

Biaxiales Bruchverhalten von stahlfaserverstärktem Beton

Univ.-Prof. DI Dr. Elmar Karl Tschegg
TU Wien, E138, Labor für Materialwissenschaften, Wien

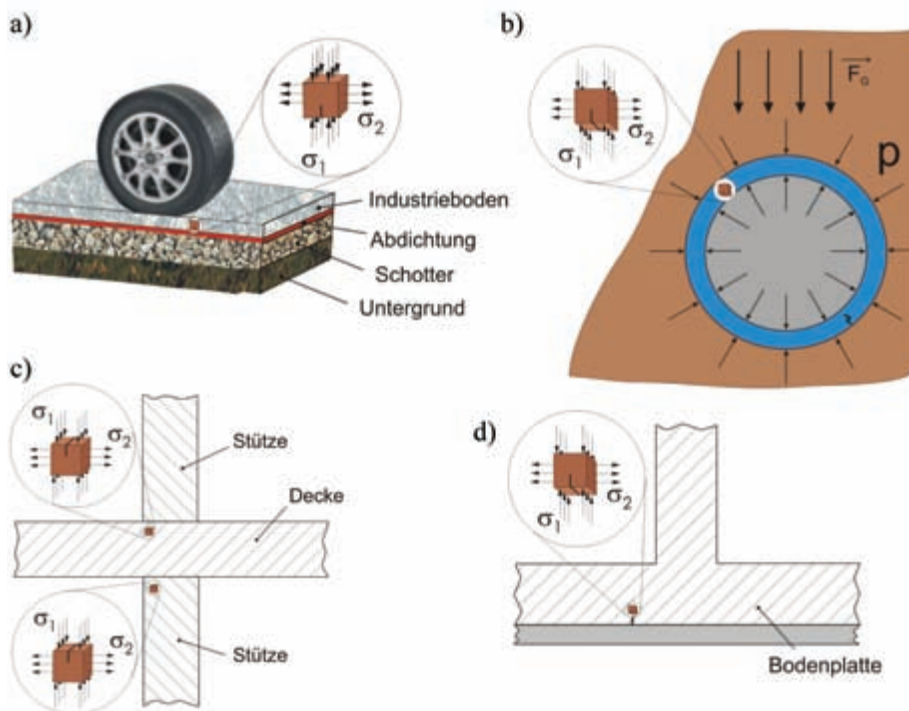


Abb. 1: a) Industrieboden, b) Tunnelröhren, Schächte, c) Stützen und Deckenteile, d) Bodenplatte

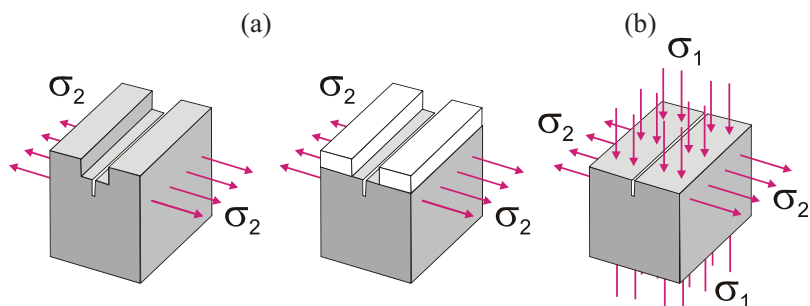


Abb. 2: (a) uniaxiale Prüfung eines Würfels (Zug – Spaltkraft), (b) biaxiale Prüfung mit der Belastung σ_1 (Druck) und σ_2 (Zug – Spaltkraft)

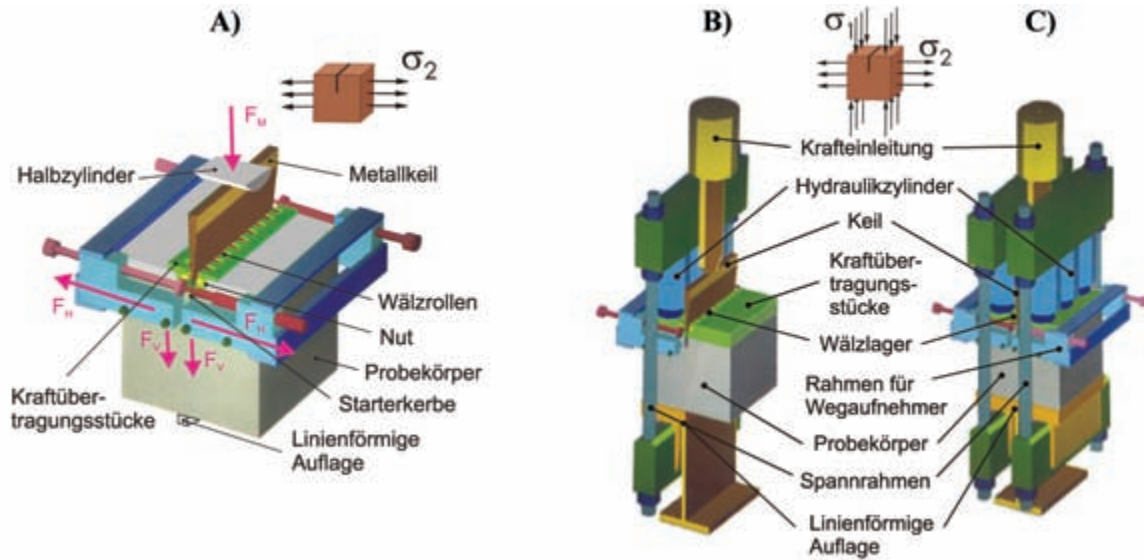
Für den Ingenieur ist es unumgänglich, dass er das Bruchverhalten von Faserbeton bei den tatsächlich auftretenden Beanspruchungen beurteilen und eine sichere und Werkstoff sparende Auslegung von Bauteilen ermöglichen kann. In der Baupraxis sind mehraxiale Spannungszustände zu erwarten,

wie z. B. bei Industrieböden, bei der Auskleidung von Kraftwerksstollen und von Tunnelröhren, bei dünnwandigen Bauteilen und Fassadenelementen im Tief- und Hochbau. In Abbildung 1 sind einige praktische Fälle einer biaxialen Belastung schematisch dargestellt.

Bisher sind die bruchmechanischen Werkstoffeigenschaften von Faserbetonen mit Biegebalkenmethoden (uniaxial) geprüft worden, wie es auch in den Richtlinien vorgeschlagen wird [1, 2]. Beim RILEM-Verfahren [1] werden die Balken (150 x 150 x 550 mm) gekerbt, während die Methode [2], die in Österreich verwendet wird, ungekerbte benutzt. Eine Biegebeanspruchung tritt auch bei der Keilspaltmethode nach Tschegg [3] auf, die zur Bruchprüfung von zementgebundenen Werkstoffen und Verbunden eingesetzt wird. Die Keilspaltmethode benötigt nur eine einfache mechanische (oder hydraulische) Druckprüfmaschine, und die Probenformen sind Würfel (Abb. 2a) oder Bohrkern, die im Vergleich zu den Balken viel kleiner und handlicher sind [4]. Dieses Patent wurde von nationalen und internationalen Wissenschaftlern übernommen [z. B. 5, 6, 7] und für Beton, Asphalt, Holz, Kunststoffe und Feuerfestwerkstoffe eingesetzt.

Mit der Biegebalken- und Keilspaltmethode werden die Proben nur uniaxial belastet. In der technischen Praxis ist jedoch die uniaxiale Beanspruchung eher ein Sonderfall. Die häufigsten Schadensfälle entstehen bei kombinierten Spannungszuständen, wie z. B. unter biaxialer, triaxialer und multiaxialer Belastung. Diese Arten der mehraxialen Prüfung können mit der Biegebalkenmethode nicht realisiert werden. Hingegen ermöglicht es eine Weiterentwicklung der Keilspaltmethode, den Rissverlauf in der Probe bei einer biaxialen Belastung zu prüfen [8, 9]. Der Würfel (oder Zylinder) wird druckbelastet und mit der Keilspaltmethode (Zugbelastung, Rissverlauf in Modus I) stabil gebrochen (siehe Abbildung 2b).

In Abbildung 3 ist die Keilspaltmethode nach Tschegg bei uniaxialer (A) und bei biaxialer Belastung (B, C) vereinfacht dargestellt. Bei der uniaxialen Keilspaltmethode



(A) wird auf der oberen Fläche des Würfels eine mittige rechteckige Kerbe ausgesägt oder auch durch zwei aufgeklebte Steinstücke hergestellt (Abb. 2a). In der rechteckigen Kerbe wird eine Starterkerbe eingeschnitten. In diese Kerbe werden die Kraftübertragungsstücke (mit Wälzlagern bestückt) eingelegt, in welche der schlanke Keil eingelegt wird. Die Kraft F_M von der Prüfmaschine wird über einen Halbzylinder auf den Keil übertragen, was zur Spaltung der Probe führt. Die Reibung zwischen Keil und Kraftübertragungsstücken ist vernachlässigbar klein ($< 1\%$ [4]), und die Spaltkraft F_H kann durch eine einfache Berechnung ermittelt werden [4]. Die vertikale Kraft F_v ist gering und stört den Bruchverlauf nicht [4].

Bei biaxialer Belastung wird der Würfel (oder Bohrkern) mit hydraulischen Zylindern durch Druck (σ_1) belastet, und außerdem wird eine Zugbelastung (σ_2) mit der Keilspaltmethode erzeugt. Abbildung 3 (B) zeigt den Aufbau der biaxialen Prüfeinrichtung. Der Würfel wird auf der linearen Auflage positioniert und Keil und Kraftübertragungsstücke werden montiert. Die linke Seite des Bildes (Abb. 3 B) zeigt den schon abgeschlossenen Aufbau. In Abbildung 3 C sind die zwei Spannrahmen mit den hydraulischen Zylindern auf dem Würfel montiert und die Halterung der zwei Wegaufnehmer (für die COD-Messung) ist in der Höhe der angreifenden Kraft des Keils befestigt. Die zwei Spannrahmen und die Teile der Keilspalteinrichtung [9] sind nur auf der Probe fixiert – damit ist die biaxiale Belastung realisiert.

Abb. 3: A) uniaxiale Keilspaltmethode nach Tschegg (1986), B) Aufbau der biaxialen Keilspaltmethode (1994) und C) vollständige Anordnung der biaxialen Keilspaltmethode

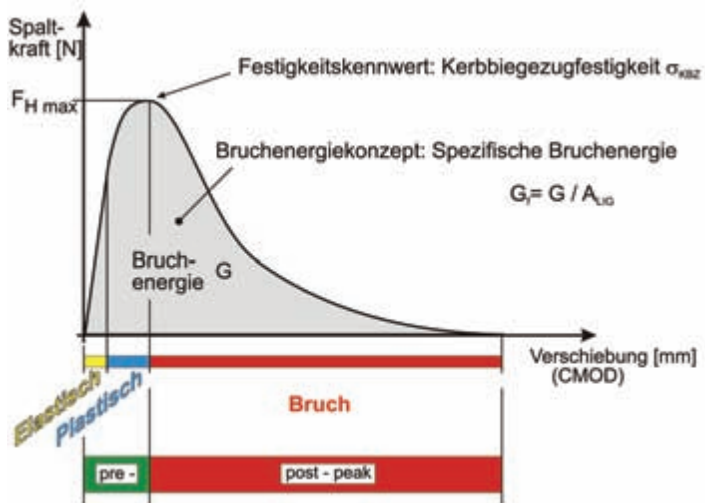


Abb. 4: Last-Verschiebungskurve; Anstieg der Kurve (a), die elastischen Eigenschaften; die Kerbiegezugfestigkeit (b); die Bruchenergie (c), der Risswiderstand. Alle Grafiken: © Univ.-Prof. DI Dr. Elmar Karl Tschegg

Aus der Last-Verschiebungskurve können mehrere wichtige und unabhängige Werte bestimmt werden (siehe Abbildung 4). Die Fläche unter der Kurve ist ein Maß für die Bruchenergie und stellt den Risswiderstand dar – den wichtigsten Materialwert der Bruchmechanik.

In der vorliegenden Untersuchung bestanden die Proben aus Beton der Qualität C25/30 mit einem Maximalrundkorn von 16 mm. Die Stahlfasern und die Stahlspäne weisen folgende Dimensionen und Volumsgehalte auf: Stahlfasern HAREX \varnothing 0,8 mm (Durchmesser), 60 mm (Länge) und 0,5 % (Volums-

gehalt), Stahlspäne SS I \square 2 mm x 0,1 mm, 16 mm, 0,5 % bzw. SS II L 2 mm x 0,1 mm, 32 mm, 0,5 % und 1 %. Die Würfelmaße der Proben betragen 150 x 150 x 130 mm, und ihr Prüfalter war 28 Tage.

Im experimentellen Programm wurden die Last-Verschiebungskurven bei einem Druckverhältnis $\sigma_1/f_c = 0\%$ (uniaxial), 15 %, 30 %, 45 %, 50 %, 60 % und 70 % bestimmt ($\sigma_1 =$ aktueller Druck, $f_c =$ Druckfestigkeit des Faserbetons). Aus diesen Messergebnissen stammen die folgenden Abbildungen,

die diskutiert werden.

Als Beispiel wird in Abbildung 5 die Last-Verschiebungskurve (HAREX Ø 0,8mm, 60 mm, 0,5 %) in Abhängigkeit von der Rissöffnung (CMOD) dargestellt. Bei uniaxialer Belastung ($\sigma_1/f_c = 0$) weicht die Kurve mit größerer Rissbreite nur wenig vom Maximum ab. Die Fläche unter der Kurve ist groß, die Bruchenergie und damit der Risswiderstand hoch. Werden die Würfel bei biaxialer Belastung von $\sigma_1/f_c = 15\%$ geprüft, sinkt die Kurve extrem zu geringen Werten, was auf eine geringe spezifische Bruchenergie bzw. einen geringen Risswiderstand hinweist. Bei weiterer Erhöhung der biaxialen Belastungen ($\sigma_1/f_c > 15\%$) sinkt dieser Wert weiter ab, aber die Abstände zwischen den Kurven werden geringer.

In der Abbildung 6 sind die σ_{2max} -Werte bei Rundkorn ohne Fasern (wird in Zukunft mit „Rundkorn“ bezeichnet), Harex-Fasern (Ø 0,8 mm, 60 mm, 0,5 %) und für Stahlspäne I (SS I, □ 2 mm x 0,1 mm, 16 mm, 0,5 %) in Abhängigkeit von der normierten Druckspannung σ_1/f_c aufgetragen. Werden die Kerbzugfestigkeiten zur bruchmechanischen Bewertung herangezogen, so ändert sich bei uniaxialer und biaxialer Belastung nur wenig. Beim Rundkorn bleibt der σ_{2max} -Wert bei niedrigen und hohen normierten Druckwerten praktisch gleich. Bei den Faserbetonen sinkt der Wert bei biaxialer Belastung im Vergleich zum uniaxialen Fall nur wenig ab. Auch die verschiedenen Faserlängen (Harex 60 mm und SS I 16 mm) zeigen keinen markanten Effekt. Erst über einer normierten Druckspannung von 80 %, die aber in der Baupraxis nicht angestrebt wird, fallen diese Werte ab.

Die spezifische Bruchenergie wird in Abhängigkeit von der normierten Druckspannung aufgetragen (siehe Abbildung 7), wobei als Parameter das Rundkorn, Harex-Fasern und Stahlspäne SS II □ 2 mm x 0,1 mm, 32 mm und 1 % angegeben sind. Bei uniaxialer Belastung beträgt die spezifische Bruchenergie bei Rundkorn etwa 150 N/m (J/m^2), bei Stahlspänen ca. 1.500 N/m und bei Harex-Fasern ca. 3.100 N/m. Die Verhältnisse der spezifischen Bruchenergien (bzw. Risswiderstände) von Rundkorn :

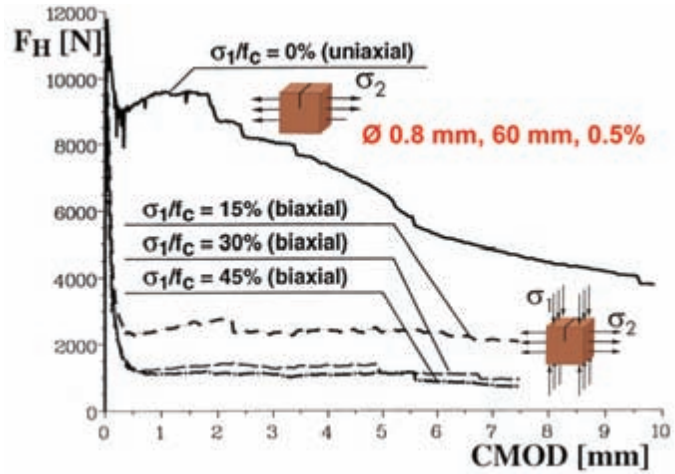


Abb. 5: Last-Verschiebungsdiagramm für HAREX Ø 0,8 mm, Länge 60 mm und Volumengehalt von 0,5 %

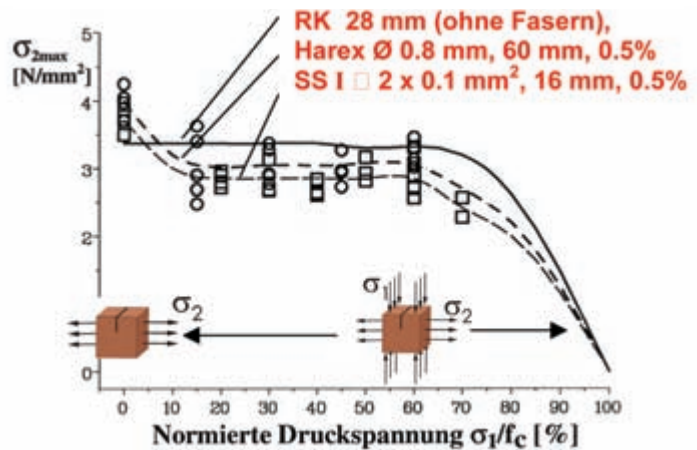


Abb. 6: Kerbzugfestigkeit σ_{2max} in Abhängigkeit der normierten Druckspannung σ_1/f_c (f_c ... Druckfestigkeit des Faserbetons)

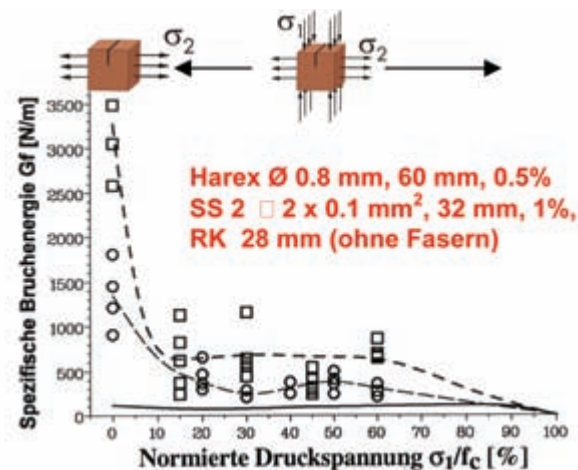


Abb. 7: Bruchenergie G_f in Abhängigkeit von der normierten Druckspannung σ_1/f_c (f_c ... Druckfestigkeit des Faserbetons)

Alle Grafiken: © Univ.-Prof. DI Dr. Elmar Karl Tschegg

Stahlspänen : Harex-Fasern betragen ca. 1 : 10 : 20.

Der Risswiderstand des Faserbetons ist im Vergleich zum Rundkorn mindestens eine Potenz höher. Bei biaxialer Belastung ändert sich aber die Bruchenergie bei Faserbeton grundlegend. Bei einer normierten Druckspannung von 15–20 % liegen die spezifischen Bruchenergiewerte nur mehr bei etwa bei 700 N/m und bei weiteren höheren Druckspannungswerten bei 500 N/m. Die Verhältnisse bei biaxialer Belastung betragen dann 1 : 3 : 5, was einen wesentlichen Unterschied zur uniaxialen Beanspruchung darstellt. Der Risswiderstand ist somit viel kleiner geworden und kommt dem Beton mit Rundkorn um vieles näher.

Eine andere Darstellung der gewonnenen spezifischen Bruchenergien ist in Abbildung 8 zusammengestellt. Statt der spezifischen Bruchenergie wird die normierte spezifische Bruchenergie aufgetragen, d. h. die spezifische Bruchenergie G_f wird im Verhältnis zur uniaxialen spezifischen Bruchenergie G_{f0} berechnet (G_f/G_{f0} in [%]). Die niedrigen Werte liegen bei 15–20 % und stammen von Betonen mit langen (Harex-Fasern) und m. vielen Fasern (SS II \square 2 mm x 0,1 mm., 32 mm, 1 %). Höhere Werte (bei 40 %) werden bei den Stahlspänen (SS II \square 2 mm x 0,1 mm, 32 mm, 0,5 %, bzw. SS I \square 2 mm x 0,1 mm, 16 mm, 0,5 %) erreicht, die kürzer sind und einen geringeren Volumsanteil ausmachen. Im Bereich von 20–60 % steigt die normierte spezifische Bruchenergie bei Stahlspänen an, die rauer sind als die Harex-Fasern und daher bei der Bruchprüfung mehr Reibung zwischen Zementstein und Fasern zeigen. In [10] wurde das uniaxiale und biaxiale Bruchverhalten bei Polypropylenfaserbetonen geprüft. Sie sollen daher als Vergleich zu den Stahlfaserbetonen angeführt werden. Der Kurvenverlauf ist ähnlich den Betonen mit Stahlspänen mit einer Länge von 16 und 32 mm und wenig Fasern.

Der obere Teil der Abbildung 8 zeigt schematisch eine Vorstellung zur Schädigung und Rissbildung in Faserbeton, was in [10] für Polypropylenfaserbeton beschrieben ist und mit einem mathematischen Modell untermauert wurde. Bei der uniaxialen Be-

lastung bildet sich eine Prozesszone aus, die als groß und zylinderförmig dargestellt ist. In dieser Prozesszone kommt es zur Rissbildung und Schädigung, die für die Bruchenergie verantwortlich ist. Bei der biaxialen Belastung bildet sich eine Prozesszone, die kleiner und linsenförmig ist, was die spezifische Bruchenergie bzw. den Risswiderstand extrem reduziert. Stark vereinfacht dargestellt kann Folgendes angeführt werden: Eine Druckkraft belastet den Würfel. Beim Prüfen erhöht sich die Reibung zwischen Faser und Betonmatrix. Wenn die Fasern reißen, werden die Auszieherte „kürzer“. Die Prozesszone wird dann kleiner und damit sinkt auch die Bruchenergie. Erst bei höheren normierten Drücken entstehen zusätzliche Risse in der Probe, die zur Bruchenergie beitragen.

Die spezifischen Bruchenergien bei biaxialer Belastung bei Faserbeton stellen in der Materialentwicklung und in der Baupraxis einen wichtigen Teil dar. Solche bruchmechanische Werte sollten daher unbedingt geprüft und das Fasermaterial optimiert werden. Dabei sollte man die Gestalt und Länge, den Werkstoff selbst (duktil oder spröde), den Faserquerschnitt und den Volumsgehalt berücksichtigen. Bei einem gezielten Forschungsaufwand kann die Bruchenergie bei biaxialer Belastung erhöht und diese den uniaxialen Werten angepasst werden – Faserbeton hat daher Zukunft!

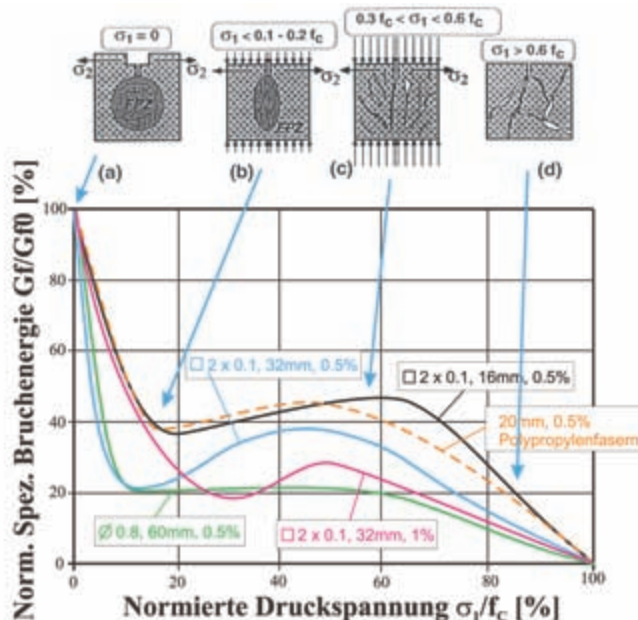


Abb. 8: Normierte spezifische Bruchenergie G_f/G_{f0} in Abhängigkeit von der normierten Druckspannung (G_{f0} ... bei uniaxialer Belastung $\sigma_1/f_c = 0$)

Literatur

1. RILEM TC 162-TDF: Test and Design Methods for Steel Fiber Reinforced Concrete, Material and Structures, Vol. 35, Nov. 2002, S. 579–582.
2. Österr. Vereinigung f. Beton- und Bauwerke, (2002), Richtlinie Faserbeton, vom März 2002, F. Csöngöi GmbH, Wien.
3. Tschegg, E. K., (1986): Prüfeinrichtung zur Ermittlung von bruchmechanischen Kennwerten sowie hierfür geeignete Prüfkörper, Patentschrift Nr. 390328, 31.1.1986, Österreich.
4. Tschegg, E. K., (1991): New Equipment for Fracture Tests on Concrete, Materials Testing (Materialprüfung), 33, S. 338–342.
5. Brühwiler, E., (1988): Bruchmechanik von Stau-mauerbeton unter quasistatischer und erdbeben-dynamischer Belastung, Dissertation EPFL, Lausanne, Schweiz.
6. Wittmann, F. H.; Brühwiler E., (1990): The Wedge Splitting Test, a New Methode of Performing Stable Fracture Mechanics Tests, Engineering Fracture Mechanics Vol. 35, No. 1/2/3, S. 117–125.
7. Linsbauer, H. N., (1986): Das Tragverhalten von Betonbauwerken des konstruktiven Wasserbaues – Einfluss von Rissbildung, Habilitationsschrift, TU Wien.
8. Elser, M.; Tschegg E. K., (1994): Einrichtung zur biaxialen Bruchprüfung, Patentschrift Nr. 4001 578, Österreich.
9. Tschegg, E. K.; Elser, M.; Stanzl-Tschegg, S. E., (1995): Biaxial Fracture Tests on Concrete – Development and Experience, Cement & Concrete Composites, 17, S. 57–75.
10. Elser, M.; Tschegg, E. K.; Stanzl-Tschegg, S. E.: Fracture Behaviour of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete – Experimental Investigation, Composite Science and Technology, 56 (1996), 933–945.

11. Elser, M.; Tschegg, E. K.; Finger, R.; Stanzl-Tschegg, S. E., (1996): Fracture Behaviour of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete – Models and Computer Simulation, Composite Science and Technology, 56, S. 947–956.