

10

Beton- und Stahlbetonbau

101. Jahrgang
Oktober 2006
Heft 10, Seite 803-810
ISSN 0005-9900

A 1740

Sonderdruck

von
Dipl.-Ing. Wilhelm Nell
Dipl.-Ing. Manfred Greiff



Innovative Konstruktionsmöglichkeiten mit Stahlfaserbeton

Optimierter Stahlfaserbeton zum Nachweis
der Rißbreitenbegrenzung eines
kombinationsbewehrten Regenrückhaltebeckens

Innovative Konstruktionsmöglichkeiten mit Stahlfaserbeton

Optimierter Stahlfaserbeton zum Nachweis der Rißbreitenbegrenzung eines kombinationsbewehrten Regenrückhaltebeckens

Zur Optimierung der Leistungsfähigkeit von Stahlfaserbeton, in Kombination mit konventionellem Stahlbeton ist es erforderlich, ausgewählte Stahldrahtfasern in einem entsprechend konfektionierten Beton zu prüfen. Die Optimierung der Stahldrahtfaser und des Betons ist die Voraussetzung innovative, technisch anspruchsvolle Lösungen und wirtschaftliche Vorteile zu erzielen. Bei einem stark bewehrten Regenrückhaltebecken werden die Vorteile deutlich. Die Stabstahlbewehrung wird reduziert und die Dauerhaftigkeit gesteigert.

Innovative construction possibilities with steelfibre reinforced concrete

Optimized steelfibre reinforced concrete for proof of crack with limitation of a combined reinforced rain storage reservoir

To optimize the performance of steelfibre reinforced concrete in combination with conventional reinforced concrete, it is necessary to test selected steelfibres in a converted concrete. The optimization of Steelfibres and concrete is the presupposition to get innovative, technical formidable solutions and economic advantages. With a strong reinforced rain storage reservoir the advantages are getting clear. The steel bar reinforcement is reduced and the durability is increased.

1 Stahlfaserbeton

1.1 Historie

Bereits im Jahre 1874 wurde die Zugabe von Stahlabfällen von *A. Berard* zum Patent angemeldet. Herr *H. Alfsen* entwickelte diese Idee weiter und meldete 1918 ein Patent zur Verbesserung der Betonzugfestigkeit durch Zumischen länglicher Fasern an. Ab 1920 erschienen verschiedene Patente zu Faserformen und -anwendungen. Erst in den 70er und 80er Jahren kamen erste Bemessungsregeln und weitere Anwendungen (unter anderem Stahlfaserbeton-Rohre, Stahlfaserspritzbeton) auf den Markt.

1.2 Anwendungen und Aussichten

In der Vergangenheit beschränkten sich die Anwendungen von Stahlfaserbeton auf den Ersatz konstruktiver Bewehrung, größtenteils bei Industriefußböden und später auch im Wohnungsbau. Vorrangig aus wirtschaftlichen Gründen wurde die übliche, konstruktive Bewehrung aus Stabstahl oder Baustahlmatten ersetzt. Heute wird jedoch das Potential des innovativen Baustoffes Stahlfaserbeton in deutlich größerem Umfang genutzt. Immer

mehr Bauteile, respektive Bauwerke werden mit Stahlfaserbeton und stahlfaserbewehrtem Stahlbeton ausgeführt.

Veröffentlichungen, Merkblätter, Bemessungshilfen, Forschungsberichte usw. zeigen immer mehr Möglichkeiten und Beispiele auf. Das DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton [1] beinhaltet unter anderem Bemessung, konstruktive Regeln, Bauausführung, usw. In der aktuellen DAfStb-Richtlinie Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton [6] wird auf die Möglichkeit der Rißbreitenbegrenzung durch Kombination von Stabstahl- und Stahlfaserbewehrung hingewiesen. Im folgenden sind einige Möglichkeiten und Anwendungen aufgeführt, die bereits ausgeführt wurden und sich in der Praxis bewährt haben.

1.2.1 Stahlfaserbeton Fertigteile

Gerade bei dünnwandigen Betonbauteilen kann durch den Einsatz von Stahlfaserbeton der komplizierte und arbeitsintensive Bewehrungsaufwand eingespart werden. Erhöhte Grünstandsfestigkeit und eine verbesserte Transportsicherung sind weitere Vorteile. Fertigteile wie Betonrohre, Tübbinge (Tunnelbau), Kellerlichtschächte, Kellerwände, usw. können wirtschaftlicher und schneller produziert werden.

1.2.2 Selbstverdichtender Stahlfaserbeton

Durch die Verwendung von Stahlfasern werden zu den Frischbetoneigenschaften auch die Festbetoneigenschaften erheblich verbessert. Mit den entsprechenden Betonrezepturen sind Zugabemengen von 100 kg/m³ Stahlfasern durchaus möglich [9].

1.2.3 Stahlfaserbewehrter Unterwasserbeton

Für ein großes Gebäude am Potsdamer Platz wurde in 20 m Tiefe eine Unterwasserbetonsohle aus Stahlfaserbeton hergestellt [10]. Im Vergleich zur konventionellen Lösung wurde die Betonstahlbewehrung eingespart, die Plattendicke reduziert und der Pfahlabstand vergrößert.

1.2.4 Stahlfaserbewehrter Leichtbeton

Der im Vergleich zum Normalbeton eher sprödere Baustoff Leichtbeton, kann durch die Zugabe von Stahldrahtfasern duktile Eigenschaften erhalten.

1.2.5 Stahlfaser-Hochleistungsbeton

Mit zunehmender Betondruckfestigkeit und steigender Stahlfaserzugfestigkeit lassen sich auch bei höher festen Betonen noch duktile Eigenschaften erzielen. Die äquivalente Biegezugfestigkeit läßt sich erheblich steigern und ermöglicht weitere Anwendungen.

1.2.6 Stahlfaserbeton-Verbundkonstruktionen

Im Verbund mit weiteren Baustoffen zeigt Stahlfaserbeton ebenfalls hervorragende Eigenschaften. Erprobte Kombinationen sind z. B. Beton und Stahlfaserbeton, Stahlbeton und Stahlfaserbeton [12] und Holzkonstruktionen und Stahlfaserbeton. Die Steifigkeit von Holzbalkendecken läßt sich durch Stahlfaserbeton im schubsteifen Verbund stark erhöhen. So ergeben sich interessante und wirtschaftliche Möglichkeiten bei der Sanierung und/oder Umnutzung von Altbauten mit Holzbalkendecken [11].

1.2.7 Stahlfaserbeton mit Vorspannung

Für große Industriebauwerke wurden schon mehrfach vorgespannte Binder aus stahlfaserverstärktem Beton eingesetzt. Die erforderliche Schubbewehrung bei diesen Bauteilen wird komplett durch den Anteil der Fasern ersetzt.

1.2.8 Geschoßdecken aus Stahlfaserbeton

Das TAB-Slab™ System ist eine frei gespannte Decke für den Wohnungs- und Gewerbebau, welches ohne tragende Betonstahlbewehrung auskommt und eine reine Stahlfaserbeton-Lösung darstellt [9]. Es wurden bereits mehrere Bauvorhaben realisiert, wobei sich zur Zeit in Deutschland drei Projekte in der Vorbereitung befinden, für die dann eine Zustimmung im Einzelfall erfolgen muß.

2 Eigenschaften des Baustoffes Stahlfaserbeton

Der werkgemischte Stahlfaserbeton entspricht hinsichtlich seiner Zusammensetzung und seiner Eigenschaften den Anforderungen der DIN EN 206-1/DIN 1045-2 [4]. Besonderheiten des Baustoffes Stahlfaserbeton, die nicht durch [4] erfaßt werden, beinhaltet das Merkblatt „Stahlfaserbeton“ des Deutschen Beton- und Bautechnik-Verains E.V. [1].

*Werksgemischter Stahlfaserbeton ist ein Beton
nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2.*

Gegenüber den unbewehrten Normalbetonen weist der Stahlfaserbeton je nach Zusammensetzung deutlich verbesserte Festbetoneigenschaften auf. Hierzu zählen insbesondere das Reißverhalten, das Last- Verformungsverhalten unter Zugbeanspruchung sowie der Verschleißwiderstand.

2.1 Verbundwirkung und Auszugsverhalten von endverankerten Stahlfasern

Die Faserwirkung, bzw. die Verbundwirkung der Fasern im Stahlfaserverbundbaustoff beruht hauptsächlich auf der elastischen Verlängerung der Fasern und dem anschließenden Ausziehen der Fasern aus der Matrix. Damit hängt die Verbundwirkung maßgeblich vom Haftverbund und vom Reibungsverbund ab. Voraussetzung dafür ist, daß die Fasern aus der Betonmatrix ausgezogen werden

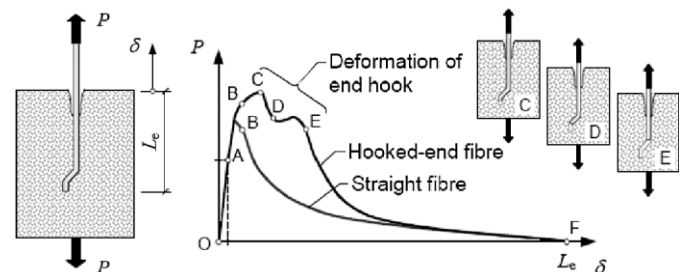


Bild 1. Faserauszugsverhalten [8]
Fig. 1. Pullout behavior of steel fibres

und nicht reißen. Bei Verformungsbeanspruchungen muß in der Abfolge zwischen einer Faseraktivierung mit einer verfestigenden Eigenschaft (in der Phase der Mikrorißbildung) und dem Faserauszug mit entfestigenden Eigenschaften und großen Verformungen unterschieden werden (Bild 1).

2.1.1 Haftverbund

Zunächst wirkt der Haftverbund (Adhäsion) und es findet eine elastische Faserverlängerung statt (Bild 1, A). Wird das Bauteil beansprucht, in der Regel durch eine Biegezugbeanspruchung, beginnt die Mikrorißbildung. Durch Adhäsionskräfte zwischen der Betonmatrix und der Oberfläche der Stahlfaser, wirkt der Haftverbund. Die Fasern werden in dieser Phase gezogen und es findet eine Faserverlängerung im elastischen Bereich statt. Dieser Prozeß dauert bei bleibender Beanspruchung bis zum Erreichen des maximalen Haftverbundes an.

2.1.2 Reibungsverbund

Durch weitere Öffnung der Risse im Mikrorißbereich wird der Haftverbund überschritten und es kommt zur Phase des Faserauszuges (Bild 1, C bis E). Hier ist eine Entfestigung des Baustoffes vorhanden. Die Fasern werden aus der Betonmatrix heraus gezogen. Dieses findet über eine plastische Verformung der Endverankerung statt. Weiterhin wirkt Reibungsverbund zwischen der Betonmatrix und der Oberfläche der Stahlfasern.

Im Zustand des Faserauszuges ist die Betondruckfestigkeit (im speziellen die Festigkeit des Zementsteines) und die Faserzugfestigkeit zu betrachten. Die plastische Verformung und damit der Faserauszug kann nur erfolgen, wenn die Faserzugfestigkeit nicht überschritten wird, welches zum Faserreißen führen würde. Je höher die Betondruckfestigkeit, desto mehr Energie muß für die plastische Verformung der Fasern aufgewendet werden. Somit kann die Verankerung in der Phase des Faserauszuges gesteigert

werden, indem im Verhältnis zur Betondruckfestigkeit eine optimal große Faserzugfestigkeit gewählt wird.

Während der plastischen Verformungen beim Auszug der Fasern, wirkt jeweils an der Seite der Innenradien der Endverankerung eine zusätzliche Druckbeanspruchung und mit der Reibung auch Scherbeanspruchung der Betonmatrix. Diese Konsolen an den Innenradien werden stark beansprucht und gegebenenfalls durch Überschreiten der lokalen Druckfestigkeit und durch Abscheren teilweise zerstört. Dadurch wird der Reibungsverbund gestört und immer geringer. Der Faserauszug wird vereinfacht.

Eine erhöhte Betondruckfestigkeit und eine dazu entsprechend höhere Faserzugfestigkeit sorgen auch hier für einen besseren Verbund.

2.2 Verschleißwiderstand

Beim Verschleißwiderstand differenziert man je nach Beanspruchung zwischen dem reibenden und dem schlagenden Verschleiß. Wie in [13] ausgeführt, kann der Verschleißwiderstand gegenüber reibender, insbesondere jedoch gegenüber schlagender Beanspruchung durch die Zugabe von Stahlfasern gesteigert werden. Die in [13] dargestellten Untersuchungen zeigen, daß der Stahlfaserbeton gegenüber dem unbewehrten Beton sowohl einen geringeren Abrieb als auch eine geringere Verschleißtiefe besitzt. So konnte die Verschleißtiefe bei einem Fasergehalt von 0,5 Vol.-% (40 kg/m^3) gegenüber dem Nullbeton um ca. 10 %, bei einem Fasergehalt von 1,0 Vol.-% (80 kg/m^3) konnte die Verschleißtiefe gegenüber dem Nullbeton gar um ca. 25% verringert werden. Der Schleifverschleißwiderstand wird in der Praxis durch die Einstreuung von Hartkornmischungen weiter gesteigert.

Aufgrund des deutlich verbesserten Verschleißwiderstandes ist Stahlfaserbeton ein favorisierter Baustoff für stark beanspruchte Bauteile.

Durch die Verwendung von Stahlfaserbeton kann der herkömmliche Bewehrungsgehalt von Betonbauteilen reduziert oder gar vollständig ersetzt werden. Hierdurch wird eine Kostenreduzierung sowie ein beschleunigter Baufortschritt erwirkt. Aufgrund des gegenüber dem unbewehrten Normalbeton deutlich verbesserten Verschleißwiderstandes ist der Stahlfaserbeton seit Jahrzehnten ein favorisierter Baustoff für die Erstellung von stark beanspruchten Bauteilen.

2.3 Last- Verformungsverhalten unter Zugbeanspruchung

Wasserundurchlässige Betonbauwerke sind Ingenieurbauwerke bei denen neben der Tragfähigkeit die Gebrauchstauglichkeit sowie die Dauerhaftigkeit der einzelnen Betonbauteile zu gewährleisten sind. Im Rahmen der Gebrauchstauglichkeitsnachweise ist vielfach eine Begrenzung der Rißbreite $\leq 0,2 \text{ mm}$ nachzuweisen. Hinsichtlich der Verwendung von Stahlfaserbeton in diesem Anwendungsbereich sind insbesondere das Last- Verformungsverhalten unter Zugbeanspruchung sowie das Reißverhalten des Stahlfaserbetons bedeutsam.

Der unbewehrte Normalbeton ist ein spröder Baustoff, der unter Zugbeanspruchung spontan versagt und gegenüber der Druckfestigkeit eine nur sehr geringe Zugfestigkeit besitzt. Diese wird im Rahmen der Bauteilbemessung zur Lastabtragung von Zugspannungen nicht herangezogen. Demgegenüber besitzt der Stahlfaserbeton die Eigenschaft auch nach der Erstrißbildung über einen größeren Verformungsweg hinweg noch Zugkräfte aufnehmen zu können. Dieses in Bild 2 vergleichend gegenübergestellte spezifische

Die Festigkeitseigenschaften des Stahlfaserbetons sind durch Angabe einer Druckfestigkeitsklasse und einer Faserbetonklasse definiert.

Last- Verformungsverhalten ist bereits seit Jahrzehnten bekannt, konnte im Ingenieurbau jedoch bisher aufgrund fehlender Regelungen zur Prüfung und Klassifizierung der Nachrißzugfestigkeit nicht genutzt werden. Mit Verweis auf das DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton wird die Nachrißzugfestigkeit von Stahlfaserbeton entsprechend Bild 3 in einem weg- oder verformungsgeregelten Biegezugversuch mit Vierpunktbelastung ermittelt und durch die Angabe einer Faserbetonklasse definiert. Hierbei werden aus den Last-Verformungskurven einer Prüfkörperserie die mittleren

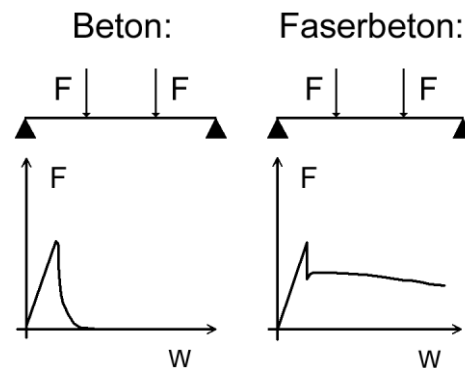


Bild 2. Spezifisches Last- Verformungsverhalten von Beton und Stahlbeton

Fig. 2. Typical load-deflection graph for non reinforced and steel-fibre reinforced concrete

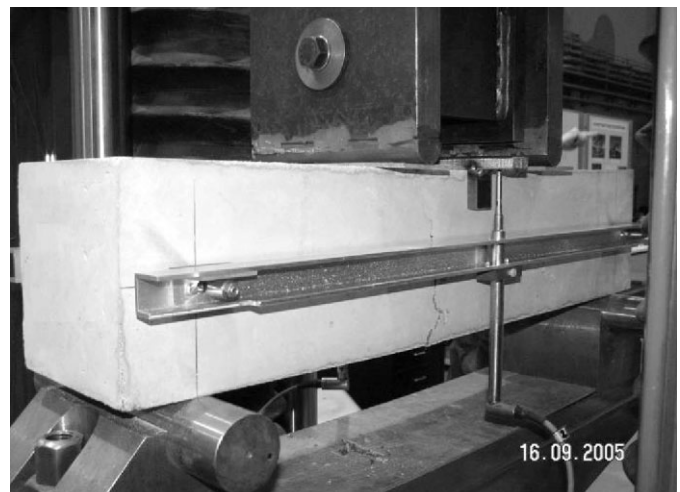


Bild 3. Biegezugversuch mit Vierpunktbelastung

Fig. 3. Four point bending test

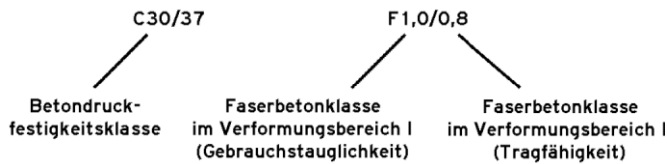


Bild 4. Bezeichnung des Stahlfaserbetons
Fig. 4. Designation of steel fibre reinforced concrete

äquivalenten Zugfestigkeiten $f_{eq,ctm,i}$ im Verformungsbereich I (geringe Verformungen) und im Verformungsbereich II (große Verformungen) ermittelt. Hieraus werden dann die charakteristischen Werte der äquivalenten Zugfestigkeit $f_{eq,ctk,i}$ [N/mm²] sowie die Faserbetonklasse entsprechend Tabelle 5.2 des DBV Merkblattes abgeleitet. Während die Druckfestigkeit des werksgemischten Stahlfaserbetons durch die Angabe einer Betondruckfestigkeitsklasse z.B. C30/37 definiert ist, wird die Nachrißzugfestigkeit durch die Angabe einer Faserbetonklasse z.B. F1,0/0,8 ausgewiesen (siehe Bild 4).

2.4 Reißverhalten

Das Reißverhalten von Stahlfaserbeton, im Vergleich zu unbewehrten und bewehrten Betonbauteilen, zählt zu den interessantesten Eigenschaften dieses Baustoffes. Wie im weiteren ausgeführt, wird hierdurch sowohl die Dichtheit

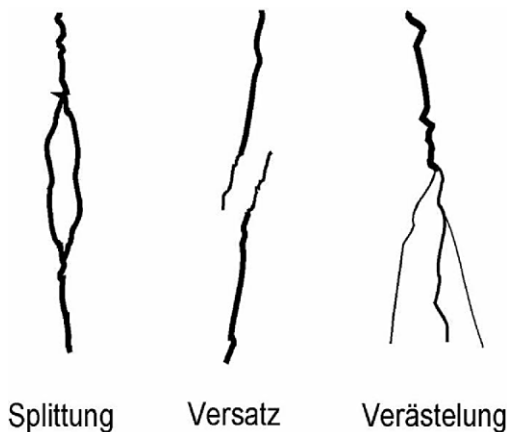


Bild 5. Stahlfaserbedingte Rißformen [14]
Fig. 5. Crack formations implied by steel fibres [14]

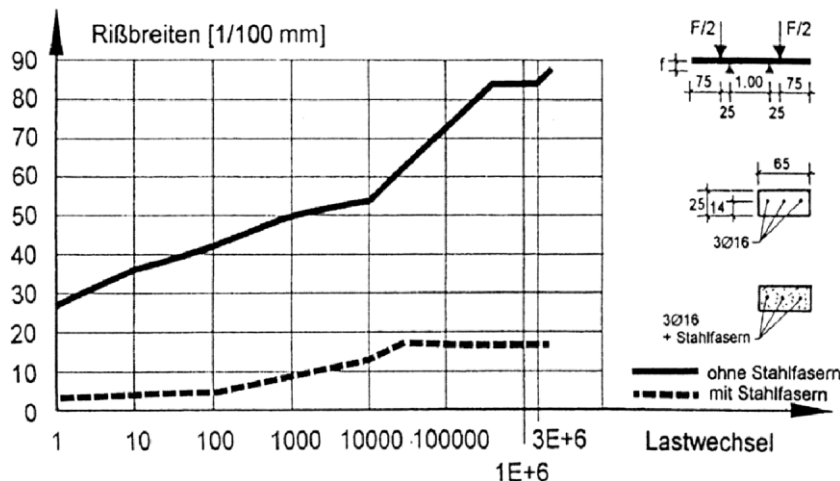


Bild 6. Rißentwicklung unter Lastwechselbeanspruchung im Gebrauchslastbereich [15]
Fig. 6. Cracking under repeated service loads [15]

einer Betonkonstruktion als auch die Dauerhaftigkeit derselben, gegenüber eindringender Medien, deutlich verbessert.

Durch die Zugabe von Stahlfasern in den Beton werden sowohl die Rißform und die Rißtiefe als auch die Rißverteilung und die Rißbreite positiv beeinflusst [14]. Bei Trennrissen, z.B. infolge von Zwang aus abfließender Hydratationswärme im Stahlfaserbeton, ist die Rißbreite im Innern z. T. deutlich geringer als an der Oberfläche. Ferner ist der Rißverlauf wie in Bild 5 dargestellt stahlfaserbedingt durch Splittungen, Verästelungen und Versätze gekennzeichnet.

Besonders deutlich zeigt sich das positive Reißverhalten von Stahlfaserbeton bei stahlfaserbewehrtem Stahlbeton (kombinationsbewehrte Betonbauteile). Bei den oben angeführten Untersuchungen ergaben sich bereits durch die Zugabe von 0,38 Vol.-% (30 kg/m³) Stahlfasern zum Stahlbeton eine Verminderung der Rißbreiten von mehr als 50%. Untersuchungen im Rahmen der Festen Fahrbahn, System Hochtief [15] zeigten, daß die Rißbreite des kombinationsbewehrten Betonbauteils, mit einem Fasergehalt von 0,5 Vol.-% (40 kg/m³), im Vergleich zu einem Stahlbetonbauteil entsprechend Bild 6 nach 3 Millionen Lastwechseln unter 0,2 mm beträgt. Demgegenüber betrug die Rißbreite des Stahlbetonbauteils ohne Stahlfasern bei 3 Millionen Lastwechseln bereits ca. 0,8 mm.

Die vorgenannten Festbetoneigenschaften werden durch zahlreiche Faktoren der Betonzusammensetzung maßgeblich beeinflusst. Zu den Einflußgrößen zählen unter anderem die Faserart, die Fasergeometrie, die Draht- und Faserzugfestigkeit, die Biegezugfestigkeit, die Betondruckfestigkeit, das Größtkorn der Betonzusammensetzung sowie der Sieblinienverlauf.

3 Bauvorhaben Regenrückhaltebecken Schellenbeck

An der Schellenbecker Straße in Wuppertal wurde im Zeitraum 2005/2006, ein Regenrückhaltebecken mit einem Rückstauvolumen von ca. 4500 m³ erstellt. Regenrückhaltebecken werden bei Misch- und Trennkanalisation im Netz angeordnet, um allzu große Abflußspitzen in der Kanalisation oder wie in diesem Fall, bei Einleitung in den Schellenbecker Bach zu verhindern. Das Regenrückhaltebecken Schellenbeck wirkt hier sowohl als Gewässerschutz als auch als Überflutungsschutz. Das Regen-

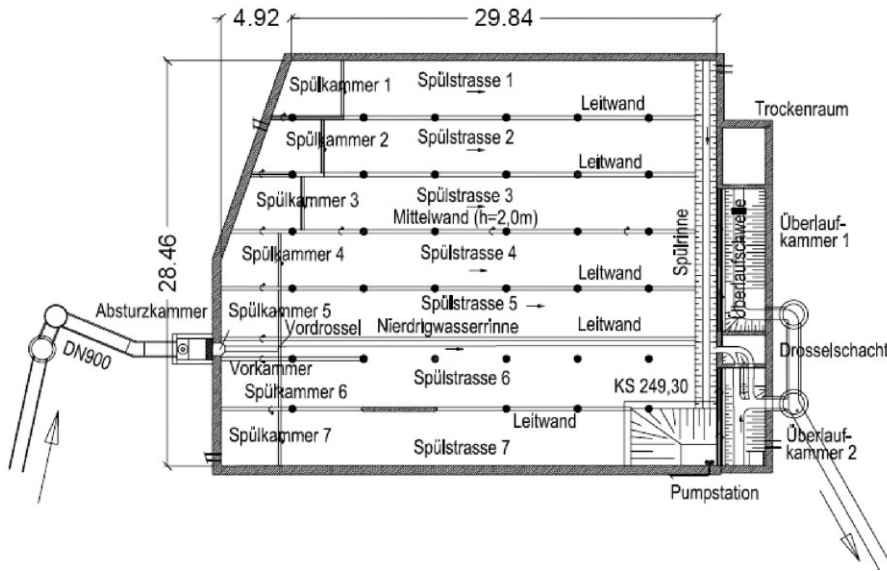


Bild 7. Grundriß Regenrückhaltebecken [16]

Fig. 7. Horizontal section of building [16]

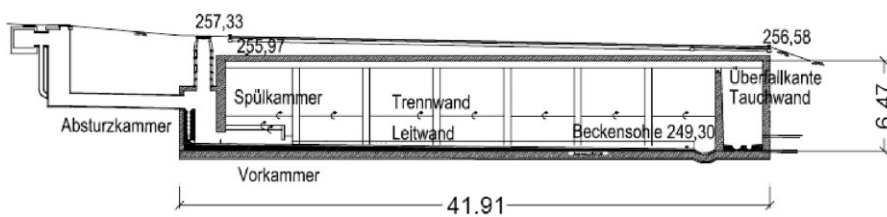


Bild 8. Schnitt Regenrückhaltebecken [16]

Fig. 8. Cross section of building [16]

rückhaltebecken ist ca. 40 m lang, 30 m breit und 7,50 m hoch (siehe Bild 7, Bild 8), wobei die Unterkante der Bodenplatte ca. 7,70 m bis 9,90 m unter GOK liegt. Die Bodenplatte besitzt eine Dicke von 0,50 m und die Dicke der Ortbetonwände variiert zwischen 0,30 m und 0,60 m.

Bei der Tragwerksplanung wurde ein Grundwasserspiegel berücksichtigt, der fast im gesamten Bereich über der Oberkante der Decke verläuft. Zur Auftriebsicherung wurden daher unterhalb der Bodenplatte Verpreßpfähle mit einer zulässigen Zugkraft von ≥ 300 kN angeordnet. Dieses wasserundurchlässige Betonbauwerk wurde mit einer Rißbreitenbegrenzung von $w_{cal} = 0,2$ mm geplant wobei bei der Bodenplatte, im Rahmen des Rißbreitennachweises, voller Zwang zu berücksichtigen war.

4 Nachweis der Rißbreitenbegrenzung

Üblicherweise erfolgt der Nachweis der Rißbreitenbegrenzung entsprechend DIN 1045-1, (127)

$$\text{erf. } A_s = \frac{k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{\sigma_s} \quad (1)$$

und erfordert erhebliche Bewehrungsgehalte. Hierdurch kommt es unter Umständen zu erhöhten Baukosten und zu verlängerten Bauzeiten. Bei zu dichter Bewehrungsführung ist eine fachgerechte Betonverarbeitung nicht mehr gewährleistet und die Gebrauchstauglichkeit sowie die Dauerhaftigkeit des Betonbauwerks beeinträchtigt.

Auf der Grundlage oben angeführter Festbetoneigenschaften des Stahlfaserbetons hat sich die Zugabe von

Stahlfasern in Stahlbetonkonstruktionen als besonders wirksame Maßnahme zur Begrenzung von Rißbreiten erwiesen und findet sowohl in der WU-Richtlinie [6] als auch in der WHG-Richtlinie [7] des DAfStb Berücksichtigung. Die DIN 1045-1 beinhaltet keine Bemessungsverfahren für Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit bei Stahlfaserbetonkonstruktionen bzw. kombinationsbewehrten Betonbauwerken.

Durch Ansatz der Nachrißzugfestigkeit des Stahlfaserbetons, läßt sich die rißbreitenbeschränkende Mindestbewehrung deutlich reduzieren.

Der Rißbreitennachweis für kombinationsbewehrte Betonbauteile erfolgt jedoch formal wie für Stahlbetonbauteile, wobei bei der Ermittlung der Mindestbewehrung statt der wirksamen Zugfestigkeit des Betons $f_{ct,eff}$ die Differenz ($f_{ct,eff} - f_{eq,ctk,I}$) in Ansatz gebracht wird [1].

$$\text{erf. } A_s = \frac{(k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} - f_{eq,ctk,I}) \cdot A_{ct}}{\sigma_s} \quad (2)$$

Durch Ansatz der charakteristischen äquivalenten Zugfestigkeit des Stahlfaserbetons im Verformungsbereich I $f_{eq,ctk,I}$ beim Nachweis der Rißbreitenbegrenzung (2), läßt sich die erforderliche Bewehrungsmenge verringern. Dies kann z.B. durch eine Reduzierung der Stabdurchmesser geschehen, was wiederum ein insgesamt günstigeres Reißverhalten mit sich bringt und sowohl die Gebrauchstauglichkeit als auch die Dauerhaftigkeit verbessert.

Durch Ansatz der charakteristischen äquivalenten Zugfestigkeit des Stahlfaserbetons im Verformungsbereich I

$f_{eq,ctk,I}$ beim Nachweis der Rißbreitenbegrenzung, läßt sich die erforderliche Bewehrungsmenge deutlich verringern. Durch den Ansatz der Nachrißzugfestigkeit des Stahlfaserbetons, läßt sich die rißbreitenbeschränkende Mindestbewehrung deutlich reduzieren. Bei wasserundurchlässigen Betonbauwerken ergeben sich hieraus neue Konstruktionsmöglichkeiten mit hoher Wirtschaftlichkeit und hoher Qualität.

5 Anforderung für das Regenrückhaltebecken Schellenbeck

Die Ingenieurgesellschaft Becker-Görz-Meister hat das Potential des Stahlfaserbetons, sowohl hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit als auch der Qualität, in der Vergangenheit bereits mehrfach genutzt und die Nachrißzugfestigkeit des Stahlfaserbetons im Rahmen von Gebrauchstaug-

lichkeits- aber auch Tragfähigkeitsnachweisen berücksichtigt.

Für wasserundurchlässige Betonbauwerke ergeben sich mit Stahlfaserbeton Konstruktionsmöglichkeiten mit hoher Wirtschaftlichkeit und hoher Qualität.

Tabelle 1. Betoneigenschaften
Table 1. Concrete properties

Klassen [2], [4]	Beschreibung
C30/37	Charakteristische Mindestdruckfestigkeit, hier vereinbart nach 56 Tagen [N/mm ²]
F1,0/0,8 [1]	Faserbetonklasse F1,0 für Verformungsbereich I und 0,8 für Verformungsbereich II. Entspricht den charakteristischen Werten der äquivalenten Zugfestigkeiten [N/mm ²]
XC4	Korrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung. Umgebung wechselnd naß und trocken
XF1	Frostangriff mit und ohne Taumittel. Umgebung mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel
XA1	Chemischer Angriff durch natürliche Böden und Grundwasser. Chemisch schwach angreifende Umgebung
XD1	Korrosion, ausgelöst durch Chloride (ausgenommen Meerwasser). Mäßig feuchte Umgebung
XM1	Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung. Umgebung mäßige Verschleißbeanspruchung

Tabelle 2. Geforderte Betoneigenschaften und -entwurf
Table 2. Required concrete properties and concrete mix design

geforderte Betoneigenschaften	Betonentwurf	
C30/37 F1,0/0,8 XC4, XF1, XA1, XD1, XM1	CEM III/B 32,5 N	360 kg/m ³
niedrige Hydratationswärmeentwicklung	Steinkohleflugasche	30 kg/m ³
schwindarme Betonzusammensetzung	Wasser	185 kg/m ³
Konsistenz F4	Sand 0/2	680 kg/m ³
Festigkeitsnachweis nach 56 Tagen	Splitt 2/8	287 kg/m ³
28 Tage Festigkeit C25/30	Splitt 8/16	413 kg/m ³
keine Überfestigkeiten nach 56 Tagen	Splitt 16/22	395 kg/m ³
	Stahlfasern	35 kg/m ³
	BV/FM	0,4 M-%
	rechn. Frischrohdichte	2385 kg/m ³
	w/zeq	0,50
	Sieblinie im Bereich	A/B 32

5.1 Anforderungen Betoneigenschaften

Für das Bauvorhaben Regenrückhaltebecken Schellenbeck ergaben sich aus der Tragwerksplanung folgende Anforderungen an die Betoneigenschaften (siehe Tabelle 1): C30/37 F1,0/0,8 XC4, XF1, XA1, XD1, XM1. Der Beton sollte eine schwindarme Zusammensetzung und eine niedrige Hydratationswärmeentwicklung haben. Für den Einbau war eine Konsistenz F4 gefordert. Aufgrund der langsamen Erhärtung fand der Festigkeitsnachweis nach 56 Tagen statt. Nach 28 Tagen war die Festigkeit C25/30 gefordert. Es durften keine Überfestigkeiten entstehen.

6 Betonentwurf, Betonzusammensetzung

Es wurden Betonzusammensetzungen (siehe Tabelle 2) erarbeitet, die sich durch eine hohe Leistungsfähigkeit und optimale Verarbeitungseigenschaften auszeichnen und den Anforderungen des Planers, sowohl bei Eignungsprüfungen als auch während der Bauausführung, entsprechen.

6.1 Optimierung der Betonzusammensetzung und Faserauswahl

Auf Basis des gewählten Betonentwurfes wurde hierbei insbesondere der Einfluß der Fasergeometrie als auch der Einfluß der Drahtzugfestigkeit auf die Nachrißzugfestigkeit untersucht. Auf der Grundlage vorhandener Erfahrungen sowie unter Berücksichtigung der Betonzusammensetzung wurden im Rahmen der Untersuchungen Drahtfasern mit einer Faserlänge von 50 mm und einem Faserdurchmesser von 1,0 mm berücksichtigt. Hinsichtlich der Fasergeometrie wurden eine gewellte sowie eine endverankerte Faser berücksichtigt, wobei die Drahtzuge-

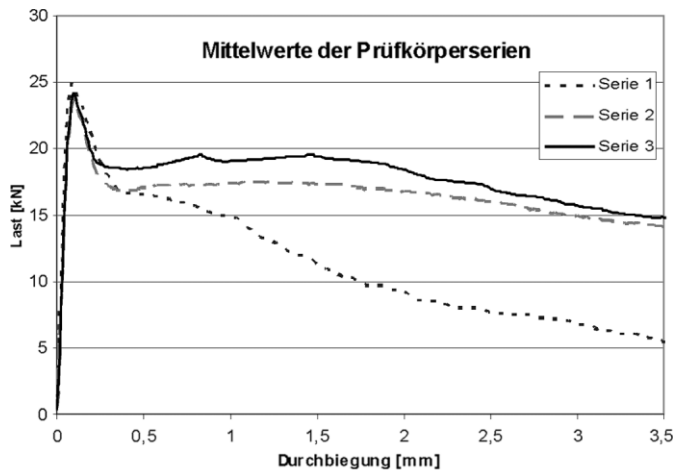


Bild 9. Last-Verformungskurven (Mittelwerte)
Fig. 9. Mean load-deflection graph for different steel fibre reinforced concretes

stigkeit variierte. Beide Faserarten besitzen eine ausgeprägte rißüberbrückende Wirkung, wobei der Verlauf der charakteristischen Last- Verformungskurve bei oben angeführtem Betonentwurf signifikante Unterschiede aufweist (Bild 9).

Für diesen Betonentwurf ergaben sich aus den Untersuchungen nachfolgende Erkenntnisse: Die gewellte Faser besitzt gegenüber der endverankerten Faser im Verformungsbereich I eine gleichwertige Leistungsfähigkeit, jedoch kommt es im Verformungsbereich II zu einem deutlichen Abfall der Last- Verformungskurve. Im direkten Vergleich der Serien 1 und 2 genügte die endverankerte Faser bereits den Anforderungen einer Faserbetonklasse F1,0/0,8, während die Serie 1 die Anforderungen einer Faserbetonklasse F1,0/0,6 erfüllte (siehe Tabelle 3). Unter Berücksichtigung baupraktischer Aspekte (z. B. Unregelmäßigkeiten beim Einbau) und zur Erhöhung der Sicherheit wurde im weiteren untersucht, inwieweit sich die Nachrißzugfestigkeit durch eine höhere Drahtzugfestigkeit weiter steigern ließe. Die Prüfungen zeigen, daß unter Verwendung einer gesteigerten Drahtzugfestigkeit von ca. 1500 N/mm² (Serie 3, Bild 9, Tabelle 3) eine Faserbetonklasse F1,2/1,0 realisiert werden konnte. In Abhängigkeit zur Betondruckfestigkeit (Zementsteinfestigkeit)

Tabelle 3. Auszug Prüfungsergebnisse
Table 3. Abstract of the results

	Serie 1	Serie 2	Serie 3
Fasergeometrie	1/50 (gewellt)	1/50 (endverankert)	1/50 (endverankert)
Drahtzugfestigkeit	ca. 1000 N/mm ²	ca. 1000 N/mm ²	ca. 1500 N/mm ²
Fasergehalt	35 kg/m ³	35 kg/m ³	35 kg/m ³
Prüfkörperanzahl	3	3	3
mittlere Rohdichte/Druckfestigkeit 2 d	2,41 kg/dm ³ /6,5 N/mm ²	2,40 kg/dm ³ /5,5 N/mm ²	2,41 kg/dm ³ /5,0 N/mm ²
mittlere Rohdichte/Druckfestigkeit 28 d	2,38 kg/dm ³ /32 N/mm ²	2,37 kg/dm ³ /30 N/mm ²	2,38 kg/dm ³ /31 N/mm ²
mittlere Rohdichte/Druckfestigkeit 56 d	2,37 kg/dm ³ /42 N/mm ²	2,36 kg/dm ³ /39 N/mm ²	2,37 kg/dm ³ /41 N/mm ²
Prüfkörperanzahl	6	6	6
mittlere Biegezugfestigkeit der Serie 28 d	4,43 N/mm ²	4,34 N/mm ²	4,35 N/mm ²
f _{eq,ctk,I} (28 d)	1,08	1,19	1,36
f _{eq,ctk,II} (28 d)	0,75	0,96	1,02
Faserbetonklasse	F 1,0/0,6	F 1,0/0,8	F 1,2/1,0

wird das Leistungsvermögen des Stahlfaserbetons durch die erhöhte Drahtzugfestigkeit der Faser größer, da für die plastische Verformung der Endaufbiegung mehr Arbeit erforderlich ist (siehe 2.1).

Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse aus dem Gemeinschaftsprojekt kam beim Bauvorhaben Regenrückhaltebecken Schellenbeck die Stahldrahtfaser HE+1/50, mit einer Drahtzugfestigkeit von ca. 1500 N/mm², zum Einsatz.

7 Bestätigung der Faserbetonklasse während der Bauausführung

Da der beim Bauvorhaben Regenrückhaltebecken Schellenbeck verwendete Stahlfaserbeton der Überwachungs-kategorie 2 zuzuordnen ist, erfolgte im Rahmen der Qualitätssicherungsmaßnahmen der Baustelle eine Überwachung der Betongüte, bestehend aus einer Eigen- und einer Fremdüberwachung. Während der Annahmeproofungen auf der Baustelle, sind neben den üblichen Frisch- und Festbetonprüfungen auch die Nachrißzugfestigkeiten des Stahlfaserbetons überprüft worden.

Die erarbeitete Betonzusammensetzung überzeugte in der Baustellenpraxis. Die kontinuierliche Qualität ermöglichte einen reibungslosen Einbau. Konsistenz, Pumpbarkeit, Zusammenhaltevermögen und homogene Mischung gewährleisteten gleichbleibende Eigenschaften. Die Anforderung an eine Faserbetonklasse F1,0/0,8 wurde während der gesamten Bauzeit erfüllt.

8 Zusammenfassung / Fazit

Das DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton (Stand Oktober 2001) regelt die Herstellung, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Bauausführung und Überwachung des Stahlfaserbetons. Mit der sich noch im Entwurf befindlichen Richtlinie Stahlfaserbeton vom DAfStb wird, nach Veröffentlichung und baurechtlicher Einführung, der Einsatz des Baustoffes Stahlfaserbeton weiter voran getrieben. Zustimmungen im Einzelfall und gesonderte Bauartzulassungen sind dann nicht mehr nötig. Planer und Bauherren können so in Zukunft in einem viel größeren Umfang das Potential des innovativen Baustoffes nutzen. Der Ingenieur kann den Stahlfaserbeton direkt für die

Tragwerksplanung ansetzen und darüber hinaus auch noch die Vorteile für den Nachweis der Gebrauchtauglichkeit nutzen.

An dem konkreten Bauvorhaben Regenrückhaltebecken Schellenbeck wurde aufgezeigt, daß ein erheblicher wirtschaftlicher Nutzen durch die Verwendung von Stahlfaserbeton, resp. in der Kombination mit Stabstahlbewehrung zu erzielen ist. Hier wurde z. B. für die 60 cm dicken Wände die horizontale Bewehrung von $d = 25$ mm, $a = 10$ cm durch den Einsatz von Stahlfaserbeton F1,0/0,8 auf $d = 20$ mm, $a = 11$ cm reduziert. Weiterhin wurde eine zusätzlich erforderliche Bügelbewehrung für den Schubnachweis eingespart.

Der Einsatz geeigneter Stahldrahtfasern in einem entsprechenden Beton bringt, außer den wirtschaftlichen, auch weitere Vorteile: der Verschleißwiderstand wird deutlich erhöht, die Oberflächenfestigkeit steigt, der Baustoff wird duktiler und belastbarer. Der Bewehrungsaufwand entfällt oder wird geringer, dadurch entstehen weniger Bewehrungsfehler und das Betonieren wird einfacher. Die Qualität und damit die Dauerhaftigkeit des Bauteiles wird erhöht!

In diesem Artikel wird aufgezeigt, daß eine entsprechend gewählte Faser in einem gezielt entwickelten Beton zu einem guten oder geforderten Ergebnis führt. Auch mit der Einführung der Richtlinie ist es weiterhin erforderlich, daß der Stahlfaserbeton für entsprechende Einsatzzwecke konfektioniert wird. Für die Bemessung von Bauteilen erforderliche Faserbetonklassen (oder Leistungsklassen) können mit verschiedenen Fasern, Fasermengen und Betonrezepturen erzeugt werden. Bei der Entwicklung einer optimalen Betonrezeptur ist es wichtig, die verschiedenen Einwirkungen auf das Bauteil genau zu kennen und im Dialog zwischen Tragwerksplaner, Betontechnologe und Stahlfaserhersteller alle Ansprüche und Möglichkeiten abzudecken.

Projektbeteiligte

Bauherr:	Wuppertaler Stadtwerke AG Schützenstraße 34, 42281 Wuppertal www.wsw-online.de
Abwassertechnische Gesamtplanung:	AF Ingenieur-Consult Am Varenholt 123, 44797 Bochum www.af-ingenieurconsult.com
Tragwerksplanung:	Gesellschaft für Tragwerksplanung und Baukonstruktion mbH Dödterstraße 10 B, 58095 Hagen www.becker-goerz-meister.de
Bauausführung:	Feldhaus Ingenieurbau Alt Hüsten 52, 59759 Arnsberg www.feldhaus.com
Betontechnologie:	CEMEX Deutschland AG Gebiet Dortmund-Südwestfalen Spicherner Straße 67, 44149 Dortmund www.cemex.de
Stahlfasertechnologie:	Arcelor Commercial Wire Drawing Deutschland GmbH Subbelrather Straße 13, 50672 Köln www.arcelor.com

Literatur

- [1] DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Berlin, Oktober 2001.
- [2] DIN EN 206-1/A1: Beton – Teil 1: Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, 2004.
- [3] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion, 2001.
- [4] DIN 1045-2/A1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, 2001. Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1; Änderung A1, 2005.
- [5] DIN 1045-3/A1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung, 2001. Änderung A1, 2005.
- [6] DAfStb-Richtlinie, Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie), Berlin, Ausgabe November 2003.
- [7] DAfStb-Richtlinie, Wassergefährdende Stoffe, Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, Berlin, Ausgabe Oktober 2004.
- [8] Löfgren, I.: Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction, Department of Civil and Environmental Engineering, Structural Engineering, CHALMERS University of technology, Goteborg, Sweden, 2005.
- [9] Gossla, U.: Flachdecken aus Stahlfaserbeton, Beton- und Stahlbetonbau 101 Heft 2, 2006.
- [10] Falkner, H.: Stahlfaserbeton für die Unterwasserbetonsohlen am Potsdamer Platz in Berlin. Deutscher Betontag 1997. Deutscher Beton-Verein Wiesbaden, S. 191–209, 1997.
- [11] Billes, M.: Verstärkung von bestehenden Holzdecken mittels Holz-Stahlfaserbeton-Verbund, WTA-Journal 3/04, S. 303–310, WTA-Publications, 2004.
- [12] Nell, W.: Sanierung eines Parkdecks mit Stahlfaserbeton, WTA-Journal 2/05, S. 157–167, WTA-Publikations, 2005.
- [13] Höcker, Th.: Einfluß von Stahlfasern auf das Verschleißverhalten von Betonen unter extremen Betriebsbedingungen in Bunkern von Abfallbehandlungsanlagen.; DAfStb-Heft 468.
- [14] Winterberg, R.: Einfluß von Stahlfasern auf die Durchlässigkeit von Beton; DAfStb-Heft 438.
- [15] Dorgarten, H.-W. und Dahl, J.: Feste Fahrbahn System Hochtief, Faserbeton, S. 287–303, Bauwerk Verlag, Berlin 2002.
- [16] Becker, H.-R.: Regenrückhaltebecken aus Stahlfaserbeton; Tagungsband Wirtschaftliche Stahlfaserbetonbauwerke, Cemex Informationsveranstaltung 2005.



Dipl. Ing. Wilhelm Nell (VDB)
Arcelor Commercial Wire Drawing
Deutschland GmbH
wilhelm.nell@arcelor.com
Mathildestraße 40
46149 Oberhausen



Dipl.-Ing. Manfred Greiff
CEMEX Deutschland AG
Klapheckenhof 17
45883 Gelsenkirchen

**Arcelor Commercial Wire Drawing
Deutschland GmbH
Subbelrather Straße 13
50672 Köln**

Stahlfasern-de@arcelor.com