

# **Duktiler Hochleistungsbeton mit Fasercocktail**

## **Technologie – Bemessung – Anwendungen**

Dr.-Ing. Lars Kützing  
Prof. Dr.-Ing. Gert König

---

# Duktiler Hochleistungsbeton mit Fasercocktail

## Technologie – Bemessung – Anwendungen

Durch Zugabe eines speziellen „Fasercocktails“, einer Kombination aus Stahl- und Polypropylenfasern kann das Bruch- und Verformungsverhalten hochfester Betone gezielt gesteuert und verbessert werden. Die rißvernaehende Stahlfaser ist dabei primär für die Duktilität verantwortlich. Durch die Polypropylenfaser werden der homogenen Zementsteinmatrix hochfester Betone Mikrodefekte initiiert, die bereits bei geringen Belastungen mikroskopische Rißbildungen bewirken und dadurch die Stahlfasern frühzeitig aktivieren. Es stellt sich ein günstiges Last-Verformungsverhalten ein. Mit Hilfe des CDZ-Modells von Marqueset und der Erweiterung von Meyer kann das Tragverhalten von Bauteilen aus „Fasercocktail“-Beton auch rechnerisch ermittelt werden. Dies wird durch Versuche an zentrisch belasteten Hochbaustützen experimentell bestätigt.

Neben diesem Fall werden weitere Sonderanwendungen des neuartigen Hochleistungsbetons vorgestellt. So konnte experimentell ein besseres Feuerwiderstandverhalten gemessen werden. Unter Ausnutzung der gleichzeitigen Verbesserung der Schubtragfähigkeit wurde eine Fertigteilstütze für Flachdecken konzipiert. Tastversuche zeigen eine wesentliche Erhöhung der Tragfähigkeit.

Sofern die Trag- und Verformungskapazität der Zugzone von Biegeträgern ausreicht, kann der neue Beton auch als Druckzonenergänzung in der Bausanierung verwendet werden. Die Tragfähigkeit des Gesamtsystems erhöht sich beträchtlich.

**Ductile high performance concrete by using special fibre cocktails – technology – dimensioning – application.** *By using special fibre cocktails, a combination of steel and polypropylene fibres, the explosive failure behaviour of High Performance Concrete (HPC) may be avoided. The steel fibre principally influences the ductility when it has developed its bond forces at the moment of failure. Therefore it needs the weak polypropylene fibres which function as a sort of micro defect in the homogeneous matrix of HPC. With the variation of the fibre cocktail composition different material ductilities could be adjusted. The characteristics of a design concept, based on the Compressive Damage Zone model (CDZ) from Marqueset and the extension from Meyer are presented. The calibration of the CDZ model for fibre cocktail concrete allows the prediction of the material ductility. According to the design requirements, the structural ductility may be achieved by a combination of transversal reinforcement and increased material ductility. After the implementation of the model parameters, the material ductility may be specified in the design of the fibre cocktail composition.*

*Beside this some other special applications with fibre cocktail concrete are introduced.*

### 1 Einleitung

Hochleistungsbetone zeichnen sich durch verbesserte Materialeigenschaften aus, die durch gezielte technologische Variationen erreicht werden. Dabei stand ursprünglich nur die Entwicklung der Festigkeit im Mittelpunkt des Interesses. Deren Steigerung basiert wesentlich auf dem sog. „Füllereffekt“, d. h. der Zugabe von Mikrofüllern, die eine feinere Gefügeabstimmung der Betonmatrix ermöglichen. In Deutschland wird hierzu meist das amorphe Mikrosilica verwendet, ein Abfallprodukt der Ferro-Silicium-Produktion, das puzzolanisch reagiert. Hierbei bilden sich zusätzliche Calciumsilicathydrate (CSH), die die Kontaktzone zwischen Zuschlag und Betonmatrix stärken und zu einer weiteren Verbesserung der Festigkeit führen. Durch die Zugabe hochleistungsfähiger Fließmittel können heute weiterhin Betone verarbeitet werden, deren Wasser-Zement-Wert ( $w/z$ ) deutlich unter 0,30 liegt. Dies führt zu einer deutlichen Reduktion des Porenvolumens und damit verbunden zu einer erheblichen Steigerung der Homogenität und der Dichtheit der Betonmatrix.

Diese technologischen Veränderungen haben jedoch maßgebliche Konsequenzen auf den Bruchmechanismus. Die Schwachstelle im Gefüge ist bei hochfesten Betonen nicht mehr die Kontaktzone, sondern der Zuschlag selbst. Im Gegensatz zu normalfesten Betonen entstehen sehr glatte Bruchflächen, die durch die Zuschlagskörner hindurch verlaufen. Der Beton versagt spröde. Mit wachsender Druckfestigkeit wird der abfallende Ast der Druckspannungs-Stauchungskurve zunehmend steiler. Eine versagensankündigende Rißbildung bleibt aus, Tragglieder versagen teilweise sogar explosionsartig.

Durch Erzeugung eines dreiachsigen Spannungszustandes kann die Trag- und Verformungskapazität solcher Betonbauteile wirkungsvoll verbessert werden. Während in den USA leistungsfähige Verbundbau-Druckglieder realisiert werden (betongefüllte Stahlhohlprofile), hat sich in Deutschland diese Bauweise derzeit noch nicht durchgesetzt. Trotzdem sehen die für hochfeste Betone maßgebenden Regelwerke [2], [3] eine aufwendigere konstruktive Durchbildung von Druckgliedern vor, wobei insbesondere die Erhöhung der Querbewehrungsgehalte auf eine Verbesserung der Verformungskapazität abzielt.

Das Verformungsverhalten von bewehrten und unbewehrten Bauteilen wird von unterschiedlichen Einflüssen bestimmt. Neben der Belastungsart und -geschwindigkeit spielt auch die Lagerung und das statische System eine wesentliche Rolle. Statisch unbestimmte Systeme besitzen Lastumlagerungspotentiale, die ein sprödes Versagen verhindern oder zumindest verzögern helfen. Auch ein statisch bestimmt gelagerter Biegebalken mit Mindestbewehrung versagt unter ankündigender Rißbildung. Um ein ähnliches Versagen bei zentrisch belasteten Stützen zu erzielen, müssen diese konstruktiv gezielt durchgebildet werden. Auch sind hier bestimmte Systemabmessungen ausschlaggebend, da energieverzehrende Bruchmechanismen in einer örtlich begrenzten Schadenszone mit ungeschädigten, sich entspannenden Bereichen des Bauteils konkurrieren. Die Duktilität selbst ist hierbei keine Materialeigenschaft, sondern beschreibt das Verhalten eines Systems („Bauteilduktilität“) und kann durch verschiedene Maßnahmen beeinflusst werden. Eine dabei entscheidende Einflußgröße ist die Verformungs-

fähigkeit des Werkstoffs selbst. Diese „Materialduktilität“ kann aufgrund der beschriebenen Einflußparameter experimentell nur unter exakt identischen Versuchsbedingungen aufgezeichnet werden. Um die Materialduktilität von hochfestem Beton untersuchen und den Einfluß von Fasern ermitteln zu können, wurde ein spezielles Versuchsprogramm konzipiert, das bereits in [4] vorgestellt wurde.

## 2 Verbesserung der Materialduktilität

### 2.1 Der Fasercocktail

In einem umfangreichen Untersuchungsprogramm wurde am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Leipzig der Einfluß unterschiedlicher Fasern auf das Deformationsverhalten zentrisch belasteter, schlanker Prüfkörper ( $d/h = 1/3$ ) unterschiedlicher Festigkeiten aufgezeichnet und ausgewertet. Dabei zeigte sich, daß der Einfluß von Stahlfasern mit zunehmender Festigkeit immer geringer wird. Abgesehen von geringen Abweichungen konnte für alle getesteten Fasertypen zwar eine merkliche Verbesserung des Arbeitsvermögens im Nachbruchbereich festgestellt werden, allerdings erst nach einem Abfall der Festigkeiten auf ca. 40 % des maximalen Niveaus. Der rapide Tragfähigkeitsverlust nach Überschreiten der Druckfestigkeit wird nicht verbessert. Die Ausbildung eines Plateaus analog normalfester Betone ließ sich nicht beobachten. Auch das Bruchbild zeigte keine wesentlichen Unterschiede zu dem des faserfreien Betons. In einer parallelen Studie wurde der hochfeste Referenzbeton durch Polypropylenfasern verstärkt. Obwohl das Verformungsverhalten nahezu unbeeinflusst blieb, zeigte sich eine grundlegende Änderung des Rißverhaltens. Statt des charakteristischen Schubbandes bildeten sich viele, über den Umfang verteilte Längsrisse (Separationsrisse) aus.

Durch die Kombination der beiden Faserarten, dem sogenannten „Fasercocktail“, läßt sich die Veränderung des Bruchmechanismus mit der rißvernähenden Wirkung der Stahlfasern verbinden. Das Versagen solcher Prüfkörper

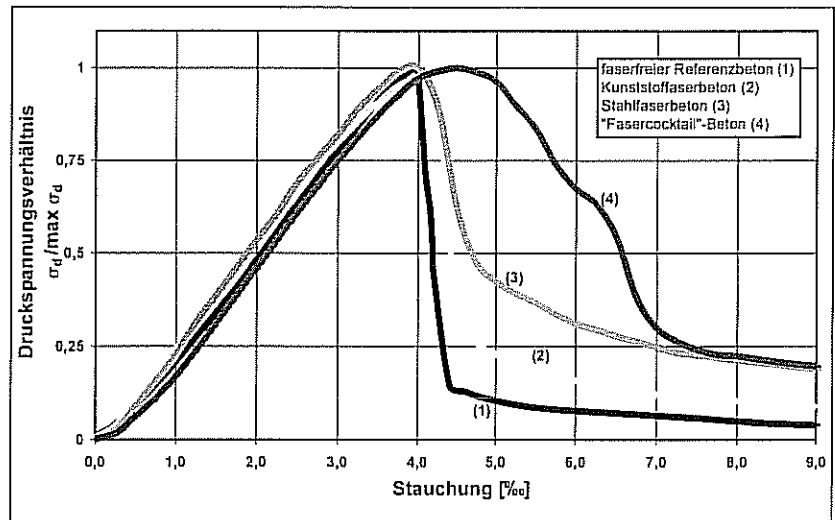


Bild 1.  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramm hochfester faserverstärkter Betone im zentrischen Druckversuch

Fig. 1.  $\sigma$ - $\epsilon$  diagram of High Performance Concrete (HPC)



Bild 2. Bruchbilder der hochfesten faserverstärkten Betone

Fig. 2. Crack pattern of HPC with fibres

vollzieht sich stabil, unter ausgeprägter und frühzeitiger Rißbildung, die das Überschreiten der Festigkeit sichtbar ankündigt. In Bild 1 sind Mittelwertskurven der Druckspannungs-Stauchungskurven der beschriebenen Betone dargestellt. Die Festigkeit  $\max \sigma_d$  dieser Prüferien lag bei ca. 115 MPa ( $1 \text{ MPa} = 1 \text{ MN/m}^2$ ). In Bild 2 finden sich die entsprechenden Bruchbilder.

### 2.2 Wirkungsweise des Fasercocktails

Die Wirkung des „Fasercocktail“-Betons konnte in weiteren Messungen unter Variation der Betondruckfestigkeit und der Fasergehalte bestätigt werden. Dabei zeigte sich eine Abhängigkeit der Verformungsfähigkeit im Nachbruchbereich von der Dosierung und der Leistungsfähigkeit der Stahlfasern. Die Polypropylenfasern vergrößern

die Dissipation inelastischer Energieanteile während der Belastungsphase, was sich in einer deutlichen Ausrundung des ansteigenden Astes niederschlägt und zu signifikanten Steigerungen der Bruchstauchungen führt. Durch lichtmikroskopische Aufnahmen an Dünnschliffen aus hochfesten, unterschiedlichen Belastungsniveaus ausgesetzten Prüfsylindern konnte nachgewiesen werden, daß die Polypropylenfasern für ein wesentlich frühzeitigeres Einsetzen der Mikrorißbildung verantwortlich sind. Bild 3 zeigt das durch eine solche Kunststoffaser ausgelöste Mikrorißwachstum bei einem Belastungsniveau von ca. 40 % der Bruchlast. Übliche faserfreie Hochleistungsbetone zeigen beginnende Mikrorißerscheinungen erst bei ca. 85 bis 90 % der Druckfestigkeit. Die zu Beginn der Untersuchungen in [4] geäußerten Deutungen,

die Polypropylenfaser wirke aufgrund ihres geringen E-Moduls als innere Fehlstelle und initiiere jene Mikroporen, die bereits während der Belastungsphase Energie dissipieren, kann demnach bestätigt werden.

Die mikroskopischen Risse helfen ihrerseits den Stahlfasern, die zur Ausbildung ihrer Zugtragfähigkeiten eine gewisse Rißweitenentwicklung benötigen [1], die vernähernde Wirkung zum Zeitpunkt des Bruchs ausgebildet zu haben.

### 3 Bruchmechanische Kenngrößen

Eine mechanische Beschreibung des Trag- und Bruchverhaltens von Beton unter Druckbeanspruchungen muß das unterschiedliche Verhalten des Werkstoffs in lokal begrenzten Zonen berücksichtigen. Hierzu wurde das compressive damage zone (CDZ) Modell von Markeset [5] verwendet, das die Rißbildungen in der Bruchprozeßzone (BPZ) energetisch beschreibt und mit dem Werkstoffverhalten in den ungeschädigten Regionen überlagert. In Bild 4 sind die verschiedenen Zonen während der Entfestigung des Betons dargestellt. Dabei hängt die Größe der Bruchprozeßzone  $L^d$  vom Dehnungsgradienten und den Querschnittsabmessungen ab. In der Bruchprozeßzone (BPZ) kommt es zur Ausbildung von Längsrissen (2) und einem Schubband (3). Die Bereiche außerhalb der Schadenszone (1) entlasten sich während der Entfestigung und leisten durch einen inelastischen Anteil  $W^{in}$  ihren Beitrag zur Energiebilanz.

Im Rahmen der eigenen Untersuchungen wurde das Entfestigungsverhalten von Beton-Zylindern ( $d/h = 100 \text{ mm}/300 \text{ mm}$ ) unterschiedlicher Druckfestigkeiten (60 MPa, 75 MPa, 90 MPa) aufgezeichnet. Die Faseranteile des Cocktails variierten zwischen  $0 \text{ kg/m}^3$  und  $120 \text{ kg/m}^3$  (Stahlfasern) bzw.  $0 \text{ kg/m}^3$  und  $5 \text{ kg/m}^3$  (Polypropylenfasern). Das experimentell ermittelte Verformungsverhalten wurde anschließend hinsichtlich der in Bild 4 dargestellten Rißbildungen untersucht. Dabei verdeutlichte

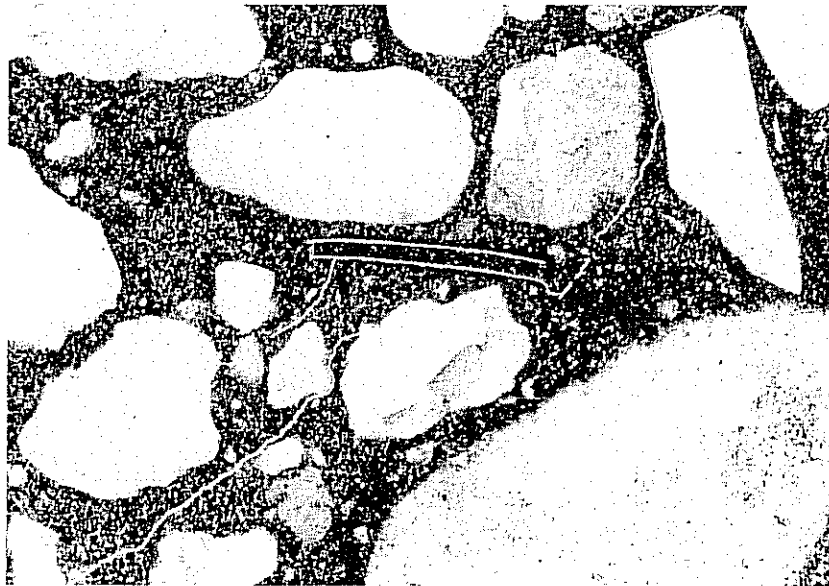


Bild 3. Mikrorißbildung eines hochfesten Betons bei ca. 40 % der Bruchlast

Fig. 3. Microcracking of HPC under 40 % of ultimate loading

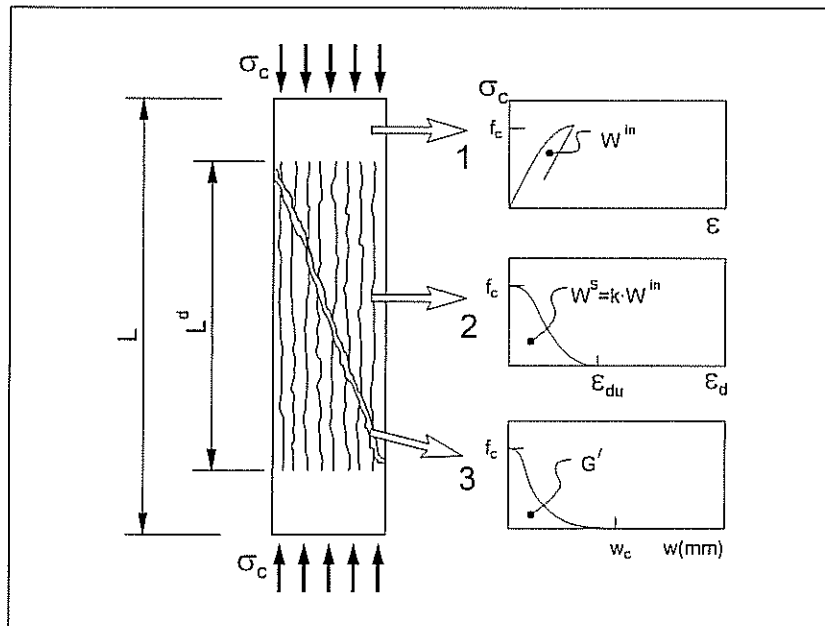


Bild 4. Ausbildung lokaler Bruchzonen (BPZ) im Druckversuch [5]

Fig. 4. Characteristic crack pattern within the CDZ [5]

sich der Einfluß der Polypropylenfasern auf die inelastischen Energieanteile, d. h. auf die Völligkeit des Kurvenverlaufs im ansteigenden Ast. Auch rechnerisch bestätigt sich demnach die modellhafte Vorstellung der durch diese Fasern initiierten inneren Fehlstellen. Die Wirkung der Stahlfasern konzentriert sich dahingegen auf die Völligkeit des Nachbruchbereiches. Die rechnerische Auswertung ergab eine Proportionalität zwischen dem Energieverzehr in den

longitudinalen Rissen und dem Zugabeghalt der Stahlfasern. Bild 5 verdeutlicht den Einfluß der Polypropylenfasern auf das Deformationsverhalten und zeigt, daß die Wirkung der Stahlfasern durch eine frühzeitigere Aktivierung der Mikrorißbildung erheblich verbessert werden kann.

Eine detailliertere Beschreibung der Untersuchungen und Auswertungen findet sich in [1]. Nachdem das Werkstoffverhalten in Abhängigkeit der Fasercocktail-

Dosierungen nunmehr energetisch beschrieben werden konnte, wurde der Transfer auf das Trag- und Verformungsverhalten zentrisch beanspruchter Stützen vorgenommen. Hierbei muß zusätzlich der Anteil der die Bruchprozeßzone umschließenden Bügel energetisch berücksichtigt werden. Entsprechende Vorarbeiten lieferte die Dissertation von Meyer [6].

**4 Bauteilverhalten**

**4.1 Experimentelle Untersuchungen**

Die Verformungsfähigkeit von Druckgliedern aus Hochleistungsbeton wird bisher durch die Festlegung eines Mindestgehaltes der Querbewehrung erreicht. Im Rahmen der eigenen Versuche sollten die Auswirkungen einer verbesserten Materialduktilität auf die Verformungsfähigkeit der zentrischen Druckglieder untersucht werden. Dabei interessierte auch die gegenseitige Beeinflussung der Bauteilduktilität durch konventionelle Bügelbewehrung und Fasercocktail-zugaben. Zu dessen Ermittlung wurden hochfeste Betonstützen im Versuchsmaßstab 1:2,5 gefertigt. Die Abmessungen betragen  $b/d/h = 13 \text{ cm}/13 \text{ cm}/100 \text{ cm}$ . Die konstruktive Durchbildung der Versuchskörper ist in Bild 6 dargestellt, wobei die Querbewehrungsgehalte sich zu 2,61 %, 1,31 %, 1,05 % und 0,87 % ergaben. Der letzte Wert entspricht einer konstruktiven Durchbildung gemäß DIN 1045 (alt).

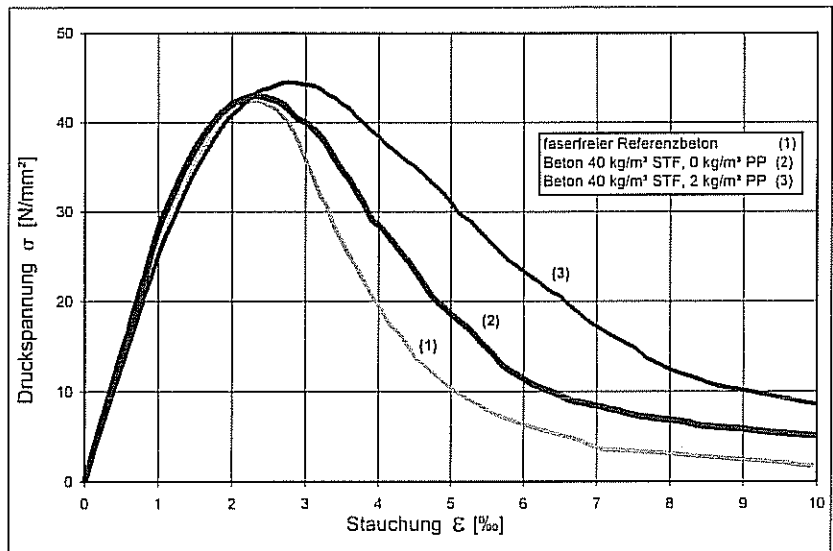


Bild 5. Steigerung der Verformungsfähigkeit durch Polypropylenfasern  
 Fig. 5. Increase of ductility after adding polypropylene fibres

Zur Verminderung eines Querschnittsversagens wurden die Bügelabstände im Bereich der Lasteinleitung stark verringert. Pro Bewehrungskorb wurde jeweils eine Stütze aus faserfreiem Referenzbeton ( $f_{cm, cyl} = 75 \text{ MPa}$ ) und vergleichend eine mit Fasercocktail-Zusatz von  $80 \text{ kg/m}^3$  Stahl- und  $1 \text{ kg/m}^3$  Polypropylenfasern hergestellt. Die Versuchskörper wurden zentrisch und weggesteuert belastet. Bild 7 zeigt das Last-Verformungsverhalten einer faserfreien Stütze mit einer Verbügelung nach Richtlinie für hochfesten Beton, das demnach als Mindestduktilität für Bauteile im Sinne der Normung angesehen werden kann. Im Vergleich hierzu zeigt sich, daß durch eine konstruk-

tive Durchbildung gemäß DIN 1045 keine ausreichende Verformungsfähigkeit erzielt werden kann. Es kommt zu einem plötzlichen Versagen ohne vorankündigende Rißbildung.

Durch Zugabe des Fasercocktails bei einer Verbügelung gemäß DIN 1045 kann zwar noch eine Verformungsfähigkeit nach Überschreiten der Druckfestigkeit aufgezeichnet werden, doch wird die Mindestduktilität nicht erreicht. Die mit enger Verbügelung und zusätzlichem Fasercocktail versehene Stütze zeigt statt dessen eine Flexibilität, die weit über dem geforderten Mindestmaß liegt. Anhand dieser Vergleiche wird bereits deutlich, daß durch die Beimischung

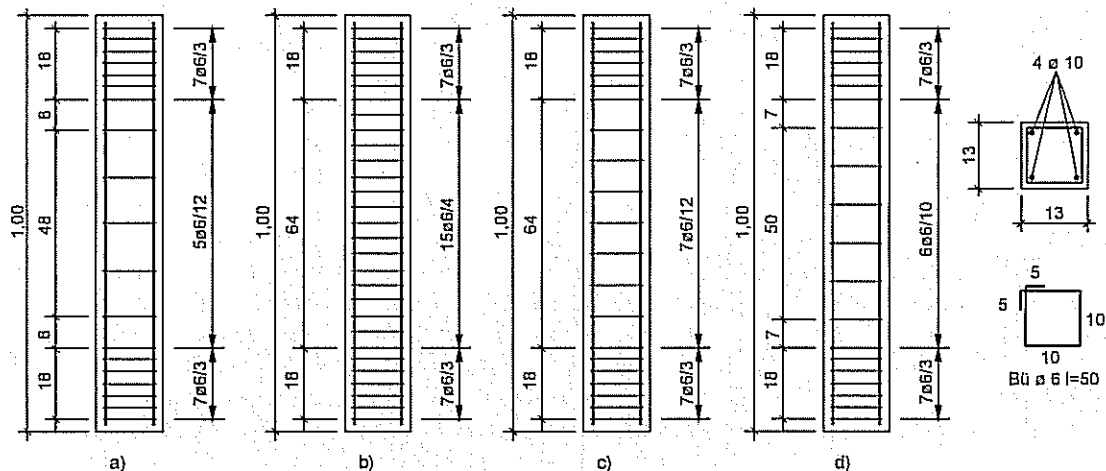


Bild 6. Querbewehrung nach a) DIN 1045, b) DAfStb-Richtlinie, c) + d) frei gewählt  
 Fig. 6. Transverse reinforcement a) DIN 1045, b) DAfStb-Richtlinie, c) + d) free choice

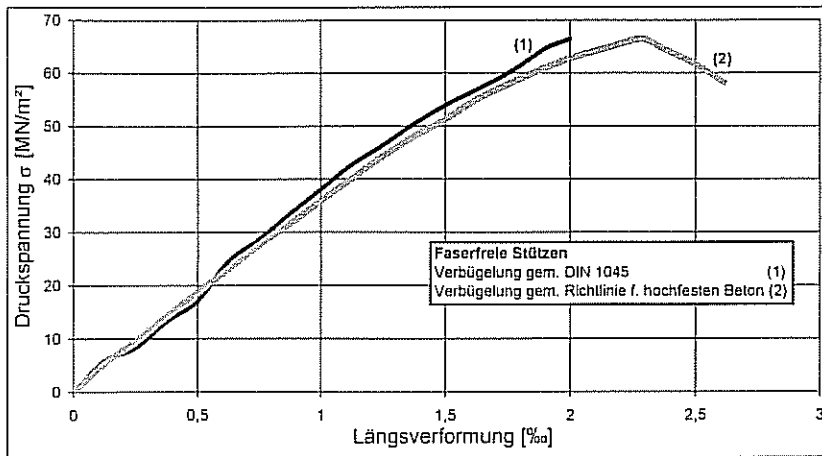


Bild 7. Faserfreie Stützen  
Fig. 7. Columns without fibres

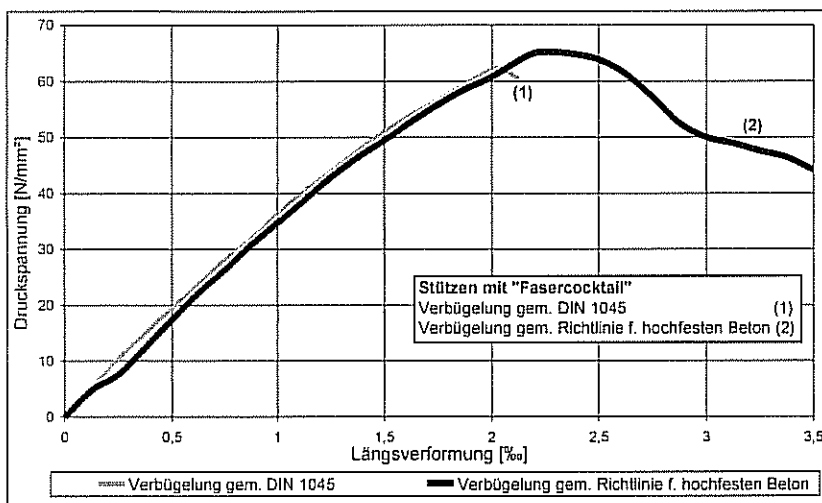


Bild 8. Stützen aus Fasercocktailbeton  
Fig. 8. Columns with fibre cocktail concrete

des Fasercocktails der Verbügelungsgrad zum Erreichen einer der Richtlinie gleichwertigen Verformungsfähigkeit reduziert werden kann. Eine konstruktive Durchbildung nach Vorgaben der DIN 1045 erweist sich allerdings als nicht ausreichend (Bild 8).

Bei allen faserfreien Versuchskörpern stellte sich das von den Zylinderversuchen bekannte Bruchbild ein. Die Stützen versagten nach Absprengen der äußeren Betonschale ausnahmslos durch Ausbildung eines lokalen Schubbandes. Im Gegensatz hierzu kollabierten die faserverstärkten Stützen unter ausgeprägter Mikrorißbildung, die im ansteigenden Ast ab ca. 85 % der Druckfestigkeit deutlich sichtbar das Erreichen der Tragfähigkeit ankündigte. Nach Überschreiten der Höchstlast kam

es zu einem kontinuierlichen Abfall der Belastbarkeit unter stetiger Vergrößerung der Schädigungszonen. Bei allen Versuchen wurde das Entfestigungsverhalten bis zu Resttragfähigkeiten von ca. 50 % der maximalen Festigkeit aufgezeichnet. Dabei konnte weder ein Ausfall der Überdeckung noch die Ausbildung des charakteristischen Schubbandes beobachtet werden. Der Bruchmechanismus ändert sich folglich auch auf Bauteilebene.

#### 4.2 Rechnerische Modellierung

Auch bei der Berechnung der Bauteilreaktion zentrisch belasteter Stützen muß das Materialverhalten in der Bruchprozeßzone (BPZ) und in den ungeschädigten Bereichen getrennt voneinander betrachtet und anschließend überla-

gert werden. Daraus folgt bei Stützen eine Aufteilung in vertikal angeordnete Wirkungssegmente. In der BPZ ist weiterhin eine horizontale, die Stützenfläche betreffende Aufteilung erforderlich, weil sich der bügelumschlossene Kernbereich anders entfestigt als die Bereiche außerhalb der Verbügelung. Bei der Überlagerung der Anteile muß aus Gleichgewichtsgründen die Normalkraft innerhalb der Schadenszone der in den ungeschädigten Bereichen entsprechen. Die gesamte Verkürzung  $\Delta \ell$  der Stütze errechnet sich aus der Stauchung innerhalb der BPZ abzüglich der elastischen Dehnungen der ungeschädigten Bereiche. In Bild 9 sind die Werkstoffbeziehungen der unterschiedlichen Zonen aufgeführt.

Zur Gütebestimmung der theoretischen Überlegungen wurden die in Abschn. 4.1 beschriebenen Stützenversuche nachgerechnet. In Bild 10 ist beispielhaft ein Ergebnis aufgeführt. Sowohl für die dargestellten Fasercocktail-Betone als auch bei den faserfreien Versuchen zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der experimentellen Daten mit den modellierten Versagenskurven. Die kritische Stauchung, bei der sich das Versagen des Systems einstellt, kann gut abgeschätzt werden. Der abfallende Ast errechnet sich für alle Versuche etwas zu ungünstig. Die Modellierungen liegen damit jedoch auf der sicheren Seite.

#### 4.3 Bemessung

Die Auswirkungen der konventionellen Wege (Erhöhung der Umschnürungsbewehrung) mit den Möglichkeiten einer Fasercocktailverstärkung des Betons wurden hinsichtlich der Verformungsfähigkeit von Bauteilen untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, daß die Zugabe eines Fasercocktails die Verformungsfähigkeit von zentrisch belasteten Stützen wesentlich effektiver verbessert, als die Erhöhung der Bügelbewehrung. Es zeigt sich rechnerisch sogar, daß derzeit in der Norm vorgeschriebene Querbewehrungsgehalte nicht ausreichen, eine Betonstütze mit einer Zylinderfestigkeit von  $f_{cm} = 75$  MPa mit einer ausreichenden Verformungs-

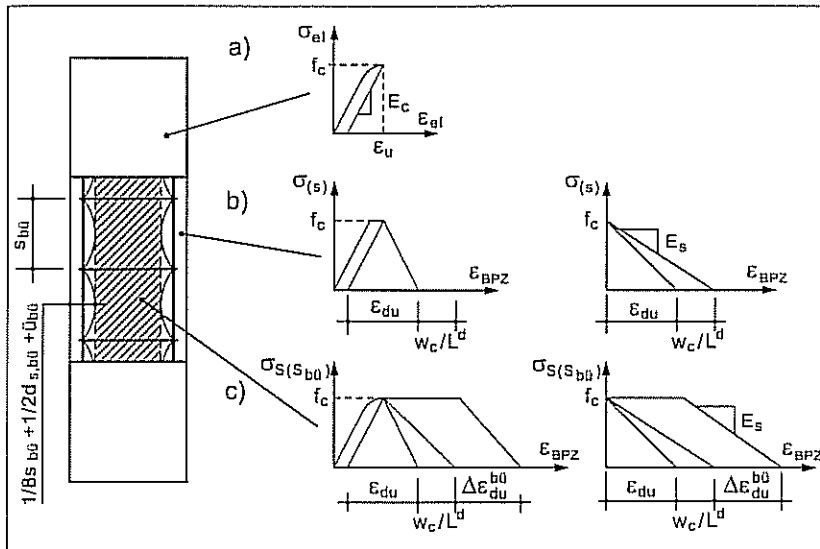


Bild 9. Materialverhalten der unterschiedlichen Stützenbereiche  
 Fig. 9. Material behaviour within the different sections of columns

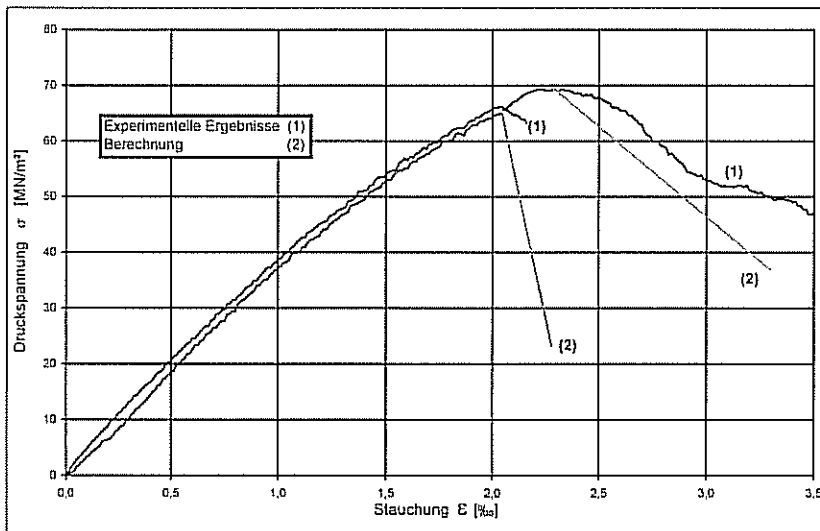


Bild 10. Berechnung des Tragverhaltens zentrisch belasteter Stützen  
 Fig. 10. Calculating the fracture behaviour

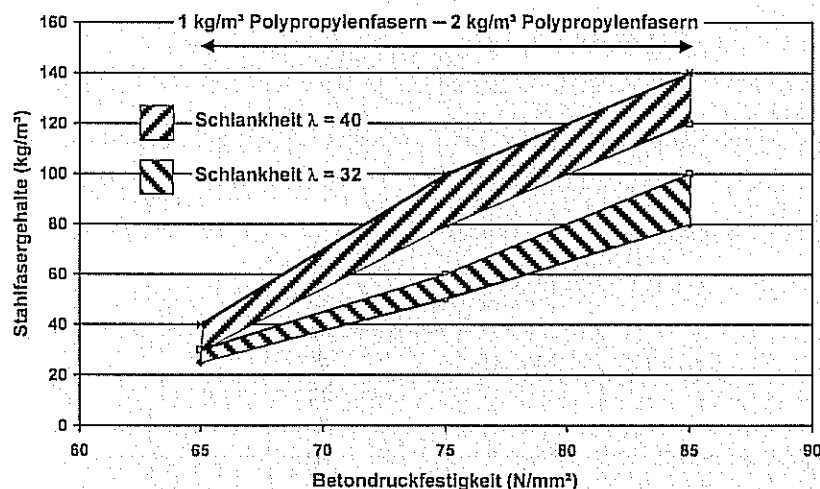


Bild 11. Beispiel eines Bemessungsdiagramms für die Faserdosierung  
 Fig. 11. Example of a fibre cocktail design diagram

kapazität auszustatten, um ein plötzliches und sprödes Versagen zu verhindern. Durch Zugabe eines Fasercocktails gelingt dies, meist sogar bei einer gleichzeitigen Reduzierung der Querbewehrung auf das für normalfeste Betone vorgeschriebene Maß.

Solche Optimierungen müssen jedoch im konkreten Anwendungsfall betrieben werden, da neben der Betonfestigkeit (Ausgangsprüdigkeit) auch die Schlankheit (Verhältnis Höhe zu Seitenlänge) maßgeblichen Einfluß auf das Versagenverhalten besitzt. Je schlanker eine Stütze wird, desto größer werden die Bauteilbereiche, die nicht in die Bruchzone involviert sind und sich nach Überschreiten der Höchstlast entspannen. Der Energieanteil, der in diesen Abschnitten freigesetzt wird, muß durch die Verformungsfähigkeit der Bruchprozezone verzehrt werden. Bei sehr schlanken Stützen, wenn dieser elastische Anteil zu groß wird, würde sich die gezielte Ausbildung mehrerer Bruchprozezzonen günstig erweisen. Dies könnte durch konstruktive Maßnahmen gesteuert werden.

Um dennoch Größenordnungen für benötigte Dosierungen des Fasercocktails zu erhalten, sind mit dem beschriebenen Modell einige Berechnungen durchgeführt worden. Dabei wurden quadratische Stützen modelliert, deren Länge 275 cm betrug. Vergleichend wurden jeweils Seitenlängen von 24 cm und 30 cm gegenübergestellt. Damit ergaben sich Schlankheiten  $\lambda$  von ca. 40 bzw. ca. 32.

In Bild 11 sind die nötigen Fasercocktaildosierungen aufgezeigt, die bei einer konstruktiven Durchbildung nach DIN 1045 für eine ausreichende Verformungsfähigkeit der Stützen sorgen, um explosives Versagen zu verhindern.

## 5 Sonderanwendungen

### 5.1 Brandverhalten

Tragwerke aus hochfestem Beton reagieren empfindlich auf Brandbeanspruchungen. Sie versagen meist frühzeitig unter teilweise explosionsartigen Abplatzungen der Oberfläche. Der verbleibende Restquerschnitt weist die nötige Tragfähigkeit nicht mehr auf.

Die Ursache für dieses Verhalten liegt in den durch die Brandeinwirkungen ausgelösten Feuchtigkeits- und Gasbewegungen im Inneren des Bauteils, die aufgrund der homogenen und dichten Betonmatrix behindert werden. Schon bei einer Aufheizung auf 300 °C, also relativ kurz nach Beginn eines Brandes, können im Beton Zugspannungen von 8 MPa entstehen, die sich bei einer weiteren Steigerung der Temperatur auf 350 °C verdoppeln können [7] und die Zugfestigkeit des Betons bei weitem überschreiten.

Die Anordnung einer netzartigen Schutzbewehrung soll schädigende Abplatzungen auf die äußeren Bereiche beschränken und einen Restquerschnitt sichern, der im Brandfall genügende Tragreserven bietet. Diesbezügliche Konstruktionsdetails können dem Beton Brandschutz Handbuch [8] und der DAfStb-Richtlinie für hochfesten Beton entnommen werden [2]. Alternativ zu diesen konstruktiven Möglichkeiten dürfen gemäß [2] auch betontechnologische Maßnahmen zur Begrenzung der Abplatztiefen herangezogen werden. Dies wird besonders dann interessant, wenn der Einbau der Schutzbewehrung aufgrund hoher statischer Bewehrungsgehalte zu kompliziert ist.

Experimentell konnte gezeigt werden, daß geringe Dosierungen von Polypropylenfasern (siehe Bild 7) die Abplatzneigung hochfester Betone deutlich reduzieren. Da Polypropylen bei ca. 160 °C schmilzt, werden in der homogenen Zementsteinmatrix Mikroporen frei, durch die sich entstehender Dampfdruck entspannen kann. In Versuchen wurde festgestellt, daß hierzu eine Mindestdosierung von 4 kg/m<sup>3</sup> an Kunststoffasern notwendig ist [9].

Kordina erläutert in [9] weiter, daß Stahlfasern zumindest bei feuchtem, normalfestem Beton die Abplatztiefen reduzieren können. König und Grimm berichten in [10] davon, daß Stahlfasern das Brandverhalten von hochfesten Betonen eher negativ beeinflussen.

In zwei Tastversuchen wurde das entsprechende Verhalten

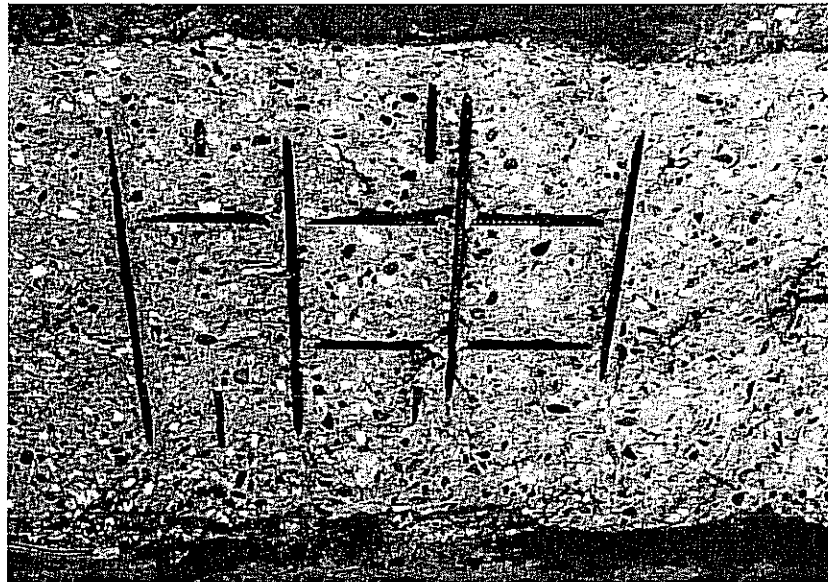


Bild 12. Abplatzung bei Platten aus faserfreiem Beton bei Brandbeanspruchungen

Fig. 12. Plate without fibre cocktail after firing

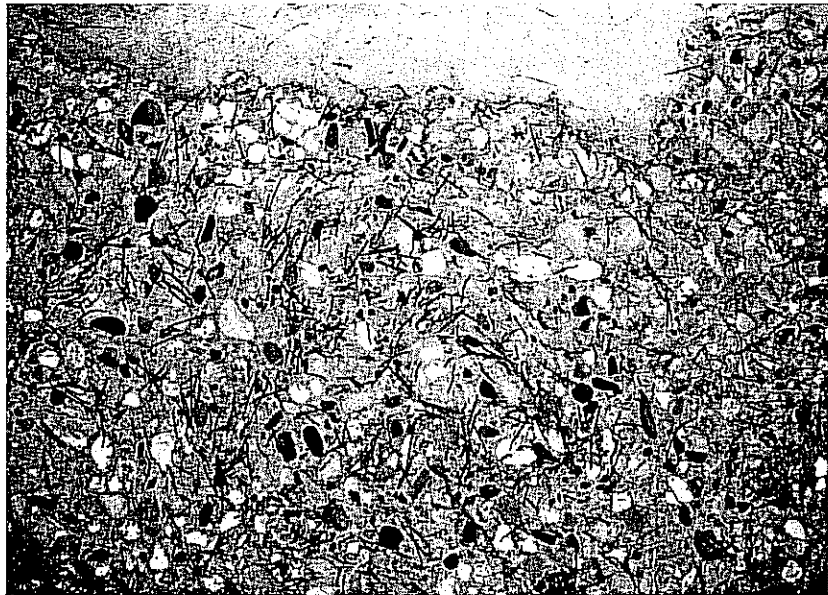


Bild 13. Abplatzung bei Platten aus „Fasercocktail“-Beton bei Brandbeanspruchungen

Fig. 13. Plate with fibre cocktail after firing

von „Fasercocktail“-Betonen untersucht. Dazu wurden jeweils 2 Stützen und 2 Deckenausschnitte gefertigt, wobei immer vergleichend ein faserfreier und ein faserverstärkter Versuchskörper hergestellt wurden. Der verwendete „Fasercocktail“ bestand aus 80 kg/m<sup>3</sup> Stahlfasern und 2 kg/m<sup>3</sup> Polypropylenfasern. Die Kunststoffasern wurden ausschließlich gemäß den Anforderungen zum Erreichen der Verformungsfähigkeit dosiert. In unabhängigen „Kaltversuchen“

konnte auch eine ausreichend hohe Duktilität der Stützen festgestellt werden. Die gewählte Polypropylenfaser-Dosierung ist jedoch deutlich geringer als der für Brandversuche benötigte Mindestgehalt.

Die Würfeldruckfestigkeit  $f_{cm,150}$  betrug im Mittel 85 MPa, der Elastizitätsmodul wurde zu ca. 34 000 MPa („Fasercocktail“) bzw. ca. 36 000 MPa (faserfrei) ermittelt. Am Prüftag ergab sich ein Feuchtegehalt der Prüfkörper zwischen 3,6 M.-% und 3,8 M.-%.



Die plattenartigen Bauteile waren jeweils 40 cm dick und besaßen unterschiedliche Seitenlängen, die durch die Ofengeometrie bestimmt wurden. Die beheizten Flächen ergaben sich zu  $1,25 \text{ m} \times 1,20 \text{ m}$  bzw.  $1,25 \text{ m} \times 0,55 \text{ m}$ . Beide Segmente wurden unbelastet geprüft und der sog. „RABT“-Beflammung (Richtlinie für Ausstattung und Betrieb von Tunneln) ausgesetzt, hinsichtlich möglicher Anwendungsgebiete im Tunnelbau (Explosionslastfall).

Etwa zeitgleich konnten erste kleine Abplatzungen bei beiden Versuchskörpern beobachtet werden. Während sich das Herauslösen der Bruchstücke bei der faserverstärkten Platte schneller beruhigte, mündeten die Abplatzungen des faserfreien Segmentes in einer explosionsartigen Ablösung eines größeren Platten-Ausschnitts. Der begleitende Rißverlauf stellte sich bei beiden Segmenten ähnlich ein. Die Tiefe der Abplatzungen wurde nach Versuchsende zu ca. 30 bis 40 mm bei der faserverstärkten und ca. 50 bis 75 mm bei der faserfreien Platte festgestellt.

Die getesteten Stützen waren quadratisch, mit Seitenlängen von jeweils 30 cm und wurden mit 4 Längsstäben  $\varnothing 20$  und Bügeln  $\varnothing 10$  bewehrt. Die Betonüberdeckung der Bügel betrug jeweils 3 cm. Die Stützenlänge war aus Gründen der Versuchseinrichtung auf 1,15 m begrenzt. Beide Stützen wurden unter Gebrauchslast einer ETK-Beflammung (Einheits-Temperatur-Kurve) ausgesetzt.

Eine verstärkt einsetzende Mikrorißbildung ermöglichte den Dampfaustritt im Eckbereich beider Stützen, führte aber bei der faserfreien Stütze zu einem frühzeitigen Abplatzen der Betonoberfläche. Ein Ablösen der Eckbereiche konnte, zeitlich verzögert, auch bei dem faserverstärkten Prüfkörper beobachtet werden, jedoch vernähten die Stahlfasern die Oberfläche mit dem Kernbereich und verhinderten so ein Abfallen. Der Rißverlauf und das Stauchungsverhalten beider Stützen waren ähnlich. Ein Versagen trat in beiden Fällen ein, nachdem die Temperaturfront von  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  die Bewehrung erreichte. Für die faserfreie Stütze war dies nach 71 Minuten der Fall, die Fasercocktail-Stütze versagte erst nach 105 Minuten.

Auch hier zeigt sich ein positiver Kombinationseffekt beider Fasertypen. Während die Kunststofffaser offensichtlich hier auch in geringerer Dosierung nötige Porenräume schafft und gleichzeitig als Initiator weiterer Mikrorißbildungen dient, vernähen die Stahlfasern die schützende Betonoberfläche mit dem Kernbereich. Durch diesen isolierenden Effekt verlangsamt sich das Eindringen der Temperaturfront ins Bauteilinnere, das Versagen kann wirksam verzögert werden. Auch bei den getesteten Platten verringern sich die schädigenden Abplatzungstiefen wohl aus ähnlichen Gründen. Das steht auch nicht im Widerspruch zu den Beobachtungen von *Kordina* [9] und *König* [10].

Diese Erkenntnisse der Tastversuche werden zur Zeit in einem vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton geförderten Versuchsprogramm vertieft. Hier soll insbesondere der Einfluß der Faserdosierung und der durch die Polypropylenfasern bereits bei geringerer Belastung bewirkte Beginn der Mikrorißbildung weiter beleuchtet werden. Auch sollen lichtmikroskopische Aufnahmen die Mikrorißbildungen untersuchen und Aufschluß über das Verhalten der Polypropylenfaser geben, nachdem sie ihren Schmelzpunkt erreicht hat. Über die Ergebnisse wird berichtet.

## 5.2 Sonderkonstruktionen im Fertigteilbau

Das Potential faserverstärkter Betone eignet sich besonders für den Fertigteilbau, da im Werk durch Vorversuche die für die jeweilige Faserdosierung optimale technologische Ausgangsmischung vorbereitet werden kann. Durch gezielte Maßnahmen wäre weiterhin denkbar, Faserausrichtungen im Frischbeton günstig zu beeinflussen und damit ihre Wirksamkeit beträchtlich zu erhöhen.

Neben herkömmlichen Konstruktionen sind hier weitere Sonderanwendungen denkbar. Erste Untersuchungen von Fertigteilstützen für Flachdecken beispielsweise gaben Aufschluß über deren Trag- und Verformungsverhalten. Diese wurden am Stützenkopf mit einem Kragen versehen, der das Durchstanzverhalten verbessern soll. Bild 14 zeigt den Versuchsaufbau.

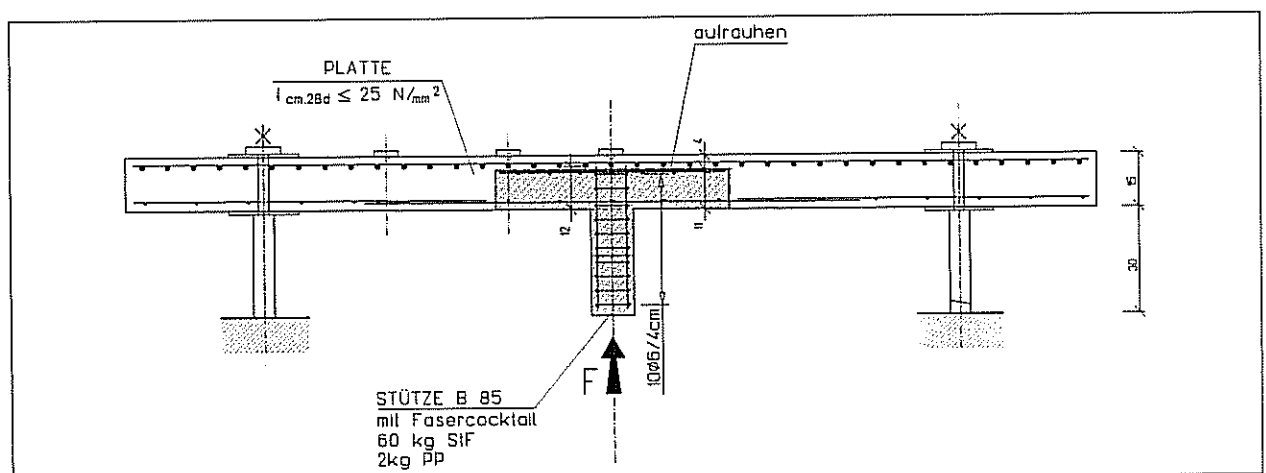


Bild 14. System der Fertigteilstütze mit integriertem Durchstanzkragen  
Fig. 14. Precast concrete column with a special punching prevention

Der Kragen ist ebenso wie die Stütze aus hochfestem Fasercocktailbeton und ca. 5 bis 7 cm dünner als die spätere Decke. Diese kann aus normalfestem Beton hergestellt werden. Die untere Deckenbewehrung wird konstruktiv angeschlossen, eine obere Bewehrung kann über dem Fertigteil verlegt werden. Bild 15 zeigt das Last-Verformungsverhalten dieser Konstruktion im Vergleich zu einem herkömmlichen Flachdeckensystem, bei dem die hochfeste Stütze auf eine normalfeste Deckenplatte trifft und sich der bekannte Durchstanzmechanismus einstellt. Signifikante Steigerungen der Tragfähigkeit und der Verformbarkeiten können durch gezielte Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften erzielt werden.

Während die Tragfähigkeit eines solchen herkömmlichen Systems durch die Tragfähigkeit der Druckstreben in der normalfesten Deckenplatte bestimmt wird, konkurrieren in der Sonderkonstruktion zwei Versagensmechanismen. Einerseits ein „inneres“ Durchstanzen, bei dem die Stütze versucht durch den Kragen zu brechen. Der von ihr aktivierte Stanzkegel ist klein, jedoch ist die Schubtragfähigkeit des Kragens durch die höhere Materialfestigkeit und die vorhandenen Fasern wesentlich gesteigert. Zur Berechnung der Schubtragfähigkeit des Kragens können die in [1] vorgestellten Modelle verwendet werden. Andererseits das „äußere“ Durchstanzen, indem die Stütze mitsamt des Kragens die Deckenkonstruktion durchbricht. Hier ist der Durchstanzkegel durch die Geometrie des Kopfkragens bestimmt, die Schubtragfähigkeit der Decke jedoch aufgrund des faserfreien normalfesten Betons wesentlich geringer.

Die Geometrie und die Festigkeit des Kopfkragens müssen so ausgelegt sein, daß die flachste auftretende Druckstrebe sicher aufgenommen werden kann. Die Mindestfaserdosierung ergibt sich aus den beschriebenen Anforderungen des „inneren“ Durchstanzens. Eine innerhalb des Kragens verlegte obere Bewehrung kann die Fertigteilkonstruktion derart ertüchtigen,

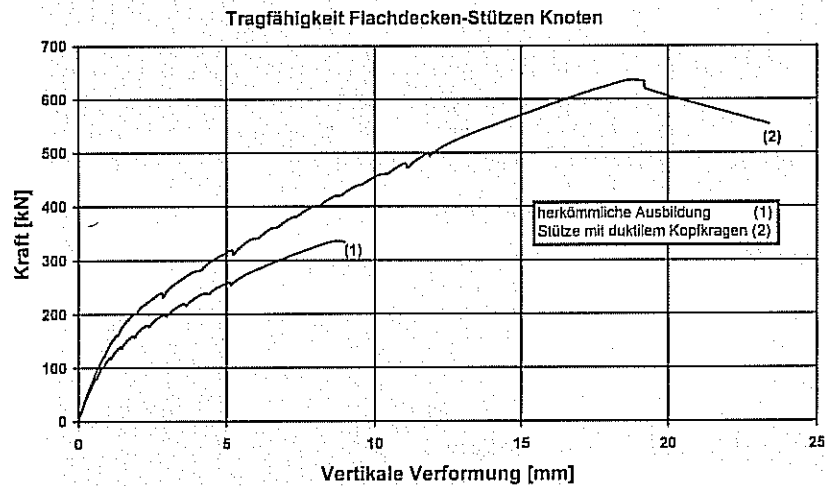


Bild 15. Last-Verformungsverhalten  
Fig. 15. Load-displacement behaviour

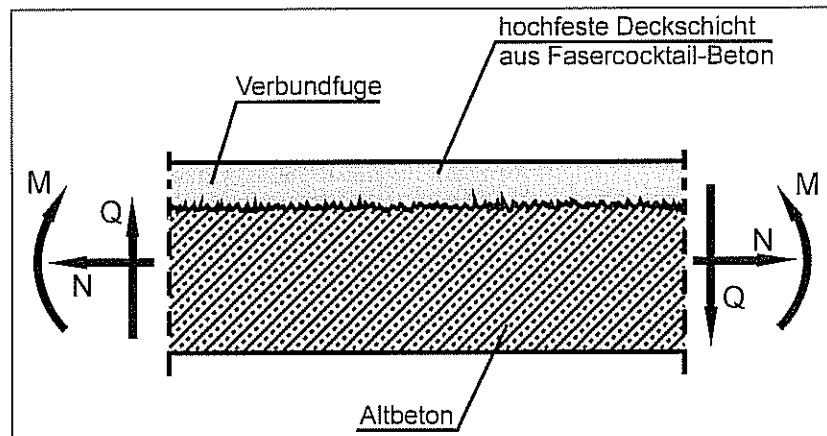


Bild 16. Hochfeste Deckschicht zur Verstärkung von Decken  
Fig. 16. HPC to strengthen slabs

daß Sonderlasten im Bauzustand abgetragen werden können. So ist es beispielsweise denkbar, daß neuartige, stützenfreie Schalungssysteme entwickelt werden könnten, bei denen die horizontalen Elemente an die Stützenraster angepaßt und an die vorhandenen Fertigteilstützen angehängt werden.

### 5.3 Verstärkung von Bauteilen

In der Bausanierung gewinnen Verstärkungen von Betonbauteilen immer mehr an Bedeutung. Sie sollen helfen, die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit und das Ermüdungsverhalten wiederherzustellen oder zu verbessern. In einem Sachstandsbericht des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) [11] finden sich hierzu unterschiedliche Möglichkeiten. Darauf aufbauend wurden in einer Diplomarbeit [12]

am Institut für Massivbau & Baustofftechnologie die Auswirkungen einer Druckzonenergänzung aus verformungsfähigem hochfesten „Fasercocktail“-Beton rechnerisch untersucht (Bild 16). Die Erhöhung der Bruchstauhungen durfte dabei berücksichtigt werden.

Durch spezielle technologische Maßnahmen kann die Verbundfuge zwischen Neu- und Altbeton so ertüchtigt werden, daß das neue System als monolithischer Querschnitt betrachtet werden kann. Die rechnerischen Auswertungen [12], bei denen auch die Einflüsse aus Vorbelastung und Entlastung berücksichtigt wurden, ergeben, daß erhebliche Tragreserven geweckt werden können, solange die Zugzone des Systems intakt bleibt. Dies gilt für alle über-

bewehrten Stahlbetonbalken und -decken, bei denen ein Versagen der Betondruckzone maßgebend wird. Bei praktisch üblichen Systemabmessungen, die auf ein Verformungsversagen der Zugzone ausgelegt sind, muß diese ebenfalls ertüchtigt werden. Dies kann durch Stahl- und Kohlefaserlamellen gewährleistet werden.

## 6 Ausblick

Durch die Kombination von Polypropylen- und Stahlfasern, also einer „weichen“ und damit rißauslösenden Faser mit einer rißvernehmenden Mikrobewehrung, können auch bei schlanken Druckgliedern aus hochfestem Beton große Verformungskapazitäten geschaffen werden. Dieser duktile Hochleistungsbeton versagt unter frühzeitiger Rißankündigung. Neben verbesserter Deformations- und Brucheigenschaften bewirkt der „Cocktail“ auch eine nicht unerhebliche Steigerung der Feuerwiderstandsdauer. Da die nötigen Fasergehalte rechnerisch ermittelt werden können [1] (siehe Bild 11), ist wirtschaftliches Konstruieren möglich.

Weiterhin zeichnen sich beispielsweise im Tunnelbau neue, interessante Anwendungsgebiete ab. Hier scheint das Material prädestiniert, den Einwirkungen aus Drucknormal- und Querkraft widerstehen und sich auch unter Brandbeanspruchungen günstig verhalten zu können.

Für weitere Grundlagenforschung sind Ergebnisse aus dreiachsigen Spannungsversuchen ebenso interessant wie auch das Verhalten unter Zwangsbeanspruchungen.

## Literatur

- [1] Kützing, L.: Ein Beitrag zur Tragfähigkeitsermittlung stahlfaserverstärkter Betone unter besonderer Berücksichtigung bruchmechanischer Kenngrößen. Dissertation, Universität Leipzig, 1999 (erschienen im Teubner Verlag, ISBN 3-519-05267-9).
- [2] Richtlinie für hochfesten Beton, Ergänzung zu DIN 1045/07.88 für die Festigkeitsklassen B 65 bis B 115. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, August 1995.
- [3] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Bemessung und Konstruktion.
- [4] König, G., Kützing, L.: Mit einem Fasercocktail zur Duktilität von Druckgliedern aus Hochleistungsbeton. Bautechnik 75 (1998), Heft 2, S. 62–66.
- [5] Markeset, G.: Failure of concrete under compressive strain gradients. Dissertation, Department of Structural Engineering, University of Trondheim, Norwegen, 1993.
- [6] Meyer, J.: Ein Beitrag zur Untersuchung der Verformungsfähigkeit von Bauteilen aus Beton unter Biegedruckbeanspruchungen. Dissertation, Universität Leipzig, 1998.
- [7] Diederichs, U., Jumppanen, U.-M., Schneider, U.: High Temperature Properties and Spalling Behaviour of High Strength Concrete.

Contribution in „High Performance Concrete: Materials and Properties“, Aedification-Verlag, Freiburg, 1995.

- [8] Kordina, K., Meyer-Ottens, C.: Beton Brandschutz Handbuch. Beton-Verlag, Düsseldorf, 1981.
- [9] Kordina, K.: Brandschutzforschung im Betonbau – Ergebnisse aus den letzten Jahren. Vorträge der DBV-Arbeitstagung „Forschung“ am 7. November 1996 in Wiesbaden, Deutscher Beton Verein (DBV), Wiesbaden, 1996.
- [10] König, G., Grimm, R.: Hochleistungsbeton. Betonkalender 1996, Teil 1, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1996.
- [11] Schäfer, H.-G. et al.: Verstärken von Betonbauteilen, Sachstandsbericht. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 467, Berlin, 1996.
- [12] Römer, T.: Verstärken von Betonbauteilen durch duktile Hochleistungswerkstoffe. Diplomarbeit, Universität Leipzig, 2000.

## Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Lars Kützing, IBC Ingenieurbau-Consult GmbH Mainz-Erfurt-Leipzig, Kakteenweg 1a, 55126 Mainz (früher Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Leipzig), Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Leipzig, Marschnerstraße 31, 04109 Leipzig