
Untersuchung der Stahlfaserverteilung im Versagensquerschnitt an Betonen mit unterschiedlichem Fasergehalt

INVESTIGATION OF STEEL FIBRE DISTRIBUTION IN THE FAILURE SECTION OF CONCRETES WITH DIFFERENT FIBRE CONTENTS

YINING DING, JOAQUIM BARROS

Zur Analyse der Stahlfaserverteilung im Versagensquerschnitt des Stahlfaserbeton-Spritzbetonbalkens liegen bisher wenige Versuchsergebnisse vor. Die Prüfungen beschränken sich meist auf den Einfluss der Faserdosierung und auf das Druck- bzw. Biegezugverhalten des Betons. Neben dem bekannten Biegezugverfahren (Kraft - Durchbiegung) gemäß DBV-Merkblatt wurden hier Untersuchungen an Balken aus Stahlfaserbeton mit verschiedenen Fasergehalten und Fasertypen nach RILEM Recommendation (Kraft - Rissöffnung) und EFNARC durchgeführt. Der Einfluss der Faseranzahl und des Faserabstandes auf das Nachbruchverhalten wurde untersucht. Die Stahlfaserverteilung im Balkenquerschnitt wurde durch die FE Methode dargestellt. Die Relation zwischen der Balkendurchbiegung und der Rissöffnung ist dokumentiert.

Nowadays, there are only few research results about the fibre distribution in the failure section of steel fibre reinforced concrete/shotcrete (SFRC) beams. Most of the experiments concentrated on the influence of different fibre contents on compression and flexural behaviour of concrete. Instead of the well-known flexural test (load - deflection) according to the German Guideline, lots of beam tests on fibre reinforced concrete/shotcrete, with different fibre content, fibre types, were done in accordance with RILEM recommendation (load - crack mouth opening) and EFNARC. The influence of different fibre numbers and fibre distance on the post crack behaviour has been investigated. The fibre distribution on the cross section was represented by FE method. The relationship between beam deflection and crack mouth opening was pointed out.

1. Einleitung

Bei gleicher Faserqualität ist der Fasergehalt ein wichtiger Faktor für die Verbesserung des Nachbruchverhaltens von Beton. Um das Arbeitsvermö-

gen des Betons zu erhöhen, wird in der Regel die Faserdosierung erhöht. Das bedingt gegebenenfalls ein erschwertes Verdichten sowie höhere Kosten. Aus der bruchmechanischen Sicht ist die Effektivität der Fasern ausschließlich vom Abstand der Fasern

zueinander abhängig. Dieser Abstand der Fasern beeinflusst wiederum das Nachbruchverhalten des Betons [1]. Bis heute gibt es aber noch wenige Forschungsergebnisse über die Beziehung zwischen Faserdosierung/Fasergehalt und Faserverteilung sowie Faserabstand. Es ist auch wichtig zu beurteilen, wie weit sich die Risse bei einer bestimmten Deformation öffnen können. Das ist ein bedeutender Faktor für die Auswahl und den Einsatz der Stahlfasern. Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist der Einfluss unterschiedlicher Faserdosierung

- auf das Nachbruchverhalten im Biegezugversuch nach RILEM Recommendation [2],
- auf die Faseranzahl und die Faserverteilung im Balkenquerschnitt bzw.,
- auf die Korrelation zwischen Durchbiegung und Rissöffnung des Biegebalkens.

2. Durchführung des Versuches

Der Zementgehalt (CEM I 42.5) betrug 300 kg/m³ Beton, der W/Z-Wert variierte von 0,54 bis 0,62. Zur Regelung der Verarbeitbarkeit des Betons kam ein Verflüssiger zum Einsatz. Der Anteil der Flugasche variierte von 0 % bis 25 %. Der Zuschlag bestand aus den Korngruppen 0-5 mm 55 %, 5-15 mm 20 %, 15-25 mm 25 %. Zur Herstellung der Faserbetonproben wurden Drahtfasern mit Endhaken RC 65/60 (3200 Stücke/kg), RC 80/60 (4600 Stücke/kg), ZP 30/0.6 (14850 Stücke/kg) und ZP 30/0.5 (21500 Stücke/kg) eingesetzt.

Die Prüfung wurde nach dem in der RILEM Recommendation beschriebenen Verfahren durchgeführt (Bild 1). Laut der statistischen Analyse verteilen sich die Fasern auf der Zug- und Druckzone gleichmäßig. Das Belastungs- Durchbiegung Diagramm eines Biegebalkens bei mittlerer Zunahme des Kolbenwegs von 0,2 mm/min ist bis zu einer Durchbiegung der Probe von ca. 3,0 mm grafisch aufzunehmen. Um das Verformungs- und Rissverhalten zu beurteilen, wird der Rissöffnungsprozess synchron mit der Durchbiegung mitgemessen.

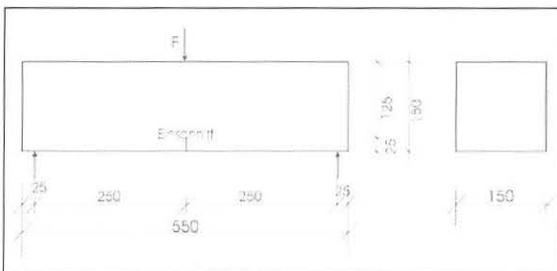


Bild 1: Versuchsaufbau und Abmessungen der Balkenprobe nach RILEM

Für die Mischung des Stahlfaserspritzbetons im Nassspritzverfahren betrug der Zementgehalt 490 kg/m³. Der W/Z Wert war ca. 0,42, Silikafume 15 kg/m³. Der Zuschlag bestand aus den Korngruppen 1 - 5 mm 52 %, 5 - 10 mm 48 %. Die Faserdosierung war 50 kg/m³ (ZP 30/0.5). Die Prüfung wurde nach EFNARC durchgeführt (Bild 2) [3].

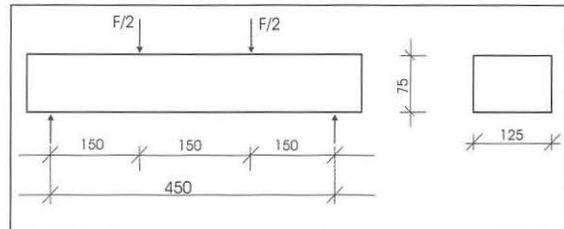


Bild 2: Versuchsaufbau und Abmessungen der Balkenprobe nach EFNARC

Die Ermittlung des Arbeitsvermögens erfolgte nach der RILEM [2] Recommendation. Dabei werden sowohl die Arbeitslinien (Kraft- Durchbiegung), als auch Kraft - Rissöffnungslinien sowie Durchbiegung- Rissöffnungslinien im Vergleich dargestellt.

3. Die Biegezugversuch

3.1 Versuchsergebnis

Als Beispiel zeigen die Bilder 3, 4, 5 und 6 die Gegenüberstellung [4] der Kraft- Durchbiegungskurven und der Kraft- Rissöffnungskurven von Stahlfaserbetonproben mit unterschiedlicher Faseranzahl im Versagensquerschnitt bei dem Fasergehalt von 10 und 20 kg/m³ im Alter von 28 Tagen.

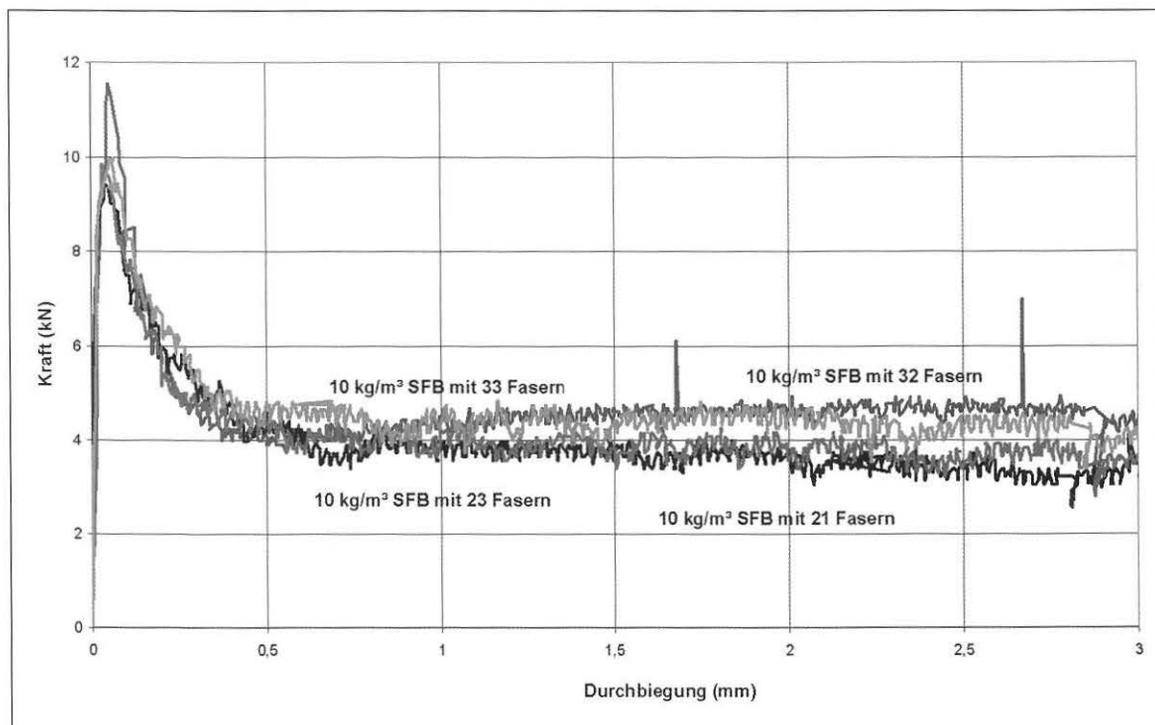
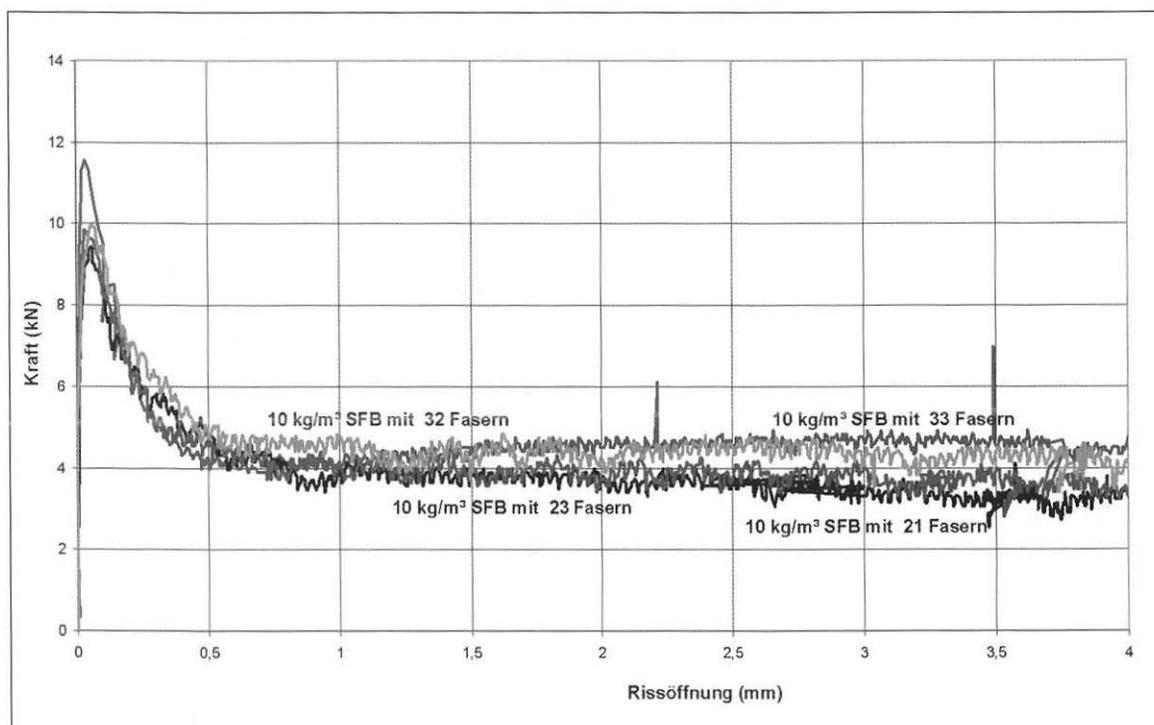
| Faserdosierung RC 80/60 (kg/m ³) | Mittelwert der Faseranzahl/ Querschnitt | Standardabweichung | Streuung (%) |
|--|---|--------------------|--------------|
| 10 | 26 | 7,4 | 28,4 |
| 20 | 56 | 20 | 35 |
| 30 | 93 | 17 | 18 |

Tab. 1: Teilergebnisse der Faserverteilung, der Faseranzahl und ihrer Standardabweichung

Wegen dem Verarbeitungsprozess des Faserbetons ist eine gleichmäßige Faserverteilung zwischen verschiedenen Proben bei der gleichen Faserdosierung kaum möglich. Die Standardabweichung der Faseranzahl im Versagensquerschnitt der unterschiedlichen Faserdosierungen vom Typ RC 80/60 (4600 Fasern/kg) ist in Tabelle 1 dargestellt.

Aus den obengenannten Versuchen ist ersichtlich:

1. die Kraft- Durchbiegungskurven und die Kraft - Rissöffnungskurven verlaufen ähnlich;

Bild 3: Gegenüberstellung der Kraft - Durchbiegungskurven mit dem Fasergehalt von 10 kg/m³Bild 4: Gegenüberstellung der Kraft - Rissöffnungskurven mit dem Fasergehalt von 10 kg/m³

2. das Nachbruchverhalten des Faserbetons mit der gleichen Faserdosierung ist stark abhängig von der Faseranzahl und von dem Faserabstand im Versagensquerschnitt, besonders in der Zugzone des Versagensquerschnittes;
3. die hohe Standardabweichung und die Streuung der Faseranzahl und von der Faserverteilung im Versagensquerschnitt haben starken Einfluss auf die Biegezugfähigkeit des Stahlfaserbetons.

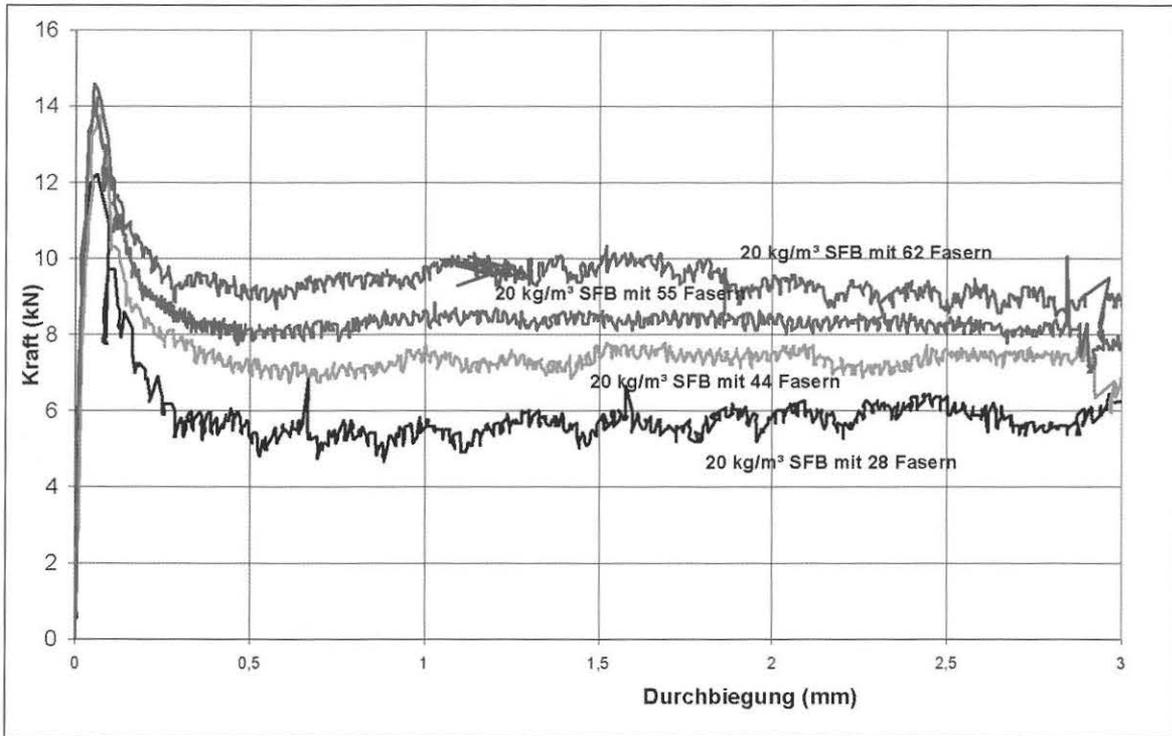


Bild 5: Gegenüberstellung der Kraft - Durchbiegungskurven mit dem Fasergehalt von 20 kg/m³

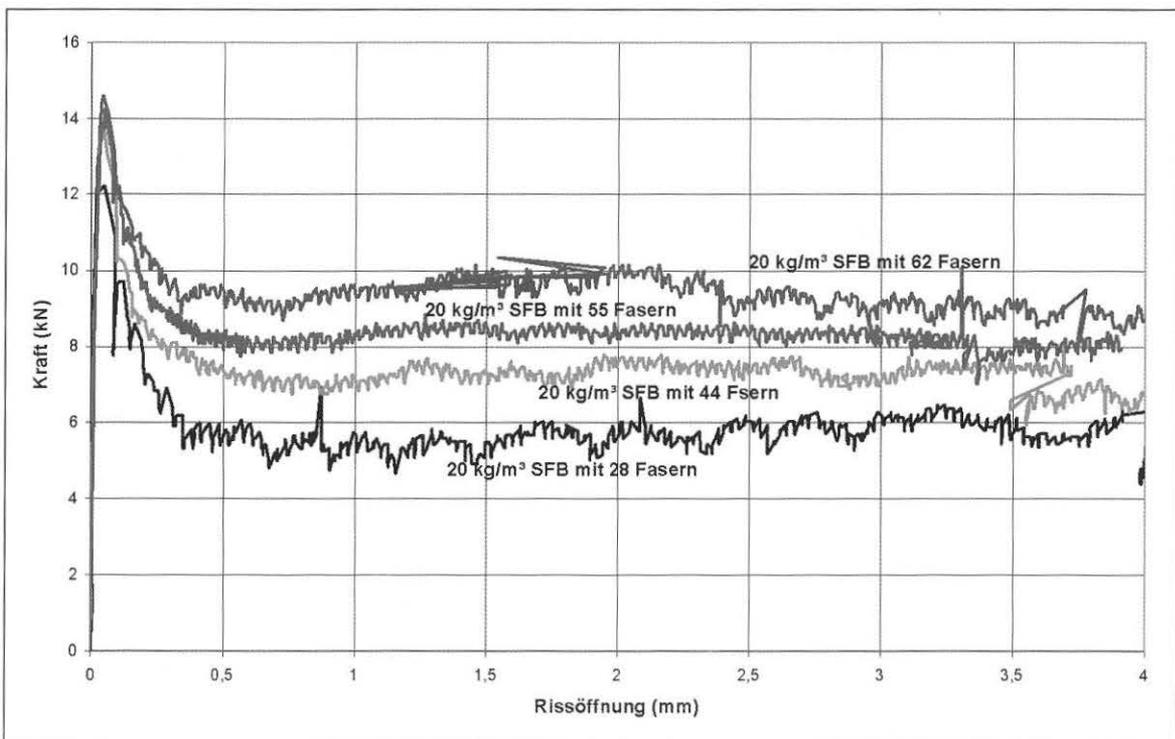


Bild 6: Gegenüberstellung der Kraft - Rissöffnungskurven mit dem Fasergehalt von 20 kg/m³

Bild 7 zeigt die Versuchsergebnisse von Stahlfaser-spritzbeton mit einer Faserdosierung von 50 kg/m³ (ZP 30/ 0.5, 21500 Stücke/kg) im Nassspritzverfahren nach EFNARC. Der verbleibende Fasergehalt in den

Proben war wegen des Rückpralls 41,5 kg/m³. Die Biegeähigkeit ist von Balken zu Balken wegen des Rückpralles und wegen der ungleichmäßig verteilten Stahlfasern in den Biegebalken sehr unterschiedlich.

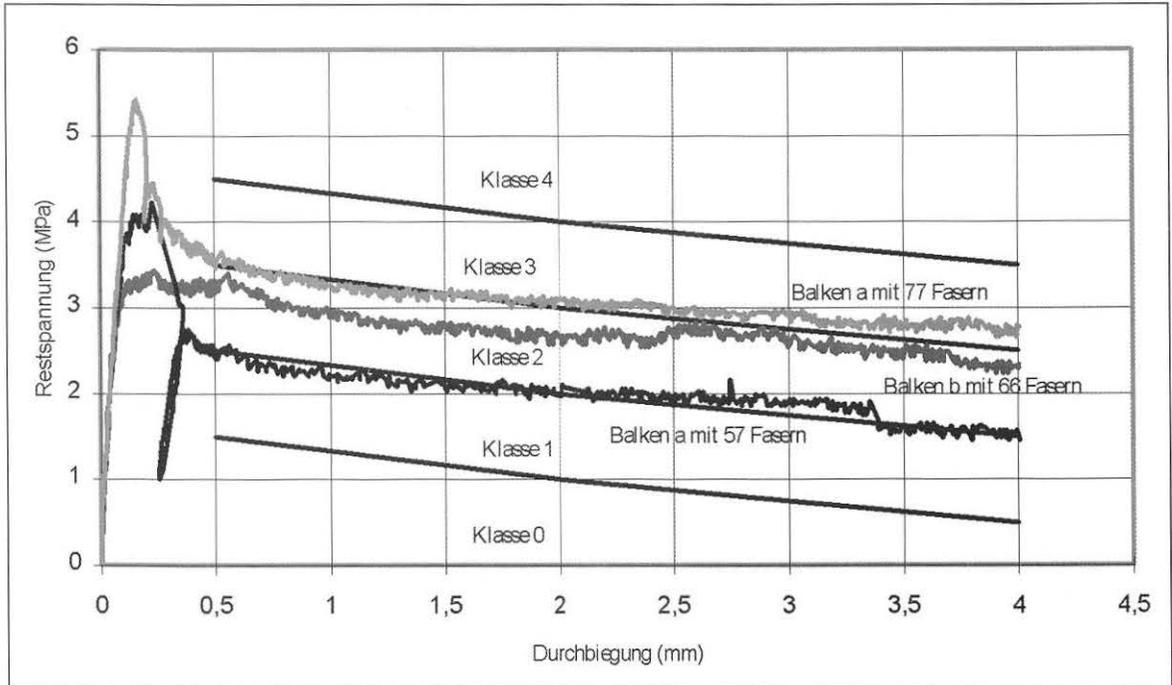


Bild 7: Restspannungsklasse des Stahlfaserspritzbetonbalkens

Ähnlich zu den Ergebnissen bei Stahlfaserbeton (Bilder 5, 6) war die Streuung des Nachbruchverhaltens mit demselben Fasergehalt in den Proben wegen unterschiedlicher Faseranzahl im Querschnitt deutlich (Bild 7). Deswegen ist es wichtig für Faseranwendung und für die Statiker/Planer, die Beziehung zwischen dem Fasergehalt in der Mischung und der Faseranzahl im Querschnitt mit unterschiedlichem Fasergehalt/-typen zu erforschen.

3.2 Darstellung der Faseranzahl/Faserverteilung

Nach dem Biegezugversuch wurde jeder geprüfte Balken in zwei Teile gespalten. Der Querschnitt wurde in 3 cm x 3 cm quadratische Zonen eingeteilt. Um die Verteilung direkt und deutlich analysieren zu können, wurde die Faseranzahl mittels Finit-Elemente-Methode dargestellt (Bilder 8, 9). End-



Bild 8: Stahlfaserverteilung mit der Faserdosierung von 20 kg/m³ im Versagensquerschnitt nach RILEM Versuch

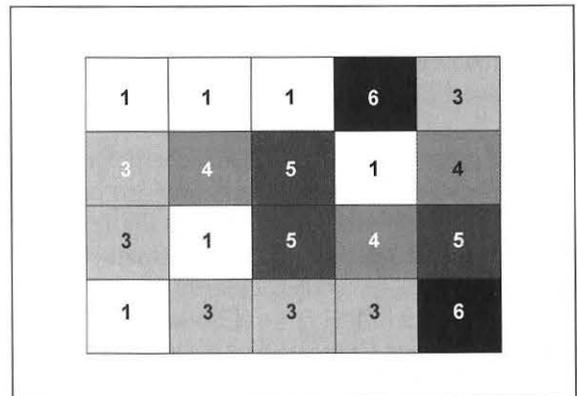


Bild 9a: 62 Stücke Fasern und die Verteilung bei der Faserdosierung von 20 kg/m³ im Versagensquerschnitt

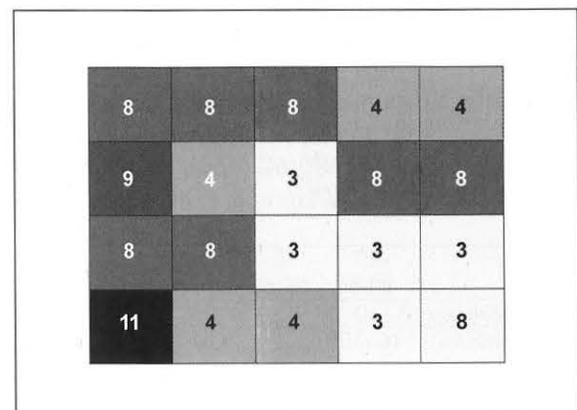


Bild 9b: Faserabstand von Bild 9a im Versagensquerschnitt

sprechend dem SFB Balken mit 62 Fasern (RC 80/60) in den Bildern 5 und 6 werden die Stahlfaserverteilung, die Faseranzahl und der Faserabstand in Bild 8, 9a und 9b vorgestellt.

Der Balkenquerschnitt nach EFNARC wurde in quadratische Zone von 2,5 cm x 2,5 cm eingeteilt. Entsprechend dem Stahlfaserspritzbetonbalken mit 77 Fasern im Querschnitt (ZP 30/0.5) in Bild 7 werden die Stahlfaserverteilung und die Faseranzahl in Bild 10 gezeigt.

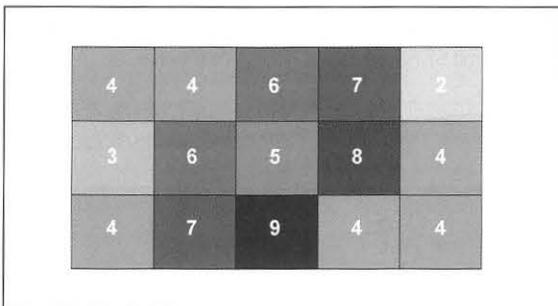


Bild 10: 77 Stücke Fasern und die Verteilung im Versagensquerschnitt nach EFNARC

4. Analyse der Beziehung zwischen dem Fasergehalt und der Faserverteilung

Wenn die Faserdosierung für Stahlfaserbeton in der Praxis von den Statikern/Planern in kg/m³ angegeben wird, kann man normalerweise die Faseranzahl/kg als einen Faktor in der Produktbeschreibung nachschlagen, sodass es leicht ist, den Fasergehalt in Anzahl/Volumen (Stücke/m³) in den Proben zu ermitteln. Für Stahlfaserspritzbeton (SFSpB) muss man zuerst den Faserverlust wegen Rückpralles bestimmen [4], [5], [6] und [7], dann kann man den tatsächlichen Fasergehalt in den Proben bestimmen. Für die Biegefähigkeit ist aber die Faseranzahl in der Querschnittsfläche (Stücke/cm²) ausschlaggebend. Die Faserverteilung im Versagensquerschnitt wurde auf Faseranzahl/cm² umgerechnet.

Um die Ergebnisse aussagenkräftig darzustellen, wurden 4 unterschiedliche Fasertypen RC 65/60 (3200 Stücke/kg), RC 80/60 (4600 Stücke/kg), ZP 30/0.6 (14850 Stücke/kg) und ZP 30/0.5 (21500

Stücke/kg) eingesetzt. Es wurden folgende Fasergehalte ausgewählt: 10, 15, 20, 25, 30, 40, 45, 60 und 65 kg/m³ [4], [5], [6], [7] und [8]. Das sind übliche Fasergehalte sowohl für Faseranwendungen für Industrieböden als auch für Spritzbeton für den Tunnelbau sowie für die Instandsetzung. Die Ergebnisse von ca. 140 unterschiedlichen Balken sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Die gesuchte mathematische Regressionsgleichung für die in Bild 11 beschriebene Beziehung ist in Gl. (1) dargestellt:

$$y = 0,000174 x^{0,637} \tag{1}$$

mit:

x: die Umrechnung des Fasergehaltes in Anzahl/Volumen (Stücke/m³) in der Mischung für SFB und oder in den Proben für SFSpB;

y: die Faseranzahl im Querschnittsfläche (Stücke/cm²).

Durch die statistische Umrechnung nach der Theorie der Normalverteilung könnte der Vertrauensgrad nach Gl. (2) ermittelt werden:

$$P[y_i - 2s_p < y < y_i + 2s_p] = 0,95 \tag{2}$$

wobei:

s_p = Standardabweichung der Stichprobe, ermittelt aus Versuchen [4], [5] und [6].

Mit $P[y_i - 2s_p < y_0 < y_i + 2s_p]$ = die Wahrscheinlichkeit dafür, dass $y_i - 2s_p < y < y_i + 2s_p$ vorkommt. Die Gleichungen für die Grenze der Vertrauensintervalle von $y_i - 2s_p$ und $y_i + 2s_p$ können aus Gl.(2) abgeleitet und in Gl. (3) und (4) dargestellt werden (Bild 11):

$$y = 0,000234x^{0,637} \tag{3}$$

$$y = 0,000129x^{0,637} \tag{4}$$

Das bedeutet, dass man mit Sicherheit von 95 % voraussagen kann, dass die Beziehung zwischen der Faseranzahl/cm² und dem Fasergehalt der Gl. (1) entspricht und in die Zone zwischen Gl. (3) und Gl. (4) fallen muss. Die Wahrscheinlichkeit von $y_i - 2s_p < y < y_i + 2s_p$ beträgt 95 %.

| Fasertyp | RC 80/60 | RC 65/60 | RC 65/60 | RC 80/60 | RC 80/60 | ZP 30/0.6 | ZP 30/0.6 | ZP 30/0.5 | ZP 30/0.5 | ZP 30/0.5 | ZP 30/0.5 | ZP 30/0.5 |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------|-----------------------|----------|-------------------------|-----------|-----------------------|-----------|-------------------------|-----------|-------------------------|
| Fasergehalt (kg/m ³) | 10 | 15 | 25 | 20 | 30 | 26 | 40 | 34 | 40 | 45 | 60 | 65 |
| Faseranzahl/m ³ | 46 x 10 ³ | 8 x 10 ³ | | 138 x 10 ³ | | 594 x 10 ³ | | 860 x 10 ³ | | 1290 x 10 ³ | | |
| | | 48 x 10 ³ | | 92 x 10 ³ | | 386,1 x 10 ³ | | 731 x 10 ³ | | 967,5 x 10 ³ | | 139,8 x 10 ³ |
| Faseranzahl/cm ² | 0,138 | 0,14 | 0,28 | 0,3 | 0,41 | 0,525 | 0,844 | 0,87 | 1,073 | 1,146 | 1,344 | 1,428 |

Tab. 2: Gegenüberstellung des Fasergehaltes (kg/m³), der Faseranzahl in der Mischung (Stücke/m³) und der Faseranzahl im Querschnitt (Stücke/cm²) von unterschiedlichen Fasertypen

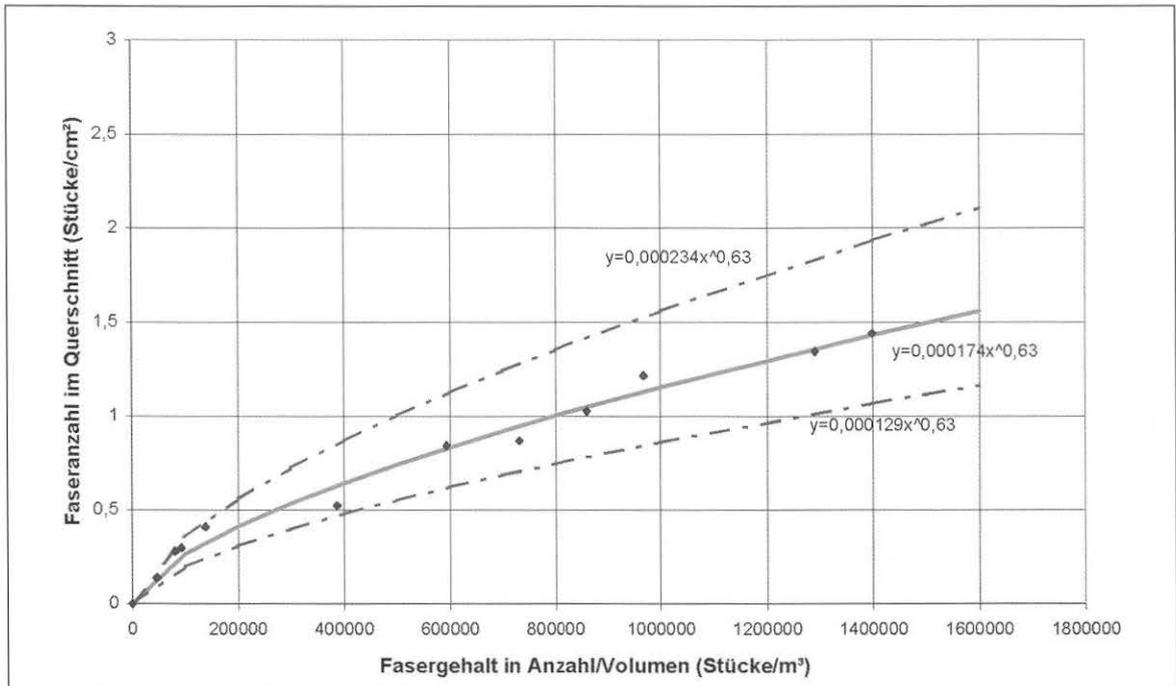


Bild 11: Beziehung zwischen Faseranzahl im Querschnitt (Stücke/m²) und Fasergehalt (Stücke/m³)

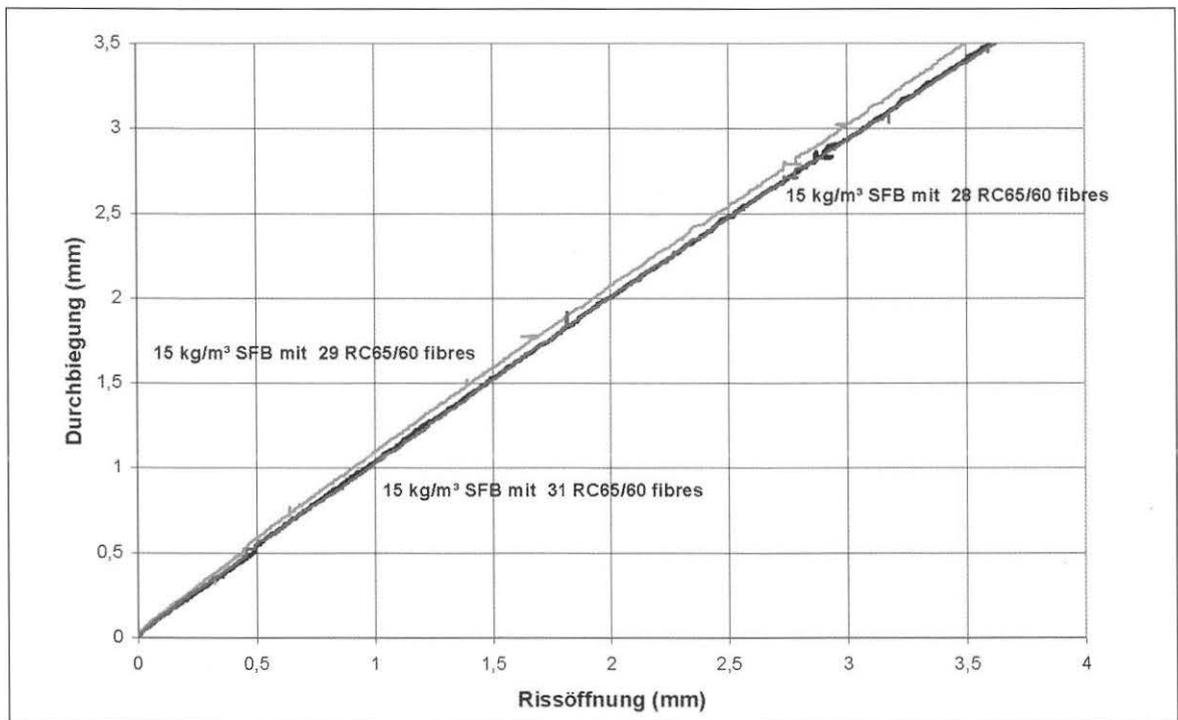


Bild 12: Gegenüberstellung der Durchbiegungs- Rißöffnungskurven mit unterschiedlicher Faseranzahl bei dem Fasergehalt von 15 g/m³ RC 65/60 Fasern

5. Beziehung der Durchbiegung - Rissöffnung des Biegebalkens

Es ist wichtig zu beurteilen, wie weit sich die Risse unter bestimmten Deformationen öffnen werden.

Das ist auch ein bedeutender Faktor für das Auswählen und den Einsatz der Stahlfasern. Manche Publikationen ([5], [9]) haben auch darüber diskutiert. Da die Versuche in [5] und [9] nach DBV-Merkblatt [10] durchgeführt waren, war eine syn-

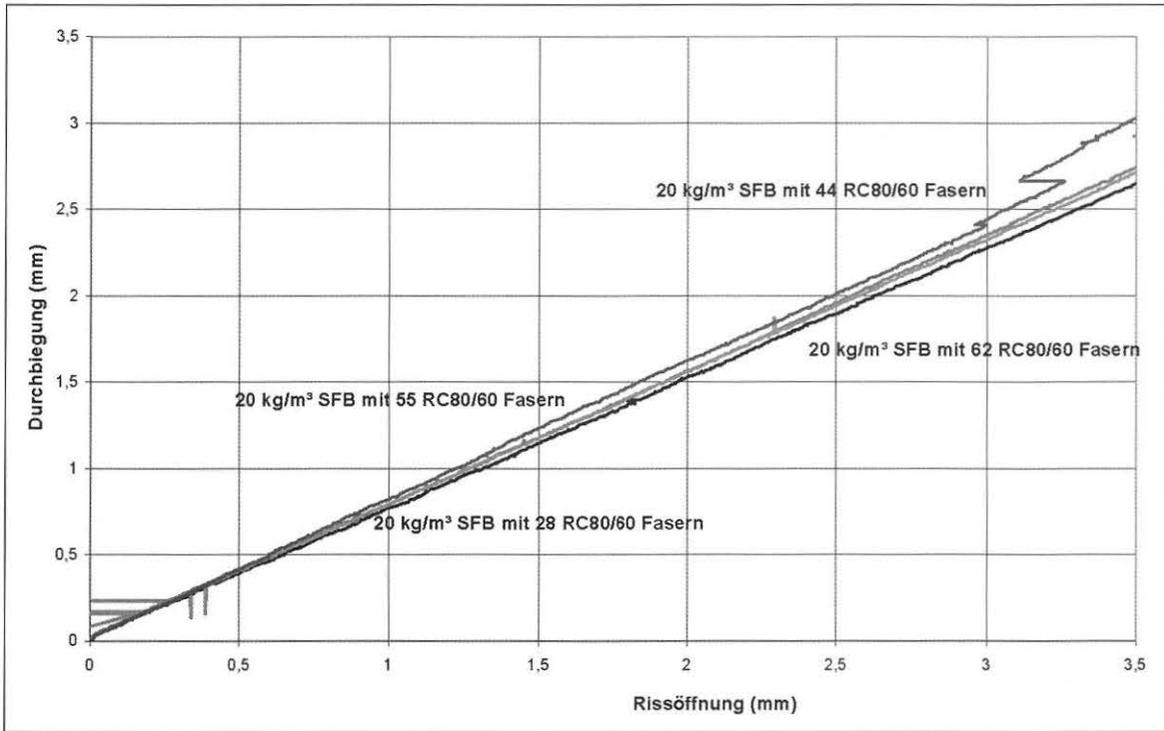


Bild 13: Gegenüberstellung der Durchbiegungs- Rissöffnungskurven mit unterschiedlicher Faseranzahl bei dem Fasergehalt von 20/m³ RC 80/60 Fasern

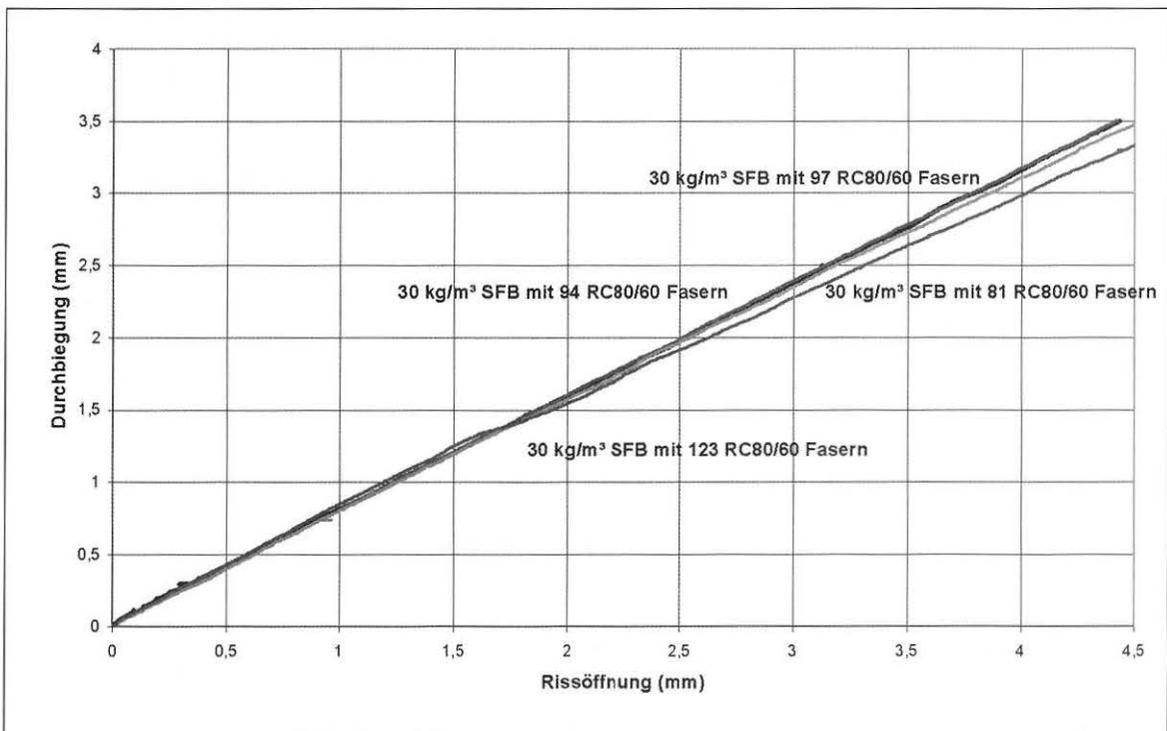


Bild 14: Gegenüberstellung der Durchbiegungs- Rißöffnungskurven mit unterschiedlicher Faseranzahl bei dem Fasergehalt von 30/m³ RC 80/60 Fasern

chrone Messung der Rissöffnung mit der Durchbiegung nicht möglich. Deswegen konnte ein genaues und aussagekräftiges Resultat nicht erreicht werden.

Einige Beispiele für die Beziehung zwischen Rissöffnung und Durchbiegung beim Biegezugversuch nach RILEM [2] sind in Bild 12, 13 und 14 [4] dargestellt.

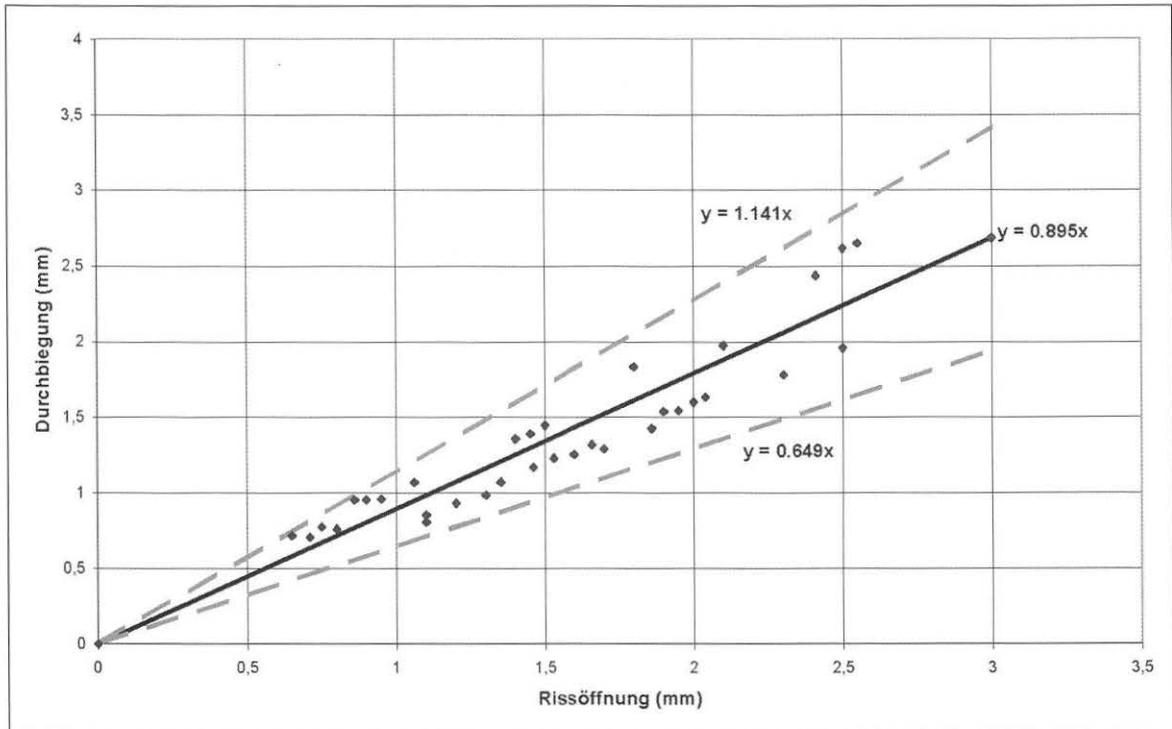


Bild 15: Beziehung zwischen der Durchbiegung und der Rissöffnung von Stahlfaserbetonbalken

Es ist ersichtlich, dass alle Durchbiegungs- Rissöffnungskurven linear verlaufen und ähnliche Gradienten haben. Der Mittelwert (k_m) der Gradienten der Durchbiegungs- Rissöffnungsgrade von 36 Balken und die Standardabweichung (s_{p1}) sind in Tabelle 3 aufgelistet. Die gewünschte Regressionsgleichung ist in Gl. (5) und im Bild 15 vorgestellt.

| | |
|-------------------------------------|---------|
| Mittelwert der Gradienten (k_m) | 0,8949 |
| Standardabweichung (s_{p1}) | 0,1231 |
| Streuung (s_{p1}/k_m) | 13,75 % |
| $k_m + 2s_{p1}$ | 1,141 |
| $k_m - 2s_{p1}$ | 0,649 |

Tab. 3: Mittelwert (k_m) der Gradienten und die Standardabweichung (s_{p1})

$$y = 0,895x \tag{5}$$

mit:

x: die Rissöffnung des geprüften Balken nach RILEM;
y: die Durchbiegung des geprüften Balken nach RILEM.

Nach Gl. (2) könnten der Vertrauensgrad und der Vertrauensintervall bestimmt werden. Die Gleichungen für die Grenze des Vertrauensintervalle von $y_i - 2s_{p1}$ und $y_i + 2s_{p1}$ können von Gl.(2) abgeleitet und im Bild 15 und in Gl. (6) und (7) dargestellt werden:

$$y = (0,895 + 2s_{p1})x \tag{6}$$

$$y = (0,895 - 2s_{p1})x \tag{7}$$

Das bedeutet, dass man mit Sicherheit von 95 % voraussagen kann, dass die Beziehung zwischen der Durchbiegung und der Rissöffnung der Gl. (5) entspricht und in der Zone zwischen Gl. (6) und Gl. (7) fallen muss. Die Wahrscheinlichkeit von $y_i - 2s_{p1} < y_0 < y_i + 2s_{p1}$ beträgt 95%.

6. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen stellen einen neuen Schritt zur realistischen Auswertung der Faserverteilung sowie des Verformungs- und Rissverhalten von Stahlfaserbeton bzw. des Stahlfaserspritzbetons dar. Die Analyse der Faserverteilung und der Faseranzahl im Versagensquerschnitt ist eine wichtige Voraussetzung für die unterschiedlichen Bemessungsmethoden des Stahlfaserbetons.

Nach dem ersten Riß im Balkenversuch zeigt Stahlfaserbeton mit einem Fasergehalt von 10 kg/m³ RC 80/60 Fasern positive Wirkungen auf das Arbeitsvermögen und keine große instabile Zone. Das Arbeitsvermögen ist abhängig vom Faseranzahl/Faserabstand im Versagensquerschnitt, besonders in der Zugzone der Querschnittes. Bei der ungleichmäßigen Faserverteilung in den Proben kann es vorkommen, dass die Proben mit niedrigerer Faser-

dosierung das bessere Arbeitsvermögen aufweisen als die Proben mit höherer Faserdosierung und weniger Faseranzahl mit dem gleichen Fasertyp im Querschnitt. Beim Balkenversuch gibt es deutliche Unterschiede im Arbeitsvermögen zwischen Stahlfaserbeton mit 10 und 20 kg/m³ Fasergehalt.

Die Versuche zeigen:

1. mit dem Netz von FE kann man die Faseranzahl, die Faserverteilung und den Faserabstand im Versagensquerschnitt klar und deutlich beschreiben. Die vorgestellten Analysen weisen eine neue Methode zur Einschätzung des Verhältnisses zwischen der Faserdosierung in der Mischung und der Faserverteilung im Balkenquerschnitt auf.
2. die Untersuchungen zeigen, dass ein lineares Verhältnis zwischen der Durchbiegung und der Rissöffnung des Balkens besteht. Die meisten Gradienten der Durchbiegungs- Rissöffnungsgrade liegen zwischen 0,65 und 1,14. Das ist ein nützliches und interessantes Ergebnis für die Forschung über Verformungs- und Rissverhalten des Stahlfaserbetons.

Die Bemessung von Stahlfaserbeton ist deshalb kompliziert, weil Ungewissheit und mangelnde Forschung über die Faseranzahl und die Faserverteilung im Querschnitt des Stahlfaserbetons herrschen. Wir haben vorliegende Forschungen auf zahlreiche Versuche, die sich auf 4 Typen von Drahtfaser beziehen, und auf eine statistische Analyse der Versuche aufgebaut. Natürlich ist es nur ein Ansatz. Es ist notwendig, immer neue Kenntnisse einfließen zu lassen und das Darstellungssystem der Faserverteilung zu vervollständigen. Versuche mit weiteren Proben und verschiedenem Fasertyp bezüglich der Faserverteilung im Versagensquerschnitt und zu unterschiedlichen Zeitpunkten wären für die Entwicklung der Bemessungstheorie sehr nützlich.

7. Literatur

- [1] **Maidl, B.:**
Stahlfaserbeton. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1991.
- [2] **RILEM TC-TDF:**
Test and design methods for steel fibre reinforced concrete, Recommendations. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, Vol. 33, January-February 2000, pp 3-5.
- [3] **Europäische Verband der Hersteller und Anwender von Spezialprodukten im Bauwesen:**
European Specification for Sprayed Concrete. EFNARC, 1996.
- [4] **Ding, Y.:**
Analyse of fibre piece/distance of RILEM beams (part 1-5). Research report, Department of Civil Engineering, University of Minho, 2001.
- [5] **Ding, Y.:**
Technologische Eigenschaften von jungem Stahlfaserbeton und Stahlfaserspritzbeton. Dissertation, 1998.
- [6] **Ding, Y.; Kusterle, W.:**
Die Eigenschaften jungen Faserspritzbetons. In: 6. Internationale Fachtagung, Spritzbeton Technologie in Innsbruck-Igls, 151-160, Februar 1999.
- [7] **Ding, Y.; Kusterle, W.:**
Untersuchungen über Äquivalente Biegezugfestigkeitsprüfung von Stahlfaserspritzbetonproben. Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe und Bauphysik der Universität Innsbruck.
- [8] **Ding, Y.; Kusterle, W.:**
Äquivalente Biegezugfestigkeitsprüfung und Stahlfasergehalt von naßgespritzten Stahlfaserbetonproben. Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe und Bauphysik der Universität Innsbruck.
- [9] **Feyerabend, B.:**
Zum Einfluss verschiedener Stahlfasern auf das Verformungs- und Rissverhalten von Stahlfaserbeton unter den Belastungsbedingungen einer Tunnelschale. Ruhr-Universität Bochum, Mitteilung Nr. 8, 1995.
- [10] **DBV-Merkblatt:**
Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau. 1996.