisch dargestellt.

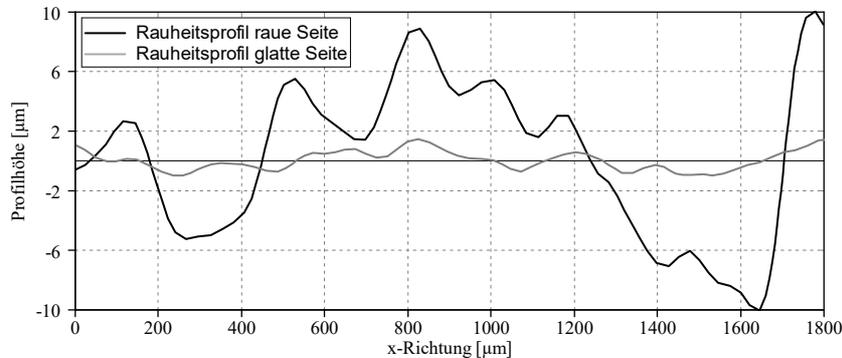


Abb. 4-11 Rauheitsprofil der glatten und rauen Seite

4.5 Vorschlag zur Qualitätskontrolle

Die Großanlage (KWT-Anlage) wurde Anfang 2017 für die Faserproduktion in Betrieb genommen. Es ist besonders darauf zu achten, dass sich mit zunehmender Produktionsdauer die Rauigkeitskennwerte nicht verändern. Aufgrund von Verschleißerscheinungen der Anlage, durch starke Temperatureinwirkungen oder durch Abnutzung der verwendeten Werkzeuge, ist eine Veränderung der Rauigkeiten möglich. Um diese Veränderungen frühzeitig erkennen zu können, ist eine regelmäßige Überprüfung der Oberflächenrauigkeiten des fertigen Faserproduktes zwingend zu empfehlen. Sollte eine Veränderung der Rauigkeiten auftreten, so wird empfohlen 4-Punkt-Biegezugversuche nach DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [1] durchzuführen und einen möglichen Einfluss auf das Tragverhalten zu verifizieren. Gegebenenfalls kann das Ankerdesign angepasst werden, um die auftretenden Veränderungen der Oberflächenrauigkeit zu kompensieren.

Es gibt unterschiedliche Messverfahren zur Bestimmung der Oberflächenrauheit (optische oder taktile Oberflächenmessgeräte), welche sich alle Verfahren in der Kompensation der Formabweichung und somit in den Ergebnissen geringfügig unterscheiden. Taktile Verfahren scheinen aufgrund der Größe der Fasern und deren Krümmung als nicht geeignet. Es wird daher empfohlen ein berührungsloses Messverfahren zu wählen, welches sich in den Produktionsprozess leicht integrieren lässt. Des Weiteren sollen damit über längere Zeiträume vergleichbare Prüfergebnisse erzielt werden können. Darüber hinaus wird empfohlen die geometrische Form des Endankers sowie die Faser auf sonstige Verformungen zu kontrollieren.

5 Untersuchungen zur Tragfähigkeit

5.1 Allgemeines

Bisher wurden bei der Entwicklung der Feel Fiber Faser zahlreiche unterschiedliche Faser-, Stahl, und Ankergeometrien eingesetzt. Nachfolgend wird nur auf die Versuchsergebnisse im Zeitraum von Herbst/2015 bis April/2017 näher eingegangen. Wie bereits in Abschnitt 3.4 erwähnt, wurde vor diesem Zeitraum ein Stahl mit einem geringen plastischen Verformungsvermögen verwendet. Dies hatte ein häufiges Faserreißen zur Folge und beeinflusste vor allem die Werte bei $\delta_2 = 3.5$ mm (ULS) sehr stark, was eine erheblich geringere Leistungsfähigkeit und somit eine niedrigere Leistungsklasse zur Folge hatte. Aufgrund der beschriebenen Problematik werden diese Versuchsergebnisse im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt.

Die in dieser Arbeit diskutierten Versuche wurden an der TU Graz sowie bei dem TBR Bernburg durchgeführt. Alle durchgeführten 4-Punkt-Biegezugversuche, die Auswertung der Versuche sowie die Einteilung in Leistungsklassen wurde nach der Richtlinie „Stahlfaserbeton“ [1] des DAfStb, wie in Abschnitt 2.7.1 beschrieben, durchgeführt.

Oftmals wurden mit derselben Fasercharge Versuche an der TU Graz und bei dem TBR durchgeführt. Anzumerken ist, dass der Großteil der bisher durchgeführten Versuche mit den Fasern aus der Prototypenanlage (Versuchsanlage) durchgeführt wurde. Die ersten Versuche mit den Fasern der Großanlage sind im Zuge dieser Arbeit durchgeführt worden. Es gilt zu überprüfen ob sich die Oberflächenrauigkeiten der Bruchflächen der KWT-Fasern von den bisher untersuchten Prototypenfasern-Fasern unterscheiden. In Abschnitt 5.2 werden sowohl die Versuchsergebnisse der TU Graz als auch die des TBR Bernburg angeführt.

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit war es, alle bisher durchgeführten Biegezugversuche zu sammeln, zuzuordnen und entsprechend auszuwerten. Hierzu wurde eine Übersichtstabelle erstellt, welche alle Parameter und zugehörigen Informationen enthält.

In den nachfolgenden Kapiteln werden alle durchgeführten Biegezugversuche systematisch nach Ihrer Faserlänge, -menge, Stahlgüte und Betongüte ausgewertet. Des Weiteren wird auf den Einfluss von unterschiedlichen Ankergrößen eingegangen sowie die Ergebnisse mit Fasern aus der KWT-Anlage mit jenen aus der Prototypenanlage gegenübergestellt und diskutiert.

5.2 Vorangegangene Biegezugversuche

Im Rahmen der Faserentwicklung wurden bisher zahlreiche Biegezugversuche sowie Ausziehversuche mit den Fasern der Fa. Feel Fiber GmbH durchgeführt. Im Laufe der Faserentwicklung erfolgte eine Vielzahl der Versuche, in gleicher Konfiguration, sowohl von dem TBR Bernburg als auch von der TU-Graz parallel zueinander. Dies führte dazu, dass es für gewisse Faserlängen und -mengen zahlreiche

idente Versuchsserien gibt. Auf der anderen Seite gibt es für gewisse Konfigurationen nur eine geringe Anzahl an Versuchsserien. Die Ergebnisse der Ausziehversuche werden ebenfalls nicht behandelt, da deren Ergebnisse große Streuungen aufweisen und Rückschlüsse schwierig sind. Sie werden allerdings im Anhang C mit angeführt.

Im Frühjahr 2016 wurden Fasern mit zwei Endankern geliefert (4-Anker-Design), welche im Bereich des zweiten Endankers eine Einkerbung (Sollbruchstelle) aufwiesen. Dies führte in weiterer Folge zu einem vermehrten Faserbrechen in den durchgeführten Biegezugversuchen. Die Ergebnisse sind daher als nicht repräsentativ zu bewerten. Auf Grund dessen konnte der Einfluss eines zweiten Endankers auf die tragfähigkeitssteigernde Wirkung der 60 mm langen Fasern erst in den im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Versuchen untersucht werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden über siebzig Versuchsserien von Biegezugprüfungen mit den verschiedensten Konfigurationen, in Hinblick auf Fasertyp, -länge, -menge, der Ritzbreite, der Ankeranzahl und der verwendeten Festigkeitsklasse des Betons, zusammengestellt und ausgewertet. In den nachfolgenden Tabellen werden alle Versuchsserien mit den Stahlgüten ST50 (Tabelle 5-1), C60S (Tabelle 5-3) und C60S-2000 (Tabelle 5-2), mit den zugehörigen Mittelwerten und Variationskoeffizienten, übersichtlich dargestellt.

Die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen sind in den Tabellen 5-1 und 5-2 farbig hinterlegt. Die erhaltenen Ergebnisse, der Versuchsaufbau sowie die zugehörigen Biegezugspannungsdurchbiegungskurven werden in Abschnitt 5.3 näher dargestellt und diskutiert.

Nachfolgend sind in Tabelle 5-1 die Versuchsreihen mit Fasern der Stahlgüte ST50 aufgelistet. Die Tabelle enthält auch die ersten drei Versuchsserien mit den Fasern der KWT-Anlage. Ein erster Vergleich der KWT-Fasern mit denen der Prototypenanlage kann Abschnitt 5.4.6 entnommen werden.

Tabelle 5-1 Übersicht aller Bisher mit der Stahlgüte ST50 durchgeführten 4-Punkt-Biegezugversuche

Fasertyp	VNr.	mm	Rizbreite	Anker	Beton	kg/m ³	0,5 MW	0,5 VAR	3,5 MW	3,5 VAR
ST50	70	33	150	2	C30/37	30	3,05	7,96%	2,07	11,73%
ST50	71	33	150	2	C30/37	60	3,44	14,12%	2,26	8,15%
ST50	52	50	100	1	C30/37	30	2,80	33,08%	1,53	34,42%
ST50	51	50	120	1	C30/37	30	2,97	25,41%	1,81	18,68%
ST50	41	50	100	2	C30/37	30	3,22	21,40%	2,18	24,25%
ST50	42	50	120	2	C30/37	30	3,39	10,99%	2,51	18,05%
ST50	61	60	75	1	C25/30	30	2,63	31,46%	2,06	40,79%
ST50	60	60	150	1	C25/30	30	2,86	13,36%	2,27	20,73%
ST50	62	60	0	1	C30/37	30	3,62	6,27%	2,45	9,37%
ST50	67	60	75	1	C30/37	30	2,91	13,52%	2,36	23,55%
ST50	40	60	80	1	C30/37	30	3,63	14,07%	2,37	11,16%
ST50 _{KWT}	72	60	80	1	C30/37	30	4,07	10,72%	3,04	11,19%
ST50	39	60	100	1	C30/37	30	3,51	20,69%	1,98	20,33%
ST50	38	60	100	1	C30/37	30	3,83	12,69%	2,83	11,43%
ST50 _{KWT}	73	60	100	1	C30/37	30	4,07	7,48%	2,65	7,36%
ST50	37	60	120	1	C30/37	30	3,54	25,64%	2,28	25,97%
ST50 _{KWT}	74	60	120	1	C30/37	30	3,71	11,62%	2,52	19,05%
ST50	34	60	140	1	C30/37	30	3,27	17,10%	2,01	24,95%
ST50	36	60	140	1	C30/37	30	3,46	10,58%	1,62	15,63%
ST50	35	60	140	1	C30/37	30	3,51	24,68%	1,80	30,57%
ST50	66	60	150	1	C30/37	30	3,27	21,15%	2,47	17,24%
ST50	68	60	0	1	C35/45	30	3,31	23,03%	1,86	35,45%
ST50	54	60	170	2	C20/25	30	2,94	21,74%	2,35	29,66%
ST50	17	60	140	2	C30/37	30	4,03	29,19%	1,54	39,28%
ST50	33	60	170	2	C30/37	30	3,36	22,39%	1,30	31,89%
ST50	45	60	170	2	C50/60	30	4,40	25,17%	0,61	25,15%

In Tabelle 5-2 sind die wenigen Versuche, welche mit der Stahlgüte C60S-2000 durchgeführt wurden, zusammengefasst. Trotz der geringen Anzahl an Versuchen kann bereits erkannt werden, dass diese Faser sehr leistungsstark ist, soweit das mögliche Potential dieses Materials ausgenutzt wird.

Tabelle 5-2 Übersicht aller Bisher mit der Stahlgüte C60S-2000 durchgeführten 4-Punkt-Biegezugversuche

Fasertyp	VNr.	mm	Rizbreite	Anker	Beton	kg/m ³	0,5 MW	0,5 VAR	3,5 MW	3,5 VAR
C60S-2000	56	60	50	2	C30/37	30	3,41	11,87%	3,29	13,86%
C60S-2000	28	60	0	1	C50/60	30	5,15	16,00%	4,31	16,04%
C60S-2000	32	60	0	1	C50/60	60	8,39	7,23%	5,77	8,12%
C60S-2000	30	60	50	2	C50/60	30	4,79	14,53%	2,12	17,40%
C60S-2000	16	60	50	2	C50/60	30	5,42	10,59%	2,84	5,49%

In Tabelle 5-3 werden die Versuchsreihen mit den Fasern der Stahlgüte C60S aufgelistet. Mit dieser Stahlgüte wurden bisher die meisten Versuche durchgeführt. Allerdings bis dato noch keine Versuchsreihen mit KWT-Fasern. Es ist geplant diese so bald wie möglich durchzuführen.

Tabelle 5-3 Übersicht aller Bisher mit der Stahlgüte C60S durchgeführten 4-Punkt-Biegezugversuche

Fasertyp	VNr.	mm	Rizbreite	Anker	Beton	kg/m ³	0,5 MW	0,5 VAR	3,5 MW	3,5 VAR
C60S	13	33	0	2	C30/37	30	2,58	31,61%	1,66	38,31%
C60S	12	33	100	2	C30/37	30	2,28	36,15%	1,43	39,20%
C60S	1	33	150	2	C30/37	30	2,61	11,66%	1,64	6,83%
C60S	11	33	150	2	C30/37	30	2,42	25,24%	1,67	29,14%
C60S	4	33	150	2	C30/37	60	3,43	18,31%	2,11	12,20%
C60S	2	33	150	2	C50/60	30	2,64	24,89%	1,21	28,83%
C60S	5	33	150	2	C50/60	60	5,05	21,42%	2,95	38,24%
C60S	50	50	100	1	C30/37	30	2,64	41,63%	1,98	63,12%
C60S	53	50	120	1	C30/37	30	3,54	20,25%	2,75	16,07%
C60S	27	50	100	1	C50/60	30	5,12	13,54%	3,25	12,04%
C60S	26	50	120	1	C50/60	30	3,71	35,77%	2,32	35,90%
C60S	31	50	100	1	C50/60	60	6,59	12,87%	3,71	17,47%
C60S	29	50	120	1	C50/60	60	6,67	11,43%	4,33	17,06%
C60S	23	50	100	2	C30/37	30	3,43	17,44%	2,21	14,95%
C60S	22	50	120	2	C30/37	30	3,45	16,72%	2,51	17,70%
C60S	59	60	0	1	C25/30	30	3,07	7,63%	2,09	10,42%
C60S	58	60	75	1	C25/30	30	2,30	11,54%	1,89	12,67%
C60S	57	60	150	1	C25/30	30	3,20	21,19%	2,35	21,01%
C60S	21	60	80	1	C30/37	30	3,83	7,34%	2,69	10,22%
C60S	3	60	100	1	C30/37	30	4,27	10,50%	3,41	9,00%
C60S	19	60	120	1	C30/37	30	3,70	19,26%	2,66	22,29%
C60S	10	60	120	1	C30/37	30	3,89	24,86%	3,03	22,29%
C60S	69	60	140	1	C30/37	30	4,18	8,91%	3,21	8,24%
C60S	6	60	100	1	C30/37	60	5,39	10,80%	4,52	10,19%
C60S	75	60	100	2	C30/37	30	4,87	6,32%	4,14	16,11%
C60S	76	60	100	2	C30/37	60	5,65	8,86%	5,85	14,22%
C60S	65	60	0	1	C35/45	30	3,91	32,02%	2,85	35,72%
C60S	64	60	75	1	C35/45	30	3,64	28,44%	2,20	30,19%
C60S	63	60	150	1	C35/45	30	4,61	20,45%	2,99	20,85%
C60S	7	60	100	1	C50/60	60	7,66	5,89%	4,23	23,48%
C60S	8	60	150	2	C25/30	30	3,62	15,17%	2,86	13,25%
C60S	9	60	150	2	C25/30	60	5,40	7,78%	3,85	8,52%
C60S	20	60	120	2	C30/37	30	3,93	12,01%	2,22	6,87%
C60S	15	60	120	2	C30/37	30	4,89	9,61%	3,41	11,04%
C60S	18	60	150	2	C30/37	30	3,95	15,83%	2,01	19,70%
C60S	14	60	150	2	C30/37	30	4,16	9,30%	3,09	18,23%
C60S	25	60	150	2	C50/60	30	4,92	17,11%	1,62	22,81%

5.3 Eigene Versuche

Nachfolgend werden die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten 4-Punkt-Biegezugversuche und deren Ergebnisse diskutiert. Es wird kurz auf das Versuchsprogramm, -aufbau und die -durchführung eingegangen. Neben den Ergebnissen der Begleitversuche werden anschließend die einzelnen Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven dargestellt und diskutiert.

5.3.1 Versuchsprogramm

Von Dezember 2016 bis April 2017 wurden im Zuge dieser Arbeit am Institut für Betonbau der TU-Graz weitere Versuche mit den Fasern der Fa. Feel Fiber GmbH durchgeführt. Für die hergestellten Probekörper sind Fasern mit einer Länge von 33 mm und 60 mm, einer Stahlgüte von C60S sowie ST50, mit einem Endanker (2-Anker-Design) und zwei Endankern (4-Anker-Design) verwendet worden. Die Ritzbreiten der Fasern variierten von 80 μm bis 150 μm , wobei ein Teil der Fasern mit der Stahlgüte ST50 aus der neu in Betrieb genommenen KWT-Anlage der Fa. Feel Fiber GmbH stammten. Es kamen Betone mit einer Festigkeitsklasse von C30/37 und C50/60 zum Einsatz. Die Faserlänge hat in Zusammenhang mit der Kornverteilung und der Korngröße der verwendeten Zuschlagstoffe, wie bereits in Abschnitt 2.4 diskutiert, einen nicht unerheblichen Einfluss. Um diesen Effekt bei allen Versuchsreihen gleich zu halten, wurde für die Herstellung der Versuchsbalken immer die gleichen Zuschlagstoffe verwendet. Die eingesetzten Betone wiesen ein Größtkorn von 16 mm auf.

Die Versuche wurden, wie bereits in Punkt 5.1 beschrieben, nach der Richtlinie Faserbeton des DAfStb [1] hergestellt und geprüft. In der nachfolgenden Tabelle 5-4 sind alle durchgeführten Versuchsserien übersichtlich mit deren Konfigurationen, Mittelwerten und zugehörigen Variationskoeffizienten zusammengefasst worden.

Tabelle 5-4 Übersicht über die im Zuge dieser Arbeit hergestellten Versuchsserien

Fasertyp	VNr.	mm	Ritzbreite	Anker	Beton	kg/m ³	Balken	0,5 MW	0,5 VAR	3,5 MW	3,5 VAR
C60S	4	33	150	2	C30/37	60	6	3,43	18,31%	2,11	12,20%
C60S	5	33	150	2	C50/60	60	5	5,05	21,42%	2,95	38,24%
C60S	6	60	100	1	C30/37	60	6	5,39	10,80%	4,52	10,19%
C60S	7	60	100	1	C50/60	60	6	7,66	5,89%	4,23	23,48%
C60S	75	60	100	2	C30/37	30	6	4,87	6,32%	4,14	16,11%
C60S	76	60	100	2	C30/37	60	6	5,65	8,86%	5,85	14,22%
ST50	70	33	150	2	C30/37	30	6	3,05	7,96%	2,07	11,73%
ST50	71	33	150	2	C30/37	60	4	3,44	14,12%	2,26	8,15%
ST50 _{KWT}	72	60	80	1	C30/37	30	6	4,07	10,72%	3,04	11,19%
ST50 _{KWT}	73	60	100	1	C30/37	30	6	4,07	7,48%	2,65	7,36%
ST50 _{KWT}	74	60	120	1	C30/37	30	6	3,71	11,62%	2,52	19,05%

5.3.2 Versuchsaufbau und Durchführung

Um horizontale Kräfte in den Balken zu vermeiden, wurde die Lagerung und die Krafteinleitung in den Drittelpunkten mittels Stahlrollen realisiert (siehe Abb. 5-1). Die maßgebenden Durchbiegungen nach [1] sind $\delta_1 = 0.5 \text{ mm}$ für SLS und $\delta_2 = 3.5 \text{ mm}$ für ULS. Hier liegt der größte Unterschied zu [17], welcher in Abschnitt 2.7.2 genauer besprochen wurde.



Abb. 5-1 Verwendeter Versuchsaufbau für Biegezugversuche nach [1]

Um eine Einteilung in Leistungsklassen gemäß [1] durchführen zu können, mussten zuerst die Mittelwerte sowie die charakteristischen Werte (5% Quantil) der Nachrissbiegezugfestigkeit, bei 0,5 mm und 3,5 mm Durchbiegung, ermittelt werden. Anschließend erfolgte die Einteilung in Leistungsklassen, wie in Abschnitt 2.7.1 beschrieben wurde.

Nachfolgend sind in Tabelle 5-5 die jeweiligen Ausbreitmaße der Versuchsserien und die zugehörigen Druckfestigkeiten der Begleitkörper dargestellt. Aufgrund der vorhandenen Kapazität des Mixers mussten die Prüfbalken in zwei Chargen betoniert werden (je Mischcharge drei Balken). Für jede Mischcharge wurde das Ausbreitmaß nach [23] bestimmt. Entsprechend der Ergebnisse kann der Frischbeton in die Klasse F4/5 eingeteilt werden. Die Druckfestigkeiten wurden nach [24] bestimmt und über beide Chargen gemittelt. Die Druckfestigkeiten ergaben entweder einen Beton der Festigkeitsklasse C30/37 oder C50/60, was genau den gewünschten Festigkeiten entsprach.

Tabelle 5-5 Ausbreitmaße und Druckfestigkeiten von Dezember 2016 bis März 2017 durchgeführten Versuche

					Ausbreitmaß [cm]	Druckfestigkeit [N/mm ²]
29.11.2016	60 mm C30/37	C60S R100	30kg	M1	51,7	49,1
				M2	47,2	
			60kg	M1	55	44,8
				M2	56,2	
05.12.2016	33 mm C30/37	C60S R150	30kg	M1	58	50,3
				M2	57,2	
			60kg	M1	56,5	44,5
				M2	53,5	
06.12.2016	33 mm C50/60	C60S R150	30kg	M1	54	72,7
				M2	61	
			60kg	M1	47,5	72,1
				M2	45,5	
07.12.2016	60 mm C50/60	C60S R100	60kg	M1	44,2	77,5
				M2	56,2	
13.03.2017	33mm C30/37	ST50 R150	30kg	M1	48,0	50,9
				M2	48,5	
			60kg	M3	50,5	45,6
				M4	50,0	
16.03.2017	60mm C30/37	ST50 R80	30kg	M1	46,5	50,8
				M2	46,0	
		ST50 R100	30kg	M3	47,0	49,9
				M4	51,0	
20.03.2017	60mm C30/37	ST50 R120	30kg	M1	43,5	50,0
				M2	44,5	
26.04.2017	60mm C30/37	C60S R100	30kg	M1	41,0	51,2
				M2	46,5	
		C60S R100	60kg	M3	47,5	46,4
				M4	46,0	

Durchgeführt wurden alle Biegezugversuche auf einer Prüfmaschine des Typs Beta 1000 des Herstellers Messphysik an der TU-Graz. Ort der Durchführung war das Labor für konstruktiven Ingenieurbau.

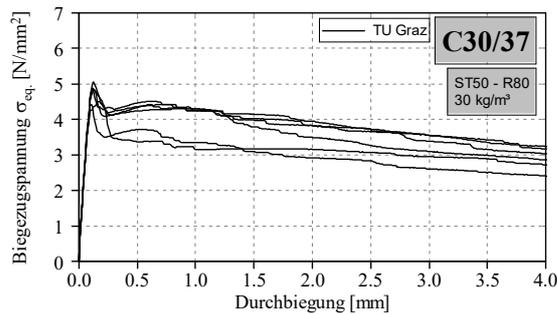
5.3.3 Versuchsergebnisse und Auswertung

Die Untersuchungen wurden mit Faserlängen von 33 mm und 60 mm mit einer Stahlgüte von ST50 und C60S durchgeführt. Wobei anzumerken ist, dass die Fasern von drei Versuchsserien bereits aus der neu in Betrieb genommenen KWT-Anlage stammen. Der Faserdurchmesser beträgt ≈ 0.75 mm (Faserfläche ≈ 0.44 mm²). Es wurden Versuche mit Fasern, die einen Endanker (2-Anker-Design) sowie zwei Endanker (4-Anker-Design) haben, durchgeführt. Die Versuchsreihe mit 60 mm langen Fasern mit zwei

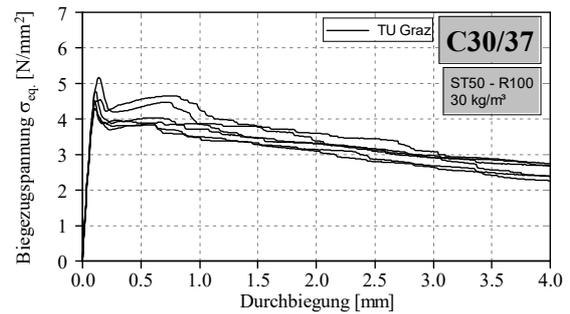
Endanker (4-Anker-Design) ist, nach den fehlerhaften Fasern aus dem Frühjahr 2016, die ersten verwertbaren Versuchsergebnisse mit diesem Faserdesign.

Ergebnisse der Versuche mit ST50 1 Endanker 60 mm 30 kg/m³ KWT-Fasern

Nachfolgend sind die Versuchsergebnisse der Biegezugversuche mit den Fasern der Stahlgüte ST50 und einer Faserlänge von 60 mm, sowie einem Fasergehalt von 30 kg/m³ abgebildet (Abb. 5-2 und Abb. 5-3). Die verwendeten Fasern stammen aus der neu in Betrieb genommenen KWT-Anlage. Das verwendete Faserdesign wies einen Endanker (2-Anker-Design) auf. Die verwendete Festigkeitsklasse des Betons lag bei C30/37.

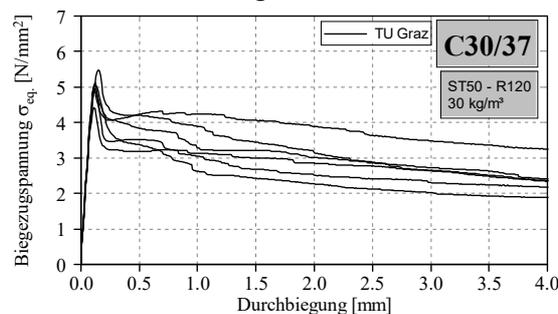


$$\begin{aligned}
 f_{cflm,L1}^f &= 4,07 \text{ MPa} & f_{cflm,L2}^f &= 3,04 \text{ MPa} \\
 f_{cflk,L1}^f &= 2,08 \text{ MPa} & f_{cflk,L2}^f &= 1,55 \text{ MPa} \\
 L1 &= 1,8 & L2 &= 1,5
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 f_{cflm,L1}^f &= 4,07 \text{ MPa} & f_{cflm,L1}^f &= 2,65 \text{ MPa} \\
 f_{cflk,L1}^f &= 2,07 \text{ MPa} & f_{cflk,L1}^f &= 1,35 \text{ MPa} \\
 L1 &= 1,8 & L1 &= 1,2
 \end{aligned}$$

Abb. 5-2 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven für 60 mm – ST50 – C30/37 – 30 kg/m³ mit einer Ritzbreite von R80 (links) bzw. R100 (rechts) und statistische Auswertung



$$\begin{aligned}
 f_{cflm,L1}^f &= 3,71 \text{ MPa} & f_{cflm,L2}^f &= 2,52 \text{ MPa} \\
 f_{cflk,L1}^f &= 1,89 \text{ MPa} & f_{cflk,L2}^f &= 1,28 \text{ MPa} \\
 L1 &= 1,8 & L2 &= 1,2
 \end{aligned}$$

Abb. 5-3 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven für 60 mm – ST50 – C30/37 – 30 kg/m³ mit einer Ritzbreite von R120 und statistische Auswertung

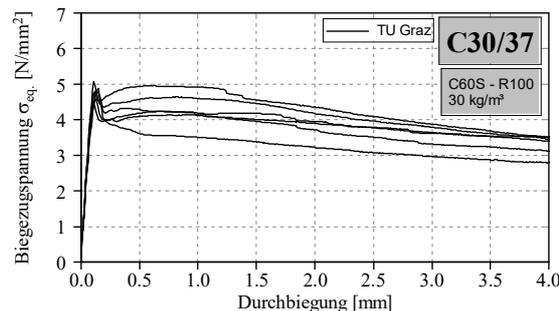
Für diese drei Versuchsreihen kamen Fasern mit Ritzbreiten von 80 μm (Abb. 5-2 links), 100 μm (Abb. 5-2 rechts) und 120 μm (Abb. 5-3) zum Einsatz. Dennoch weisen alle drei Serien hinsichtlich der Mittelwerte $f_{cflm,Li}^f$, charakteristischen Werte $f_{cflm,Lk}^f$ und Leistungsklasse sehr ähnliche Ergebnisse auf. Die

Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven weisen geringe Streuungen auf und sind ebenfalls bei allen drei Versuchen sehr ähnlich. Wie nachfolgend in Abschnitt 5.4.6 genauer diskutiert wird, fügen sich diese Versuchsserien in die bereits durchgeführten Versuche mit den Prototypenfasern sehr gut ein.

Wie bereits aus den Versuchen mit den Fasern der Prototypenanlage bekannt ist, liegen die erzielten Leistungswerte knapp unter jenen der Stahlgüte C60S. Des Weiteren ergab eine Nachrechnung mit dem in [5] vorgestellten Modell, das bereits bei der Festigkeitsklasse C30/37 die Zugfestigkeit der ST50 Fasern voll ausgeschöpft ist. Daher ist eine weitere Steigerung der Betondruckfestigkeit mit dieser Fasergüte nicht empfehlenswert.

Ergebnisse der Versuche mit C60S ein Endanker (2-Anker-Design) 60 mm

In Abb. 5-4 ist die Biegezugspannungs-Durchbiegungskurve ($\sigma_{eq} = M/W$) der Versuchsreihe mit der Fasermenge von 30 kg/m³ bei einer Stahlgüte C60S und einem Endanker (2-Anker-Design) dargestellt. Verwendet wurde ein Beton der Festigkeitsklasse C30/37. Des Weiteren sind die Mittelwerte $f_{cflm,Li}^f$, die charakteristischen Werte $f_{cflk,Lk}^f$ und die Leistungsklassen, bei den dazugehörigen Durchbiegungen δ_1 und δ_2 , angeführt. Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt, dass mit den zugegebenen Fasermengen bereits konkurrenzfähige Leistungswerte bzw. -klassen erzielt wurden.



$$f_{cflm,L1}^f = 4.27 \text{ MPa} \quad f_{cflm,L2}^f = 3.41 \text{ MPa}$$

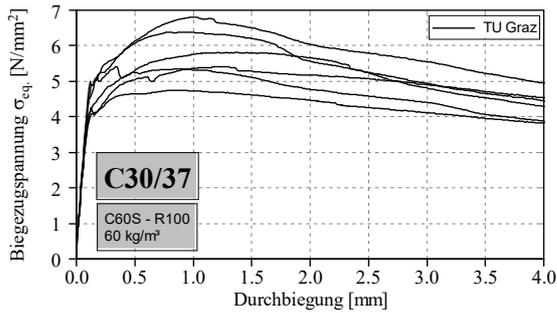
$$f_{cflk,L1}^f = 2.18 \text{ MPa} \quad f_{cflk,L2}^f = 1.74 \text{ MPa}$$

$$L1 = 2.1$$

$$L2 = 1.5$$

Abb. 5-4 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven für 60 mm – C60S – C30/37 mit 30 und statistische Auswertung

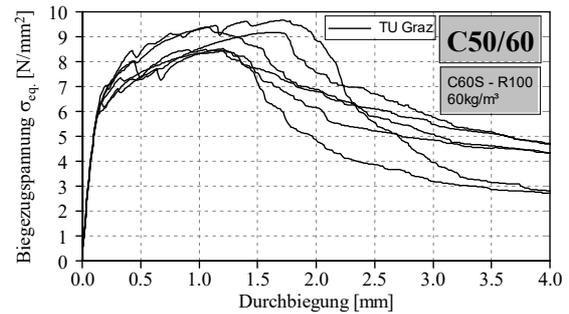
In weiterer Folge sind mit diesem Fasertyp, einer Fasermenge von 60 kg/m³ und einer Festigkeitsklasse des Betons von C30/37 sowie C50/60 weitere Versuchsserien hergestellt worden. Die zugehörigen Versuchsergebnisse finden sich in Abb. 5-5. Bei beiden Versuchsreihen konnte eine Mehrfachrissbildung mit einer Überschreitung des Rissmomentes, ein sogenanntes Multi-Cracking beziehungsweise Deflection-Hardening Verhalten, festgestellt werden.



$$f_{cf\,lm,L1}^f = 5.39 \text{ MPa} \quad f_{cf\,lm,L2}^f = 4.52 \text{ MPa}$$

$$f_{cf\,lk,L1}^f = 2.75 \text{ MPa} \quad f_{cf\,lk,L2}^f = 2.30 \text{ MPa}$$

$$L1 = 2,7 \quad L2 = 2,1$$



$$f_{cf\,lm,L1}^f = 7.66 \text{ MPa} \quad f_{cf\,lm,L2}^f = 4.23 \text{ MPa}$$

$$f_{cf\,lk,L1}^f = 3.90 \text{ MPa} \quad f_{cf\,lk,L2}^f = 2.16 \text{ MPa}$$

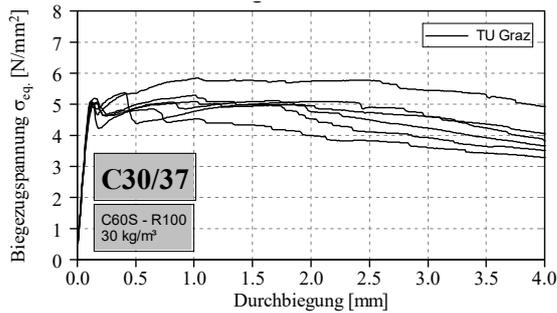
$$L1 = 3.0 \quad L2 = 2.1$$

Abb. 5-5 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven mit 60 mm – C60S – 60 kg/m³ für C30/37 (links) und C50/60 (rechts) mit statistischer Auswertung

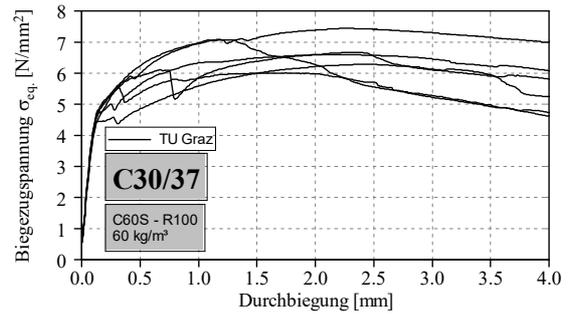
Im Gegensatz zur Festigkeitsklasse C30/37 und 60 kg/m³ (Abb. 5-5 links) kann bei der Versuchsreihe mit dem Beton der Festigkeitsklasse C50/60 und 60 kg/m³ (Abb. 5-5 rechts), ab einer Durchbiegung von ca. 1,5 mm, ein verstärktes Faserreißen beobachtet werden. Dies führte in weiterer Folge zu einem erheblichen Kraftabfall. Insbesondere die Versuchsergebnisse mit dem Beton der Festigkeitsklasse C50/60 verdeutlichen das große Potential der Feel Fiber Fasern. Um auch mit dieser Betongüte entsprechend hohe Werte in der Leistungsklasse L2 zu erreichen, ist es empfehlenswert das Faserdesign zu modifizieren. Des Weiteren wäre es auch möglich, die Stahlgüte der verwendeten Stahlfasern auf C60S-2000 ($f_y=2000 \text{ N/mm}^2$) zu erhöhen.

Ergebnisse der Versuche mit C60S zwei Endanker (4-Anker-Design) 60 mm

Nachfolgend sind in Abb. 5-6 die Ergebnisse der ersten Versuche mit Fasern der Stahlgüte C60S und 60 mm Länge, allerdings mit zwei Endankern (4-Anker-Design) in Form der Biegezugspannungs-Durchbiegungskurve ($\sigma_{eq} = M/W$) dargestellt. Die statistische Auswertung der Versuche samt zugehörigen Leistungsklassen ist ebenfalls dargestellt. Beim Vergleich der Ergebnisse dieser Versuchsserien mit den Fasern, mit nur einem Endanker (2-Anker-Design) in Abb. 5-4 und Abb. 5-5, ist erkennbar, dass sich die Werte der Leistungsklasse L1 gleichen, die Werte der Klasse L2 sich bei den Fasern mit zwei Endankern um zwei Klassen verbessert haben.



$$\begin{aligned}
 f_{cflm,L1}^f &= 4.87 \text{ MPa} & f_{cflm,L2}^f &= 4.14 \text{ MPa} \\
 f_{cflk,L1}^f &= 2.48 \text{ MPa} & f_{cflk,L2}^f &= 2.11 \text{ MPa} \\
 L1 &= 2.4 & L2 &= 2.1
 \end{aligned}$$



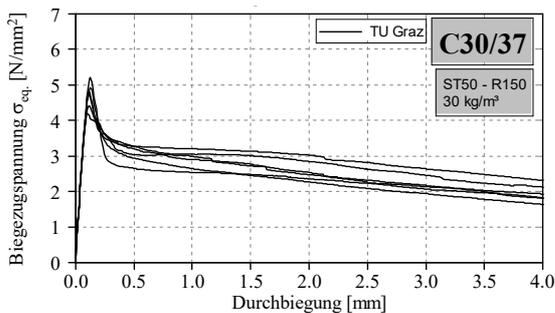
$$\begin{aligned}
 f_{cflm,L1}^f &= 5.65 \text{ MPa} & f_{cflm,L2}^f &= 5.85 \text{ MPa} \\
 f_{cflk,L1}^f &= 2.88 \text{ MPa} & f_{cflk,L2}^f &= 2.98 \text{ MPa} \\
 L1 &= 2.7 & L2 &= 2.7
 \end{aligned}$$

Abb. 5-6 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven mit 60 mm - C60S – R100 - 30 (links) bzw. 60 kg/m³ (rechts) und statistische Auswertung

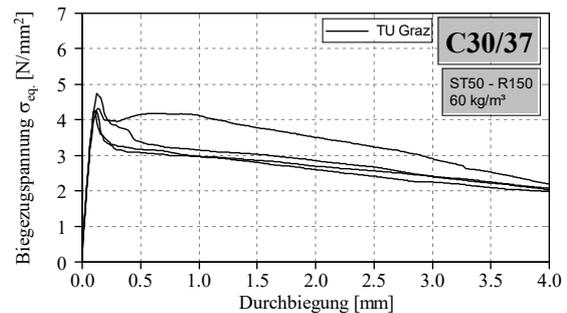
Dies bestätigt die in Abschnitt 3.3 beschriebene potentielle Leistungsfähigkeit der Feel Fiber Faser. Um diese ersten Versuchsergebnisse mit diesem Fasertyp zu bestätigen, sind weitere Versuchsreihen erforderlich.

Ergebnisse der Versuche mit ST50 2 Endanker 33 mm 30 kg/m³ und 60 kg/m³

Mit der Stahlgüte ST50, einer Ritzbreite von 150 µm und einer Faserlänge von 33 mm wurden ebenfalls Versuche durchgeführt. In Abb. 5-7 sind diese zwei Versuchsserien mit der zugehörigen statistischen Auswertung abgebildet. Die verwendeten Fasern weisen zwei Endanker (4-Anker-Design) auf. Die verwendete Betongüte betrug C30/37. Es wurden Fasergehälter von 30 kg/m³ und 60 kg/m³ verwendet.



$$\begin{aligned}
 f_{cflm,L1}^f &= 3,05 \text{ MPa} & f_{cflm,L2}^f &= 2,07 \text{ MPa} \\
 f_{cflk,L1}^f &= 1,56 \text{ MPa} & f_{cflk,L2}^f &= 1,06 \text{ MPa} \\
 L1 &= 1,50 & L2 &= 0,90
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 f_{cflm,L1}^f &= 3,44 \text{ MPa} & f_{cflm,L2}^f &= 2,26 \text{ MPa} \\
 f_{cflk,L1}^f &= 1,75 \text{ MPa} & f_{cflk,L2}^f &= 1,15 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

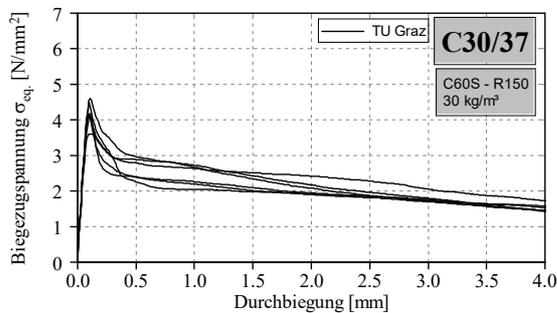
Abb. 5-7 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven für 33 mm – ST150 – C30/37 - 30 (links) bzw. 60 kg/m³ (rechts) und statistische Auswertung

Aufgrund der kürzeren Faserlänge und der somit geringer eingebetteten Mantelfläche (bei gleich bleibendem Faserdurchmesser) waren geringere Leistungsklassen, im Vergleich zu der 60 mm langen Fa-

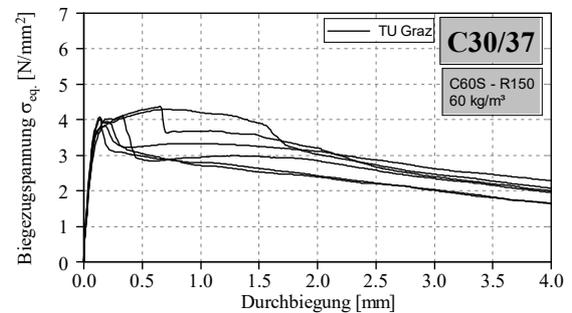
ser, zu erwarten. Auffällig ist, dass trotz der höheren Fasermenge die Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven sich in Ihren Ergebnissen nur geringfügig unterschieden. Da die Versuchsreihe mit einem Fasergehalt von 60 kg/m^3 nur aus vier Probekörpern bestand, wurden in diesem Falle die Leistungsklassen nicht berechnet.

Ergebnisse der Versuche mit C60S 2 Endanker (4-Anker-Design) 33 mm

Nachfolgend sind in Abb. 5-8 die Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven und die zugehörige statistische Auswertung der Versuchsreihen mit den Fasern der Stahlgüte C60S (1400 N/mm^2) und zwei Endankern (4-Anker-Design) dargestellt. Die verwendete Betongüte lag bei C30/37 und es wurden Fasergehalte von 30 und 60 kg/m^3 verwendet.



$$\begin{aligned}
 f_{cflm,L1}^f &= 2.61 \text{ MPa} & f_{cflm,L2}^f &= 1.64 \text{ MPa} \\
 f_{cflk,L1}^f &= 1.33 \text{ MPa} & f_{cflk,L2}^f &= 0.84 \text{ MPa} \\
 L1 &= 1.2 & L2 &= 0.6
 \end{aligned}$$

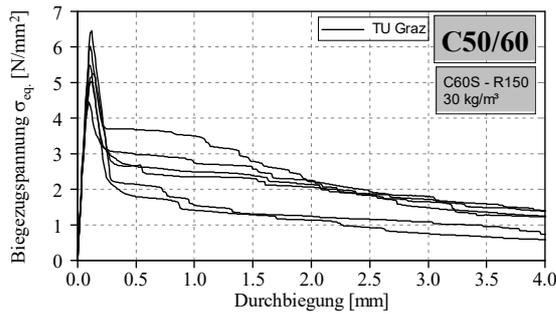


$$\begin{aligned}
 f_{cflm,L1}^f &= 3.43 \text{ MPa} & f_{cflm,L2}^f &= 2.11 \text{ MPa} \\
 f_{cflk,L1}^f &= 1.75 \text{ MPa} & f_{cflk,L2}^f &= 1.08 \text{ MPa} \\
 L1 &= 1.5 & L2 &= 0.9
 \end{aligned}$$

Abb. 5-8 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven für 33 mm – C60S – C30/37 mit 30 (links) bzw. 60 kg/m^3 (rechts) und statistische Auswertung

Die Ergebnisse der Stahlgüte C60S mit einer Faserlänge von 33 mm weisen ähnliche Tragfähigkeiten wie die Versuche mit ST50 und 33 mm auf. Mit der Stahlgüte C60S und einem Fasergehalt von 60 kg/m^3 ist, in manchen Fällen, eine Mehrfachrissbildung (Multi-Cracking bzw. Deflection-Hardening Verhalten) aufgetreten.

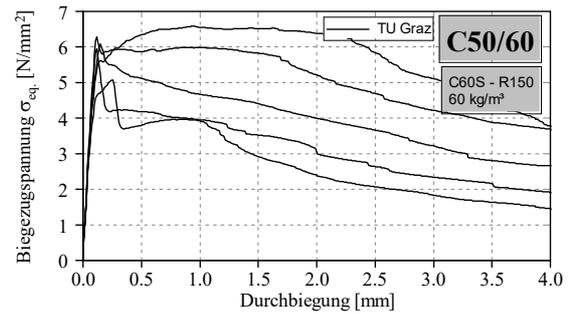
Wie die Nachrechnung, mit dem in [5] vorgestellten Modell zeigt, wird die Stahlgüte C60S (1400 N/mm^2) bei einer Faserlänge von 33 mm nicht gänzlich ausgenutzt. Daher wird empfohlen, für diese Konfiguration auf das günstigere ST50 Material zurückzugreifen.



$$f_{cflm,L1}^f = 2,64 \text{ MPa} \quad f_{cflm,L2}^f = 1,21 \text{ MPa}$$

$$f_{cflk,L1}^f = 1,35 \text{ MPa} \quad f_{cflk,L2}^f = 0,62 \text{ MPa}$$

$$L1 = 1,2 \quad L2 = 0,6$$



$$f_{cflm,L1}^f = 5,05 \text{ MPa} \quad f_{cflm,L2}^f = 2,95 \text{ MPa}$$

$$f_{cflk,L1}^f = 2,58 \text{ MPa} \quad f_{cflk,L2}^f = 1,51 \text{ MPa}$$

Abb. 5-9 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven für 33 mm – C60S – C50/60 mit 30 (links) bzw. 60 kg/m³ (rechts) und statistische Auswertung

Die 33 mm lange Faser der Stahlgüte C60S wurde auch mit einem Beton der Festigkeitsklasse C50/60 getestet. Die Abb. 5-9 zeigt die Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven und die statistischen Auswertungen dieser Versuchsserien. Es wurden Fasergehalte von 30 bzw. 60 kg/m³ verwendet. In der Versuchsreihe mit einem Fasergehalt von 30 kg/m³ kam es zu Faserreißen. Dies kann auf den stärkeren Verbund zwischen Faser und Betonmatrix durch die höhere Druckfestigkeit des Betons, zurückgeführt werden. Bei einem Fasergehalt von 60 kg/m³ ist teilweise ein Überschreiten des Rissmomentes zu beobachten. Da diese Versuchsreihe allerdings nur aus fünf Balken und nicht wie lt. [1] vorgeschrieben aus sechs Balken besteht, wurden die Leistungsklassen nicht berechnet.

5.4 Auswertung aller bisherigen Versuchsergebnisse

5.4.1 Einführung

Im Zuge dieser Arbeit wurden die Versuchsergebnisse von Herbst/2015 bis April/2017 aus 4-Punkt-Biegezugversuchen des TBR-Bernburg und der TU-Graz zusammengestellt. Das Hauptaugenmerk sei hierbei auf die Betonfestigkeitsklasse C30/37 und C50/60 gelegt worden. Es wurden auch Versuche mit weiteren Festigkeitsklassen durchgeführt. Diese werden in dieser Arbeit nicht näher behandelt. Zur Vollständigkeit der Zusammenfassung sind sie in der Übersicht (Tabelle 5-1, Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3) angeführt.

Nachfolgend wird auf Basis der gesammelten Daten der Einfluss der Ankergröße, der Faserlänge, der Fasermenge und des Fasermaterials näher behandelt. Abschließend erfolgt ein kurzer Vergleich der Fasern aus der KWT-Anlage mit den Fasern der Prototypenanlage und die Ergebnisdiskussion.

In Abb. 5-10 wurden die Mittelwerte bei den relevanten Durchbiegungen δ_1 (0,5 mm) und δ_2 (3,5 mm) aller, mit den Fasern der Fa. Feel Fiber GmbH, durchgeführten Versuchsreihen zusammengefasst. Anhand dieser Übersicht ist auf einen Blick ersichtlich, welche Versuche bereits durchgeführt wurden. In allen folgenden Diagrammen stellen die Blauen Säulen die Mittelwerte bei δ_1 (0,5 mm) und die roten

Säulen die Mittelwerte bei δ_2 (3,5 mm Durchbiegung) je Versuchsreihe dar. Der vertikale schwarze Balken am Ende jeder Säule stellt die Standardabweichung der jeweiligen Versuchsreihen dar.

Alle Parameter der Versuchsserien sind unterhalb des Säulendiagrammes angeführt. Die Ergebnisse wurden aufsteigend nach dem Mittelwert bei δ_1 (0,5 mm Durchbiegung) sortiert und anschließend in Hauptgruppen und Untergruppen zusammengefasst.

In Abb. 5-10 sind die Hauptgruppen nach dem verwendeten Fasertyp in der Reihenfolge ST50, C60S und C60S-2000 gruppiert worden. Anschließend erfolgt einer Sortierung der drei entstandenen Hauptgruppen in Untergruppen nach der Festigkeitsklasse des Betons (C30/37 und C50/60), dem Fasergehalt (30 und 60 kg/m³) und der Faserlänge (33, 50 und 60 mm). Aufgrund der in Abschnitt 5.4.2 diskutierten Ergebnisse wurde auf die Ritzbreite bei der Sortierung keine Rücksicht genommen.

Neben den einzelnen, oben beschriebenen, Haupt- und Untergruppen sind alle weiteren relevanten Parameter der Versuchsreihen ebenfalls angegeben worden. Die Ritzbreite der verwendeten Faser wurde in μm angegeben. Die Angabe der Ankeranzahl bezieht sich auf die Endanker je Seite. Eine „1“ bedeutet, dass eine Faser mit einem Endanker (2-Anker-Design) und eine „2“ bedeutet, dass eine Faser mit zwei Endankern (4-Anker-Design) je Ende verwendet wurde. Die Zeile mit der Bezeichnung „F. Reißen“ gibt Auskunft darüber, ob bei den Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven ein vermehrt auftretendes Faserbrechen zu beobachten war. Sollte dies der Fall sein, so wurde die Versuchsreihe mit einem „R“ für Faserreißen markiert. Sollte kein, beziehungsweise nur sehr geringes, Faserreißen zu erkennen sein, so ist die Versuchsserie mit eine „K“ für kein Faserreißen markiert worden. Jede Versuchsserie wurde unter VNr. mit einer fortlaufenden Nummer versehen um sie immer eindeutig identifizieren zu können.

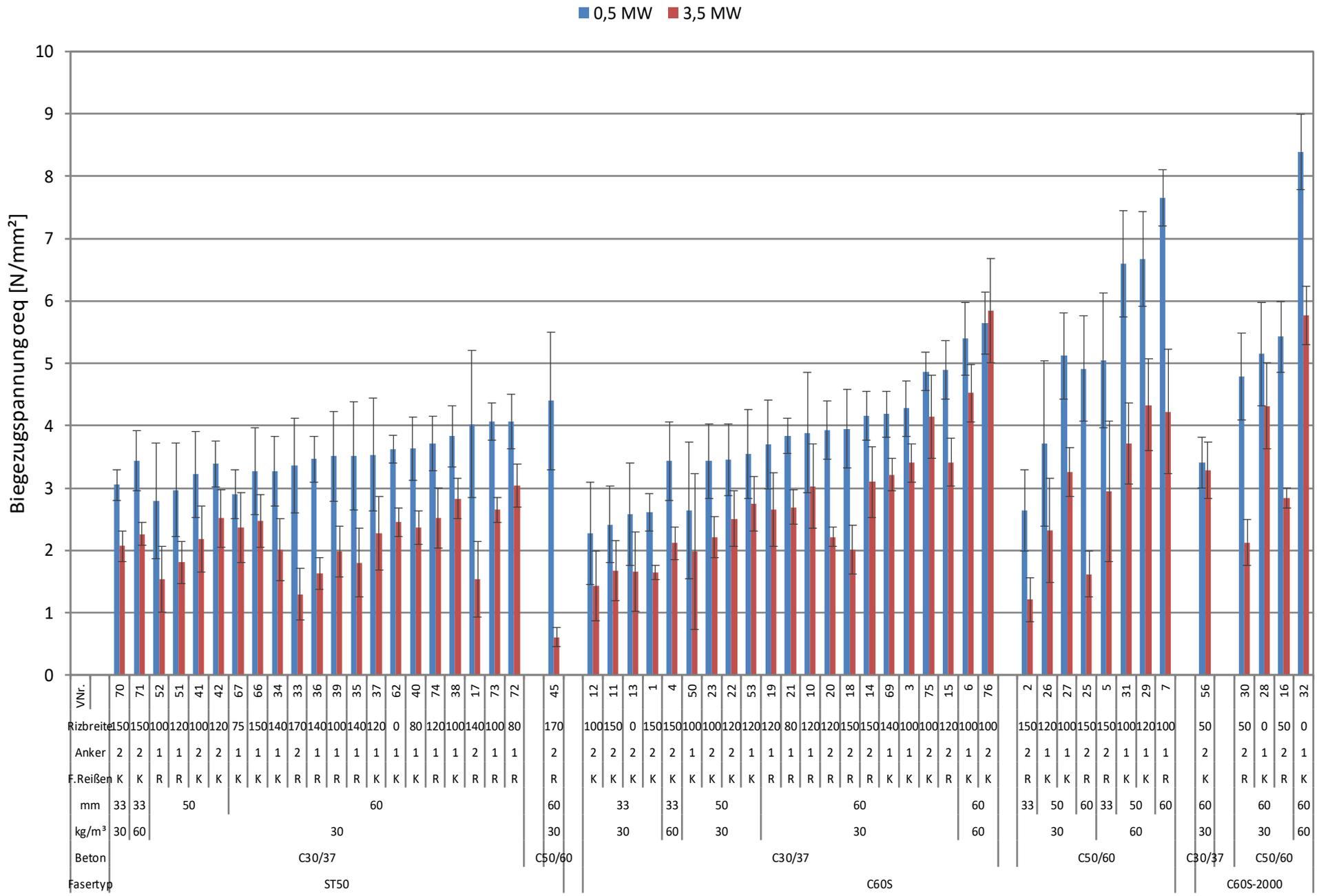


Abb. 5-10 Übersicht aller bisher durchgeführter Versuchsreihen mit den Feel Fiber Fasern

5.4.2 Variation der Ankergröße (Ritzbreite)

Es wurde versucht, durch Variation der Ankergröße bei sonst gleichbleibenden Parametern, den Einfluss der Ritzbreite auf das Tragverhalten zu ermitteln. Die Definition der Ritzbreite ist Abschnitt 3.2 zu entnehmen und indirekt proportional zur Größe des Ankers. Dies bedeutet, dass ein Anker mit der Bezeichnung R150 (Ritzbreite 150 μm) einem kleinen Anker entspricht, wobei die Bezeichnung R0 (Ritzbreite 0 μm) den größtmöglichen Anker mit der größten Ankerfläche repräsentiert.

In Abb. 5-11 ist der Einfluss der Ritzbreite auf die Ergebnisse der Biegezugversuche dargestellt. Die dargestellten Kurven repräsentieren jeweils die Mittelwerte von 3 Standardbiegebalken. Bereits hier ist kein eindeutiger Zusammenhang von Ritzbreite und Biegetragverhalten zu erkennen.

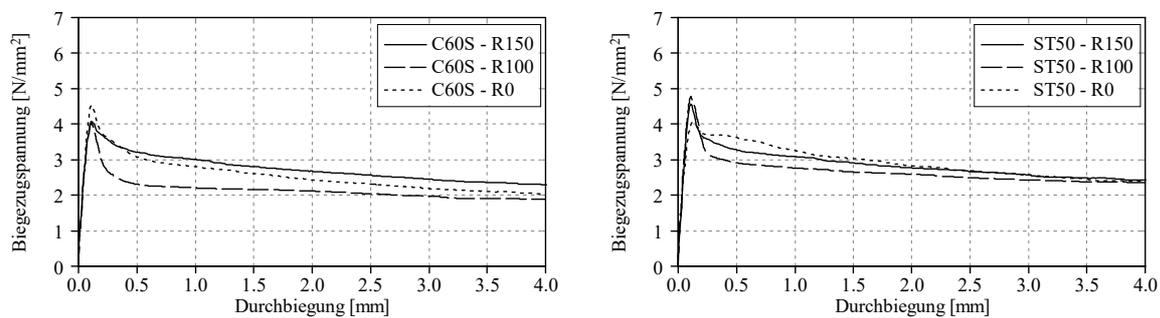


Abb. 5-11 Einfluss der Ankergröße (Ritzbreite) bei Fasern der Stahlgüte C60S (links) und ST50 (rechts) mit einem Endanker

Um diese Ergebnisse zu bestätigen wurden in

Abb. 5-12 die Mittelwerte der Biegezugspannungen (bei 0,5 und 3,5 mm Durchbiegung) sowie die zugehörigen Standardabweichungen (vertikale schwarze Linien am Ende jedes Balkens) ausgewählter Versuche dargestellt. Es handelt sich um fünf Versuchsserien mit C60S-Fasern und dreizehn Versuchsserien mit ST50-Fasern. Bei allen Versuchen wurde eine Faserlänge von 60 mm, ein Fasergehalt von 30 kg/m³, ein Endanker (2-Anker-Design) und ein Beton der Festigkeitsklasse C30/37 verwendet. Die Ergebnisse der Fasern sind, gruppiert nach Fasertyp und von links nach rechts mit absteigender Ritzbreite und somit mit immer größer werdenden Ankerknoten, sortiert worden. Wenn sich die größer werdende Ankerfläche positiv auf das Tragverhalten auswirken würde, so müsste sich in Abb. 5-12 ein Ansteigen der Mittelwerte erkennen lassen. Eine solche Tendenz lässt sich nicht ablesen, es ist vielmehr ein gleichbleibendes Tragverhalten zu erkennen. Dies führt zu dem Schluss, dass eine Veränderung der Ritzbreite in einem Bereich von 0-150 μm zu keinen signifikanten Änderungen im Tragverhalten führt.

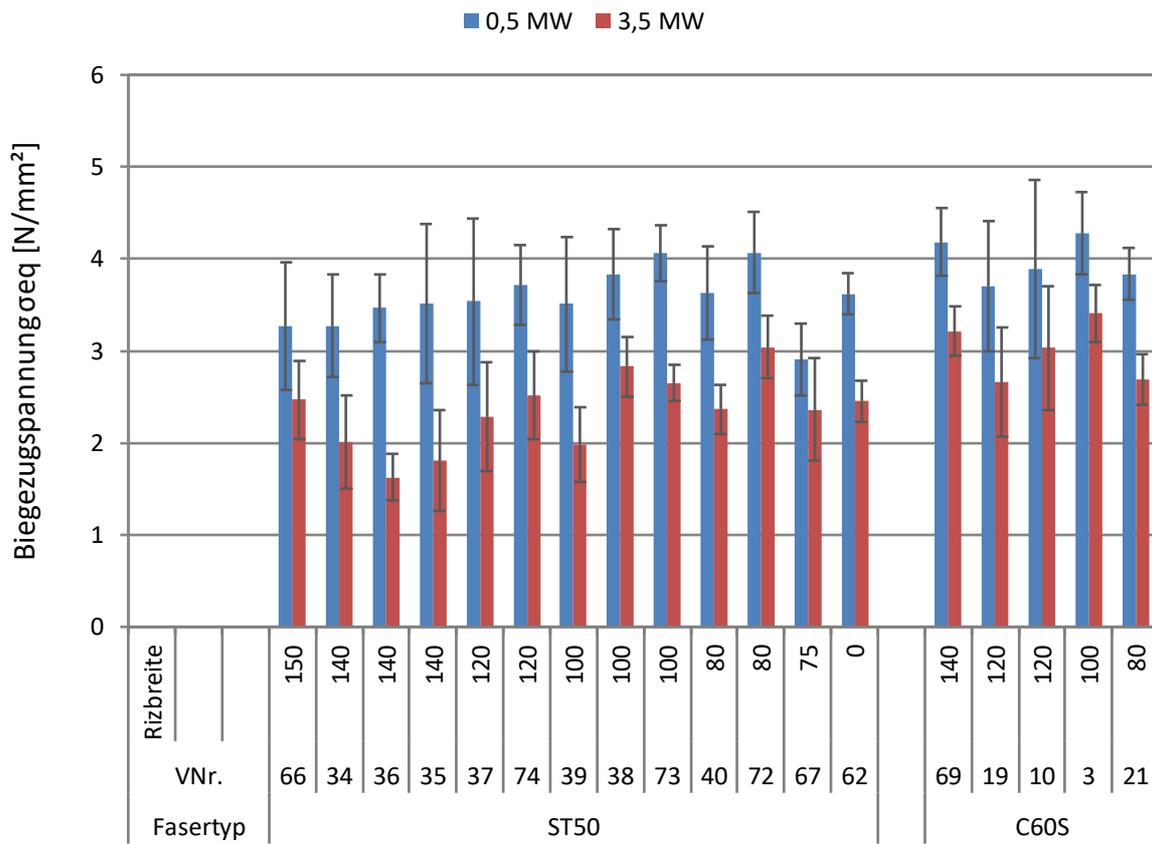


Abb. 5-12 Mittlere Biegezugspannung bei 0,5 und 3,5 mm Durchbiegung sortiert nach der Ritzbreite und gruppiert nach C60S und ST50

5.4.3 Einfluss der Faserlängen

In Abb. 5-13 sind die Mittelwerte ausgewählter Versuchsreihen mit einer Festigkeitsklasse des Betons von C30/37 dargestellt. Sie wurden aufsteigend nach Ihrer Faserlänge von 33 über 50 bis 60 mm sortiert und nach ihrem Fasermaterial in Gruppen zusammengefasst. Für diese Darstellung erfolgte nur eine Heranziehung der Versuchsserien ohne Aufweisung von Faserreißen.

Bei beiden Fasermaterialien ist mit zunehmender Faserlänge eine eindeutige Steigerung der Tragfähigkeit zu erkennen. Die Stahlgüte C60S zeigt im Vergleich zur Stahlgüte ST50 dahingehend ein ausgeprägteres Verhalten. Zurückzuführen ist diese Zunahme der Leistungsfähigkeit darauf, dass bei gleichbleibender Fasermenge und gleichbleibenden Faserdurchmesser die Anzahl der risskreuzenden Fasern auch bei veränderlicher Faserlänge gleichbleibend ist. Dadurch entsteht eine größere Tragfähigkeit mit zunehmender Faserlänge, da auch die mittlere Einbindelänge l_e zunimmt (siehe Formel 2.1).

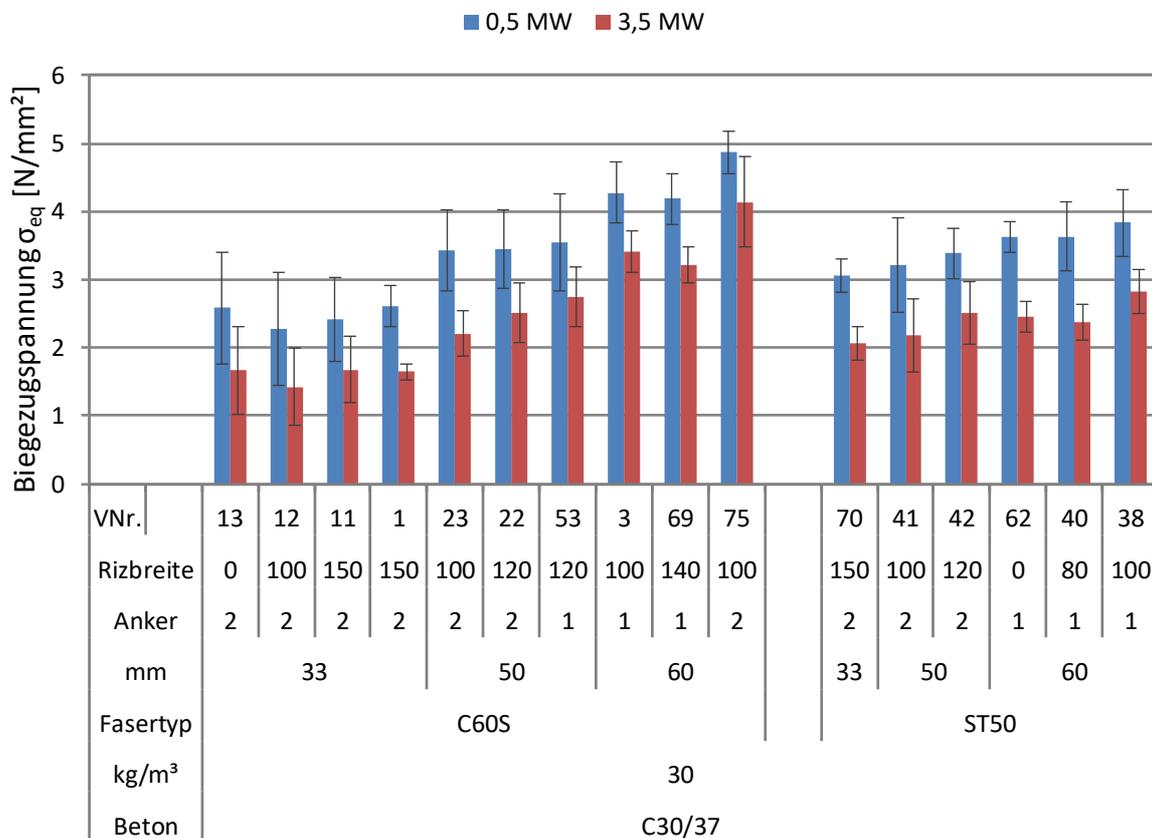


Abb. 5-13 Einfluss der Faserlänge

5.4.4 Einfluss der Fasermenge

In Abb. 5-14 wurden die Hauptgruppen nach der Fasermenge 30 kg/m^3 und 60 kg/m^3 unterteilt. Es werden auch wieder nur jene Versuchsserien herangezogen, welche kein Faserreißen aufweisen. Des Weiteren werden hier alle von der Fa. Feel Fiber GmbH eingesetzten Stahlgüten dargestellt. Erfahrungsgemäß ist zu erwarten, dass mit einer Erhöhung des Fasergehaltes nur ein unterproportionaler Anstieg der Biegezugfestigkeit einhergeht. Diese Annahme lässt sich, wie in Abb. 5-14 gut zu erkennen ist bestätigen. Es besteht kein linearer Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit der Stahlfaser und dem Fasergehalt. Als mögliche Ursache für dieses Verhalten sei hier die Verschlechterung des Verbunds mit zunehmenden Fasergehalt angeführt. Hervorgerufen wird dies durch eine gegenseitige Beeinflussung der Fasern in der der Betonmatrix. Bei einer Faserlänge von 33 mm und einer Betonfestigkeit von C30/37, ist die Leistungssteigerung von 30 auf 60 kg/m^3 nur sehr gering. Bei den 50 mm und 60 mm langen Fasern ist dieser Unterschied ausgeprägter. Die Leistung steigert sich trotzdem nicht linear zum Fasergehalt. Die Versuche mit einer Festigkeitsklasse von C50/60 zeigen eine sehr ausgeprägte Leistungssteigerung mit höherem Fasergehalt. Allerdings kann auch hier keine Verdoppelung der aufnehmbaren Kraft erreicht werden.

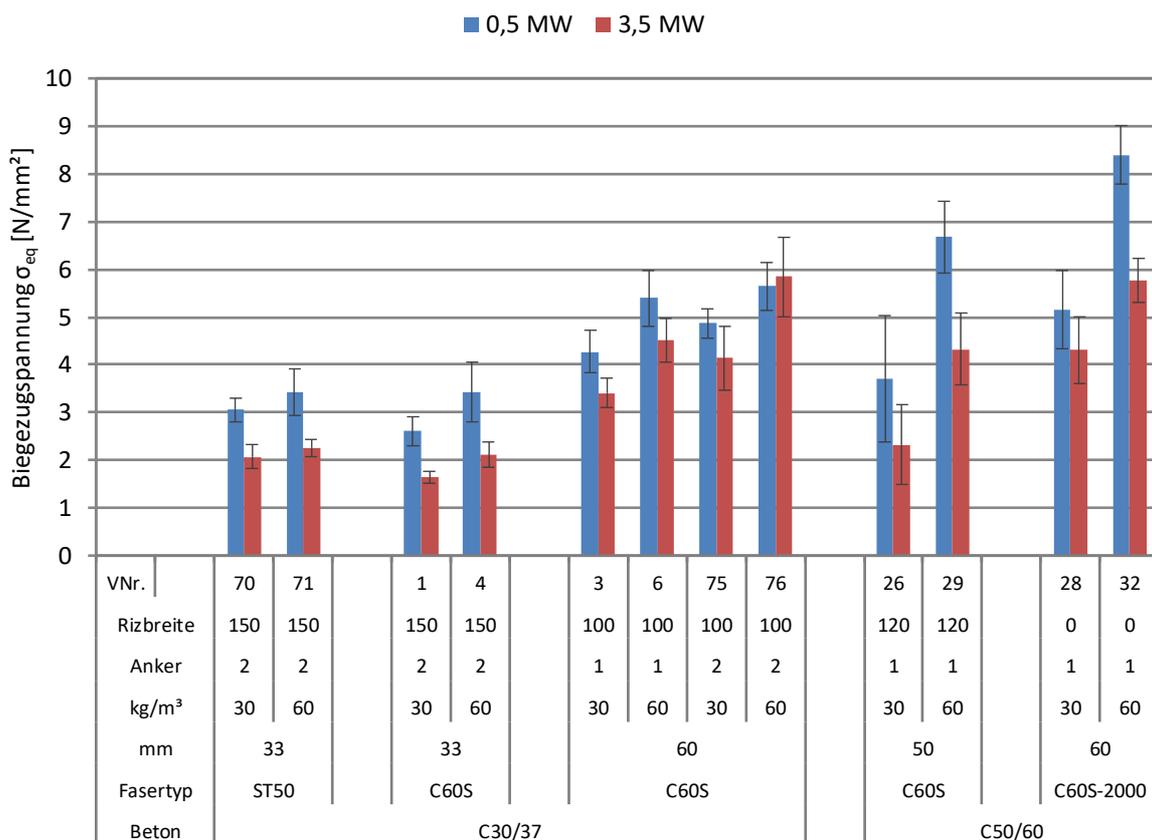


Abb. 5-14 Einfluss der Fasermenge (Gegenüberstellung 30 und 60 kg/m^3)

5.4.5 Einfluss des Fasermaterials

Nachfolgend wird auf den Einfluss des verwendeten Fasermaterials näher eingegangen. In Abb. 5-15 erfolgt ein Vergleich der Versuchsergebnisse zwischen der Stahlgüten ST50 und C60S. Dabei werden wiederum vergleichbare Versuchsserien gegenübergestellt. Herangezogen wurden Versuche mit einer Betongüte von C30/37 und einem Fasergehalt von 30 kg/m³. Anschließend sind sie entsprechend der Faserlänge gruppiert worden.

Bei einer Faserlänge von 33 mm und 50 mm und einer Festigkeitsklasse von C30/37 sowie sonst gleichen Parametern fällt auf, dass die Stahlgüten ST50 und C60S ähnliche Ergebnisse liefern. Grund dafür dürfte sein, dass die Stahlgüten eine ähnliche Oberflächenbeschaffenheit aufweisen. Diese Annahme wird durch die Rauigkeitsuntersuchungen bestätigt.

In der Gruppe der 60 mm Fasern scheint die Zugfestigkeit des ST50-Materials voll ausgenutzt, wenn nicht schon leicht überschritten worden, zu sein. Dies zeigt sich in einem vermehrt auftretenden Faserreißen. Dahingehend ist das Potenzial der C60S-Fasern noch nicht gänzlich ausgeschöpft worden, wie die letzten Versuche mit zwei Endankern (4-Anker-Design) gezeigt haben (siehe Abschnitt 5.3.3). Aufgrund des Faserreißen der ST50 Fasern, kommt es somit zu einer geringeren Tragfähigkeit im Vergleich zu den C60S Fasern.

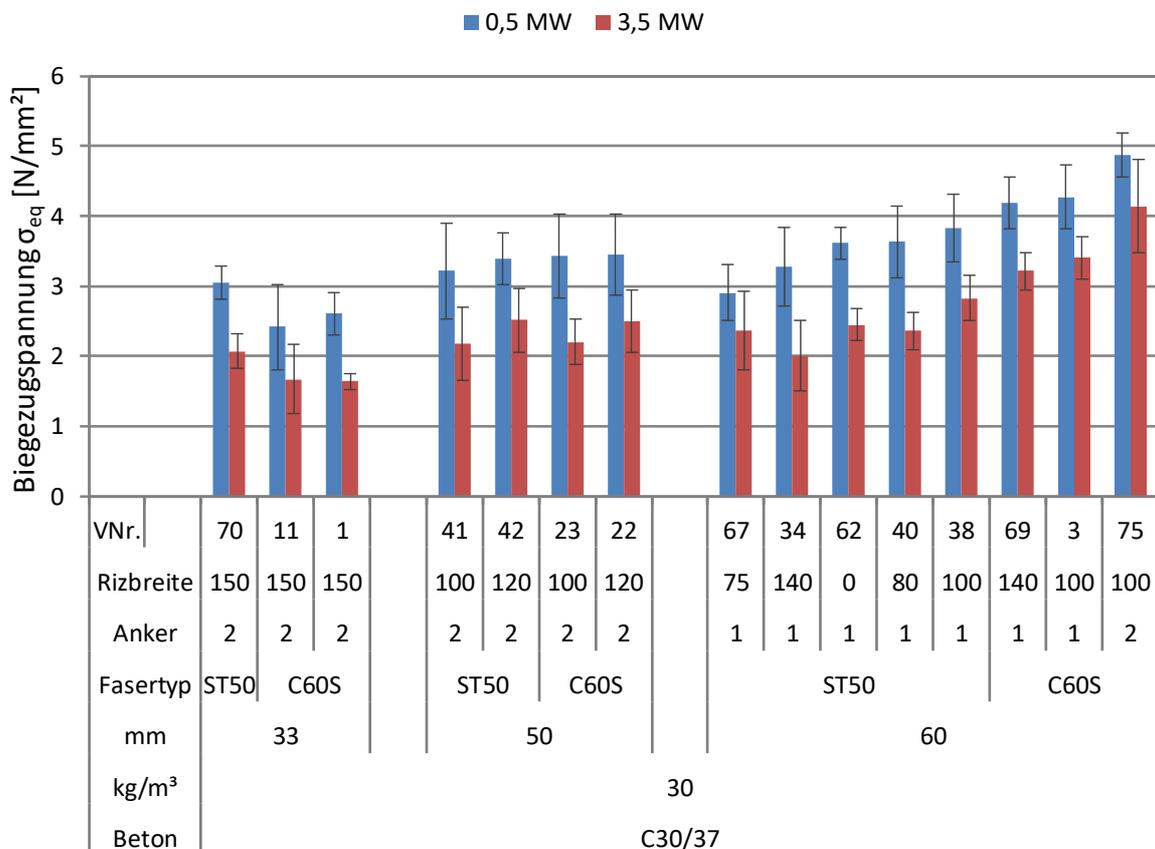


Abb. 5-15 Einfluss des Fasermaterials

5.4.6 Vergleich der Fasern der Prototypen- und der KWT-Anlage

Alle bisher geprüften Fasern der Fa. Feel Fiber GmbH wurden mit der sogenannten Prototypenanlage hergestellt. Seit Anfang 2017 ist auch die KWT-Anlage (Großanlage) in Betrieb genommen worden. Nun gilt es zu überprüfen, ob die mit dieser Anlage hergestellten Fasern die gleichen Eigenschaften wie die bisher geprüften Fasern der Prototypenanlage aufweisen. Wie bereits in Abschnitt 4 besprochen, ist es wichtig, die Oberflächenrauigkeit konstant zu halten bzw. deren Einfluss weiter zu beobachten. Ebenfalls sollte die Ausbildung der Ankerknoten keine Abweichungen aufweisen und ist daher ebenfalls zu kontrollieren.

Es wurden daher drei Prüfbalkenserien mit den Fasern der KWT-Anlage hergestellt und nach den Bestimmungen in [1] geprüft. Für die hergestellten Prüfbalken sind drei unterschiedliche Ritzbreiten des Fasertyps ST50 mit einem Endanker (2-Anker-Design) und einer Faserlänge von 60 mm verwendet worden. Es waren diese Fasern mit Ritzbreiten von R80, R100 und R120. Alle Balken wurden mit einem Fasergehalt von 30 kg/m³ und mit einem Beton der Festigkeitsklasse C30/37 hergestellt. Nachfolgend werden die mit den KWT-Fasern hergestellten Versuchsserien mit bereits vorhandenen Versuchsreihen verglichen. In Tabelle 5-6 sind die Versuchsserien zusammengefasst, die gegenübergestellt werden. Es ist zu erkennen, dass sowohl die Mittelwerte als auch die Variationskoeffizienten sehr ähnlich sind.

Tabelle 5-6 Übersicht der Versuchsserien mit ST50, C30/37, 60 mm und 1 Endanker

Fasertyp	VNr.	mm	Ritzbreite	Anker	Beton	kg/m ³	0,5 MW	0,5 VAR	3,5 MW	3,5 VAR
ST50	40	60	80	1	C30/37	30	3,63	14,07%	2,37	11,16%
ST50 _{KWT}	72	60	80	1	C30/37	30	4,07	10,72%	3,04	11,19%
ST50	38	60	100	1	C30/37	30	3,83	12,69%	2,83	11,43%
ST50 _{KWT}	73	60	100	1	C30/37	30	4,07	7,48%	2,65	7,36%
ST50	37	60	120	1	C30/37	30	3,54	25,64%	2,28	25,97%
ST50 _{KWT}	74	60	120	1	C30/37	30	3,71	11,62%	2,52	19,05%

Nachfolgend werden die Ergebnisse der blau hinterlegten KWT- und der grün hinterlegten Prototypen-Fasern gegenübergestellt und diskutiert. In

Abb. 5-16 wurden die Mittelwerte, bei 0,5 mm und 3,5 mm Durchbiegung, der Versuchsserien mit den KWT-Fasern und den Prototypenfäsern in Form eines Säulendiagrammes einander gegenübergestellt. Die schwarzen vertikalen Balken stellen die Standardabweichung der jeweiligen Versuchsserie dar. Es fällt auf, dass sich die einzelnen Serien in ihren Mittelwerten kaum unterscheiden.

In den nachfolgenden Abbildungen wurden die Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven ($\sigma_{eq} = M/W$) der Versuchskörper mit den Fasern der KWT-Anlage jenen der Prototypenanlage gegenübergestellt. Außerdem sind die Mittelwerte $f_{efl,m,Li}$, die charakteristischen Werte $f_{efl,m,Lk}$ und die Leistungsklassen bei den entsprechenden Durchbiegungen δ_1 (0,5 mm) und δ_2 (3,5 mm) mitangeführt. Die Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven der Versuchskörper mit den Fasern der Prototypenanlage stammen nicht von der TU-Graz, sondern wurden von dem TBR Bernburg hergestellt und geprüft

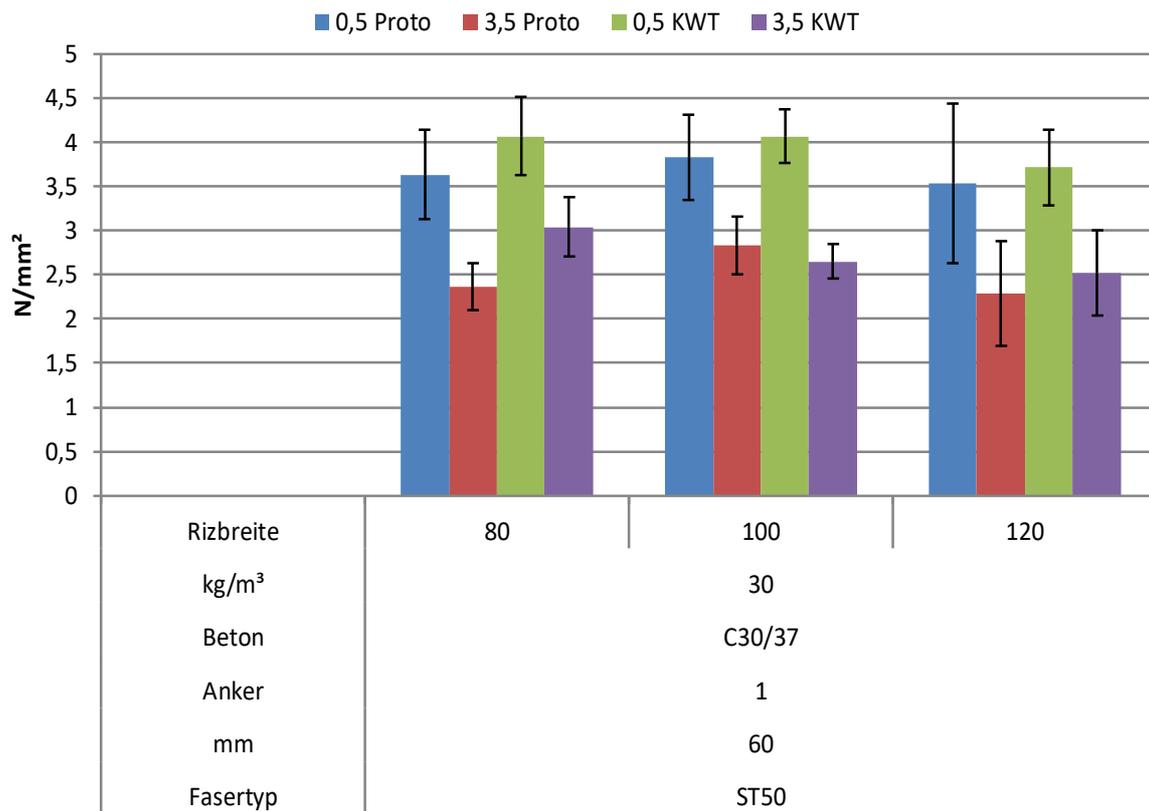


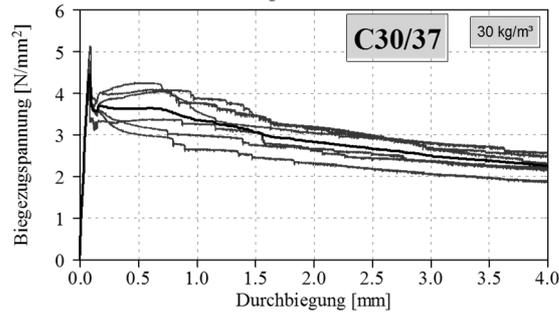
Abb. 5-16 Gegenüberstellung der Mittelwerte von KWT zu Prototypenfasern

Alle weiteren Parameter sind identisch mit den im Zuge dieser Arbeit hergestellten Versuchskörpern mit den Fasern der KWT-Anlage. Da die bisher parallel durchgeführten Versuche beider Prüfanstalten immer ähnliche Ergebnisse gebracht haben, ist ein Vergleich dieser Versuchsserien möglich. Weitere Versuche mit den Fasern der KWT-Anlage wurden noch nicht durchgeführt.

In Abb. 5-17 wurden in der obersten Reihe die Fasern mit einer Ritzbreite von R80, in der mittleren Reihe mit R100 und in der unteren Reihe die Fasern mit Ritzbreite R120, einander gegenübergestellt.

Bei allen drei Versuchsreihen ist zu erkennen, dass die Probekörper mit den Fasern der KWT-Anlage sehr ähnliche Ergebnisse, wie die Versuche mit den Fasern der Prototypenanlage, liefern. Bei allen Versuchsserien ist ab einer Durchbiegung von ca. 0,6 mm ein einzelnes Faserreißen zu erkennen. Die Mittelwerte der Biegezugfestigkeit $f_{cfm,L1}^f$ und $f_{cfm,L2}^f$ liegen, wie bereits in Abb. 5-16 zu erkennen ist, jeweils sehr nahe zusammen. Auch die Verläufe der Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven zeigen das gleiche Verhalten.

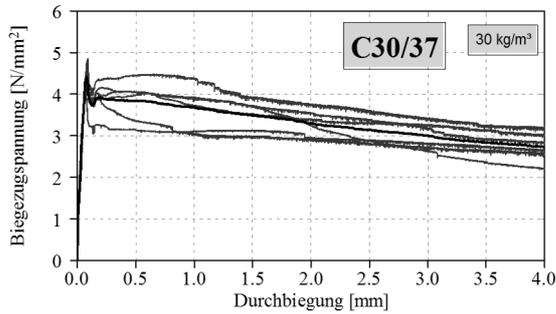
Aufgrund der bisherigen Versuche lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Fasern der KWT- und der Prototypen-Anlage eine ähnliche Leistungsfähigkeit aufweisen. Diese Annahme muss mit weiteren Versuchen bestätigt werden und gilt derzeit nur für die Stahlgüte ST50. Da die Versuchsserien der KWT-Fasern und jene der Prototypen-Fasern vergleichbare Ergebnisse liefern, kann angenommen werden, dass in Hinblick auf die Oberflächenrauigkeit zwischen den Fasern der KWT- und der Prototypenanlage keine Veränderung aufgetreten ist.



$$f_{cf_{lm,L1}}^f = 3,63 \text{ MPa} \quad f_{cf_{lm,L2}}^f = 2,37 \text{ MPa}$$

$$f_{cf_{lk,L1}}^f = 1,85 \text{ MPa} \quad f_{cf_{lk,L2}}^f = 1,21 \text{ MPa}$$

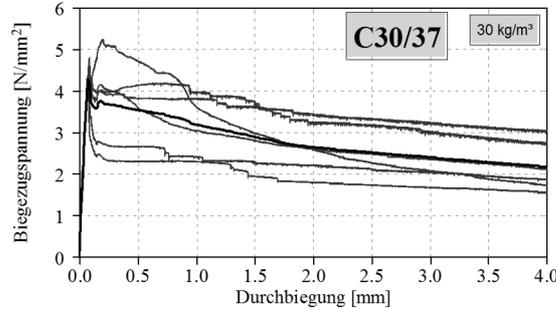
$$L1 = 1,8 \quad L2 = 1,2$$



$$f_{cf_{lm,L1}}^f = 3,83 \text{ MPa} \quad f_{cf_{lm,L2}}^f = 2,83 \text{ MPa}$$

$$f_{cf_{lk,L1}}^f = 1,95 \text{ MPa} \quad f_{cf_{lk,L2}}^f = 1,44 \text{ MPa}$$

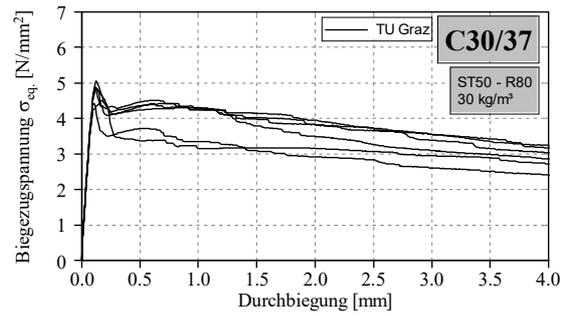
$$L1 = 1,8 \quad L2 = 1,2$$



$$f_{cf_{lm,L1}}^f = 3,54 \text{ MPa} \quad f_{cf_{lm,L2}}^f = 2,28 \text{ MPa}$$

$$f_{cf_{lk,L1}}^f = 1,8 \text{ MPa} \quad f_{cf_{lk,L2}}^f = 1,16 \text{ MPa}$$

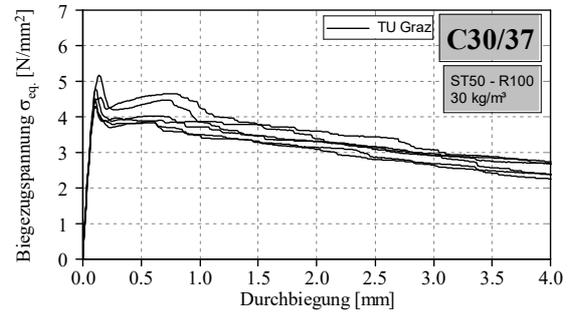
$$L1 = 1,8 \quad L2 = 0,9$$



$$f_{cf_{lm,L1}}^f = 4,07 \text{ MPa} \quad f_{cf_{lm,L2}}^f = 3,04 \text{ MPa}$$

$$f_{cf_{lk,L1}}^f = 2,08 \text{ MPa} \quad f_{cf_{lk,L2}}^f = 1,55 \text{ MPa}$$

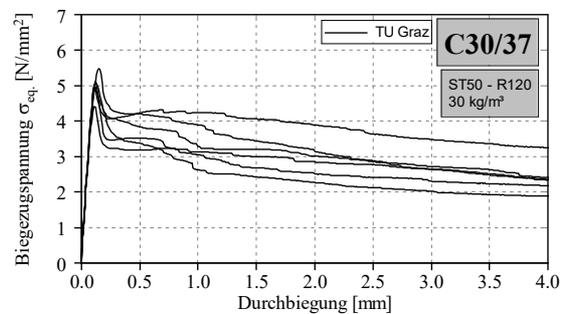
$$L1 = 1,8 \quad L2 = 1,5$$



$$f_{cf_{lm,L1}}^f = 4,07 \text{ MPa} \quad f_{cf_{lm,L2}}^f = 2,65 \text{ MPa}$$

$$f_{cf_{lk,L1}}^f = 2,08 \text{ MPa} \quad f_{cf_{lk,L2}}^f = 1,35 \text{ MPa}$$

$$L1 = 1,8 \quad L2 = 1,2$$



$$f_{cf_{lm,L1}}^f = 3,83 \text{ MPa} \quad f_{cf_{lm,L2}}^f = 2,52 \text{ MPa}$$

$$f_{cf_{lk,L1}}^f = 1,95 \text{ MPa} \quad f_{cf_{lk,L2}}^f = 1,29 \text{ MPa}$$

$$L1 = 1,8 \quad L2 = 1,2$$

Abb. 5-17 Gegenüberstellung von ST50 R80, R100 und 120 Fasern mit 60 mm und 30 kg/m³ der Prototypenanlage (links) und der KWT-Anlage (rechts)

Diese Annahme sollte noch, mittels der in Abschnitt 4 beschriebenen Verfahren, überprüft und mit den bereits vorhandenen Ergebnissen verglichen werden. Bis zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit wurden keine weiteren Versuche mit den Fasern aus der KWT-Anlage durchgeführt. Die bisherigen Versuche deuten aber bereits darauf hin, dass sich die Qualität der Fasern im Vergleich zu den bisher untersuchten Fasern nicht geändert hat.

6 Untersuchungen zur Faserverteilung

6.1 Einleitung

Voraussetzung um Faserbeton effizient einsetzen zu können ist, dass die in die Betonmatrix eingebrachten Fasern eine möglichst homogene Verteilung über das gesamte Bauteilvolumen aufweisen. Durch eine inhomogene Verteilung der Fasern kommt es zu einer erheblichen Streuung im Tragverhalten und somit zu einer negativen Beeinflussung der charakteristischen Materialkennwerte sowie der zugehörigen Sicherheitsfaktoren. Demzufolge ist der Faserverteilung eine entsprechend große Bedeutung zuzuschreiben.

6.2 Versuchsprogramm

Es wurde ein Versuchsprogramm entwickelt, um den Einfluss der Faserzugabeart, der Fasermenge und der Einbautechnologie unter Verwendung der Stahlfasern der Fa. Feel Fiber GmbH auf die Faserverteilung in bauteilähnlichen Balken zu untersuchen.

Die Faserzugabe ist in unterschiedlichen Varianten und verschiedenen Abläufen durchgeführt worden und wird daher in Kapitel 6.3 näher beschrieben. Grundsätzlich wurden je Faserzugabeart Balken mit einem Fasergehalt von 30 kg/m^3 als auch 60 kg/m^3 hergestellt. Diese Balken sind wiederum mit zwei unterschiedlichen Einbautechnologien befüllt worden. Durch diese Unterteilung ergaben sich schlussendlich zwölf unterschiedlich hergestellte Balken. Diese Balken wurden anschließend hinsichtlich ihrer Faserverteilung mit dem fotooptischen Verfahren untersucht. Das beschriebene Versuchsprogramm zeigt sich in Abb. 6-1. Begleitend zu der Herstellung der Balken wurde der Frischbeton hinsichtlich seiner Faserverteilung untersucht.

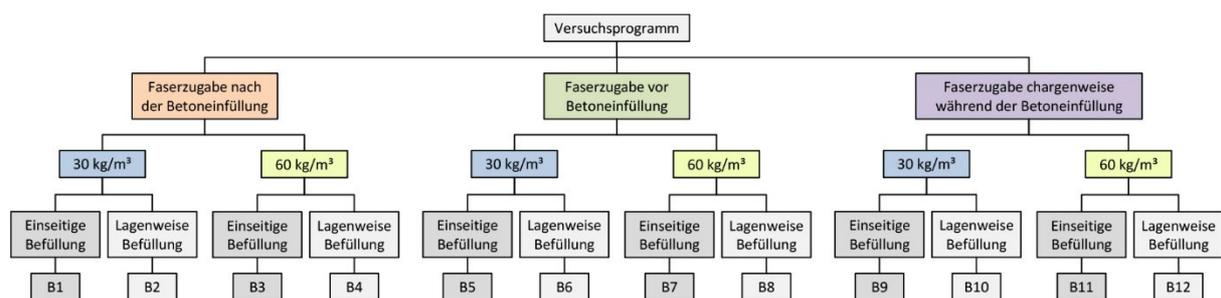


Abb. 6-1 Schema des Versuchsprogramms

6.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Der verwendete Beton wurde in einer Transportbetonmischanlage hergestellt und, wie in Abb. 6-2 zu sehen ist, in einem LKW-Betonfahrmischer eingebracht. Die Stahlfasern der Fa. Feel Fiber GmbH sind über ein Förderband, welches ebenfalls in Abb. 6-2 zu erkennen ist, dem Fahrmischer zugegeben worden.



Abb. 6-2 Zugabe der Fasern in den Fahrmischer mittels eines Förderbandes

Der Beton und die Stahlfasern wurden immer erst im Fahrmischer miteinander vermischt, jedoch variierte im Versuchsprogramm der Zeitpunkt der Faserzugabe. Bei der Herstellung der Balken B1 bis B4 sind die Fasern erst nach der vollständigen Befüllung des Fahrmischers mit dem Frischbeton zugegeben worden. Im Gegensatz dazu wurden die Stahlfasern bei den Balken B5 bis B8 vollständig vor dem Frischbeton in den Fahrmischer eingefüllt. Die Balken B9 bis B12 stellen eine Kombination der ersten beiden Varianten dar. Der Beton wurde Drittelweise in den Fahrmischer eingefüllt. Nach jedem Drittel ist zuerst der zugehörige Anteil an Fasern zugegeben worden, bevor weiterer Beton eingefüllt wurde.

6.3.1 Untersuchung des Frischbetons

Das TBR Technologiezentrum übernahm während der Durchführung des Versuchsprogrammes die Untersuchung des Frischbetons. Die zugehörigen Ergebnisse der Prüfungen sind in [25] protokolliert worden und sind hier in Abschnitt 6.4 nochmals angeführt.

Gemäß DIN EN 12350-5 [23] wurde für jede Ladung des Fahrmischers das Ausbreitmaß (siehe Abb. 6-3) und ebenso gemäß DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton – Anhang M.1 [1] die Faserverteilung im Frischbeton bestimmt. Hierzu sind während der Entleerung des Fahrmischers aus jedem Drittel der Ladung Teilproben in der Größe von 10 bis 15 Litern entnommen und deren Gesamtmasse sowie die Frischbetondichte nach DIN EN 12350-4 [26] ermittelt worden. Anhand dieser Messergebnisse konnte das Faserbetonvolumen der Probe bestimmt werden. Mittels eines starken Magneten (siehe Abb. 6-4) wurden die Fasern aus dem Frischbeton ausgesondert und anhand der gewonnenen Stahlfasermasse konnte der zugehörige Stahlfasergehalt der Teilprobe berechnet werden.



Abb. 6-3 Bestimmung des Ausbreitmaßes



Abb. 6-4 Aussonderung der Fasern aus dem Frischbeton zur Bestimmung des Stahlfasergehaltes

6.3.2 Untersuchung der Balken

Es wurde ein Beton der Festigkeitsklasse C30/37 mit einem Größtkorn von 16 mm für die Herstellung der Balken verwendet. Des Weiteren sind wie in Abb. 6-1 dargestellt zwei unterschiedliche Fasermengen und zwar 30 und 60 kg/m³ verarbeitet worden. Um die Verarbeitbarkeit bei einer Fasermenge von 60 kg/m³ sicherzustellen, erfolgte eine Erhöhung des Leimgehaltes. Die Mischzeit war bei allen hergestellten Balken gleich lang.

Eine Ladung des Fahrmischers reichte aus um zwei Balken herzustellen, wobei ein Balken von einer Stirnseite aus befüllt wurde und der andere Balken lagenweise. Im Anschluss verdichtete ein Flaschenrüttler beide Balken.

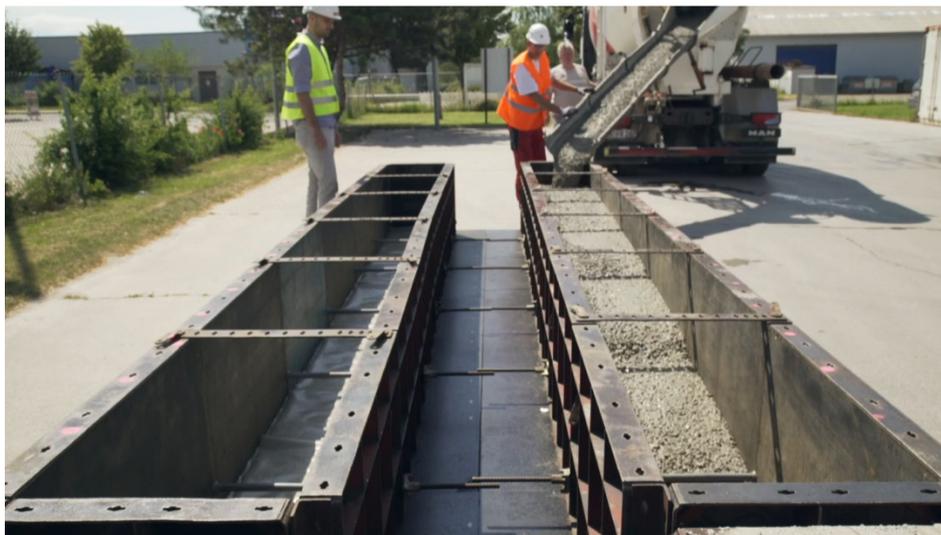


Abb. 6-5 Einseitige Befüllung des Balkens mit dem Fahrmischer

Alle hergestellten Balken haben eine Breite von 0,5 m und eine Höhe von 0,4 – 0,48 m bei einer Länge von 6,0 m. Die Faserlänge der eingesetzten Fasern betrug 60 mm mit einem Faserdurchmesser von 0,75 mm, was einer Querschnittsfläche von $\approx 0.44 \text{ mm}^2$ entspricht. Im Anschluss an das Erhärten des

Betons wurden im Abstand von 1,0 m aus jedem Balken insgesamt sechs Platten herausgeschnitten. Der erste Schnitt S1, sowie der letzte Schnitt S6 (siehe Abb. 6-6), waren nur 0,5 m von der Stirnfläche der Balken entfernt. Um zu verhindern, dass eine Faser an beiden Schnittflächen einer Platte durchtrennt wird, wurde die Plattenbreite mit 70 mm festgelegt. Somit ergaben sich insgesamt 12 Schnittflächen pro Balken, welche anschließend im Labor untersucht worden sind.

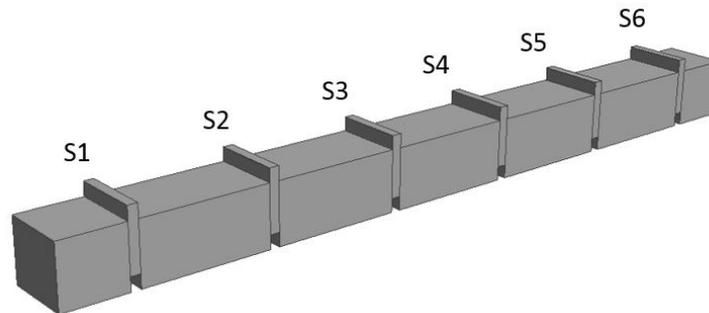


Abb. 6-6 Versuchskörper

6.4 Versuchsergebnisse

6.4.1 Frischbetonprüfungen

Bei der Herstellung der Balken konnte sowohl bei einem Fasergehalt von 30 kg/m^3 als auch bei 60 kg/m^3 ein sehr hohes Fließvermögen des Frischbetons festgestellt werden. Dies ermöglichte eine sehr gute Verarbeitung des Betons. Begleitend zur Herstellung der Balken wurde für jede Ladung des Fahrmi-schers, das Ausbreitmaß nach [23] bestimmt. Anhand dieser Prüfungen konnte der Beton in die Konsistenzklasse F4/5 eingeteilt werden. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind der Tabelle 6-1 zu entnehmen.

Tabelle 6-1 Ausbreitmaße

	Fasergehalt [kg/m^3]	Faserzugabeart	Befüllart	Ausbreitmaß
B1	30	FZ nach der Betoneinfüllung	einseitig	560
B2	30	FZ nach der Betoneinfüllung	lagenweise	
B3	60	FZ nach der Betoneinfüllung	einseitig	580
B4	60	FZ nach der Betoneinfüllung	lagenweise	
B6	30	FZ vor der Betoneinfüllung	einseitig	630
B7	30	FZ vor der Betoneinfüllung	lagenweise	
B8	60	FZ vor der Betoneinfüllung	einseitig	610
B9	60	FZ vor der Betoneinfüllung	lagenweise	
B10	30	FZ chargenweise	einseitig	540
B11	30	FZ chargenweise	lagenweise	
B12	60	FZ chargenweise	einseitig	580
B13	60	FZ chargenweise	lagenweise	

Wie bereits in Abschnitt 6.3.1 beschrieben, wurden aus jedem Drittel der Ladung des Fahrmixers ein Eimer (10 bis 15 Liter) Frischbeton als Teilproben entnommen. Jede Probe ist hinsichtlich ihres Fasergehalts untersucht worden. Gemäß DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton [1] sind nachstehende Konformitätskriterien einzuhalten.

- Einzelwertkriterium: $m_{f,i} \geq 0.80 \cdot m_{f,ziel}$
- Mittelwertkriterium: $\bar{m}_f \geq 0.85 \cdot m_{f,ziel}$

Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 6-2 Ergebnisse der Faserverteilung im Frischbeton

		Faser- gehalt $m_{f,i}$ [kg/m ³]	Mittel- wert \bar{m}_f [kg/m ³]	Variations- koeffizient [%]	Faser- gehalt $m_{f,i}$ [kg/m ³]	Mittel- wert \bar{m}_f [kg/m ³]	Variations- koeffizient [%]	
		$m_{f,ziel}=30$ [kg/m ³]			$m_{f,ziel}=60$ [kg/m ³]			
Faser- zugebe- art	FZ nach der Be- toneinfüllung	1. Teilprobe	30.3	30.6	0.9	63.1	65.4	4.5
		2. Teilprobe	30.7		68.7			
		3. Teilprobe	30.8		64.4			
	FZ vor der Beton- einfüllung	1. Teilprobe	31.0	31.2	6.8	60.9	65.1	5.9
		2. Teilprobe	33.4		65.9			
		3. Teilprobe	29.2		68.5			
	FZ chargenweise	1. Teilprobe	30.9	31.4	1.9	68.9	64.8	5.6
		2. Teilprobe	32.1		63.1			
		3. Teilprobe	31.3		62.3			

Bei allen Faserzugabearten und Fasermengen konnten die angeführten Kriterien eingehalten werden. Um die Faserverteilung im Frischbeton besser beurteilen zu können, wurde der Variationskoeffizient aus den ermittelten Werten der Teilproben berechnet. Dieses relative Streumaß berechnet sich aus dem Verhältnis von Standardabweichung zu dem Mittelwert der Teilproben.

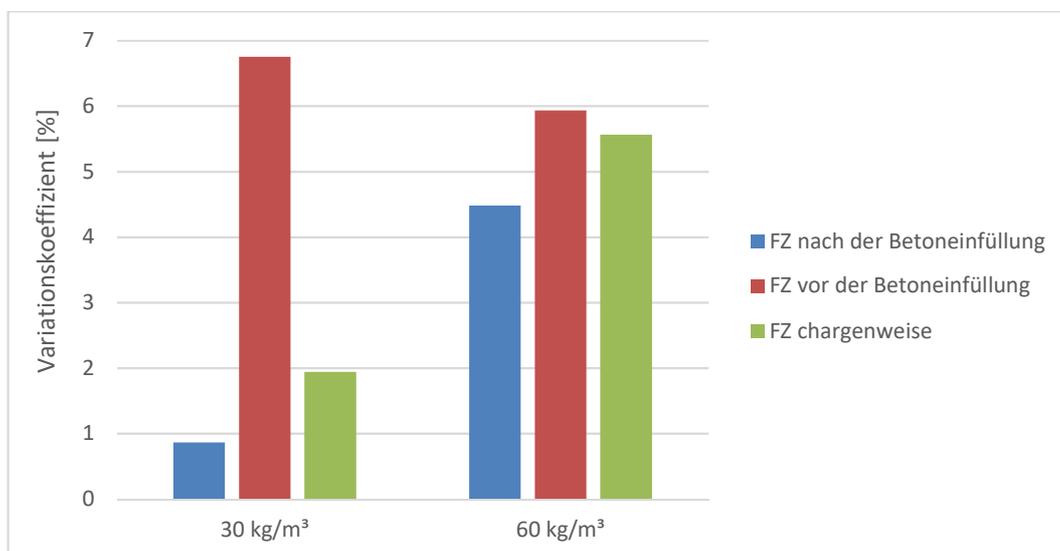


Abb. 6-7 Streuung des Fasergehaltes im Frischbeton

In Abb. 6-7 wurde der errechnete Variationskoeffizient der unterschiedlichen Faserzugabearten gegenübergestellt. Es ergibt sich ein Streubereich von 1% bis 7%. Aufgrund dieser Ergebnisse kann bei allen Faserzugabearten auf eine gute Faserverteilung im Frischbeton geschlossen werden.

6.4.2 Faserverteilung in den Balken

Die aus den Balken herausgetrennten Platten wurden im Labor mittels dem fotooptischen Verfahren auf ihre Faseranzahl untersucht. Die gesammelten Ergebnisse aller Schnittflächen sind dem Anhang beige-fügt. Die zusammengefassten Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt. Um die Daten zu analysieren, sind folgende Kenngrößen herangezogen worden:

- Mittlere Faseranzahl je Schnittfläche [Anzahl/dm²]
- Variationskoeffizient [%]

Es wurde in jeder Schnittfläche die gesamte Faseranzahl ermittelt. Aufgrund der unterschiedlichen Querschnittsabmessungen der Platten bezieht sich die Faseranzahl auf die Größe der Schnittfläche, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Aus den Ergebnissen der zwölf Schnittflächen wurde das arithmetische Mittel gebildet.

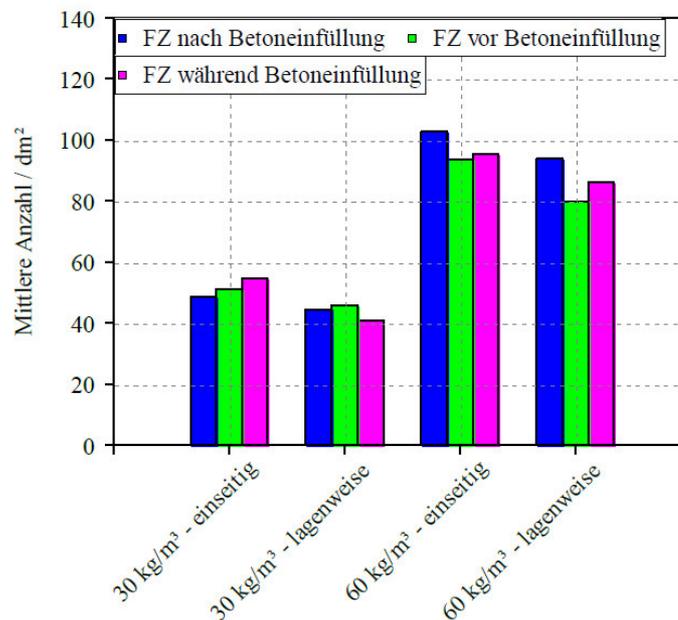


Abb. 6-8 Mittlere Faseranzahl in den Schnittflächen je Balken

Die mittlere Faseranzahl je Balken in den Schnittflächen wurde in Abb. 6-8 zusammengefasst. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Faseranzahl je Querschnitt von der Faserorientierung im Balken abhängig ist. Im Vergleich zu den lagenweise befüllten Balken mit den einseitig befüllten Balken ist zu erkennen, dass bei gleichem Fasergehalt diese jeweils einen geringeren mittleren Fasergehalt aufweisen. Dieser Effekt kann dadurch begründet werden, dass Fasern in engen Formen (beispielsweise Balken) dazu neigen, sich in Fließrichtung auszurichten. Somit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Faser

die vertikale Schnittfläche kreuzt. Bei den einseitig befüllten Balken war ein ausgeprägtes Fließen des Frischbetons erforderlich, um ein vollständiges Befüllen der Balken zu ermöglichen. Aus diesem Grund war zu erwarten, dass diese Balken eine höhere Faseranzahl aufweisen. Die Ergebnisse liegen somit in einem durchaus zu erwartenden Bereich.

In Abb. 6-9 wurden die Ergebnisse anhand des errechneten Variationskoeffizienten gegenübergestellt. Aufgrund dieser Darstellung ist ersichtlich, dass die Anzahl der Fasern in den Schnittflächen in einem Bereich von 7% bis 12% streuen. Nachdem die Ergebnisse nach der Faserzugabeart unterteilt werden, ist ersichtlich, dass keine Zugabeart eine erkennbare Tendenz zu einem positiveren beziehungsweise negativeren Ergebnis aufzeigt.

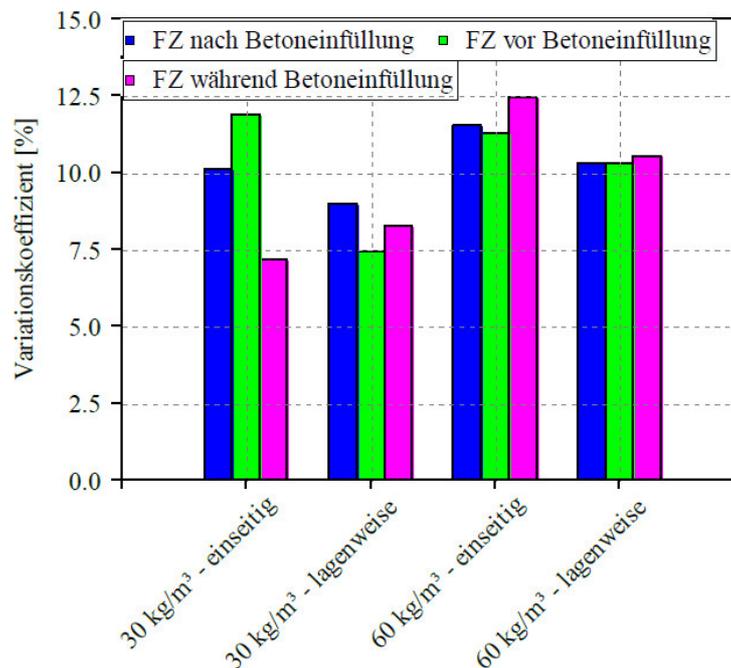


Abb. 6-9 Streuung der Faseranzahl in den Schnittflächen - Gegenüberstellung der Faserzugabeart

Bei genauerer Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass die lagenweise befüllten Balken bei gleicher Faserzugabe und Fasermenge geringere Streuungen gegenüber der einseitigen Befüllung aufweisen. Diese Beobachtung wird in Abb. 6-10 besser Veranschaulicht. Daher kann hergeleitet werden, dass die Einbautechnologie einen nennenswerten Einfluss auf die Faserverteilung im Balken nimmt.

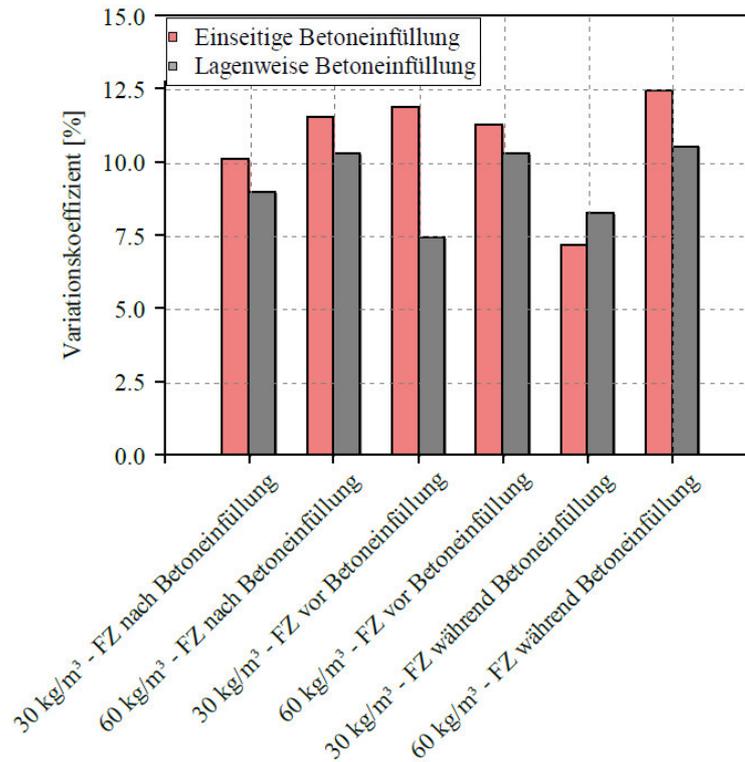


Abb. 6-10 Streuung der Faseranzahl in den Schnittflächen - Gegenüberstellung der Befüllvarianten

Bei einer lagenweisen Befüllung des Faserbetons befindet sich dieser bereits mehr oder weniger an seiner Endposition, wohingegen der Faserbeton bei einer einseitigen Befüllung eine gewisse Fließstrecke zurücklegen muss und eine homogene Faserverteilung nachteilig beeinflusst.

Wie eingangs erwähnt, wurde der Frischbeton mittels eines Flaschenrüttlers verdichtet. Um die Höhenunterschiede zwischen Balkenanfang und -ende (vor allem bei der seitlichen Befüllung) auszugleichen, war ein erhöhter Verdichtungsaufwand notwendig. Um ein mögliches Faserabsetzen im Frischbeton zu verifizieren, wurde die vertikale Verteilung der Fasern im Balken ebenfalls betrachtet. Hierzu wurden alle Schnittflächen in eine obere und eine untere Hälfte aufgeteilt und die darin enthaltene Faseranzahl ermittelt. Die aus diesen Daten erhaltenen Werte sind wieder mittels des arithmetischen Mittelwertes zusammengefasst und je Balken in Abb. 6-11 dargestellt worden.

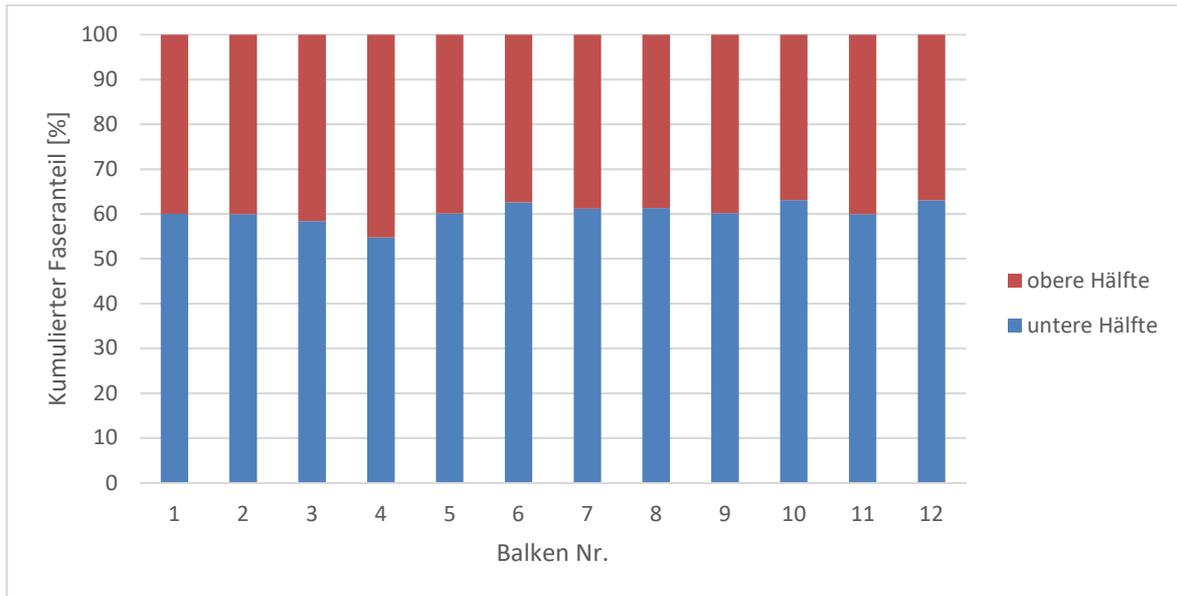


Abb. 6-11 Vertikale Faserverteilung

Es lässt sich deutlich erkennen, dass sich in etwa 60 % der Fasern in der unteren Hälfte und daher 40% der Fasern in der oberen Hälfte situieren. Ein Entmischen des Frischbetons ist auszuschließen, da sonst die Fasern bei den einseitig befüllten Balken in Fließrichtung abnehmen müssten, was in der Versuchsdokumentation im Anhang nicht zu erkennen ist. Es kann daher geschlussfolgert werden, dass sich dieses Absetzverhalten durch die Rüttelvorgänge eingestellt hat.

7 Zusammenfassung

Die im Laufe der Entwicklung der Feel Fiber Fasern angestellten Versuche wurden in der vorliegenden Arbeit übersichtlich zusammengefasst. Im speziellen ist auf die Versuche aus dem Zeitraum von Herbst 2015 bis April 2017 eingegangen worden. Darin wurden das Tragverhalten der Faser anhand von 4-Punkt-Biegezugversuchen, die Oberflächenbeschaffenheit der Faser sowie die Faserverteilung in bauteilähnlichen Balken untersucht.

Für die Rauigkeitsuntersuchungen wurde ein optisches Digitalmikroskop verwendet. Hierbei wurde die Oberfläche der Fasern vermessen und anschließend der R_z -Werte der Oberflächen bestimmt. Bei diesen Betrachtungen war besonders die raue Seite der Fasern von Interesse. Diese Auswertungen ergaben, dass die raue Seite durchschnittlich einen in etwa drei Mal so großen R_z -Werte aufweist wie die glatte Seite. Daraufhin wurden Empfehlungen zum zukünftigen Qualitätsmanagement des Faserproduktes gemacht, um eine gleichbleibende Qualität der Fasern zu garantieren.

Unter Verwendung der Feel Fiber Fasern wurden im genannten Zeitraum über siebzig 4-Punkt-Biegezugversuche durchgeführt. Darin sind 14 eigene Versuchsreihen beinhaltet. Diese Versuche wurden zusammengestellt, welche eine systematische Auswertung erstmals ermöglicht. Dadurch konnte der Einfluss der Faserlänge, -materials, -menge und der Ritzbreite auf die Tragfähigkeit dargestellt werden. Zusammenfassend lassen sich daraus folgende Erkenntnisse ableiten:

- Mit zunehmender Fasermenge tritt keine proportionale Steigerung der Tragfähigkeit ein.
- Eine Variation der Ritzbreite in einem Bereich von 0-150 μm deutet auf keinen signifikanten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Faser hin.
- Bei gleichbleibendem Faserdurchmesser nimmt die Tragfähigkeit mit zunehmender Faserlänge zu (vorausgesetzt es kommt zu keinem Faserreißen).
- Bei Faserlängen von 33 und 50 mm zeigten die Stahlgüten ST50 und C60S ein ähnliches Tragverhalten. Erst ab einer Faserlänge von 60 mm wirkt sich die größere Zugfestigkeit der C60S Fasern zunehmend positiv aus, wodurch im Vergleich zum Fasermaterial ST50 erhöhte Tragfähigkeiten ermittelt wurden.
- Der Vergleich von Versuchsserien mit Fasern der KWT-Anlage mit jenen der Prototypenanlage zeigte vergleichbare Ergebnisse, was auf eine gleichbleibende Qualität der Fasern schließen lässt.
- Bereits zum derzeitigen Entwicklungsstand können konkurrenzfähige Leistungsklassen mit den Feel Fiber Fasern erzielt werden.

Des Weiteren wurden Untersuchungen zur Bestimmung der Faserverteilung in Abhängigkeit der Faserzugabart, der Fasermenge und der Einbautechnologie an bauteilähnlichen Balken durchgeführt. In der Regel werden bei Prüfungen an Standardbiegebalken aus Stahlfaserbeton Streuungen von 20 – 25%

beobachtet. Durch die großen Streuungen wird der Bemessungswert der Nachrisszugfestigkeit entsprechend abgemindert. Die Auswertung der vorliegenden Versuchsserien ergab, dass die Faseranzahl in den Schnittflächen auch bei Faserzugabe in den Fahrnischer mit nur ca. 10% streut. Unter Berücksichtigung zusätzlicher Einflüsse der Bauteilherstellung ist eine Gesamtstreuung v_m unter 15% zu erwarten. Um die homogenere Verteilung der Fasern in der Bemessung berücksichtigen zu können, sind weitere gezielte Untersuchungen und Genehmigungsverfahren erforderlich.

Literaturverzeichnis

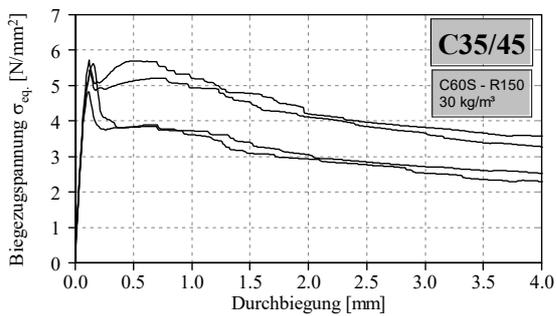
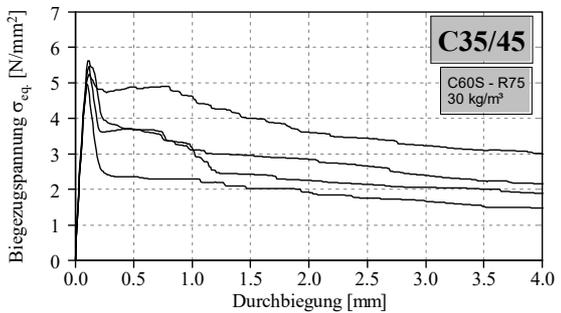
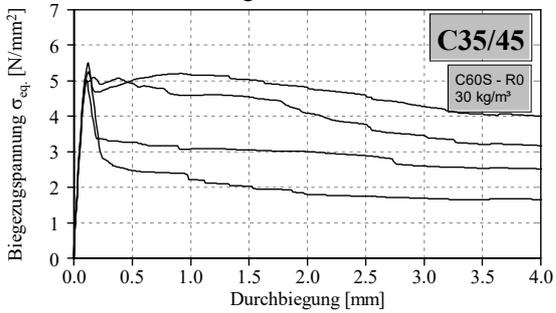
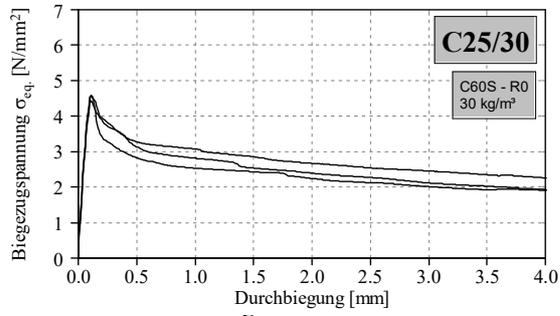
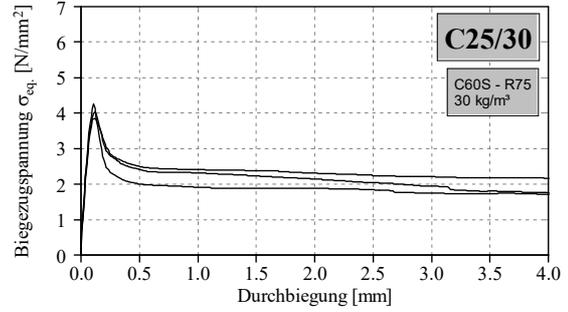
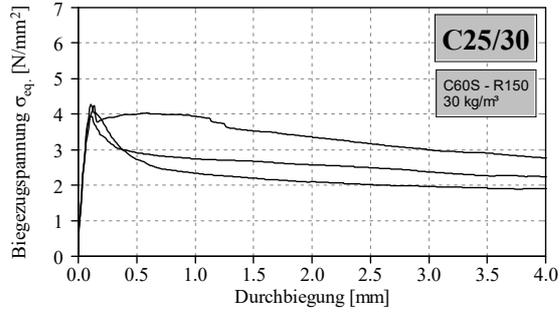
- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Stahlfaserbeton. Beuth, Berlin, 2010.
- [2] Wietek, B.: Faserbeton im Bauwesen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [3] Naaman, A. E.; Massachusetts Institute of Technology.; Department of Civil Engineering.: A statistical theory of strength for fiber reinforced concrete, 1972.
- [4] Erdem, E.: Probabilistisch basierte Auslegung stahlfasermodifizierter Betonbauteile auf experimenteller Grundlage, Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2002. Inst. für Konstruktiven Ingenieurbau, Bochum, 2002.
- [5] Hadl, P.: Zum besseren Verständnis der Streuung des Zugtragverhaltens von stahlfaserbewehrtem Normalbeton und Ultra-Hochleistungsbeton, Dissertation. Graz, 2017.
- [6] Röhm, C.: Zum Tragverhalten von Rahmenknoten mit Stahlfaserbeton unter zyklischer Belastung. Stuttgart, Univ., Diss., 2012 (Nicht für den Austausch), 2012.
- [7] König, G.; Tue, N. V.; Schenck, G.: Grundlagen des Stahlbetonbaus. Einführung in die Bemessung nach DIN 1045-1. Bauwesen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008.
- [8] Kessler-Kramer, C.: Zugtragverhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung, Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2002. /Massivbau, Baustofftechnologie Karlsruhe, H. 49. Inst. für Massivbau und Baustofftechnologie; Univ.-Bibl, Karlsruhe, Karlsruhe, 2002.
- [9] Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D.: Beton-Kalender 2011. Kraftwerke, Faserbeton. Beton-Kalender (VCH) *. Wiley, Hoboken, 2014.
- [10] Pfyl, T.: Tragverhalten von Stahlfaserbeton, Eidgenössische Techn. Hochsch., Diss.--Zürich, 2002. IBK-Bericht, Nr. 279. vdf Hochsch.-Verl. an der ETH, Zürich, 2003.
- [11] Freytag, B.; Santner, G.: Bemessung von Bauteilen aus faserbewehrtem UHPC - Zug, Druck, Biegung. Nachhaltig Bauen mit Beton: Werkstoff und Konstruktion. Beton Graz `14. 2. Grazer Betonkolloquium, 25./26., 2014.
- [12] Kützing, L.: Tragfähigkeitsermittlung stahlfaserverstärkter Betone. Forschung für die Praxis. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2000.
- [13] Lin, Y.-z.: Tragverhalten von Stahlfaserbeton, Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 1996. Massivbau, Baustofftechnologie Karlsruhe, H. 28. Inst. für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruhe, 1996.
- [14] Jungwirth, J.: Zum Tragverhalten von zugbeanspruchten Bauteilen aus Ultra-Hochleistungs-Faserbeton, École Polytechnique Fédérale, Diss.--Lausanne, 2006. Lausanne, 2006.
- [15] Behloul, M.: Analyse et modélisation du comportement d'un matériau à matrice cimentaire fibrée à ultra hautes performances. Bétons de poudres réactives : du matériau à la structure. LMT, Heft 14. Laboratoire de mécanique et technologie, Cachan, 1996.

- [16] Maidl, B.: Stahlfaserbeton. [64 Tabellen]. Ernst, Berlin, 1991.
- [17] Huber, H.: Richtlinie Faserbeton. Richtlinie / Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik. Wien, 2008.
- [18] ehemals Trebantec GmbH (Feel Fiber GmbH): Errichtung einer Kerb-Walk-Trenn-Anlage zur Herstellung von Drahtprodukten aus Bandstahl. Umwelt Innovations Programm. https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/internetbeitrag_feel_fiber_chem_trebantec.pdf.
- [19] Hadl, P.; Tue, N. V.: Einfluss der Faserzugabe auf die Streuung im Zugtragverhalten von Stahlfaserbeton. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), Heft 5, S. 310–318.
- [20] Brameshuber, W.: Optimierung einer Stahlfasergeometrie für den Einsatz in Konstruktionsbeton. (Unveröffentlicht), F 7097. Institut für Bauforschung Aachen, Aachen, 2014.
- [21] Dobler, H.-D.: Fachkunde Metall. Europa-Fachbuchreihe für metalltechnische Berufe. Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, Haan-Gruiten, 2003.
- [22] DIN 4768: Ermittlung der Rauheitskenngrößen Ra, Rz, Rmax mit elektrischen Tastschnittgeräten. 05/1990.
- [23] DIN EN 12350-5: Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß; 08/2009.
- [24] DIN EN 12390-3: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; 07/2009.
- [25] TBR Technologiezentrum: Bestimmung des Stahlfasergehaltes im Frischbeton gemäß DAfStb-Richtlinie Stahlbeton., (unveröffentlicht). Prüfberichts-Nr., 16-99-0367 – 16-99-0372. Bernburg, 2016.
- [26] DIN EN 12350-4: Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß; 08/2009.

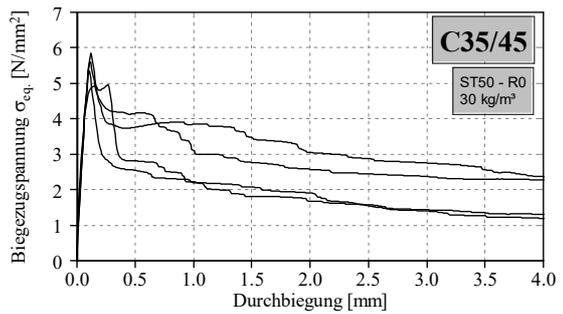
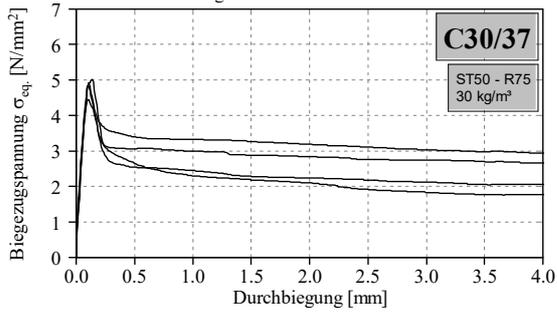
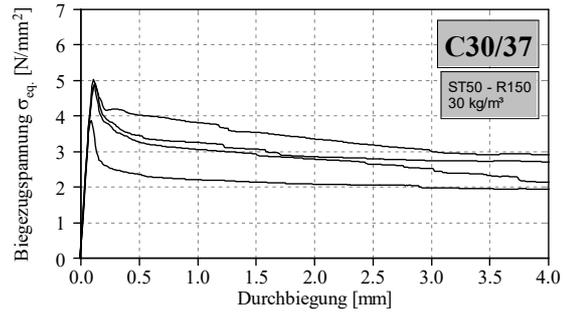
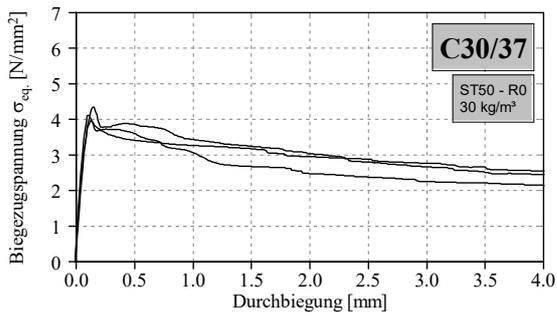
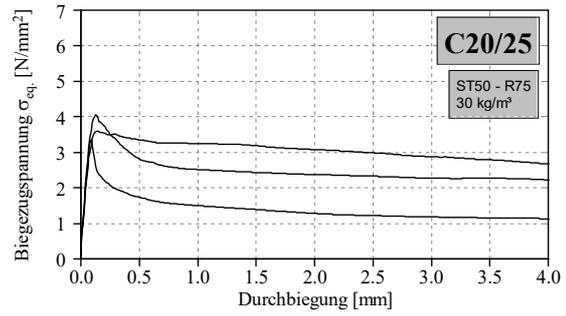
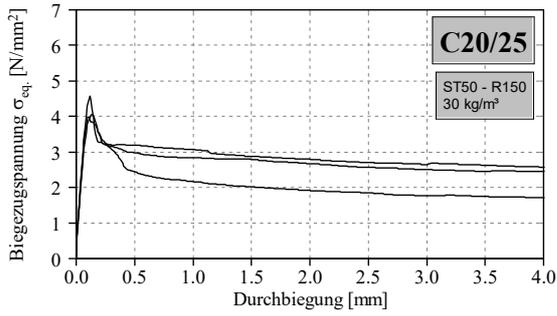
Anhang

A Biegezugversuche der TU Graz

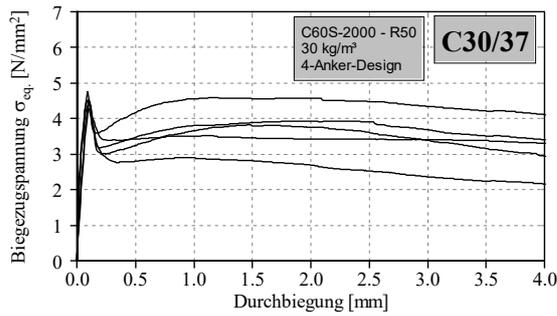
A.1 Faserlänge 60 mm - C60S



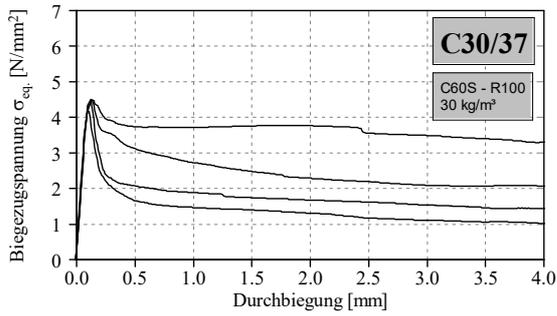
A.2 Faserlänge 60 mm – ST50



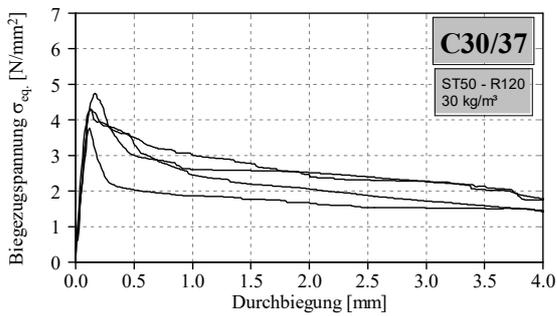
A.3 Faserlänge 60 mm – C60S-2000



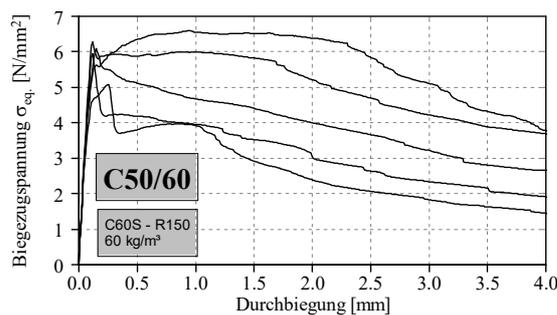
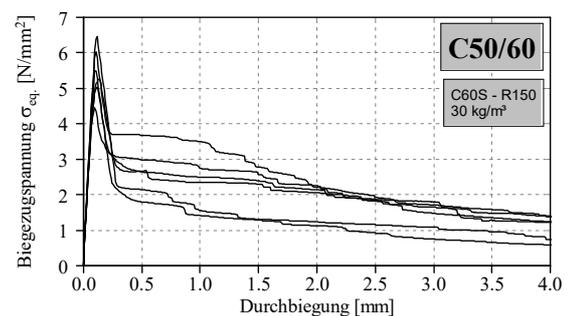
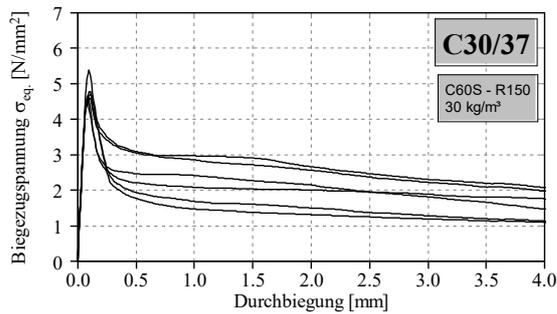
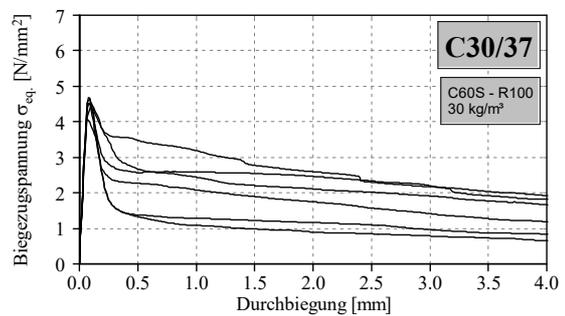
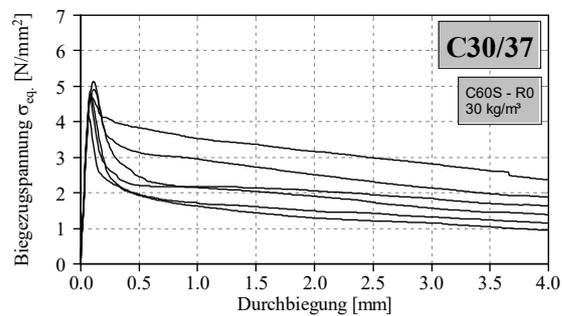
A.4 Faserlänge 50 mm – C60S



A.5 Faserlänge 50 mm – ST50

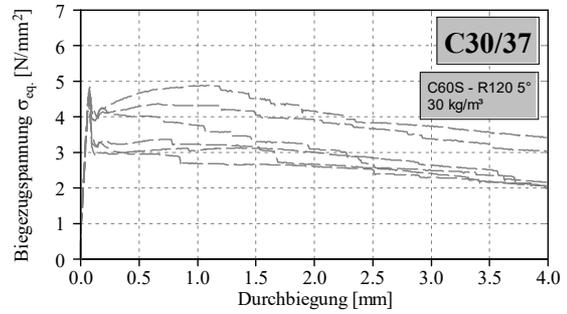
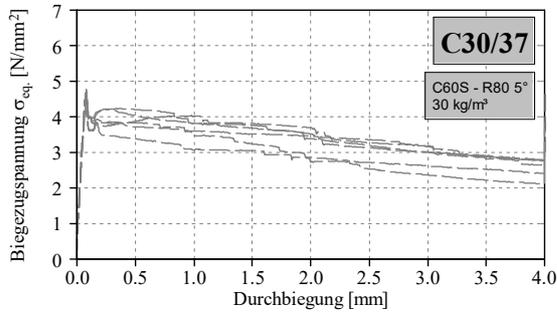


A.6 Faserlänge 33 mm – C60S

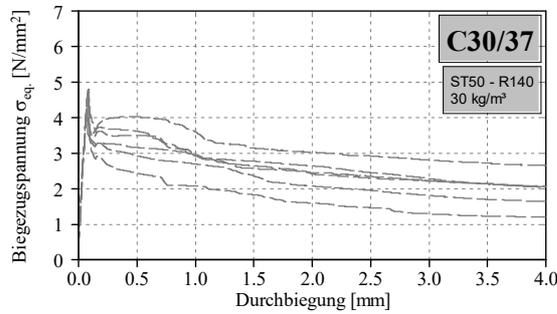
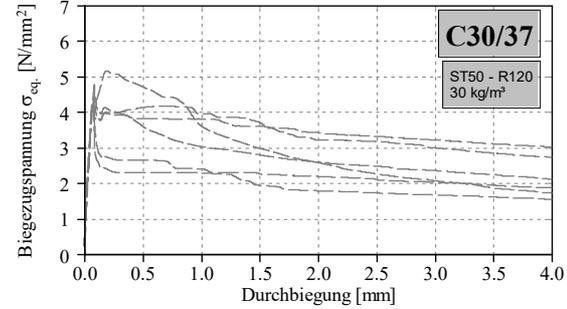
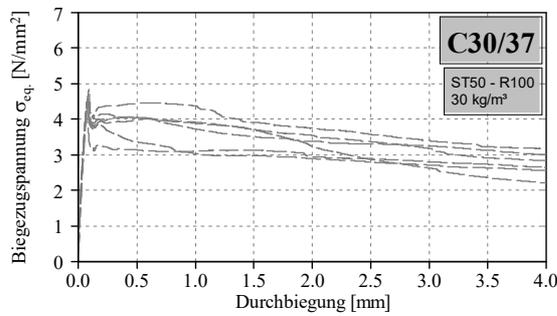


B Biegezugversuche der TBR Bernburg

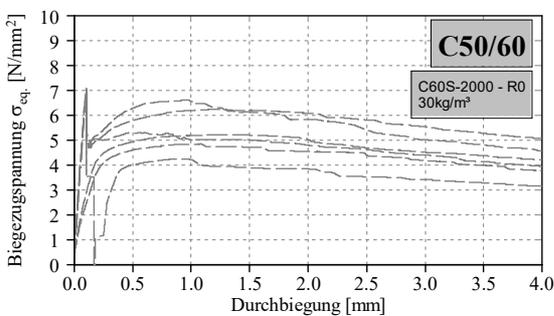
B.1 Faserlänge 60 mm – C60S



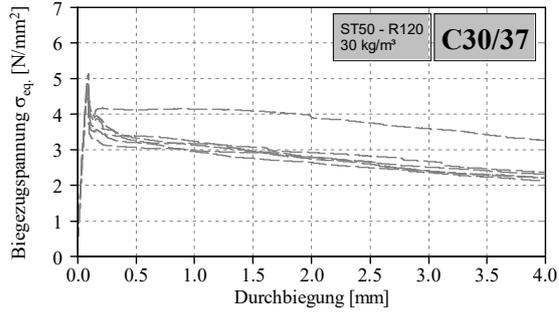
B.2 Faserlänge 60 mm – ST50



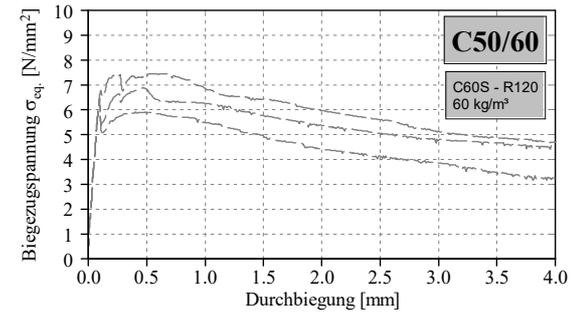
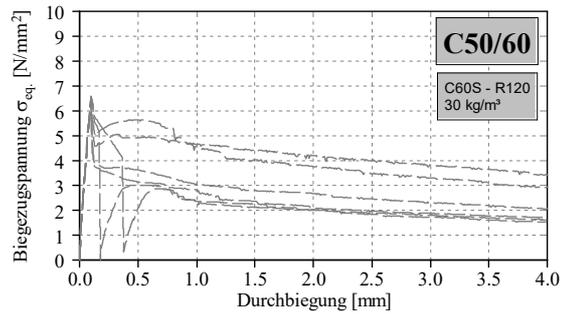
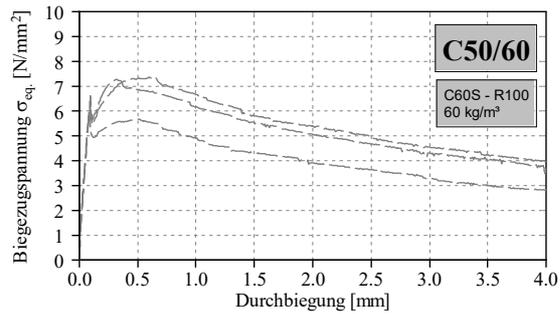
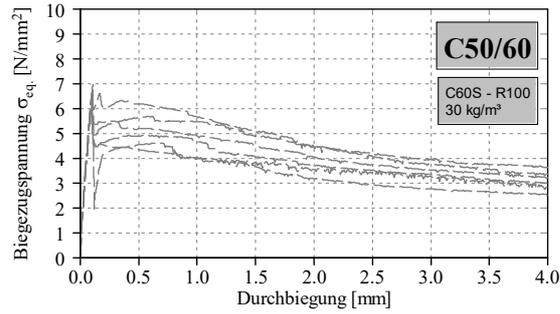
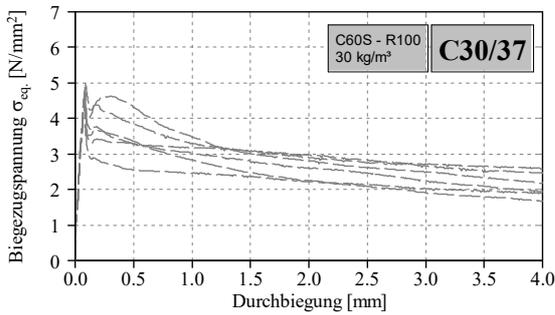
B.3 Faserlänge 60 mm – C60S-2000



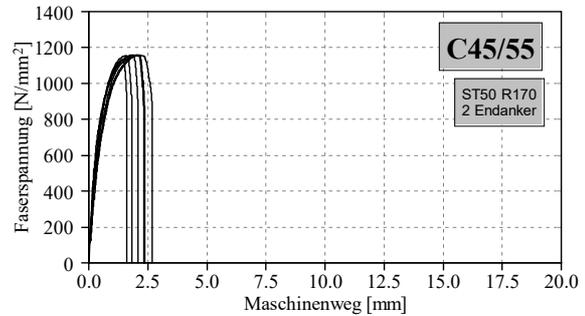
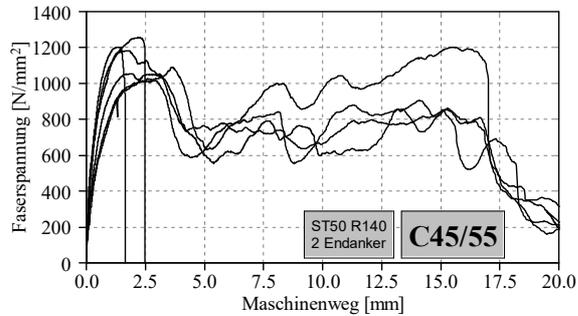
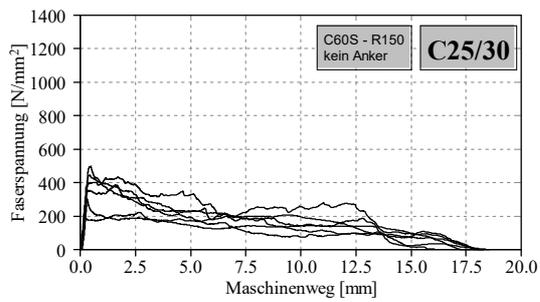
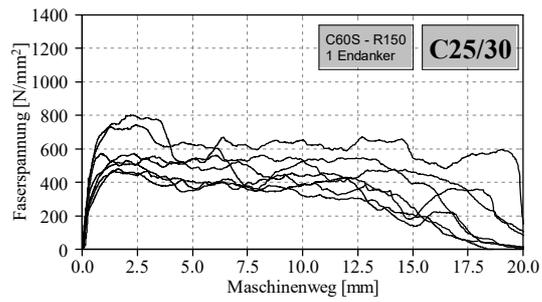
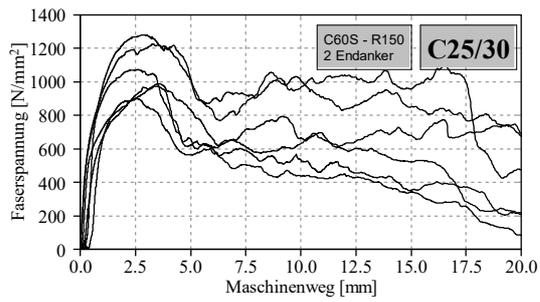
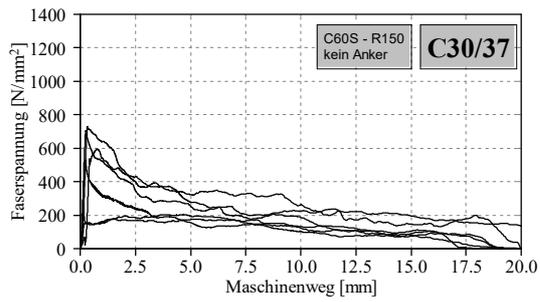
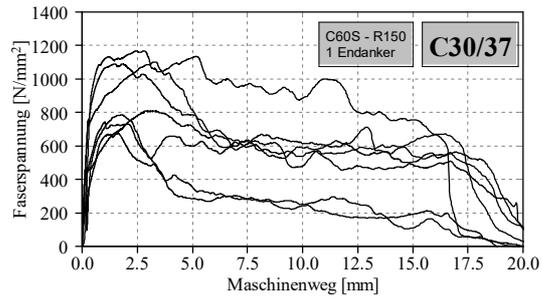
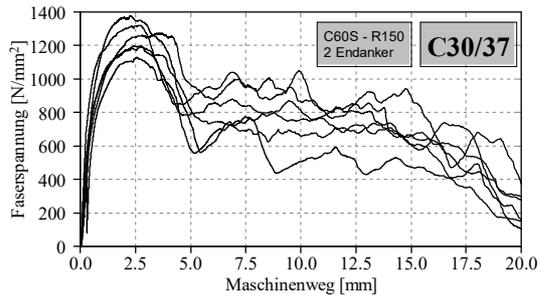
B.4 Faserlänge 50 mm – ST50

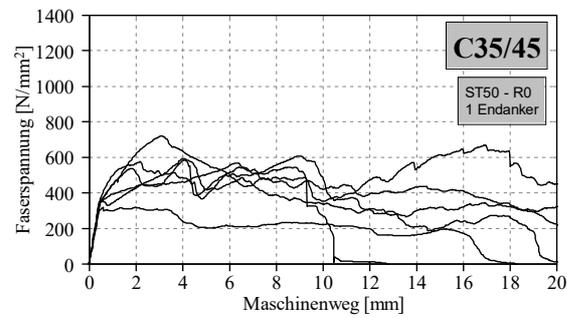
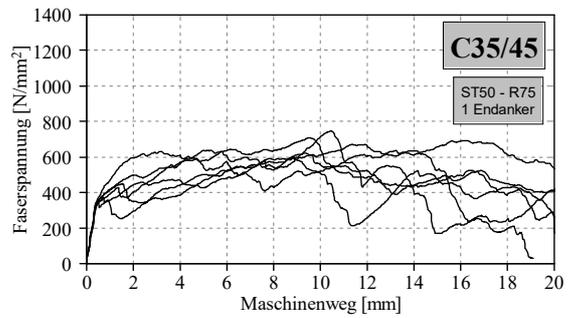
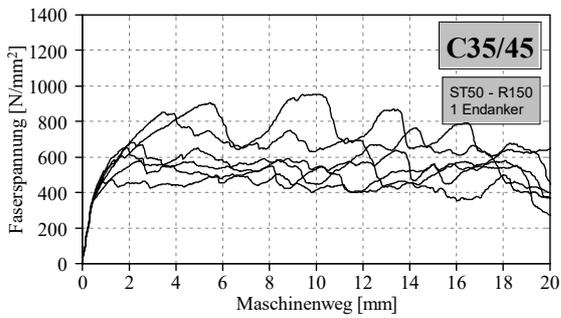
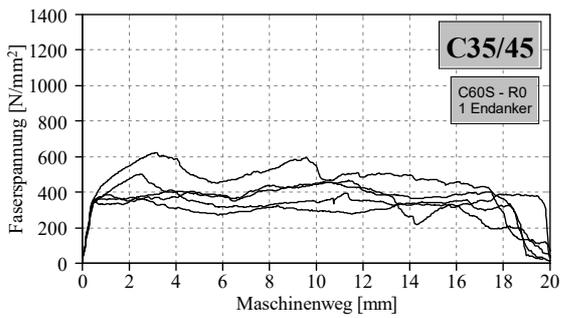
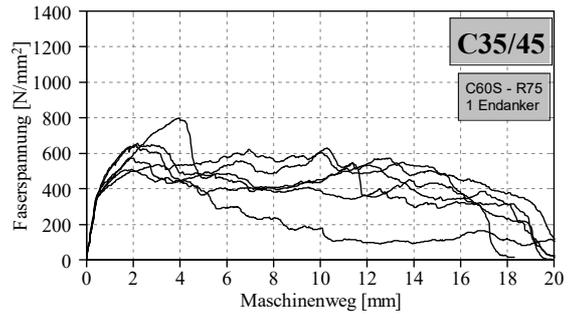
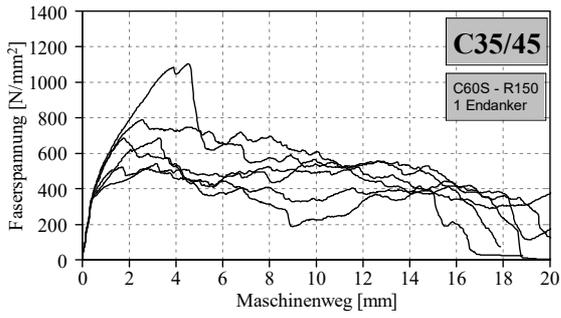
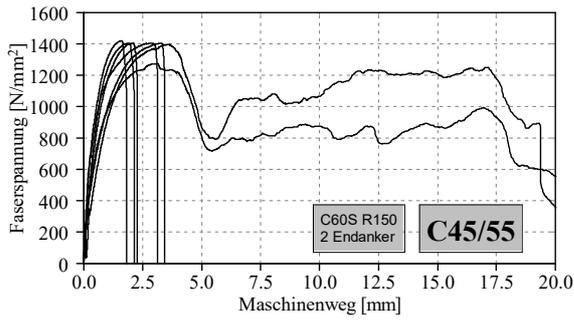


B.5 Faserlänge 50 mm – C60S



C Ausziehversuche der TU Graz





D Untersuchung zur Tragfähigkeit

Tabelle 7-1 Datenblatt Übersichtstabelle

Fasertyp	Beton	kg/m ³	mm	F.Reißen	Anker	Rizbreite	VNr.	0,5 MW	3,5 MW	0,5 STABW	3,5 STABW		
ST50	C30/37	30	33	K	2	150	70	3,05	2,07	0,24	0,24		
		60	33	K	2	150	71	3,44	2,26	0,49	0,18		
		50				R	1	100	52	2,80	1,53	0,93	0,53
						R	1	120	51	2,97	1,81	0,75	0,34
						K	2	100	41	3,22	2,18	0,69	0,53
						K	2	120	42	3,39	2,51	0,37	0,45
						K	1	75	67	2,91	2,36	0,39	0,56
						K	1	150	66	3,27	2,47	0,69	0,43
		60				K	1	140	34	3,27	2,01	0,56	0,50
						R	2	170	33	3,36	1,30	0,75	0,41
						R	1	140	36	3,46	1,62	0,37	0,25
						R	1	100	39	3,51	1,98	0,73	0,40
	R					1	140	35	3,51	1,80	0,87	0,55	
	K					1	120	37	3,54	2,28	0,91	0,59	
	C50/60	30	60		K	1	0	62	3,62	2,45	0,23	0,23	
					K	1	80	40	3,63	2,37	0,51	0,26	
					R	1	120	74	3,71	2,52	0,43	0,48	
					K	1	100	38	3,83	2,83	0,49	0,32	
					R	2	140	17	4,03	1,54	1,18	0,61	
					R	1	100	73	4,07	2,65	0,30	0,19	
					R	1	80	72	4,07	3,04	0,44	0,34	
					R	2	170	45	4,40	0,61	1,11	0,15	
					K	2	100	12	2,28	1,43	0,82	0,56	
					K	2	150	11	2,42	1,67	0,61	0,49	
					K	2	0	13	2,58	1,66	0,82	0,64	
					K	2	150	1	2,61	1,64	0,30	0,11	
	C60S	C30/37	30	50	K	2	150	4	3,43	2,11	0,63	0,26	
					K	1	100	50	2,64	1,98	1,10	1,25	
K					2	100	23	3,43	2,21	0,60	0,33		
K					2	120	22	3,45	2,51	0,58	0,44		
K					1	120	53	3,54	2,75	0,72	0,44		
R					1	120	19	3,70	2,66	0,71	0,59		
C50/60		30	60		R	1	80	21	3,83	2,69	0,28	0,27	
					R	1	120	10	3,89	3,03	0,97	0,68	
					R	2	120	20	3,93	2,22	0,47	0,15	
					R	2	150	18	3,95	2,01	0,63	0,40	
					R	2	150	14	4,16	3,09	0,39	0,56	
					K	1	140	69	4,18	3,21	0,37	0,26	
C60S-2000	C50/60	30	60	K	1	100	3	4,27	3,41	0,45	0,31		
				K	2	100	75	4,87	4,14	0,31	0,67		
				R	2	120	15	4,89	3,41	0,47	0,38		
				K	1	100	6	5,39	4,52	0,58	0,46		
				K	2	100	76	5,65	5,85	0,50	0,83		
				R	2	150	2	2,64	1,21	0,66	0,35		
C60S	C50/60	30	50	K	1	120	26	3,71	2,32	1,33	0,83		
				K	1	100	27	5,12	3,25	0,69	0,39		
				R	2	150	25	4,92	1,62	0,84	0,37		
				R	2	150	5	5,05	2,95	1,08	1,13		
				K	1	100	31	6,59	3,71	0,85	0,65		
				K	1	120	29	6,67	4,33	0,76	0,74		
C60S	C30/37	30	60	R	1	100	7	7,66	4,23	0,45	0,99		
				K	2	50	56	3,41	3,29	0,40	0,46		
				R	2	50	30	4,79	2,12	0,70	0,37		
				K	1	0	28	5,15	4,31	0,82	0,69		
				R	2	50	16	5,42	2,84	0,57	0,16		
				K	1	0	32	8,39	5,77	0,61	0,47		

Tabelle 7-2 Datenblatt Variation der Ritzbreite

Fasertyp	VNr.	Ritzbreite	0,5 MW	0,5 STABW	3,5 MW	3,5 STABW
ST50	66	150	3,27	0,69	2,47	0,43
	34	140	3,27	0,56	2,01	0,50
	36	140	3,46	0,37	1,62	0,25
	35	140	3,51	0,87	1,80	0,55
	37	120	3,54	0,91	2,28	0,59
	74	120	3,71	0,43	2,52	0,48
	39	100	3,51	0,73	1,98	0,40
	38	100	3,83	0,49	2,83	0,32
	73	100	4,07	0,30	2,65	0,19
	40	80	3,63	0,51	2,37	0,26
	72	80	4,07	0,44	3,04	0,34
	67	75	2,91	0,39	2,36	0,56
	62	0	3,62	0,23	2,45	0,23
	C60S	69	140	4,18	0,37	3,21
19		120	3,70	0,71	2,66	0,59
10		120	3,89	0,97	3,03	0,68
3		100	4,27	0,45	3,41	0,31
21		80	3,83	0,28	2,69	0,27

Tabelle 7-3 Datenblatt Faserlänge

Beton	kg/m ³	Fasertyp	mm	Anker	Ritzbreite	VNr.	0,5 MW	3,5 MW	0,5 STABW	3,5 STABW								
C30/37	30				33	2	0	13	2,58	1,66	0,82	0,64						
						2	100	12	2,28	1,43	0,82	0,56						
						2	150	11	2,42	1,67	0,61	0,49						
					C60S						2	150	1	2,61	1,64	0,30	0,11	
											2	100	23	3,43	2,21	0,60	0,33	
											50	2	120	22	3,45	2,51	0,58	0,44
											1	120	53	3,54	2,75	0,72	0,44	
											1	100	3	4,27	3,41	0,45	0,31	
											60	1	140	69	4,18	3,21	0,37	0,26
					ST50						2	100	75	4,87	4,14	0,31	0,67	
											33	2	150	70	3,05	2,07	0,24	0,24
											2	100	41	3,22	2,18	0,69	0,53	
											2	120	42	3,39	2,51	0,37	0,45	
											1	0	62	3,62	2,45	0,23	0,23	
					1	80	40	3,63	2,37	0,51	0,26							
					60	1	100	38	3,83	2,83	0,49	0,32						

Tabelle 7-4 Datenblatt Fasermenge

Beton	Fasertyp	mm	kg/m ³	Anker	Rizbreite	VNr.	0,5 MW	3,5 MW	0,5 STABW	3,5 STABW		
C30/37	ST50	33	30	2	150	70	3,05	2,07	0,24	0,24		
			60	2	150	71	3,44	2,26	0,49	0,18		
	C60S	33	30	2	150	1	2,61	1,64	0,30	0,11		
			60	2	150	4	3,43	2,11	0,63	0,26		
	C60S	60	30	1	100	3	4,27	3,41	0,45	0,31		
			60	1	100	6	5,39	4,52	0,58	0,46		
			30	2	100	75	4,87	4,14	0,31	0,67		
		60	60	2	100	76	5,65	5,85	0,50	0,83		
			C60S	50	30	1	120	26	3,71	2,32	1,33	0,83
					60	1	120	29	6,67	4,33	0,76	0,74
	C60S-2000	60	30	1	0	28	5,15	4,31	0,82	0,69		
			60	1	0	32	8,39	5,77	0,61	0,47		

Tabelle 7-5 Datenblatt Fasermaterial

Beton	kg/m ³	mm	Fasertyp	Anker	Rizbreite	VNr.	0,5 MW	3,5 MW	0,5 STABW	3,5 STABW		
C30/37	30	33	ST50	2	150	70	3,05	2,07	0,24	0,24		
			C60S	2	150	11	2,42	1,67	0,61	0,49		
				2	150	1	2,61	1,64	0,30	0,11		
		50	30	ST50	2	100	41	3,22	2,18	0,69	0,53	
				C60S	2	120	42	3,39	2,51	0,37	0,45	
					2	100	23	3,43	2,21	0,60	0,33	
	60	30	30	2	120	22	3,45	2,51	0,58	0,44		
				1	75	67	2,91	2,36	0,39	0,56		
				1	140	34	3,27	2,01	0,56	0,50		
		60	30	ST50	1	0	62	3,62	2,45	0,23	0,23	
				C60S	1	80	40	3,63	2,37	0,51	0,26	
					1	100	38	3,83	2,83	0,49	0,32	
		60	30	60	1	140	69	4,18	3,21	0,37	0,26	
					C60S	1	100	3	4,27	3,41	0,45	0,31
						2	100	75	4,87	4,14	0,31	0,67

E Faserverteilung Datenblätter je Balken

Tabelle 7-6: Datenblatt Balken B1

Balkennummer	B1											
Befüllart	einseitig											
Fasergehalt [kg/m³]	30											
Faserzugabeart	FZ nach der Betoneinfüllung											
Schnittnummer	S1.1	S1.2	S2.1	S2.2	S3.1	S3.2	S4.1	S4.2	S5.1	S5.2	S6.1	S6.2
Faseranzahl /dm²	48.0	45.4	50.5	51.2	59.2	52.6	46.1	50.7	43.7	50.7	40.3	45.8
Mittelwert Faseranzahl	48.7											
Faserorientierung η_v	0.56											
Variationskoeffizient [%]	10.1											

Tabelle 7-7: Datenblatt Balken B2

Balkennummer	B2											
Befüllart	lagenweise											
Fasergehalt [kg/m³]	30											
Faserzugabeart	FZ nach der Betoneinfüllung											
Schnittnummer	S1.1	S1.2	S2.1	S2.2	S3.1	S3.2	S4.1	S4.2	S5.1	S5.2	S6.1	S6.2
Faseranzahl /dm²	46.87	44.63	45.76	40.24	38.44	38.75	45.19	43.93	44.9	46.38	53.11	45.33
Mittelwert Faseranzahl	44.5											
Faserorientierung η_v	0.51											
Variationskoeffizient [%]	9.0											

Tabelle 7-8: Datenblatt Balken B3

Balkennummer	B3											
Befüllart	einseitig											
Fasergehalt [kg/m³]	60											
Faserzugabeart	FZ nach der Betoneinfüllung											
Schnittnummer	S1.1	S1.2	S2.1	S2.2	S3.1	S3.2	S4.1	S4.2	S5.1	S5.2	S6.1	S6.2
Faseranzahl /dm²	93.27	90.78	117.9	108	110.3	113.2	111	103	109.7	108	80.97	86.6
Mittelwert Faseranzahl	102.7											
Faserorientierung η_v	0.59											
Variationskoeffizient [%]	11.5											

Tabelle 7-9: Datenblatt Balken B4

Balkennummer	B4											
Befüllart	lagenweise											
Fasergehalt [kg/m³]	60											
Faserzugabeart	FZ nach der Betoneinfüllung											
Schnittnummer	S1.1	S1.2	S2.1	S2.2	S3.1	S3.2	S4.1	S4.2	S5.1	S5.2	S6.1	S6.2
Faseranzahl /dm²	99.35	94.37	107.2	105	104.6	100.9	83.71	90.69	92.25	80.96	81.24	84.87
Mittelwert Faseranzahl	93.8											
Faserorientierung η_v	0.54											
Variationskoeffizient [%]	10.3											

Tabelle 7-10: Datenblatt Balken B5

Balkennummer	B5											
Befüllart	einseitig											
Fasergehalt [kg/m ³]	30											
Faserzugabeart	FZ vor der Betoneinfüllung											
Schnittnummer	S1.1	S1.2	S2.1	S2.2	S3.1	S3.2	S4.1	S4.2	S5.1	S5.2	S6.1	S6.2
Faseranzahl /dm ²	46.62	46.53	58.9	55.48	58.86	59.09	44.64	48.43	52.09	53.91	44.52	43.57
Mittelwert Faseranzahl	51.1											
Faserorientierung η_v	0.59											
Variationskoeffizient [%]	11.9											

Tabelle 7-11: Datenblatt Balken B6

Balkennummer	B6											
Befüllart	lagenweise											
Fasergehalt [kg/m ³]	30											
Faserzugabeart	FZ vor der Betoneinfüllung											
Schnittnummer	S1.1	S1.2	S2.1	S2.2	S3.1	S3.2	S4.1	S4.2	S5.1	S5.2	S6.1	S6.2
Faseranzahl /dm ²	44.79	46.36	43.54	43.63	43.53	46.09	42.82	53.88	43.07	50.62	46.22	43.76
Mittelwert Faseranzahl	45.7											
Faserorientierung η_v	0.53											
Variationskoeffizient [%]	7.4											

Tabelle 7-12: Datenblatt Tabelle B7

Balkennummer	B7											
Befüllart	einseitig											
Fasergehalt [kg/m ³]	60											
Faserzugabeart	FZ vor der Betoneinfüllung											
Schnittnummer	S1.1	S1.2	S2.1	S2.2	S3.1	S3.2	S4.1	S4.2	S5.1	S5.2	S6.1	S6.2
Faseranzahl /dm ²	80.36	81.24	89.39	84.51	105.9	97.99	105.7	109.5	97.1	98.51	81.54	87.59
Mittelwert Faseranzahl	93.3											
Faserorientierung η_v	0.54											
Variationskoeffizient [%]	11.3											

Tabelle 7-13: Datenblatt Balken B8

Balkennummer	B8											
Befüllart	lagenweise											
Fasergehalt [kg/m ³]	60											
Faserzugabeart	FZ vor der Betoneinfüllung											
Schnittnummer	S1.1	S1.2	S2.1	S2.2	S3.1	S3.2	S4.1	S4.2	S5.1	S5.2	S6.1	S6.2
Faseranzahl /dm ²	94.32	85.11	83.53	80.3	87.54	84.02	75.12	67.28	80.55	78.34	76.02	65.21
Mittelwert Faseranzahl	79.8											
Faserorientierung η_v	0.46											
Variationskoeffizient [%]	10.3											

Tabelle 7-14: Datenblatt Balken B9

Balkennummer	B9											
Befüllart	einseitig											
Fasergehalt [kg/m ³]	30											
Faserzugabeart	FZ chargenweise											
Schnittnummer	S1.1	S1.2	S2.1	S2.2	S3.1	S3.2	S4.1	S4.2	S5.1	S5.2	S6.1	S6.2
Faseranzahl /dm ²	54.6	55.81	51.34	45.21	59.4	59.26	58.18	54.16	54.63	52.46	52.37	54.52
Mittelwert Faseranzahl	54.3											
Faserorientierung η_v	0.63											
Variationskoeffizient [%]	7.2											

Tabelle 7-15: Datenblatt Balken B10

Balkennummer	B10											
Befüllart	lagenweise											
Fasergehalt [kg/m ³]	30											
Faserzugabeart	FZ chargenweise											
Schnittnummer	S1.1	S1.2	S2.1	S2.2	S3.1	S3.2	S4.1	S4.2	S5.1	S5.2	S6.1	S6.2
Faseranzahl /dm ²	34.57	40.09	40.4	41.38	35.73	40.22	46.72	43.28	41.14	42.42	38.97	44.08
Mittelwert Faseranzahl	40.8											
Faserorientierung η_v	0.47											
Variationskoeffizient [%]	8.2											

Tabelle 7-16: Datenblatt Balken B11

Balkennummer	B11											
Befüllart	einseitig											
Fasergehalt [kg/m ³]	60											
Faserzugabeart	FZ chargenweise											
Schnittnummer	S1.1	S1.2	S2.1	S2.2	S3.1	S3.2	S4.1	S4.2	S5.1	S5.2	S6.1	S6.2
Faseranzahl /dm ²	82.27	87.04	96.32	102.6	97.93	101.1	119.9	111.7	85.1	89.2	88.62	83.03
Mittelwert Faseranzahl	95.4											
Faserorientierung η_v	0.55											
Variationskoeffizient [%]	12.4											

Tabelle 7-17: Datenblatt Balken B12

Balkennummer	B12											
Befüllart	lagenweise											
Fasergehalt [kg/m ³]	60											
Faserzugabeart	FZ chargenweise											
Schnittnummer	S1.1	S1.2	S2.1	S2.2	S3.1	S3.2	S4.1	S4.2	S5.1	S5.2	S6.1	S6.2
Faseranzahl /dm ²	98.25	95.24	80.91	68.56	87.51	93.76	87.16	96.46	78.49	75.81	84.44	86.94
Mittelwert Faseranzahl	86.1											
Faserorientierung η_v	0.50											
Variationskoeffizient [%]	10.5											

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1 Verhalten von Beton unter Zugbeanspruchung [7]	4
Abb. 2-2 Vergleich der übertragbaren Zugspannung bei unbewehrten Normal- und Faserbeton [8]	5
Abb. 2-3 Faseraktivierung: Verlauf der Verbundschubspannungen, der Spannungen in Faser und Matrix und Verlauf der Relativverschiebungen; Haftverbund (links); Haft- und Reibungsverbund (Mitte); Faserauszug: Prinzipskizze und qualitativer Verlauf der Faser- und Matrixspannungen (rechts) [9]	6
Abb. 2-4 Häufigkeitsverteilung der Einbindelänge l_e [8]	7
Abb. 2-5 Unterschiedliche Stahlfaserarten [8]	8
Abb. 2-6 Versagensmechanismus von Endhaken [8]	10
Abb. 2-7 Kritischer Fasergehalt V_{crit} [8]	10
Abb. 2-8 Einfluss der Korngröße auf Faserverteilung, -orientierung und Verarbeitbarkeit [8]	12
Abb. 2-9 Definition der Faserorientierung η [8]	12
Abb. 2-10 Faserorientierung [8]	13
Abb. 2-11 Faserorientierung an Grenzflächen und Verlauf des Faserorientierungsbeiwertes [13]	13
Abb. 2-12 Einflussparameter auf die Arbeitslinie von Stahlfaserbeton unter einachsiger Druckbeanspruchung [8]	14
Abb. 2-13 Messvorrichtung zur Ermittlung der Nachrissbiegezugfestigkeiten (Abmessungen in mm) [1]	17
Abb. 2-14 Versuchsaufbau der Biegezugprüfungen nach [16]	19
Abb. 2-15 Last-Durchbiegungsdiagramm zur Ermittlung der äquivalenten Biegezugfestigkeit [16]	20
Abb. 3-1 Feel Fiber Faser	22
Abb. 3-2 Schematische Darstellung einer Feel Fiber Faser	23
Abb. 3-3 Detaildarstellung des Ankers (links), Ritzbreite (rechts)	24
Abb. 3-4 Ursprünglich geplantes Faserdesign © Feel Fiber GmbH	25
Abb. 4-1 Faserdesign mit 2 Endankern (4-Anker-Design)	26
Abb. 4-2 links: ideale Geometrie rechts: reale Geometrie	27
Abb. 4-3 Gestaltabweichung von Oberflächen [20]	27
Abb. 4-4 Prinzip eines Tastschnittgerätes [20]	27
Abb. 4-5 Ertastetes Primärprofil (P-Profil) [20]	28

Abb. 4-6 Oberflächen-Profildiagramme [20]	28
Abb. 4-7 Maximale und gemittelte Rautiefe [20]	29
Abb. 4-8 Mittenrauwert R_a [20]	29
Abb. 4-9 Mikroskopaufnahme der glatten (links) und rauen (rechts) Faserfläche	30
Abb. 4-10 Ermittlung des Rauheitsprofils der glatten Seiten	31
Abb. 4-11 Rauheitsprofil der glatten und rauen Seite	32
Abb. 5-1 Verwendeter Versuchsaufbau für Biegezugversuche nach [1]	38
Abb. 5-2 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven für 60 mm – ST50 – C30/37 – 30 kg/m ³ mit einer Ritzbreite von R80 (links) bzw. R100 (rechts) und statistische Auswertung	40
Abb. 5-3 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven für 60 mm – ST50 – C30/37 – 30 kg/m ³ mit einer Ritzbreite von R120 und statistische Auswertung	40
Abb. 5-4 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven für 60 mm – C60S – C30/37 mit 30 und statistische Auswertung	41
Abb. 5-5 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven mit 60 mm – C60S – 60 kg/m ³ für C30/37 (links) und C50/60 (rechts) mit statistischer Auswertung	42
Abb. 5-6 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven mit 60 mm - C60S – R100 - 30 (links) bzw. 60 kg/m ³ (rechts) und statistische Auswertung	43
Abb. 5-7 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven für 33 mm – ST150 – C30/37 - 30 (links) bzw. 60 kg/m ³ (rechts) und statistische Auswertung	43
Abb. 5-8 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven für 33 mm – C60S – C30/37 mit 30 (links) bzw. 60 kg/m ³ (rechts) und statistische Auswertung	44
Abb. 5-9 Biegezugspannungs-Durchbiegungskurven für 33 mm – C60S – C50/60 mit 30 (links) bzw. 60 kg/m ³ (rechts) und statistische Auswertung	45
Abb. 5-10 Übersicht aller bisher durchgeführter Versuchsreihen mit den Feel Fiber Fasern	47
Abb. 5-11 Einfluss der Ankergröße (Ritzbreite) bei Fasern der Stahlgüte C60S (links) und ST50 (rechts) mit einem Endanker	48
Abb. 5-12 Mittlere Biegezugspannung bei 0,5 und 3,5 mm Durchbiegung sortiert nach der Ritzbreite und gruppiert nach C60S und ST50	49
Abb. 5-13 Einfluss der Faserlänge	50
Abb. 5-14 Einfluss der Fasermenge (Gegenüberstellung 30 und 60 kg/m ³)	51
Abb. 5-15 Einfluss des Fasermaterials	52
Abb. 5-16 Gegenüberstellung der Mittelwerte von KWT zu Prototypenfasern	54

Abb. 5-17 Gegenüberstellung von ST50 R80, R100 und 120 Fasern mit 60 mm und 30 kg/m ³ der Prototypenanlage (links) und der KWT-Anlage (rechts)	55
Abb. 6-1 Schema des Versuchsprogramms	56
Abb. 6-2 Zugabe der Fasern in den Fahrmischer mittels eines Förderbandes	57
Abb. 6-3 Bestimmung des Ausbreitmaßes	58
Abb. 6-4 Aussonderung der Fasern aus dem Frischbeton zur Bestimmung des Stahlfasergehaltes	58
Abb. 6-5 Einseitige Befüllung des Balkens mit dem Fahrmischer	58
Abb. 6-6 Versuchskörper	59
Abb. 6-7 Streuung des Fasergehaltes im Frischbeton	60
Abb. 6-8 Mittlere Faseranzahl in den Schnittflächen je Balken	61
Abb. 6-9 Streuung der Faseranzahl in den Schnittflächen - Gegenüberstellung der Faserzugabeart	62
Abb. 6-10 Streuung der Faseranzahl in den Schnittflächen - Gegenüberstellung der Befüllvarianten	63
Abb. 6-11 Vertikale Faserverteilung	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Fraktilefaktor k_s [1]	18
Tabelle 2-2	Leistungsklassen L1 und L2 für Stahlfaserbeton mit zugehörigen Grundwerten der zentrischen Nachrisszugfestigkeiten	18
Tabelle 2-3	Schwellenwert für $1-\alpha=95\%$ (5%-Fraktile) [16]	21
Tabelle 2-4	Faserbetonklassen G nach ÖVBB Richtlinie Faserbeton (f_{eqks} -Gebrauchstauglichkeit)	21
Tabelle 2-5	Faserbetonklassen T nach ÖVBB Richtlinie Faserbeton (f_{eqku} -Tragsicherheit)	21
Tabelle 4-1	Rauigkeitskennwerte von Fasern der Stahlgüte C60S (links) und ST50 (rechts)	31
Tabelle 5-1	Übersicht aller Bisher mit der Stahlgüte ST50 durchgeführten 4-Punkt-Biegezugversuche	35
Tabelle 5-2	Übersicht aller Bisher mit der Stahlgüte C60S-2000 durchgeführten 4-Punkt-Biegezugversuche	35
Tabelle 5-3	Übersicht aller Bisher mit der Stahlgüte C60S durchgeführten 4-Punkt-Biegezugversuche	36
Tabelle 5-4	Übersicht über die im Zuge dieser Arbeit hergestellten Versuchsserien	37
Tabelle 5-5	Ausbreitmaße und Druckfestigkeiten von Dezember 2016 bis März 2017 durchgeführten Versuche	39
Tabelle 5-6	Übersicht der Versuchsserien mit ST50, C30/37, 60 mm und 1 Endanker	53
Tabelle 6-1	Ausbreitmaße	59
Tabelle 6-2	Ergebnisse der Faserverteilung im Frischbeton	60
Tabelle 7-1	Datenblatt Übersichtstabelle	76
Tabelle 7-2	Datenblatt Variation der Ritzbreite	77
Tabelle 7-3	Datenblatt Faserlänge	77
Tabelle 7-4	Datenblatt Fasermenge	78
Tabelle 7-5	Datenblatt Fasermaterial	78
Tabelle 7-6:	Datenblatt Balken B1	79
Tabelle 7-7:	Datenblatt Balken B2	79
Tabelle 7-8:	Datenblatt Balken B3	79
Tabelle 7-9:	Datenblatt Balken B4	79
Tabelle 7-10:	Datenblatt Balken B5	80

Tabelle 7-11: Datenblatt Balken B6	80
Tabelle 7-12: Datenblatt Tabelle B7	80
Tabelle 7-13: Datenblatt Balken B8	80
Tabelle 7-14: Datenblatt Balken B9	81
Tabelle 7-15: Datenblatt Balken B10	81
Tabelle 7-16: Datenblatt Balken B11	81
Tabelle 7-17: Datenblatt Balken B12	81