



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Institut für Baustatik und Konstruktion

# Trag- und Verformungsverhalten von faserbewehrtem Beton unter Schubbeanspruchung

Schlussbericht

ETH Zürich

Prof. Dr. Walter Kaufmann  
Nicola Gehri

cemsuisse-Projekt 202007 – März 2024

Diese Forschungsarbeit wurde durch cemsuisse, Verband der Schweizerischen Cementindustrie mitfinanziert

# Inhaltverzeichnis

- 1. Zusammenfassung ..... 1**
- 2. Projektvoraussetzungen und -ziele..... 1**
  - 2.1. Problemstellung..... 1
  - 2.2. Ziele ..... 2
  - 2.3. Allgemeine Bemerkung..... 2
- 3. Stand der Technik..... 3**
- 4. Experimentelle Arbeiten ..... 3**
  - 4.1. Versuchsprogramm ..... 3
  - 4.2. Resultate ..... 5
    - 4.2.1. Last–Verformungsverhalten ..... 5
    - 4.2.2. Rissverhalten..... 6
    - 4.2.3. Verhalten der Längsstabbewehrung in FS1 und FS2 ..... 7
- 5. Modellierung ..... 8**
  - 5.1. Mechanisches Modell des Last–Verformungsverhalten..... 8
  - 5.2. Bemessungsmodell..... 9
- 6. Schlussfolgerungen und Bedeutung für die Praxis ..... 11**
- 7. Empfehlungen für künftige Forschungsarbeiten ..... 12**
- 8. Finanzielles ..... 13**
- Literatur ..... 14**

# 1. Zusammenfassung

Es ist allgemein anerkannt, dass die Beigabe von Fasern das mechanische Verhalten von Stahlbeton verbessert, und dass Fasern somit eine herkömmliche Stabbewehrung teilweise ersetzen können. Der Ersatz der manuell verlegten Bewehrungsstäbe durch eine entsprechende, dem Beton beigemischte Menge an Fasern kann zudem erhebliche wirtschaftliche und ökologische Vorteile haben. Aufgrund des unter Zugbeanspruchung oft ungünstigen Entfestigungsverhaltens nach dem Reißen des Betons wird faserbewehrter Beton heute jedoch hauptsächlich in statisch wenig beanspruchten oder untergeordneten Bauteilen eingesetzt. Andererseits haben Fasern aber ein beachtliches Potenzial als Querkraftbewehrung: Zahlreiche Versuche haben gezeigt, dass spröde Schubversagen in Balken ohne herkömmliche Querkraftbewehrung bereits durch die Beigabe einer moderaten Fasermenge verhindert werden können. Das theoretische Verständnis der Wirksamkeit von Fasern als Querkraftbewehrung ist jedoch noch begrenzt und es gibt nur wenige für reale Tragwerke repräsentative Versuche.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde das Schubtragverhalten von faserbewehrtem Beton durch experimentelle und theoretische Untersuchung der zugrunde liegenden mechanischen Phänomene untersucht. Zu diesem Zweck wurden grossmassstäbliche Schubversuche an faserbewehrten Betonscheiben, die repräsentativ für Trägerstegelemente sind, im Large Universal Shell Element Tester der ETH Zürich durchgeführt. Die Versuche wurden mit modernster Messtechnik instrumentiert, welche tiefgreifende Erkenntnisse über das Tragverhalten von schubbeanspruchten faserbewehrten Betonbauteilen lieferte. Die gewonnenen Resultate bildeten die Grundlage für die Entwicklung eines mechanisch fundierten Modells für (in der Ebene) schubbeanspruchten faserbewehrten Beton und die Herleitung praktischer Bemessungsempfehlungen, um die Anwendung von faserbewehrtem Beton für künftige tragende Bauteile zu fördern.

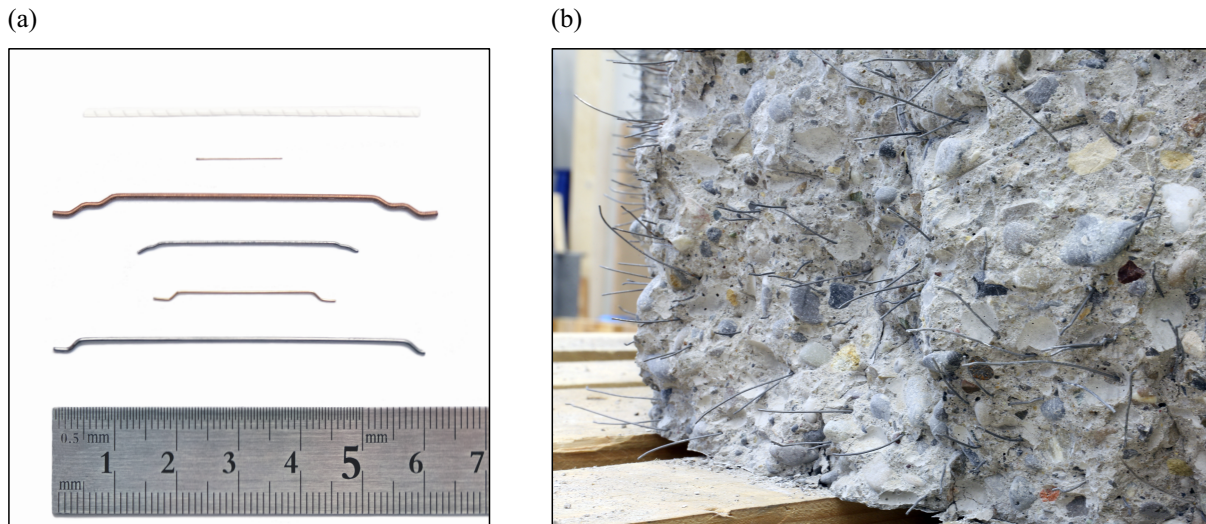
## 2. Projektvoraussetzungen und -ziele

### 2.1. Problemstellung

Durch die Beigabe von Fasern zum Beton wird in vielen Fällen der mechanische Widerstand erhöht und ein günstiges Rissverhalten erreicht [1]. Seit mehr als 50 Jahren werden umfangreiche Forschungsarbeiten zu faserverstärktem Beton durchgeführt, um dessen Potenzial für praktische Anwendungen zu untersuchen [1], [2]. Dabei wurden verschiedene Konzepte bezüglich Fasermaterial und -geometrie (siehe Abbildung 1a), Betonzusammensetzung und Herstellungsverfahren entwickelt [1], [3].

Der Ersatz von Bewehrungsstäben (im Folgenden als «Stabbewehrung» bezeichnet) durch eine entsprechende Dosierung von Fasern, die ein äquivalentes mechanisches Verhalten aufweisen, kann erhebliche Vorteile haben [1]. Die Verwendung von faserbewehrtem Beton anstelle von herkömmlichem Stahlbeton erspart das manuelle Verlegen der Bewehrung, da die Fasern direkt dem Beton beigemischt werden [1], [4]. Faserbewehrter Beton ermöglicht zudem innovative Bauverfahren wie die digitale Fertigung mit Beton, bei der dünnwandige Bauteile mit optimierter Geometrie – in der Regel ohne Schalung – mittels 3D-Druck hergestellt werden [5]. Der Einsatz von faserbewehrtem Beton beschleunigt folglich die Bauausführung und ermöglicht ressourcenschonende freie Geometrien mit wesentlich geringerem Aufwand [1], [2], [4], [6] und stellt damit einen bedeutenden Schritt in Richtung einer nachhaltigeren Bauweise dar [5].

In der Baupraxis beschränkt sich der Einsatz von faserbewehrtem Beton heute jedoch hauptsächlich auf Bauteile mit geringen Tragwerksanforderungen [1]. Die grössten Herausforderungen beim Einsatz von faserbewehrtem Beton für tragende Bauteile liegen in der schlechten Verarbeitbarkeit von Frischbeton mit hohen Fasergehalten [2], [3] und dem oft unzureichenden Last-Verformungsverhalten von moderat bis stark beanspruchten faserbewehrten Betonelementen mit praxistauglichen Faserdosierungen [3], [4], [7]. Während faserbewehrter Beton unter Zugbeanspruchung typischerweise ein entfestigendes Verhalten zeigt, sind Fasern insbesondere als Querkraftbewehrung vielversprechend: Mehrere experimentelle Studien, die das Schubtragverhalten von faserbewehrten Betonbalken ohne herkömmliche Querkraftstabbewehrung (Bügelbewehrung) untersuchten, haben bestätigt, dass bereits moderate Fasergehalte ein sprödes Schubversagen verhindern und ein duktileres Biegeversagen sicherstellen können [2].



**Abbildung 1** Faserbewehrter Beton: (a) typische kommerzielle Fasertypen; (b) Bruchfläche einer unter Schub geprüften faserbewehrten Betonscheibe.

Das theoretische Verständnis der zugrunde liegenden mechanischen Phänomene ist jedoch noch begrenzt, und es gibt noch kein etabliertes Modell, auf das sich die Fachwelt geeinigt hat [2]. Bestehende Modelle für das Schubtragverhalten von faserbewehrten Betonbauteilen beruhen auf (halb-)empirischen Grundlagen, die häufig anhand von Experimenten kalibriert wurden, die hinsichtlich ihrer Grösse, Beanspruchung und statischem System nicht repräsentativ für reale Tragwerke sind [4], [8]. Daher sind diese Modelle mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, und die daraus abgeleiteten Bemessungsempfehlungen sind berechtigterweise restriktiv [2], [4]. Um das Potenzial von Fasern als Querkraftbewehrung voll ausschöpfen zu können, ist es somit unerlässlich, ein umfassenderes Verständnis des mechanischen Verhaltens von schubbeanspruchten faserbewehrten Betonbauteilen zu gewinnen [2].

## 2.2. Ziele

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, das Wissen über das Schubtragverhalten von faserbewehrtem Beton zu erweitern, indem die zugrunde liegenden mechanischen Phänomene durch eine Kombination aus experimentellen und theoretischen Forschungsarbeiten untersucht werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden in einem ersten Schritt sechs Grossversuche an faserbewehrten Scheibenelementen durchgeführt, die repräsentativ für Stege von Trägern sind. Durch den Einsatz modernster Messsysteme konnten wertvolle Einblicke in das Tragverhalten der Prüfkörper gewonnen werden. Das für faserbewehrten Beton besonders relevante Rissverhalten wurde mittels einer verfeinerten Messtechnik zur automatisierten Erfassung des Rissbilds und Messung der Rissuferverschiebung anhand von Daten aus digitaler Bildkorrelationsmessungen analysiert [9]–[11]. Zudem wurden die quasi-kontinuierlichen Dehnungen und Krümmungen der Längsstabbewehrung durch verteilte faseroptische Dehnungsmessungen erfasst [11]–[13].

Die dabei gewonnenen experimentellen Erkenntnisse tragen zur Entwicklung eines mechanisch fundierten Modells für schubbeanspruchten faserbewehrten Beton bei, welches nicht nur die eigenen Experimente, sondern auch die verfügbaren Testresultate aus der Literatur zuverlässig vorhersagen kann. Abschliessend wurde anhand von Parameterstudien des entwickelten und validierten Modells ein vereinfachtes, praxistaugliches Schubmessmodell hergeleitet, das den Einsatz von faserbewehrtem Beton für künftige tragende Bauteile fördern soll.

## 2.3. Allgemeine Bemerkung

Dieser gezielt kurz gehaltene Bericht bietet einen Überblick und eine Zusammenfassung des Projekts, wobei insbesondere auf die Problemstellung, die Ziele sowie die durchgeführten experimentellen und theoretischen Arbeiten eingegangen wird und die wichtigsten Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse beschrieben werden. Ausführlichere Projektdetails befinden sich in der Dissertation des Zweitautors, die gegenwärtig begutachtet wird, und in den darin enthaltenen wissenschaftlichen Publikationen [14]–[16].

### 3. Stand der Technik

Unter Zugbeanspruchung zeigt faserbewehrter Beton mit wirtschaftlichen und praktischen Fasergehalten typischerweise ein Entfestigungsverhalten nach dem Reissen des Betons, wobei die Fasern sukzessive aus der Betonmatrix herausgezogen werden [1], [3]. Ein solches Materialverhalten bewirkt typischerweise eine Verformungslokalisierung in einzelnen Rissen, was zu sprödem Versagen führen kann [3]. Diese mangelnde Duktilität ist der Hauptgrund dafür, dass ausschliesslich mit Fasern bewehrter Beton heute im Bauwesen kaum verwendet wird: Sofern nicht sehr hohe, unpraktische Fasergehalte verwendet werden, können Fasern zur Gewährleistung der Tragsicherheit unter Zugbeanspruchung die herkömmliche Stabbewehrung nicht ersetzen, da sie ein Versagen bei Rissbildung nicht verhindern können [1].

Fasern haben jedoch ein grosses Potenzial als Querkraftbewehrung, da bereits ein relativ geringer Widerstand der Querbewehrung ausreicht, um ein sprödes Schubversagen zu verhindern, wenn eine ausreichende herkömmliche Längsbewehrung vorhanden ist [4]. Bei konventionellen Stahlbetonträgern spiegelt sich dies in der Tatsache wider, dass die von internationalen Bemessungsnormen geforderte Mindestquerkraftbewehrung (bestehend aus Bügelstäben) typischerweise weniger als ein Viertel der für ein duktilen Verhalten bei direktem Zug erforderlichen Bewehrung beträgt [4], [17], [18]. Folglich ist es möglich, eine Zugfestigkeit zu gewährleisten, die der geforderten Mindestquerkraftbewehrung entspricht, indem moderate Faserdosen verwendet werden [4].

Diverse experimentelle Studien zum Schubtragverhalten von faserbewehrten Bauteilen ohne herkömmliche Querkraftbewehrung zeigen in der Tat, dass bereits ein moderater Fasergehalt (mit im Zugversuch entfestigendem Verhalten) ausreichen kann, um eine ausreichende Duktilität des Tragwerks insgesamt zu gewähren und somit eine herkömmliche Querkraftbewehrung zu ersetzen. Insbesondere Stahlfasern mit Endhaken, die dem Beton beigemischt werden, haben eine hohe mechanische Wirksamkeit und Effizienz gezeigt [1], [19]. Allerdings wurden bisher überwiegend einfache Balkenversuche an faserbewehrten Trägern mit herkömmlicher Längsstabbewehrung durchgeführt (z.B. [20]–[25]), und die auf dieser Basis entwickelten Modelle sind (semi-)empirischer Natur. Da solche Experimente hinsichtlich ihrer Bauteilgrösse und Beanspruchung häufig nicht repräsentativ für reale Tragwerke sind, und die (semi-)empirischen Modelle das tatsächliche Tragverhalten nur unzureichend beschreiben, sind die darauf basierenden, heute verfügbaren Bemessungsregeln mit grosser Unsicherheit behaftet.

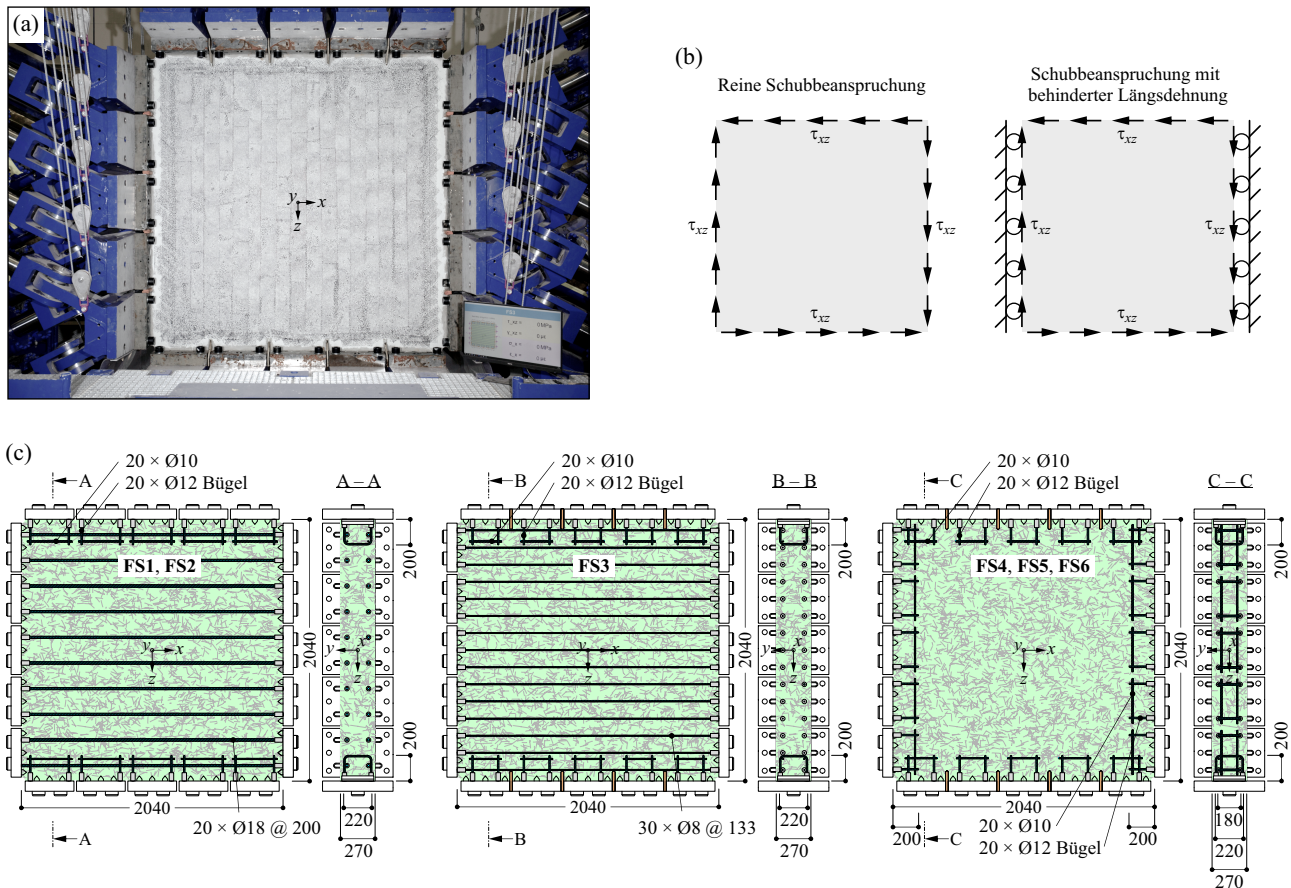
Um faserbewehrtem Beton im konstruktiven Ingenieurbau zum Durchbruch zu verhelfen, ist daher die Entwicklung mechanisch fundierter, experimentell hinreichend validierter Modelle, die das tatsächliche Tragverhalten zuverlässig erfassen, unerlässlich. Dazu sind grossmassstäbliche Scheibenversuche notwendig, die verlässliche und aussagekräftige Resultate zum Schubtragverhalten realer Tragwerke liefern.

## 4. Experimentelle Arbeiten

Nachfolgend werden die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Versuche sowie die wichtigsten experimentellen Ergebnisse vorgestellt. Detailliertere Informationen sind in [14] (frei zugänglich) zu finden.

### 4.1. Versuchsprogramm

Es wurden sechs Grossversuche an schubbeanspruchten stahlfaserbewehrten Betonscheiben mit den Abmessungen  $2,00\text{ m} \times 2,00\text{ m} \times 0,27\text{ m}$  durchgeführt, die repräsentativ für Stege von Trägern sind. Die sechs Scheibenelemente sind als FS1–FS6 bezeichnet (für «Faserbewehrter Beton unter Schubbeanspruchung») und wurden im Large Universal Shell Element Tester (LUSSET) der ETH Zürich geprüft (Abbildung 2a) [26]. Die Versuche unterschieden sich im volumetrischen Stahlfasergehalt, im Längsstabbewehrungsgehalt und der Beanspruchung (Abbildung 2b und c). Alle Versuche enthielten keine herkömmliche Querkraftstabbewehrung. Fünf Versuche (FS1–FS5) wurden an Elementen aus normalfestem Beton der Sorte C30/37 mit einem Grösstkorn von 16 mm durchgeführt, wobei praxisübliche Dramix® 3D 80/60 BG Stahlfasern mit Endhaken der Länge von 60 mm und Durchmesser von 0.75 mm der Firma NV Bekaert SA [27] beigemischt wurden. Es wurden moderate und praxistaugliche Fasergehalte von 40, resp. 60 kg/m<sup>3</sup> verwendet. Ziel dieser Versuche war es, das Potenzial von Fasern als Ersatz für die herkömmliche Mindestquerkraftbewehrung in Stegen von Trägern zu untersuchen. Die minimale Faserdosierung von 40 kg/m<sup>3</sup> war so ausgelegt, dass sie einen äquivalenten



**Abbildung 2** Grossversuche an faserbewehrten Betonscheiben: (a) Prüfkörper im Large Universal Shell Element Tester (LUSSET) an der ETH Zürich; (b) Beanspruchung; (c) Geometrie und Bewehrung der sechs Prüfkörper.

Querkraftwiderstand einer herkömmlichen Querkraftbewehrung mit einem Bewehrungsgehalt von 0,2% ergab. Dieser Bewehrungsgehalt wurde von Beck [28] als Mindestquerbewehrung in Stegen von grossen Trägern ohne Fasern vorgeschlagen. Alle Bewehrungsstäbe waren aus geripptem Stahl der Klasse B500B. Das Bewehrungslayout kann der Abbildung 2c entnommen werden.

Zusätzlich wurde ein Versuch an einer Scheibe aus Ductal® Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) der Klasse UA gemäss der SIA Richtlinie 2052 [29] durchgeführt, um das Tragverhalten im Vergleich zu den Prüfkörpern aus normalfestem faserbewehrtem Beton zu beurteilen. Parallel dazu wurden Materialprüfungen durchgeführt, um die relevanten Materialeigenschaften zu bestimmen.

Um das grundlegende mechanische Verhalten der Scheibenelemente aus faserbewehrtem Beton zu untersuchen und eine experimentelle Grundlage für die Entwicklung und Validierung mechanischer Modelle zu schaffen, wurde eine homogene Beanspruchung in der Ebene gewählt. Dabei brachten alle 5 Joche pro Elementrand die gleiche Kraft auf das Scheibenelement auf. Vier Prüfkörper wurden auf homogenen Schub mit behinderter Längsverformung beansprucht, entweder ohne oder mit geringer verteilter Längsstabbewehrung, wodurch bei steigender Beanspruchung ein homogener Längsdruck erzeugt wurde (Abbildung 2b). Diese Konfiguration wurde gewählt, um ein Stegelement eines typischen Spannbetonträgers darzustellen, bei dem (i) die Längsstabbewehrung hauptsächlich in den Gurten konzentriert ist und (ii) die steifen (vorgespannten) Gurte die Längsverformungen des Stegs kontrollieren. Die beiden anderen Prüfkörper wurden auf reinen homogenen Schub beansprucht, waren aber mit einer signifikanten über die Elementhöhe verteilten Längsstabbewehrung versehen (Abbildung 2c). Diese Konfiguration wurde gewählt, um den Vergleich mit früheren Versuchen an anderen Forschungseinrichtungen zu erleichtern, bei denen eine Längsstabbewehrung vorgesehen war, anstatt die Längsverformungen der Elemente zu kontrollieren. Ziel dieser Versuche war es, den Einfluss der verteilten Längsstabbewehrung und der Beanspruchungsart auf das Tragverhalten der Stegelemente zu untersuchen.

**Tabelle 1** Überblick des Versuchsprogramms der grossmassstäblichen Scheibenversuche: Hauptparameter und wichtigste Materialeigenschaften (RS: Reiner ebener Schub, SvL: Ebener Schub mit behinderter Längsverformung,  $\tau_{xz}$ : nominelle ebene Schubspannung,  $\gamma_{xz}$ : ebene Schubverzerrung,  $\mu$ : Mittelwert, CV: Variationskoeffizient).

Prüfkörper	Geometrischer Stab- bewehrungsgehalt $\rho_{s,x}   \rho_{s,z}$ [%]	Volumetrischer Fasergehalt		Residuelle Biegezugfestigkeit gemäss EN 14651 [23]		Beanspruchung (gesteigerte Kenngrösse)
		$\rho_f$ [%] (Faserdosierung $V_f$ [kg/m <sup>3</sup> ])	Zylinderdruckfestigkeit $f_c$ : $\mu$ (CV) [MPa]	$f_{R,1}$ : $\mu$ (CV) [MPa]	$f_{R,3}$ : $\mu$ (CV) [MPa]	
FS1	0.94   0	0.51 (40)	50.3 (0.08)	5.7 (0.24) 5.9 (0.27)		RS ( $\gamma_{xz}$ )
FS2	0.94   0	0.76 (60)	45.8 (0.05)	6.6 (–) 5.6 (–)		RS ( $\tau_{xz}$ )
FS3	0.28   0	0.51 (40)	49.5 (0.08)	4.4 (0.21) 4.9 (0.37)		SvL ( $\gamma_{xz}$ )
FS4	0   0	0.51 (40)	46.4 (0.03)	3.1 (0.16) 3.5 (0.12)		SvL ( $\gamma_{xz}$ )
FS5	0   0	0.76 (60)	48.3 (0.05)	5.3 (0.30) 4.9 (0.25)		SvL ( $\tau_{xz}$ )
FS6 (UHFB)	0   0	3.35 (263)	169.9 (0.10)	11.0 (0.15) 9.5 (0.05)		SvL ( $\gamma_{xz}$ )

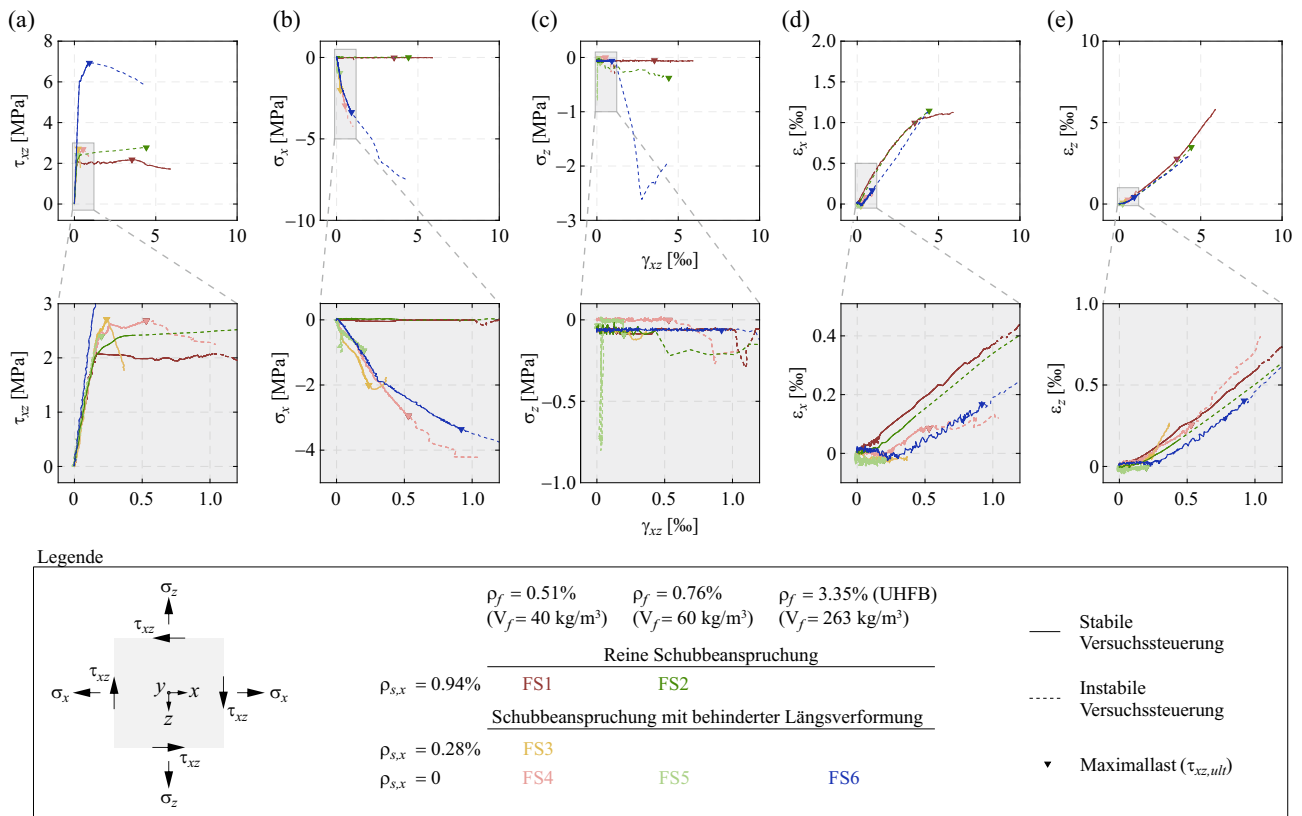
Die Versuche FS2 und FS5 wurden kraftgesteuert getestet, wobei die nominelle ebene Schubspannung  $\tau_{xz}$  monoton und quasi-statisch mit  $d\tau_{xz}/dt \approx 0.03$  MPa/min bis zum Versagen des Prüfkörpers erhöht wurde. Die anderen vier Versuche (FS1, FS3, FS4 und FS6) wurden durch monotone Erhöhung der ebenen Schubverzerrung des Prüfkörpers beansprucht, welche aus den Kolbenwegen der insgesamt 80 in der Ebene liegenden hydraulischen Pressen von LUSET bestimmt wurde. Dieses Beanspruchungsmodul wurde während des Versuchsprogramms nach der Durchführung von FS2 und FS5 entwickelt, um das Verhalten nach Erreichen der Maximallast zu erfassen und den Versagensmechanismus genauer untersuchen zu können. Das Versuchsprogramm und die wichtigsten Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Alle sechs getesteten Prüfkörper wurden mit modernster Messtechnik [11] instrumentiert, die es ermöglichte, bei allen Versuchen die Verformungen an der vorderen und hinteren Oberfläche mittels digitaler 3D-Bildkorrelation und bei FS1 und FS2 die quasi-kontinuierliche Dehnungen und Krümmung entlang der Bewehrungsstäbe mittels verteilter faseroptischer Dehnungsmessungen [12], [13] umfassend zu messen. Nebst der Bestimmung der mittleren (homogenen) ebenen Verformungen der Scheibenelemente wurden die Daten aus der digitalen 3D-Bildkorrelation zur Analyse des Rissverhaltens durch Erfassen der detaillierten Rissbilder und Messung der Rissuferverschiebungen verwendet. Dazu wurde das durch die Autoren entwickelte Programm «Automated Crack Detection and Measurement» [9], [10] eingesetzt.

## 4.2. Resultate

### 4.2.1. Last-Verformungsverhalten

Das Tragverhalten der Scheibenversuche FS1–FS6 ist in Abbildung 3 zusammengefasst, wobei die ebene Schubverzerrung auf den Abszissen und die nominellen Spannungen ( $\tau_{xz}$ ,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$ ) und Axialdehnungen ( $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_z$ ) auf den Ordinaten dargestellt sind. Es ist zu beachten, dass die Dehnungen der geprüften Scheibenelemente aus den digitalen Bildkorrelationsmessungen (DIC) an der Vorder- und Rückseite der Prüfkörper als Durchschnitt der beiden entsprechenden homogenen Dehnungen bestimmt wurden. Aufgrund der relativ zu den Prüfkörpern grossen Nachgiebigkeit von LUSET auf Schub kam es bei erheblicher Steifigkeitsänderung der Versuchskörper bei Rissbildung oder beim Erreichen der Maximallast teilweise zu Instabilitäten in der Regelung mit erheblichen Abweichungen von den vorgegebenen Beanspruchungskurven und kinematischen Randbedingungen. Diese Bereiche sind in Abbildung 3 durch gestrichelte Linien gekennzeichnet.



**Abbildung 3** Last-Verformungsverhalten von FS1–FS6: (a)–(c) nominelle Spannungen ( $\tau_{xz}$ ,  $\sigma_x$ ,  $\sigma_z$ ) und (d)–(e) axiale Dehnungen ( $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_z$ ) in Funktion der ebenen Schubverzerrung  $\gamma_{xz}$  (die untere Reihe zeigt die Vergrößerung der schattierten Bereiche der oberen Reihe).

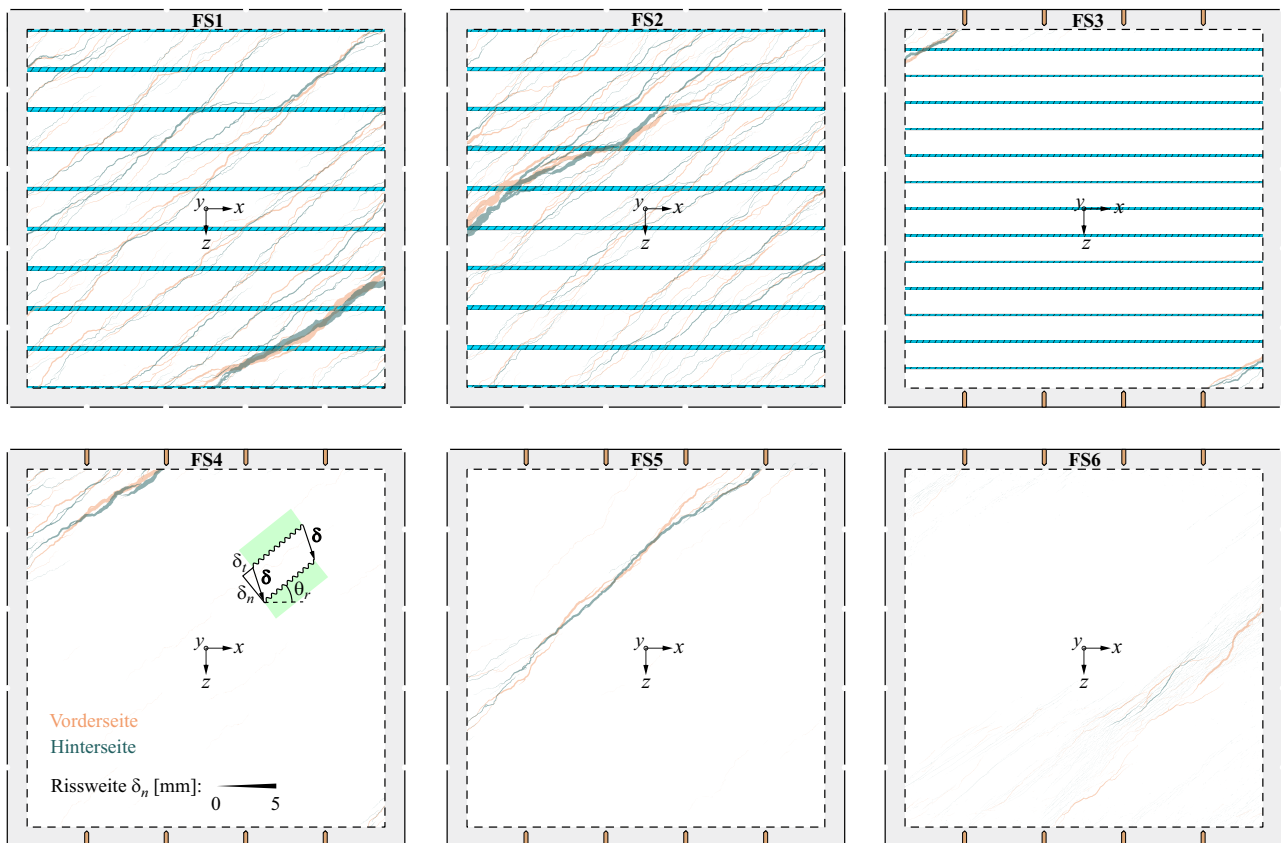
Das Last-Verformungsverhalten von FS1–FS6 lässt sich durch drei ausgeprägte Bereiche der nominellen Schubspannungs–Schubverzerrungsbeziehung (Abbildung 3a) beschreiben: (i) Ein steifer, in guter Näherung linear elastischer Bereich bis zur Erstrissbildung, (ii) ein Verfestigungsbereich mit der Bildung von mehreren über das Element verteilten Rissen bis zum Erreichen der Maximallast ( $\tau_{xz,ult}$ ) und (iii) ein Entfestigungsbereich mit abnehmender Schubspannung bei zunehmender Schubverzerrung, wobei die Verformungen in einem Riss lokalisieren. Der letztgenannte Bereich konnte jedoch nur in den Schubverzerrungsgesteuerten Versuchen (FS1, FS3, FS4 und FS6) geprüft werden.

Der ungerissene Bereich (i) war bei allen Versuchen nahezu identisch. Im Verfestigungsbereich (ii) von FS1 und FS2, die beide eine Längsstabbewehrung enthielten und auf reinen ebenen Schub beansprucht wurden, wurden grosse Schubverzerrungen  $\gamma_{xz}$  (3,5% bzw. 4,4% für FS1 und FS2) bei nahezu konstanter nominellen Schubspannung  $\tau_{xz}$  beobachtet. In beiden Versuchen bildeten sich mehrere über das Element verteilte Diagonallrisse, bevor die Maximallast erreicht wurde (siehe Abschnitt 4.2.2). Die verbleibenden vier auf Schub getesteten Scheibenelemente mit behinderter Längsverformung (FS3–FS6) versagten eher spröde. Ein Verfestigungsbereich (ii) war in FS3 und FS5 kaum vorhanden. Diese beiden Prüfkörper versagten kurz nach Erstrissbildung bei sehr geringer Verformung. FS4 und FS6 zeigten zwar einen geringfügigen Verfestigungsbereich mit einem gewissen Anstieg der Schubspannung nach Erstrissbildung, die Maximallast wurde aber bereits bei sehr geringen Verformungen der Prüfkörper erreicht.

Der nominelle Schubwiderstand  $\tau_{xz,ult}$  von FS1–FS5 lag zwischen 2 und 3 MPa und erreichte bei FS6 (UHFB)  $\tau_{xz,ult} = 6.9 \text{ MPa}$ . Im Allgemeinen wurden bei Versuchen mit höheren Fasergehalten und bei Versuchen mit eingeschränkter Längsverformung höhere Schubwiderstände erzielt als bei den auf reinen Schub geprüften Prüfkörper.

### 4.2.2. Rissverhalten

Abbildung 4 zeigt die überlagerten Rissbilder der Vorder- (orange) und Rückseiten (blau-grün) der Prüfkörper FS1–FS6 bei Maximallast. Die Rissbilder und die Rissuferverschiebungen wurden mit dem Programm «Automated Crack Detection and Measurement» [9], [10] basierend auf den Messungen aus der digitalen Bildkorrelation (DIC) ermittelt. In Abbildung 4 sind die Linienstärken der Rissbilder proportional zu den gemessenen Rissweiten. Die Rissbilder auf der



**Abbildung 4** Überlagerte Rissbilder der Vorder- und Rückseite der Prüfkörper FS1–FS6 bei Maximallast, wobei die Linienstärke proportional zu den Rissweiten ist.

Vorder- und Rückseite stimmen gut überein, was darauf hindeutet, dass die Risse ungefähr orthogonal zur Prüfkörperoberfläche verlaufen. Die Verformungslokalisierung in einem Riss ist in allen Versuchen bereits beim Erreichen der Maximallast deutlich zu erkennen. Die Rissbilder wurden durch das Vorhandensein einer Längsstabbewehrung und der Beanspruchung der Prüfkörper erheblich beeinflusst. FS1 und FS2, die beide auf reinen Schub beansprucht wurden, wiesen ein Rissbild mit mehreren Diagonallissen in sehr regelmässigem Abstand auf, was auf die Aktivierung der Längsstabbewehrung zurückzuführen ist. Die Risse in den anderen vier Versuchen (FS3–FS6) – die alle auf Schub mit behinderter Längsverformung beansprucht wurden und mit Ausnahme von FS3 keine Stabbewehrung enthielten – waren in relativ kleinen Bereichen konzentriert. Obwohl bei diesen Versuchen Holzplatten zur Rissinitiierung an den oberen und unteren Rändern der Prüfkörper angebracht wurden (in Abbildung 4 in braun dargestellt), bildete sich bei diesen Versuchen also kein Rissbild mit über das Element verteilten Rissen. Auch die geringe Längsstabbewehrung von FS3 reichte nicht aus, um mehrere Risse auszubilden; dieser Prüfkörper versagte kurz nachdem sich erste Risse in den oberen linken und unteren rechten Ecken gebildet hatten. FS6, der Prüfkörper aus UHFB, wies einen gewissen Bereich mit vielen eng beieinander liegenden feinen Rissen auf, während der übrige Prüfkörper ungerissen blieb.

Das Rissverhalten der Versuche wurde analytisch untersucht, indem die detaillierten Daten aus der digitalen Bildkorrelation zu äquivalenten homogenen Rissen, d.h. einem Satz gerader paralleler Risse mit konstantem Abstand, Öffnungswinkel und Rissweiten, konsolidiert wurden. Dies ist eine grundlegende Annahme in etablierten mechanischen Modellen zum Schubtragverhalten von Elementen aus Stahlbeton (siehe die Erweiterung eines solchen Modells auf faserbewehrten Beton in Abschnitt 5). Da die durchgeführten Scheibenversuche hinsichtlich ihrer Geometrie, Bewehrung und Beanspruchung homogen waren, liefert die Extraktion der experimentellen äquivalenten homogenen Risse wertvolle Informationen für die Entwicklung und Validierung solcher Modelle.

#### 4.2.3. Verhalten der Längsstabbewehrung in FS1 und FS2

Alle Bewehrungsstäbe der Längsstabbewehrung von FS1 und FS2 wurden an der Ober- und Unterseite mit verteilter faseroptischer Dehnungsmessung (DFOS) instrumentiert, um vertiefte Einblicke in das mechanische Verhalten zu

gewinnen. Die Dehnungsmessungen wurden mittels der an nackten Bewehrungsstäben experimentell bestimmten Spannungs–Dehnungsbeziehungen zunächst in Stahlspannungen und sodann in Normalkräfte, Biegemomente und Querkräfte in den Bewehrungsstäben umgerechnet. Die Analyse der Normalkräfte der Stäbe zeigte, dass ein erheblicher Teil der Stabzugkräfte am Riss durch Verbund in den (faserbewehrten) Beton übertragen wird. Diese im Beton aufgetragenen Zugspannungen führten zu weiteren Rissen und letztlich zu einem (wie im Abschnitt 4.2.2 beschriebenen) Rissbild mit mehreren über das Element verteilten Diagonalarissen [3], [4], [17], [30]. Aus dem Vergleich der in Abbildung 4 dargestellten Rissbilder der Versuche mit und ohne Längsstabbewehrung geht hervor, dass eine verteilte Stabbewehrung einen äusserst günstigen Einfluss auf die Rissabstände (und somit auf das Verformungsvermögen) von faserbewehrtem Beton unter Schubbeanspruchung hat.

Die mittleren Normalspannungen der Stäbe blieben während der Versuche im elastischen Bereich. An den Schnittpunkten mit Rissen überschritten jedoch Teile des Stabquerschnitts infolge der überlagerten Biegebeanspruchung des Stabes die Fließgrenze. Beim Erreichen der Maximallast trug die Stabbewehrung durch ihre Normalkraft, ähnlich wie bei herkömmlichem Stahlbeton, wesentlich zum Gleichgewicht am Riss bei [4], [30], [31] und war damit entscheidend für den Nachriss-Schubwiderstand. Andererseits betrug der Beitrag der Stabquerkraft (oft auch als Dübelwirkung bezeichnet) zum Schubwiderstand der Scheiben nur wenige Prozent (durchschnittlich 4,1% bzw. 1,6% in FS1 und FS2). Die Dübelwirkung ist damit tatsächlich in guter Näherung vernachlässigbar, wie dies in mechanischen Modellen oft angenommen wird.

## 5. Modellierung

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Versuchsergebnissen und früheren theoretischen Arbeiten wurde ein mechanisch fundiertes Modell zur Beschreibung des Schubtragverhaltens von Stegelementen aus faserbewehrtem Beton entwickelt. Anhand von Parameterstudien mit diesem mechanischen Modell wurde ein vereinfachtes praxistaugliches Schubbemessungsmodell hergeleitet. Dieses basiert auf dem unteren Grenzwertsatz der Plastizitätstheorie und ist kompatibel mit der allgemein anerkannten (und in heutigen internationalen Normen etablierten) Schubbemessung von herkömmlichem Stahlbeton. Nachfolgend werden die wichtigsten Aspekte des Modells beschrieben: Für eine ausführliche Modellbeschreibung wird auf [15] und [16] verwiesen.

### 5.1. Mechanisches Modell des Last–Verformungsverhalten

Das Last–Verformungsverhalten von Scheibenelementen aus faserbewehrtem Beton unter Schubbeanspruchung wird durch die Erweiterung des Gerissenen Scheibenmodells [30], [31] um die Wirkung der Faserbewehrung beschrieben. Das Gerissene Scheibenmodell wurde ursprünglich für herkömmliche stabbewehrte Betonbauteile unter ebener Beanspruchung entwickelt. Da dieses mechanisch fundierte Modell Gleichgewicht in Spannungen am Riss formuliert und damit explizite Informationen über die Rissabstände und Rissweiten liefert [30], kann es durch die Berücksichtigung etablierter Materialgesetze für die auf den Betonquerschnitt bezogene Faserspannung am Riss (nachfolgend Faserwirkung genannt) direkt, d.h. ohne semi-empirische Annahmen (wie sie in Modellen wie der Modified Compression Field Theory [32], die in «mittleren Spannungen» formuliert sind, erforderlich sind) erweitert werden. Wie das ursprüngliche Modell basiert somit auch das für faserbewehrten Beton erweiterte Gerissene Scheibenmodell auf einer mechanisch konsistenten Formulierung. Dadurch wird die Verwendung etablierter Materialgesetze ermöglicht, die aus grundlegenden Materialeigenschaften entwickelt wurden, anstatt sich auf empirisch kalibrierte, in «mittleren Spannungen» formulierte Materialgesetze zu verlassen.

In seiner allgemeinen Formulierung mit fester Rissneigung berücksichtigt das für faserbewehrten Beton erweiterte Gerissene Scheibenmodell nebst der Faserwirkung Spannungen aus der Schubverzahnung (englisch «aggregate interlock»). Dadurch kann das Modell Versagensmechanismen infolge Rissgleiten erfassen, wie sie in Experimenten an faserbewehrten Betonbauteilen mit uniaxialer Stabbewehrung beobachtet wurden. Für die Modellierung der Faserwirkung wird die Faserspannungs-Rissbreitenbeziehung von Pfył [3] und deren Erweiterung auf schiefe Rissöffnungen [2] verwendet (Abbildung 5), während die Spannungen aus der Schubverzahnung durch das etablierte Zwei-Phasen-Modell von Walraven [33] bestimmt werden. Um die Wechselwirkung zwischen der Faserwirkung und der Schubverzahnung zu

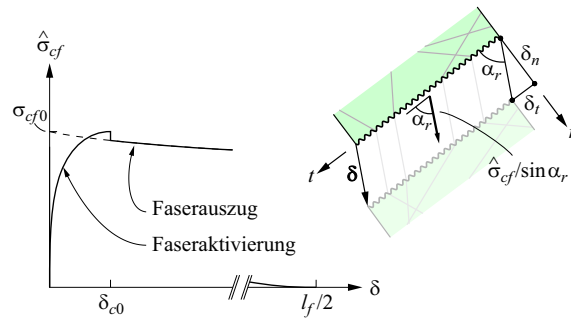


Abbildung 5 Faserspannungs-Rissbreitenbeziehung von Pfyl [3].

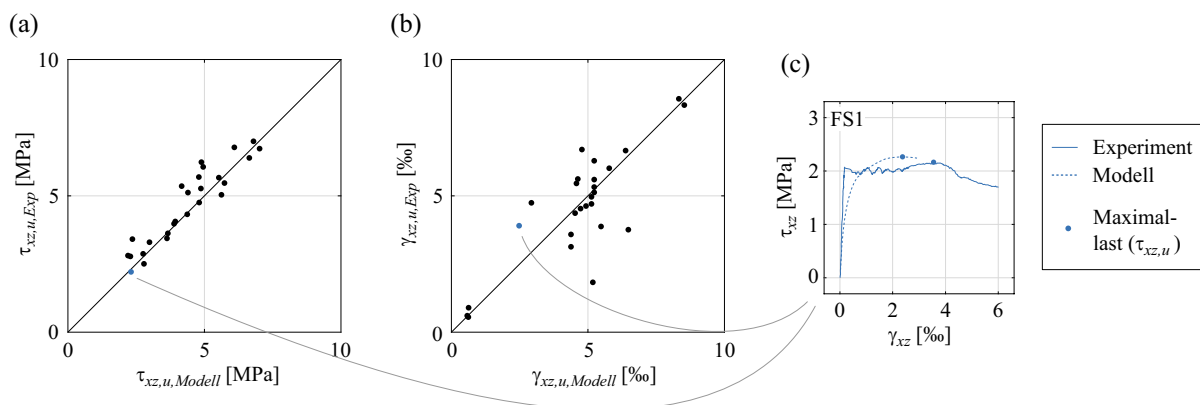


Abbildung 6 Gerissenes Scheibenmodell für faserbewehrten Beton: Vergleich der vorhergesagten und experimentell bestimmten Last-Verformungsverhalten von faserbewehrten Betonscheiben ohne herkömmliche Querkraftbewehrung unter Schubbeanspruchung: (a) Maximallast (maximale Schubspannung  $\tau_{xz,u}$ ); (b) Schubverzerrung bei Maximallast  $\gamma_{xz,u}$ ; (c) Schubverzerrungs-Schubspannungsbeziehung des Versuchs FS1 (siehe Abschnitt 5).

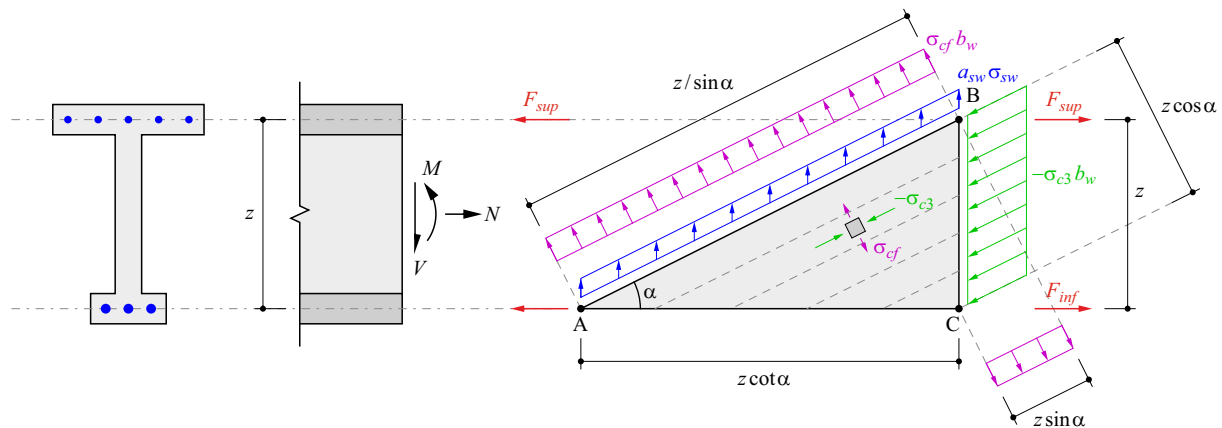
berücksichtigen, wird ein neuer Ansatz vorgestellt, der davon ausgeht, dass die Spannungen aus der Schubverzahnung im Verhältnis zu den durch die Faserwirkung auf den Beton übertragenen Betonzugspannungen reduziert werden.

Das Modell wurde anhand der Abschnitt 5 vorgestellten Versuche sowie mit allen in der Literatur verfügbaren Versuchsdaten von Schubversuchen an faserbewehrten Betonscheiben validiert. Dabei wurde eine ausgezeichnete Übereinstimmung des vorhergesagten und experimentell bestimmten Last-Verformungsverhalten, einschliesslich der Maximallast, der entsprechenden Verformung sowie der Versagensmechanismen erreicht (siehe Abbildung 6), was die allgemeine Anwendbarkeit des Modells für einen breiten Bereich von Fasergehalten und Betonfestigkeiten bestätigt.

Da die über die Risse übertragenen Spannungen das Schubtragverhalten der faserbewehrten Elemente dominieren, vor allem wenn Fasern als Ersatz für eine Querkraftstabbewehrung verwendet werden, wurde ein besonderer Fokus auf die Eignung verschiedener etablierter Materialgesetze für die Faserwirkung und Schubverzahnung in Scheibenelementen gelegt. Dabei zeigte sich, dass der (nach dem für faserbewehrten Beton erweiterten Gerissenen Scheibenmodell vorhergesagte) Schubwiderstand eine geringe Sensitivität hinsichtlich einer Variation der Modelle für die Faserwirkung und Schubverzahnung aufweist. Allerdings werden die Scheibenverformungen bei Verwendung alternativer Materialgesetze deutlich überschätzt. Ein vereinfachtes Modell, das fiktive Risse mit variabler Neigung und orthogonaler Rissöffnung anstelle von sich schräg öffnenden Rissen mit fester Rissneigung berücksichtigt, überschätzt sowohl die Festigkeit als auch die Verformungen einachsrig bewehrter Betonelemente mit hohen Fasergehalten erheblich, ist aber für Elemente mit geringer Festigkeit (d. h. mit niedrigen Fasergehalten) anwendbar.

### 5.2. Bemessungsmodell

Das für faserbewehrten Beton erweiterte Gerissene Scheibenmodells liefert zwar hervorragende Vorhersagen des Last-Verformungs-Verhaltens von Schubversuchen an faserbewehrten Betonelementen, ist aber aufgrund seiner hohen Komplexität und starken Nichtlinearität als Bemessungsmodell wenig geeignet [30]. Hingegen ermöglichen vereinfachte,



**Abbildung 7** Schubbemessungsmodell: Schnittkörperdiagramm im Steg eines faserbewehrten Stahlbetonträgers.

geschlossene Ausdrücke, die aus dem Gerissenen Scheibenmodells abgeleitet wurden, eine mechanisch fundierte Bemessung schubbeanspruchter faserbewehrter Betonbauteile, die mit den aktuellen Bemessungskonzepten für herkömmlichen Stahlbeton auf der Grundlage des unteren Grenzwertsatzes der Plastizitätstheorie kompatibel ist.

Konkret wird vorgeschlagen, die allgemein anerkannten Traglastverfahren für Stahlbeton durch systematische Berücksichtigung eines vorsichtig gewählten Residualwerts der Faserwirkung  $\sigma_{cf}$ , entsprechend einer starr-ideal plastischen Idealisierung des faserbewehrten Betons auf Zug, auf die Bemessung von faserbewehrten Stahlbetonbauteilen zu erweitern. Dies ist sowohl für untere als auch obere Grenzwerte der Traglast von Stahlbetonstegelementen möglich. Diese Lösungen enthalten als Sonderfälle zum einen die Lösungen für faserbewehrte Betonstege ohne Querkraftstabbewehrung und zum anderen die bekannten plastischen Lösungen für herkömmliche Stahlbetonträger ohne Faserbewehrung.

Die Untersuchung der Anwendungsgrenzen der Plastizitätstheorie ermöglichte die Entwicklung eines vereinfachten praxistauglichen Schubbemessungsmodells auf Grundlage des unteren Grenzwertsatzes der Plastizitätstheorie für faserbewehrte Betonstege unter Schubbeanspruchung (Abbildung 7). Dazu wurden in einem ersten Schritt die umfangreichen experimentellen Daten und theoretischen Kenntnisse über den Schubwiderstand von faserbewehrte Betonstegen ohne Querkraftstabbewehrung genutzt, um Fälle zu untersuchen, in denen Fasern die herkömmliche Querkraftstabbewehrung vollständig ersetzen. Daraus ergab sich folgender Querkraftwiderstand eines faserbewehrten Stahlbetonträgers mit Längsstabbewehrung und ohne Querkraftstabbewehrung:

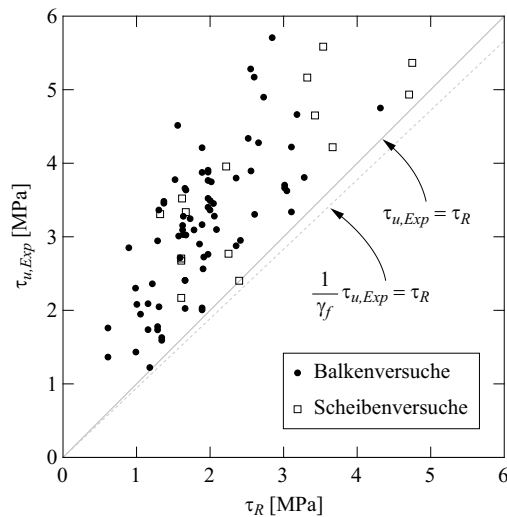
$$V_R = \tau_R b_w z = \sigma_{cf} b_w z \cot \alpha \quad (\alpha_{min} < \alpha < 45^\circ) \quad (1)$$

wobei  $b_w$  die Stegbreite und  $z$  den Hebelarm der inneren Kräfte beschreibt. Vereinfachend wird hier für  $z$  90% der statischen Höhe der Biegebewehrung  $d$  angenommen (d.h.  $z = 0.9d$ ).

Das vorgeschlagene Schubbemessungsmodell stützt sich auf eine residuelle Faserwirkung  $\sigma_{cf}$ , die direkt aus dem Fasergehalt abgeleitet wird (basierend auf der Faserspannungs-Rissbreitenbeziehung von Pfyl [3]), was die Verwendung normalfesten Betons und von Makrostahlfasern mit Endhaken voraussetzt. Anhand von Parameterstudien des im Abschnitt 5.1 vorgestellten Gerissenen Scheibenmodell für faserbewehrten Beton konnten die folgenden verlässlichen Werte für  $\sigma_{cf}$  und die minimale Druckfeldneigung  $\alpha_{min}$  bestimmt werden:

$$\begin{aligned} \sigma_{cf} &= 0.9\sigma_{cf0} \\ \alpha_{min} &= 35^\circ \end{aligned} \quad (2)$$

wobei  $\sigma_{cf0}$  die Faserwirksamkeit gemäss Pfyl [3] mit einer 3-dimensionalen Faserverteilung beschreibt. Im Vergleich zu typischen alternativen Bemessungsvorschlägen, die sich auf experimentell bestimmte residuelle Faserwirkungen aus 3-Punkt-Biegeversuchen und inversen Analysen stützen, behandelt der verwendete vereinfachte Ansatz die Fasern als mechanische Bewehrung. Dadurch werden spezifische Versuche und inverse Analysen überflüssig, sofern normalfester Beton und Makrostahlfasern mit Endhaken verwendet werden, was insbesondere für die Bemessung von Vorteil ist. Das



**Abbildung 8** Schubmessungsmodell: Vergleich der vorhergesagten und experimentell bestimmten Schubwiderständen von faserbewehrten Balken und Scheibenelementen ( $\gamma_f$ : Teilsicherheitsbeiwert).

Modell ist jedoch ausreichend anpassungsfähig, um die Eingabe beliebiger repräsentativer Residualwerte für die Faserwirkung zu ermöglichen. Ausserdem wurde gezeigt, dass die Betondruckfestigkeit in faserbewehrten Stegen ohne Querkraftstabbewehrung grundsätzlich nicht massgebend wird.

Die Validierung des vereinfachten Schubmessungsmodells anhand einer in der Literatur vorhandenen Datenbank [34] mit 75 Schubversuchen an faserbewehrten Balken ohne Querkraftstabbewehrung bestätigte dessen Eignung für Bemessungszwecke (Abbildung 8). Eine Analyse der Modellunsicherheit ermöglichte zudem die Abschätzung des Teilsicherheitsfaktors für den Residualwert der Faserwirkung  $\sigma_{cf}$ , wenn dieser direkt aus dem Fasergehalt unter Verwendung von Gleichung (2) bestimmt wird. Es ist zu beachten, dass aufgrund des konservativen Charakters des vorgeschlagenen Schubmessungsmodells ein relativ kleiner Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_f = 1.11$  ausreicht, um eine normgemässe Sicherheit (Zuverlässigkeitsindex  $\beta = 3.8$  und Sensitivitätsfaktor des Widerstands  $\alpha_R = 0.8$ ) zu gewährleisten.

Abschliessend wurde die Anwendung des Schubmessungsmodells auf faserbewehrte Stahlbetonstege mit Querkraftstabbewehrung untersucht. Es wurde festgestellt, dass die für Stege ohne Querkraftstabbewehrung gemäss Gleichung (2) bestimmten Werte in solchen Situationen gegebenenfalls angepasst werden müssen. Es sind jedoch weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen erforderlich, um das mechanische Verhalten von faserbewehrten Stahlbetonstegen mit Querkraftstabbewehrung unter Schubbeanspruchung zu verstehen und somit die Entwicklung von entsprechenden mechanisch fundierten Bemessungsmodellen zu ermöglichen.

## 6. Schlussfolgerungen und Bedeutung für die Praxis

Im Rahmen dieses Projekts wurde das Schubtragverhalten von faserbewehrtem Beton durch umfangreiche experimentelle und theoretische Arbeiten untersucht. Es wurden grossmassstäbliche Schubversuche an faserbewehrten Scheibenelementen durchgeführt, die repräsentativ für Trägerstegelemente sind. Die durchgeführten Experimente führten zu den folgenden Hauptkenntnissen:

- Bei moderater Schubbeanspruchung können Fasern bereits in praxistauglicher Dosierung eine herkömmliche Querkraftstabbewehrung in Trägerstegen ersetzen, sofern gewährleistet ist, dass mehrere über den Steg verteilte Risse auftreten, so dass ein sprödes Versagen bei Erstrissbildung verhindert werden kann. Dazu ist beispielsweise eine über die Steghöhe verteilte Längsstabbewehrung anzuordnen.
- Wenn keine oder nur eine geringe über die Steghöhe verteilte Stabbewehrung in Längsrichtung vorhanden ist, muss hingegen mit einem eher spröden Versagen gerechnet werden, auch wenn die Längsverformung stark behindert ist (wie beispielsweise bei Stegen vorgespannter Träger durch die angrenzenden Gurte). Dies, da in

solchen Fällen nur wenige über den Steg verteilte Risse auftreten, was zu einer Verformungslokalisierung führt, was selbst beim Versuch aus Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) der Fall war.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Experimenten und früheren theoretischen Arbeiten wurde ein mechanisches Modell für das Schubtragverhalten von faserbewehrtem Beton entwickelt. Das Modell wurde anhand der im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Experimente sowie der in der Literatur verfügbaren Versuchsdaten validiert. Schliesslich wurde ein praktisches Bemessungsmodell vorgeschlagen, das mit etablierten Bemessungsregeln für herkömmlichen Stahlbeton kompatibel ist. Dabei wurden folgende wesentliche Erkenntnisse gewonnen:

- Die Modellierung des Schubtragverhaltens von faserbewehrtem Beton durch die Integration bestehender Materialgesetze für die auf den Betonquerschnitt bezogene Fasertension am Riss in etablierte Druckfeldmodelle für herkömmlichen Stahlbeton ermöglicht es, die Wirkung der Fasern als Querkraftbewehrung mechanisch konsistent zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck wurde das Gerissene Scheibenmodell, das ursprünglich für die Beschreibung des Verhaltens konventionell bewehrter Stahlbetonbauteile entwickelt wurde, auf faserbewehrten Beton erweitert. Das erweiterte Modell liefert äusserst zuverlässige Vorhersagen des Last-Verformungsverhaltens für sämtliche in der Literatur verfügbare Daten zu Versuchen an Scheibenelementen aus faserbewehrtem Beton. Dies sowohl hinsichtlich des Schubwiderstands als auch der entsprechenden Verformungen und des Versagensmechanismus. Somit kann das Modell effektiv auf einen breiten Bereich von Fasergehalten und Betonfestigkeiten angewendet werden.
- Die Erweiterung der allgemein anerkannten Traglastverfahren für herkömmlichen Stahlbeton um die Wirkung der Fasern ermöglicht die Entwicklung eines einfachen und effizienten mechanisch fundierten Schubbemessungsmodells für faserbewehrte Betonstege. Mittels einer Parameterstudie des für faserbewehrten Beton erweiterten Gerissenen Scheibenmodells konnten zuverlässige Residualwerte der Faserwirkung sowie die Grenzen der Anwendbarkeit der Plastizitätstheorie ermittelt werden. Die Validierung des vorgeschlagenen Schubbemessungsmodells anhand einer grossen in der Literatur verfügbaren Datenbank von Scheiben- und Balkenversuchen liefert wertvolle Einblicke in dessen Zuverlässigkeit und ermöglicht die Bestimmung eines geeigneten Teilsicherheitsfaktors.
- Die Verwendung von Fasern als Querkraftbewehrung erfordert einen gezielten Einsatz und eine sorgfältige Bemessung. Es ist zu berücksichtigen ist, dass das vorgeschlagene Schubbemessungsmodell aufgrund des unterschiedlichen mechanischen Verhaltens der Fasern im Vergleich zur herkömmlichen Querstabbewehrung den Materialbedarf an Stahl für typische Bedingungen um den Faktor 3 bis 5 erhöht, um einen Bemessungswiderstand zu erreichen, der den gängigen Normvorgaben für herkömmlichen Stahlbeton entspricht. Um eine ökologischere und umweltfreundlichere Lösung im Vergleich zu herkömmlichem Stahlbeton zu erreichen, muss daher der drastisch erhöhte Materialbedarf für die Bewehrung im Falle von faserbewehrtem Beton durch eine Reduktion der Gesamtmasse des Bauwerks und allgemeine Kosteneinsparungen kompensiert werden. Dies kann durch eine verbesserte statische Effizienz des Bauwerks mittels freierer Geometrien – die durch die Verwendung von faserbewehrtem Beton wesentlich erleichtert wird – und durch den Verzicht auf das Verlegen einer entsprechenden Stabbewehrung erreicht werden. Die im Rahmen dieses Projekts gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Modelle sind wichtige Werkzeuge für die effiziente und sichere Bemessung sowie die konstruktive Durchbildung von schubbeanspruchten faserbewehrten Betonbauteilen dar.

## 7. Empfehlungen für künftige Forschungsarbeiten

Im Rahmen dieses Projekts wurden folgende wesentliche Wissenslücken festgestellt, die weitere Forschungsarbeiten erfordern:

- Weitere Versuche an faserbewehrten Scheibenelementen mit repräsentativer Bewehrung, Grösse, Beanspruchung und statischem System sind erforderlich, um das Verhalten typischer faserbewehrter Trägerstege zu untersuchen und die entwickelten mechanischen Modelle umfassend validieren zu können. Insbesondere sollte der Einfluss einer starken Längsstabbewehrung, die typischerweise in den angrenzenden Gurten

konzentriert (und nicht verteilt) ist, auf das Schubtragverhalten von faserbewehrten Trägern genauer untersucht werden.

- Die vorgeschlagene Erweiterung des Gerissenen Scheibenmodells auf faserbewehrten Beton sowie das entwickelte Schubbemessungsmodell wurden in erster Linie entwickelt, um das mechanische Verhalten und die Festigkeit von faserbewehrtem Beton mit normalfestem Beton und moderaten Faserdosierungen von Stahlfasern mit Endhaken unter Schubbeanspruchung zu erfassen. Mögliche Anpassungen der Modellparameter für hochfesten Beton und Fasern aus anderen Materialien oder mit anderer mechanischer Verankerung wurden nur teilweise berücksichtigt und erfordern weitere Untersuchungen. Insbesondere erfordert die Erweiterung der Modelle auf Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) voraussichtlich grössere Anpassungen, um die Eigenschaften von UHFB mit seiner charakteristischen ultrahohen Festigkeit der Betonmatrix, der feinen Gesteinskörnungen und der sehr hohen Dosierungen von kurzen Fasern zu berücksichtigen.
- Die vorgeschlagenen Modelle erfassen zuverlässig das Schubtragverhalten und die Festigkeit von faserbewehrten Betonbauteilen mit herkömmlicher Längsbewehrung, die ausreicht, um ein Versagen bei Erstrissbildung zu verhindern. Die Auswirkung einer möglichen zusätzlichen Querstabbewehrung wurde ebenfalls theoretisch untersucht. Während die Modelle anhand von Versuchen, bei denen die Querstabbewehrung vollständig durch Fasern ersetzt wurde, umfassend validiert wurden und eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen erzielt wurde, deuten die wenigen verfügbaren Versuche von faserbewehrten Betonbauteilen mit zusätzlicher Querkraftstabbewehrung darauf hin, dass die Modelle in solchen Situationen angepasst werden müssen. Weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen sind notwendig, um das mechanische Verhalten von faserbewehrten Betonstegen mit Querkraftstabbewehrung unter Schubbeanspruchung genauer zu verstehen.

## 8. Finanzielles

Die vorliegende Arbeit wurde durch cemsuisse mit einem Beitrag von CHF 106'623.– unterstützt, wofür sich die Autoren aufrichtig bedanken.

## Literatur

- [1] A. Amin, 'Post cracking behavior of steel fiber reinforced concrete: from material to structure', Doktorarbeit, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australien, 2015. doi: 10.26190/unsworks/18412.
- [2] W. Kaufmann, A. Amin, A. Beck, and M. Lee, 'Shear transfer across cracks in steel fibre reinforced concrete', *Engineering Structures*, vol. 186, pp. 508–524, 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.02.027.
- [3] T. Pfyl, 'Tragverhalten von Stahlfaserbeton', Doktorarbeit, ETH Zürich, Zürich, Schweiz, 2003. doi: 10.3929/ethz-a-004502831.
- [4] W. Kaufmann, J. Mata-Falcón, and A. Amin, 'Compression Field Analysis of Fiber-Reinforced Concrete Based on the Cracked Membrane Model', *ACI Structural Journal*, vol. 116, no. 5, pp. 213–224, 2019, doi: 10.14359/51716763.
- [5] L. Gebhard, 'Reinforcement Strategies for Digital Fabrication with Concrete', Doktorarbeit, ETH Zürich, Zürich, Schweiz, 2023. doi: 10.3929/ethz-b-000614836.
- [6] D. Asprone, C. Menna, F. P. Bos, T. A. M. Salet, J. Mata-Falcón, and W. Kaufmann, 'Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete', *Cement and Concrete Research*, vol. 112, pp. 111–121, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.020.
- [7] L. Gebhard *et al.*, 'Aligned Interlayer Fibre Reinforcement and Post-tensioning as a Reinforcement Strategy for Digital Fabrication', presented at the Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication: Digital Concrete, F. P. Bos, S. S. Lucas, R. J. M. wolfs, and T. A. M. Salet, Eds., online: Springer, 2020, pp. 622–631. doi: 10.1007/978-3-030-49916-7\_63.
- [8] W. Kaufmann, J. Mata Falcon, and A. Beck, 'Future directions for research on shear in structural concrete', International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Schweiz, fib Bulletin 85, 2018. doi: 10.35789/fib.BULL.0085.Ch20.
- [9] N. Gehri, J. Mata-Falcón, and W. Kaufmann, 'Automated crack detection and measurement based on digital image correlation', *Construction and Building Materials*, vol. 256, p. 119383, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119383.
- [10] N. Gehri, J. Mata-Falcón, and W. Kaufmann, 'Refined extraction of crack characteristics in Large-scale concrete experiments based on digital image correlation', *Engineering Structures*, vol. 251, p. 113486, 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113486.
- [11] J. Mata-Falcón, S. Häfliger, M. Lee, T. Galkovski, and N. Gehri, 'Combined application of distributed fibre optical and digital image correlation measurements to structural concrete experiments', *Engineering Structures*, vol. 225, p. 111309, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.111309.
- [12] T. Galkovski, Y. Lemcherreq, J. Mata-Falcón, and W. Kaufmann, 'Fundamental Studies on the Use of Distributed Fibre Optical Sensing on Concrete and Reinforcing Bars', *Sensors*, vol. 21, no. 22, Art. no. 22, 2021, doi: 10.3390/s21227643.
- [13] Y. Lemcherreq, T. Galkovski, J. Mata-Falcón, and W. Kaufmann, 'Application of Distributed Fibre Optical Sensing in Reinforced Concrete Elements Subjected to Monotonic and Cyclic Loading', *Sensors*, vol. 22, no. 5, Art. no. 5, 2022, doi: 10.3390/s22052023.
- [14] N. Gehri, J. Mata-Falcón, and W. Kaufmann, 'Experimental investigation of the shear response of large-scale fibre-reinforced concrete panels', *Engineering Structures*, vol. 295, p. 116598, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.116598.
- [15] N. Gehri, J. Mata-Falcón, and W. Kaufmann, 'Cracked Membrane Model for fiber-reinforced concrete', *Journal of Structural Engineering*, under review 2023.
- [16] N. Gehri, A. Amin, M. A. Kraus, and W. Kaufmann, 'Limit analysis and design recommendations for fibre-reinforced concrete subjected to shear', *Structural Concrete*, under review 2023.
- [17] P. Marti, M. Alvarez, W. Kaufmann, and V. Sigrist, 'Tension Chord Model for Structural Concrete', *Structural Engineering International*, vol. 8, no. 4, pp. 287–298, 1998, doi: 10.2749/101686698780488875.

- [18] P. Marti and M. Alvarez, 'Versuche zum Verbundverhalten von Bewehrungsstahl bei plastischen Verformungen', Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), ETH Zürich, Zürich, Schweiz, IBK Bericht 222, 1996. doi: 10.3929/ethz-a-001685619.
- [19] J. P. Romualdi and G. B. Batson, 'Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement', *ACI Journal Proceedings*, vol. 60, no. 6, pp. 775–790, 1963, doi: 10.14359/7878.
- [20] V. C. Li, R. Ward, and A. M. Hmaza, 'Steel and Synthetic Fibers as Shear Reinforcement', *ACI Materials Journal*, vol. 89, no. 5, pp. 499–508, 1992, doi: 10.14359/1822.
- [21] P. Adebar, S. Mindess, D. St.-Pierre, and B. Olund, 'Shear Tests of Fiber Concrete Beams without Stirrups', *ACI Structural Journal*, vol. 94, no. 1, pp. 68–76, 1997, doi: 10.14359/462.
- [22] Y.-K. Kwak, M. O. Eberhard, W.-S. Kim, and J. Kim, 'Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups', *ACI Structural Journal*, vol. 99, no. 4, pp. 530–538, 2002, doi: 10.14359/12122.
- [23] J. Y. L. Voo, S. J. Foster, and R. I. Gilbert, 'Shear Strength of Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete Prestressed Girders without Stirrups', *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 123–132, 2006, doi: 10.3151/jact.4.123.
- [24] G. J. Parra-Montesinos, 'Shear Strength of Beams with Deformed Steel Fibers: evaluating an alternative to minimum transverse reinforcement', *Concrete International*, vol. 28, no. 11, pp. 57–67, 2006.
- [25] F. Minelli, 'Plain and fiber reinforced concrete beams under shear loading: structural behavior and design aspects', Doktorarbeit, Università degli studi di Brescia, Brescia, Italien, 2005.
- [26] W. Kaufmann, A. Beck, D. Karagiannis, and D. Werne, 'The Large Universal Shell Element Tester LUNET', Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK), ETH Zürich, Zürich, Schweiz, IBK Bericht 506, 2019. doi: 10.3929/ethz-b-000379657.
- [27] NV Bekaert SA, 'Product Data Sheet for Dramix 3D 80/60 BG'. Accessed: Feb. 13, 2023. [Online]. Verfügbar: [https://www.bekaert.com/content/dam/corporate/dop/Datasheet\\_Dramix%203D%208060BG\\_en-US\\_20230102\\_8060BG\\_Dramix%203D.pdf](https://www.bekaert.com/content/dam/corporate/dop/Datasheet_Dramix%203D%208060BG_en-US_20230102_8060BG_Dramix%203D.pdf)
- [28] A. Beck, 'Paradigms of shear in structural concrete: Theoretical and experimental investigation', Doktorarbeit, ETH Zürich, Zürich, Schweiz, 2021. doi: 10.3929/ethz-b-000482684.
- [29] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), 'SIA Merkblatt 2052: Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) – Baustoffe, Bemessung und Ausführung'. Zürich, Schweiz, 2016.
- [30] W. Kaufmann, 'Strength and Deformations of Structural Concrete Subjected to In-Plane Shear and Normal Forces', Doktorarbeit, ETH Zürich, Zürich, Schweiz, 1998. doi: 10.3929/ethz-a-001945805.
- [31] W. Kaufmann and P. Marti, 'Structural Concrete: Cracked Membrane Model', *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, no. 12, pp. 1467–1475, 1998, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:12(1467).
- [32] F. Vecchio and M. P. Collins, 'The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear', *ACI Journal Proceedings*, vol. 83, no. 2, pp. 219–231, 1986, doi: 10.14359/10416.
- [33] J. C. Walraven, 'Aggregate interlock: A theoretical and experimental analysis', Doktorarbeit, TU Delft, Delft, Niederlande, 1980.
- [34] E. O. L. Lantsoght, 'Database of Shear Experiments on Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrups', *Materials*, vol. 12, no. 6, p. 917, 2019, doi: 10.3390/ma12060917.