

2021

116. Jahrgang
April 2021
ISSN 0005-9900

Sonderdruck

Beton- und Stahlbetonbau



Stahlfaserbeton

**Betontechnologische Einflüsse auf die Leistungsklassen
von Stahlfaserbeton**

Leistungsfähige Spezialbetone für Industrieböden

Sonderdruck aus Beton- und Stahlbetonbau, Sonderheft Stahlfaserbeton, S. 36–47 und S. 91–94

Betontechnologische Einflüsse auf die Leistungsklassen von Stahlfaserbeton

Die Leistungsfähigkeit von Stahlfaserbeton, ausgedrückt durch seine Leistungsklassen und damit die erreichten Nachrissbiegezugfestigkeiten, hängt von zahlreichen Faktoren ab. Dazu zählen beispielsweise die Betondruckfestigkeit, Faserart und -geometrie, der Fasergehalt und die Betonzusammensetzung. Im Rahmen der Arbeit im Unterausschuss Stahlfaserbeton des DAfStb wurde mit der Biegebalken-Datenbank „Stahlfaserbeton“ eine sehr umfangreiche Datenbank mit Erst- und Bestätigungsprüfungen an Stahlfaserbetonen aus der Literatur und Praxis aufgebaut. Sie ermöglicht es, unterschiedliche Einflüsse, z. B. aus der Betonzusammensetzung oder den Fasereigenschaften, allgemein zu quantifizieren. In diesem Beitrag werden die Einflüsse der Faserzugfestigkeit, der Schlankheit der Fasern, der Betondruckfestigkeit, üblicher Einbaukonsistenzen, der Form der Gesteinskörnung sowie die Verwendung sekundärreaktiver Zusätze betrachtet. Auf Grundlage der Datenbank kann gezeigt werden, dass im Allgemeinen gebrochene Gesteinskörnung im Vergleich zu runder Gesteinskörnung sowie die Einbaukonsistenzen F3 und F4 keinen erkennbaren Effekt auf die Nachrissbiegezugfestigkeit zeigen. Bei der Verwendung sekundärreaktiver Stoffe wie hüttensandhaltige Zemente oder Flugaschen lässt sich aus der Datenbank eine deutliche Erhöhung der Nachrissbiegezugfestigkeiten ablesen. Die positiven Einflüsse der Betondruckfestigkeit und der Faserschlankheit können verallgemeinert bestätigt und quantifiziert werden.

Stichworte Stahlfaserbeton; betontechnologische Einflüsse; Stahlfasern; Nachrissbiegezugfestigkeit; Biegebalken-Datenbank; DAfStb

1 Einleitung

Stahlfaserbetone werden seit Jahrzehnten untersucht und in der Praxis eingesetzt [1, 2]. Erste Anwendungen sind ab 1960 vor allem bei Industriefußböden oder im Tief- und Tunnelbau dokumentiert, z. B. in [3–6]. Eine wesentliche Voraussetzung zur breiteren Anwendung von Stahlfaserbeton ist die zuverlässige Bestimmung seiner Eigenschaften, insbesondere der Nachrissbiegezugfestigkeit. Außerdem sind auf die ermittelten Nachrissbiegezugfestigkeiten abgestimmte und praktikable Bemessungsansätze und Regelwerke erforderlich, um Rechtssicherheit für die Bemessung zu schaffen. Hierzu wurden in der Vergangenheit u. a. vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein Merkblätter für Stahlfaserbeton zunächst für Industrieböden [7], Tunnelbauwerke [8, 9] und später für Stahlfaserbeton allgemein [10] veröffentlicht, bevor die allgemeingültigere DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ [11] veröffentlicht und bauaufsichtlich eingeführt wurde. Ähn-

Concrete technological influences on the performance classes of steel fibre concrete

The performance capacity of steel fibre reinforced concrete, expressed by its performance classes and therefore the residual flexural strength, depends on numerous factors. Including compressive strength, fibre type and geometry, fibre content and concrete composition to name a few. A working group of DAfStb subcommittee “Stahlfaserbeton” set up a comprehensive database containing data of numerous initial and performance tests of steel fibre reinforced concretes from publications and suppliers, especially ready mixed concrete plants. It enables us to identify specific influences, e.g. of concrete composition or fibre properties and quantify them in general. In this contribution the influence of fibre tensile strength, fibre slenderness, concrete compressive strength, concrete installation consistency, the shape of aggregates as well as the usage of reactive additives are considered. Based on the database it can be seen, that no measurable effect of crushed coarse aggregates on the residual flexural strengths can be identified compared to round aggregates. The consistencies F3 and F4 of the ready mixed concrete show no significant dependency as well. The usage of secondary reactive additives, especially fly ash, as well as cement containing blast furnace slag provides higher residual flexural strengths regarding to the database. Positive influences of the compressive strength and the fibre slenderness can be generally confirmed and quantified.

Keywords steel fibre reinforced concrete; bending beam database; concrete technology; residual flexural strength

liche Entwicklungen der Stahlfaserbetonbauweise gab es international beispielsweise in Japan [12] oder Großbritannien [13].

Durch die folgende breitere Verwendung von Stahlfaserbeton stehen mittlerweile sehr umfangreiche Erst- und Bestätigungsprüfungen aus der Betonherstellung zur Verfügung. Zahlreiche dieser Prüfungen wurden im vergangenen Jahr von der Arbeitsgruppe „Datenbank“ des Unterausschusses Stahlfaserbeton des DAfStb [14] zur Datenbank „Stahlfaserbeton“ zusammengefasst.

Zu Beginn der Entwicklung von Faserbeton standen Fragen der Faserart (Glasfasern, Polymerfasern, Stahlfasern, o.Ä.) sowie die Formgebung (gerade, gewellte, endverankerte Fasern) im Vordergrund der Betrachtungen [15]. Auch das Tragverhalten der Fasern, insbesondere der heute am häufigsten verwendeten endverankerten Stahlfasern, wurde in zahlreichen Veröffentlichungen be-

schrieben. Dem Einfluss der Betonzusammensetzung, beispielsweise der Art der Gesteinskörnung oder der Verwendung sekundärreaktiver Zusatzstoffe, auf die Leistungsfähigkeit der Stahlfaserbetone wurde bislang weniger Aufmerksamkeit geschenkt. Gleichzeitig wird aus der Praxis beschrieben, dass die Verwendung gebrochener Gesteinskörnung zu einer höheren Nachrissbiegezugfestigkeit führen soll als die Verwendung runder Gesteinskörnung.

In diesem Beitrag sollen ausgewählte Aspekte der Betonzusammensetzung und Fasereigenschaften auf Grundlage der Biegebalken-Datenbank „Stahlfaserbeton“ [14] untersucht werden. Das Ziel ist herauszufinden, ob sich die in einzelnen Veröffentlichungen dokumentierten Einflussgrößen anhand der Vielzahl der in der Datenbank vorhandenen Versuchsserien flächendeckend zeigen lassen. Außerdem soll abgeschätzt werden, wie groß gegebenenfalls ihr Einfluss auf die in der Bemessung ansetzbare Nachrissbiegezugfestigkeit ist. Dabei erfolgt die Bewertung auf der Grundlage der charakteristischen Nachrissbiegezugfestigkeit $f_{\text{cfk},L1}^f$, um unmittelbar eine bemessungsrelevante Größenordnung des jeweiligen Einflusses abschätzen zu können.

In diesem Beitrag wird speziell der Frage nachgegangen, ob sich Einflüsse gebrochener Gesteinskörnungen gegenüber rundem Gesteinskorn, der Verwendung sekundärreaktiver Zusätze entweder als Bestandteil des Zements oder des Betons, der Konsistenzklasse, der Faserschlankheit sowie der Faserzugfestigkeit zeigen lassen. Um eine Verallgemeinerbarkeit zu erreichen, wird nicht auf singuläre vergleichende Versuchsserien zu den einzelnen Einflüssen zurückgegriffen. Die Grundlage der Betrachtung bildet die Biegebalken-Datenbank „Stahlfaserbeton“ [14], in die 1.123 Prüfserien mit Eignungs-, Erst- und Bestätigungsprüfungen nach Anhang O der Richtlinie „Stahlfaserbeton“ eingeflossen sind.

2 Aufbereitung der Daten/Biegebalken-Datenbank „Stahlfaserbeton“

Die Bewertung der genannten Einflüsse auf die Nachrissbiegezugfestigkeit basiert auf der Biegebalken-Datenbank „Stahlfaserbeton“. Inhalt und Aufbau der Datenbank sind in [14] ausführlich beschrieben. Für die Betrachtungen in diesem Beitrag werden ausschließlich Ergebnisse von Prüfserien verwendet, die an 4-Punkt-Biegezugversuchen nach der Richtlinie „Stahlfaserbeton“ [11] sowie unter Verwendung der heute marktüblichen Fasern mit Endverankerung ermittelt wurden. Unvollständige Datensätze oder Datensätze mit einer geringeren Faserzugfestigkeit als 1.100 N/mm^2 wurden ebenso wenig einbezogen wie Einflussgrößen, für die weniger als 20 Prüfserien zur Verfügung standen. Um die gesamte Marktbreite der Ergebnisse darstellen zu können, wurden alle Serien einbezogen, für die die relevanten Informationen über die Betonzusammensetzungen vorlagen. Die Angaben des Fa-

sergehalts und der Druckfestigkeitsklasse entsprechen den Angaben aus den Prüfberichten.

Um Stahlfasersorten verschiedener Hersteller vergleichen zu können, wurden drei Faserzugfestigkeitsklassen für „normalfeste“, „mittelfeste“ und „hochfeste“ Stahlfasern eingeführt. Die Faserzugfestigkeitsklassen werden nach der jeweiligen Obergrenze der Klasse bezeichnet. Sie orientieren sich an Häufungen im Aufkommen von Fasern in den betrachteten Daten. Als Zugfestigkeitsklassen wurden für „normalfeste“ Fasern 1.100 N/mm^2 bis einschließlich 1.250 N/mm^2 (77% der Prüfserien), für „mittelfeste“ Fasern von 1.250 N/mm^2 bis einschließlich 1.750 N/mm^2 (10% der Prüfserien) und für „hochfeste“ Fasern mit Festigkeiten über 1.750 N/mm^2 (13% der Prüfserien) verwendet. Fasern mit größeren und kleineren Zugfestigkeiten kommen in der Datenbank nur vereinzelt vor und wurden nicht berücksichtigt. Innerhalb der größten Gruppe der „normalfesten“ Fasern mit Zugfestigkeiten unter 1.250 N/mm^2 sind ca. 80% der Betone mit einer Druckfestigkeitsklasse von C30/37 angegeben, ca. 15% mit C25/30 und ca. 5% sind der Druckfestigkeitsklasse C20/25 zugeordnet. Wie [14] zu entnehmen ist, sind in der Datenbank auch Serien mit hochfesten Betonen enthalten. Ihre Anzahl ist jedoch so gering, dass sie hier aus statistischen Gründen nicht weiter betrachtet werden. Die Fasergehalte liegen überwiegend zwischen 10 kg/m^3 und 40 kg/m^3 . Höhere Fasergehalte zwischen 45 kg/m^3 und 90 kg/m^3 sind für 55 Serien angegeben und wurden nicht betrachtet. Demgegenüber stehen allein 50 Serien mit einem Fasergehalt von 10 kg/m^3 , sodass diese Gruppe einbezogen wurde.

Um eine unmittelbare Verwendbarkeit der Auswertungen für die Bemessungspraxis darstellen zu können, wurden für die Grafiken und Tabellen die charakteristischen Nachrissbiegezugfestigkeiten $f_{\text{cfk},L1}^f$ nach [11] angegeben, die auch zur Einstufung in Leistungsklassen verwendet werden. Das heißt, es wurde der Minimalwert der charakteristischen Werte angesetzt, der sich aus der statistischen Berechnung des 5%-Quantils oder der pauschalen Abminderung des gemessenen Mittelwerts der Nachrissbiegezugfestigkeit f_{cfm}^f auf 51% ergibt. Die untersuchten Einflussgrößen werden in Abhängigkeit vom Fasergehalt, von der Druckfestigkeitsklasse des Betons sowie von der Faserzugfestigkeit angegeben. In den grafischen Darstellungen in Abschn. 3 ist in der Regel nur die Kombination mit der höchsten Serienanzahl dargestellt. Dies ist in allen Fällen die Druckfestigkeitsklasse C30/37 in Kombination mit einer Faserzugfestigkeit unter 1.250 N/mm^2 . Im linken Teil der Diagramme sind jeweils die Ergebnisse für die charakteristischen Werte für die Einstufung in die Leistungsklasse L1, im rechten Teil der Grafik entsprechend für die Einstufung in die Leistungsklasse L2 dargestellt. Entsprechend der Richtlinie „Stahlfaserbeton“ wird die den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit zugeordnete Leistungsklasse L1 aus dem charakteristischen Wert der Nachrissbiegezugfestigkeit $f_{\text{cfk},L1}^f$ bei einer Durchbiegung des Prüfbalkens in Feldmitte von $\delta = 0,5 \text{ mm}$ als charakteristischer Wert aus einer Prüfserie

mit mindestens sechs Balken ermittelt [11]. Zur Einstufung in die dem Grenzzustand der Tragfähigkeit zugeordnete Leistungsklasse L2 wird analog der charakteristische Wert der Nachrissbiegezugfestigkeit $f_{\text{cfik,L2}}^f$ bei einer Durchbiegung des Prüfbalkens von $\delta = 3,5$ mm verwendet. Nähere Informationen zur Prüfung und Berechnung sind [11, 14, 16, 17, 19] zu entnehmen.

Die in den Grafiken angegebenen Regressionsgeraden geben die Abhängigkeit der charakteristischen Nachrissbiegezugfestigkeit f_{cfik}^f vom Fasergehalt an. In die Berechnung der Regression wurden die Fasergehalte ab 10 kg/m^3 bis einschließlich 40 kg/m^3 einbezogen. Sie wurden ergänzend für die Druckfestigkeitsklassen C20/25 und C25/30 errechnet. Alle Regressionen sind zusammen mit den Bestimmtheitsmaßen und Serienanzahlen im Anhang zusammengestellt. Um eine weitergehende Bewertung zu ermöglichen, wurden die Regressionen in Abhängigkeit von der Druckfestigkeitsklasse, der jeweiligen Einflussgröße und der Leistungsklasse exemplarisch für übliche Fasergehalte von 20 kg/m^3 und 40 kg/m^3 ausgewertet und tabellarisch aufbereitet.

3 Bewertung betontechnologischer Einflüsse

3.1 Faserzugfestigkeit und Betondruckfestigkeit

In zahlreichen Veröffentlichungen und Bemessungsansätzen ist beschrieben, dass mit zunehmender Betondruckfestigkeit und steigender Faserzugfestigkeit die im Riss übertragbaren Kräfte und damit die Tragfähigkeit von Stahlfaserbeton ansteigt [18, 19]. Am Markt sind Fasern mit Zugfestigkeiten vor allem zwischen ca. 1.000 N/mm^2 und 2.500 N/mm^2 erhältlich. Die Auswertung der Biegebalken-Datenbank „Stahlfaserbeton“ zeigt, dass derzeit weit überwiegend Fasern mit Zugfestigkeiten unter 1.250 N/mm^2 eingesetzt werden. Fasern mit Zugfestigkeiten zwischen 1.250 N/mm^2 und 1.750 N/mm^2 sind in der industriellen Anwendung noch selten und werden

dann in Betonen mit Druckfestigkeiten über C30/37 eingesetzt. Ähnliches gilt für Fasern mit Zugfestigkeiten über 1.750 N/mm^2 . Mit steigender Druckfestigkeit des Betons wird ein Ansteigen der Verbundfestigkeit erwartet. Außerdem wird das Herausziehen des Endhakens aus dem Faserkanal durch eine höherfeste Betonmatrix erschwert, wodurch die Tragfähigkeit ebenfalls ansteigt [20, 21].

In Bild 1 ist der erwartete Trend, dass die Nachrissbiegezugfestigkeit mit zunehmender Faserzugfestigkeit ansteigt, nicht zu erkennen. Bei niedrigeren Fasergehalten um 20 kg/m^3 steigt die Tragfähigkeit mit zunehmender Faserzugfestigkeit leicht an. Für höhere Fasergehalte ist bei einer Faserzugfestigkeit der Kategorie 1.750 N/mm^2 keine Erhöhung zu erkennen. Hierfür sind mehrere Gründe denkbar. Für diese „mittelfesten“ Fasern in C30/37 liegen lediglich 37 Serien vor. Dem stehen fast 550 Serien von C30/37 Betonen mit „normalfesten“ Fasern gegenüber. „Mittelfeste“ Fasern werden vor allem in C35/45 und höherfesten Betonen verwendet. Daher stehen für diesen Vergleich nur wenige Serien zur Verfügung. Die geringeren Werte der „mittelfesten“ Fasern bei höheren Fasergehalten können zudem darauf zurückzuführen sein, dass das Tragverhalten in den überkritischen Bereich geht, wodurch eine Mehrfachrissbildung einsetzen kann, die zudem die Streuung erhöht und damit die charakteristischen Werte beeinflusst. Für die Betone mit hochzugfesten Fasern $f_{\text{ct}} > 1.750 \text{ N/mm}^2$ werden wieder größere Nachrissbiegezugfestigkeiten gemessen. Diese Stichprobe ist lediglich orientierend zu betrachten, da sie nur sieben Serien umfasst. Auch aus unveröffentlichten Versuchen der Autoren an vergleichbaren Betonzusammensetzungen konnte ein eindeutiger Trend erhöhter Nachrissbiegezugfestigkeiten bei erhöhter Zugfestigkeit der Faser festgestellt werden. Aus diesen Gründen ist aus Sicht der Autoren der Effekt der Faserzugfestigkeit in zahlreichen Studien belegt. Durch den noch nicht flächendeckenden Einsatz „mittelfester“ Fasern und die geringe Anzahl der Prüferien in höherfesten Betonen ist

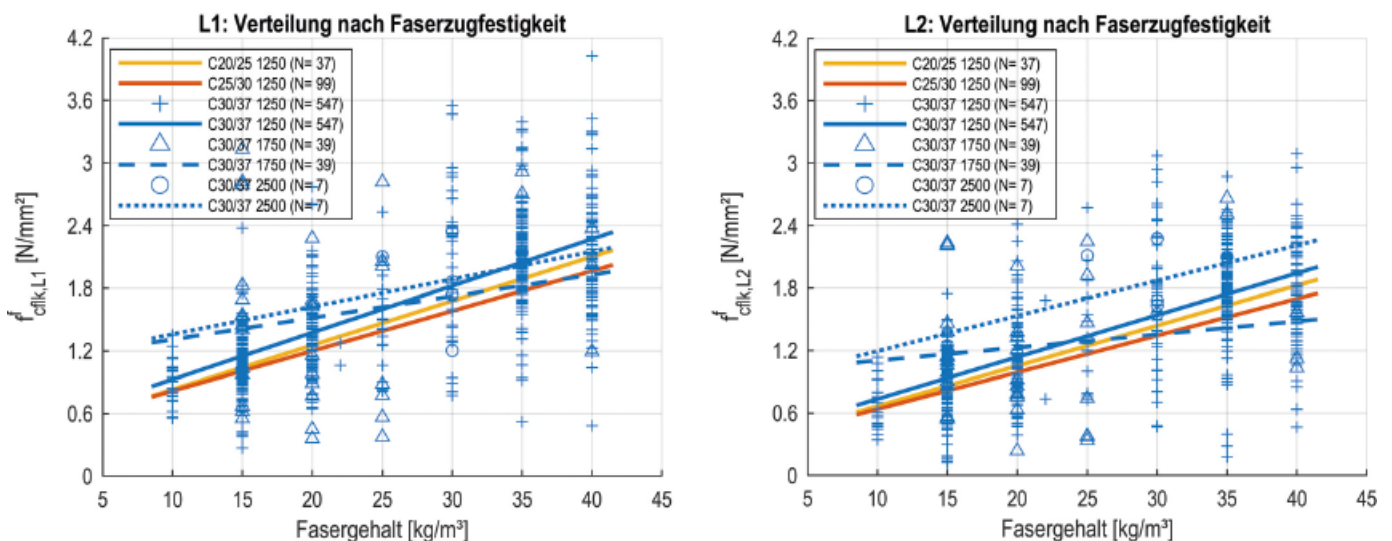


Bild 1 Abhängigkeit der charakteristischen Nachrissbiegezugfestigkeit von der Betondruckfestigkeitsklasse und der Faserzugfestigkeit
 Dependency of the characteristic residual flexural strength from compressive strength class and fibre tensile strength

Tab. 1 Einfluss der Faserzugfestigkeit und der Betondruckfestigkeitsklasse auf die charakteristischen Nachrissbiegezugfestigkeiten
Effects of fibre tensile strength and compressive strength class on the characteristic residual flexural strength

Druckfestigkeitsklasse	Fasergehalt [kg/m ³]	L1		L2	
		1.250 N/mm ² [N/mm ²]	1.750 N/mm ² [N/mm ²]	1.250 N/mm ² [N/mm ²]	1.750 N/mm ² [N/mm ²]
C20/25	20	1,25 (N=37)	– (N=7)	1,05 (N=37)	– (N=7)
	40	2,10 (N=37)	– (N=7)	1,83 (N=37)	– (N=7)
C25/30	20	1,20 (N=99)	– (N=7)	0,99 (N=99)	– (N=7)
	40	1,97 (N=99)	– (N=7)	1,70 (N=99)	– (N=7)
C30/37	20	1,38 (N=547)	1,52 (N=39)	1,14 (N=547)	1,23 (N=39)
	40	2,27 (N=547)	1,93 (N=39)	1,94 (N=547)	1,48 (N=39)

der Effekt in der Biegebalken-Datenbank „Stahlfaserbeton“ aktuell noch nicht allgemein belegbar.

Der Einfluss der Betondruckfestigkeitsklasse ist in Bild 1 in durchgezogenen Linien für die „normalfesten“ Fasern dargestellt. Während beim Übergang von C25/30 auf C30/37 eine Erhöhung der Nachrissbiegezugfestigkeit erkennbar ist, zeigen die C20/25 Betone eine etwas höhere Nachrissbiegezugfestigkeit als Betone der Klasse C25/30. Hierbei ist zu beachten, dass für die C20/25 Betone lediglich 37 Versuchsserien zur Verfügung stehen. Insofern könnten bei den C20/25 Mischungen Überfestigkeiten vorgelegen haben. Dies kann anhand der Datenbank nicht abschließend nachvollzogen werden.

Der Vergleich zwischen 99 Serien für C25/30 und 547 Serien für C30/37 zeigt einen Anstieg der Nachrissbiegezugfestigkeit mit höherer Betondruckfestigkeit. Für höhere Druckfestigkeitsklassen liegen nicht genügend Daten vor. Exemplarisch betrachtet, erhöht sich die Nachrissbiegezugfestigkeit für $f_{\text{cflk,L1}}^f$ und $f_{\text{cflk,L2}}^f$ bei einem Fasergehalt von 20 kg/m³ um im Mittel 0,2 N/mm². Für einen Fasergehalt von 40 kg/m³ erhöht sie sich im Mittel um 0,3 N/mm². Dies würde einer Erhöhung um eine Leistungsklasse entsprechen.

In Bild 1 ist weiterhin zu erkennen, dass sich zwischen 35 kg/m³ und 40 kg/m³ der Trend einer nahezu linearen Zunahme der charakteristischen Nachrissbiegezugfestigkeit mit zunehmendem Fasergehalt offenbar nicht fortsetzt. Um die Interpolationsmöglichkeiten für die Nachrissbiegezugfestigkeit über den Fasergehalt in der Richtlinie „Stahlfaserbeton“ zu nutzen, werden oft zwei Prüfserien mit entweder 15 kg/m³ und 35 kg/m³ oder 20 kg/m³ und 40 kg/m³ geprüft. Zwischenwerte dürfen dann interpoliert werden. Eine mögliche Erklärung für diesen Effekt ist, dass mit zunehmendem Fasergehalt und je nach Beton- und Faserzugfestigkeit ab ca. 35 kg/m³ Fasern pro Kubikmeter Beton eine vermehrte Mehrfachrissbildung in der Biegezugzone zu beobachten ist. Sobald die Tragfähigkeit im gerissenen Querschnitt infolge eines hohen Fasergehalts die Biegezugfestigkeit der Betonmatrix in einem anderen Querschnitt überschreitet, tritt ein zweiter Riss auf. Hierdurch verläuft die Last-Durchbiegungskurve im Versuch generell flacher.

3.2 Kornform der Gesteinskörnung

Gebrochener Gesteinskörnung, vor allem der groben gebrochenen Gesteinskörnung, wird oft ein positiver Einfluss auf die Nachrissbiegezugfestigkeit zugeschrieben. Bei der Verwendung gebrochener Gesteinskörnung werden durch eine bessere Kraftübertragung im Riss Erhöhungen der Biegezugfestigkeit von 10% bis 20% gegenüber Referenzprüfungen mit rundem Gesteinskorn beschrieben [23]. Kustermann [24] beschreibt ergänzend, dass gebrochene Gesteinskörnung zu Gefügeeigenheiten mit Mikrorissen mit größerer Länge und Breite führt. Gleichzeitig werden erhöhte Festigkeiten bestätigt. Bei einigen unmittelbar vergleichenden, unveröffentlichten Serien der Autoren konnte keine eindeutige Erhöhung der Nachrissbiegezugfestigkeit durch die Verwendung gebrochener Gesteinskörnung festgestellt werden. Wird als gebrochene Gesteinskörnung Hartgestein wie Diabas, Basalt oder Gabbro verwendet, ist jedoch zu beachten, dass neben der veränderten Kornform die Eigenfestigkeit des Gesteins über der Festigkeit runder, zumeist quarzitischer Gesteinskörnung liegt. Demzufolge könnte eine erhöhte Nachrissbiegezugfestigkeit angenommen werden.

Während die Sieblinien der in der Datenbank hinterlegten Prüfserien deutschlandweit weitestgehend vergleichbar sind, sind die Zusammensetzungen in Bezug auf die Kornform sehr unterschiedlich. Teilweise wird ausschließlich runde Gesteinskörnung verwendet, teilweise ausschließlich gebrochenes Korn und teilweise gemischte Gesteinskörnungen, wobei zumeist für die groben Fraktionen gebrochene Gesteinskörnungen verwendet werden. Für die nachfolgenden Auswertungen wurden die Kornformen zu zwei großen Gruppen zusammengefasst:

Runde Gesteinskörnung: Betonzusammensetzungen, die ausschließlich runde Gesteinskörnung enthalten.

Gebrochene Gesteinskörnung: Alle Betonzusammensetzungen, in denen zumindest für die Kornfraktion 8/16 ein Splitt verwendet wurde.

In Bild 2 ist deutlich zu erkennen, dass die durchgezogene Linie für die runde Gesteinskörnung und die gestrichelte Linie für die gebrochene Gesteinskörnung

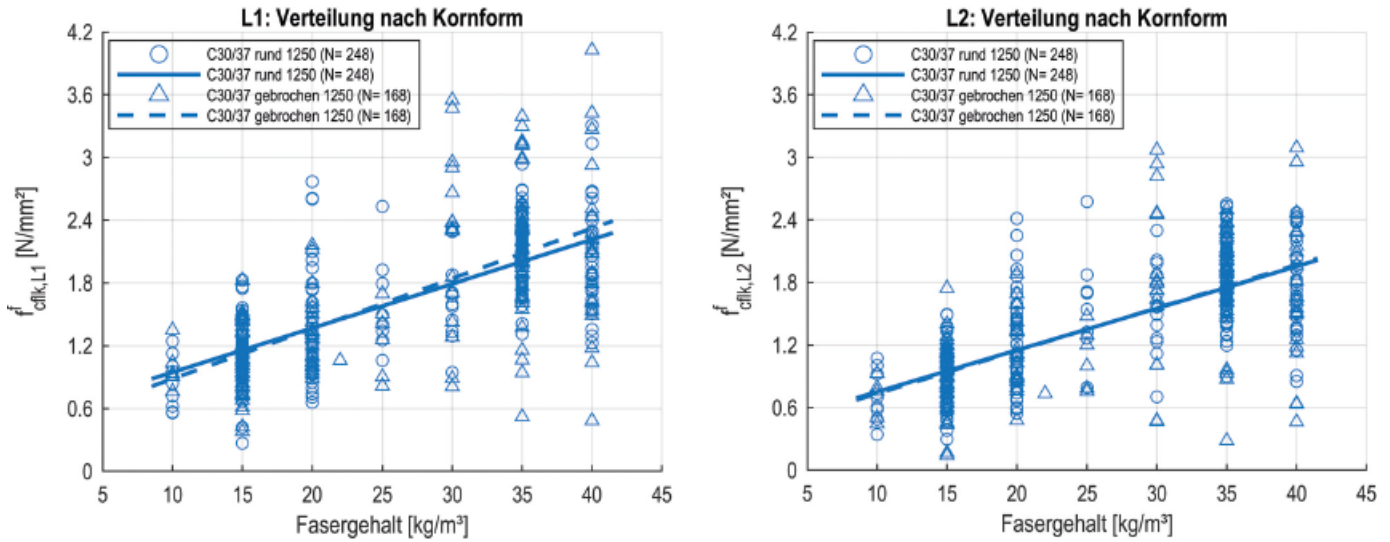


Bild 2 Abhängigkeit der charakteristischen Nachrissbiegezugfestigkeit von der Kornform
 Dependency of the characteristic residual flexural strength on the shape of aggregates)

Tab. 2 Einfluss der Kornform auf die charakteristische Nachrissbiegezugfestigkeit < 1.250 N/mm²
 Influence of shape of coarse aggregates on the characteristic residual flexural strength < 1.250 N/mm²

Druckfestigkeitsklasse	Fasergehalt [kg/m ³]	L1		L2	
		rund [N/mm ²]	gebrochen [N/mm ²]	rund [N/mm ²]	gebrochen [N/mm ²]
C25/30	20	1,21 (N=55)	– (N=13)	1,01 (N=55)	– (N=13)
	40	2,08 (N=55)	– (N=13)	1,83 (N=55)	– (N=13)
C30/37	20	1,37 (N=248)	1,36 (N=168)	1,15 (N=248)	1,15 (N=168)
	40	2,21 (N=248)	2,32 (N=168)	1,95 (N=248)	1,97 (N=168)

chelte Linie für die gebrochene Gesteinskörnung nahezu identisch verlaufen. Dies gilt gleichermaßen für die Leistungsklassen L1 und L2. Aufgrund der großen Datenmenge kann als gesichert angesehen werden, dass die Kornform keinen signifikanten Einfluss auf die Nachrissbiegezugfestigkeit darstellt.

3.3 Einfluss der Konsistenzklasse

Für sehr fließfähige Betone der Konsistenzklassen F5, F6 sowie selbstverdichtende Betone wurde verschiedentlich beschrieben, dass die im Vergleich zu steiferen Betonen ausgeprägten Fließvorgänge bei der Betonage zu einer verstärkten Ausrichtung der Fasern sowie zu einem Absinken führen können. In diesem Beitrag soll untersucht werden, ob für übliche steifere Einbaukonsistenzen F3 und F4 Unterschiede nachweisbar sind.

In Bild 3 ist die charakteristische Nachrissbiegezugfestigkeit in Abhängigkeit von der Konsistenzklasse dargestellt. Auch in dieser Zusammenstellung liegen für C30/37-Betone mit Abstand die meisten Ergebnisse vor. Wie schon in den anderen Darstellungen ist die insgesamt sehr große Streuung der Messergebnisse deutlich zu erkennen. Die Unterschiede zwischen den Konsistenzklassen F3 und F4, dargestellt als durchgezogene bzw. gestrichelte Linie,

sind gering. Aus Tab. 3 lässt sich eine leichte Tendenz zu einer höheren Nachrissbiegezugfestigkeit für die Konsistenzklasse F4 bei höheren Fasergehalten ablesen. In diesem Fall sollte zusätzlich berücksichtigt werden, dass es sich sowohl um Erst- als auch um Bestätigungsprüfungen handelt.

3.4 Zementarten und reaktive Zusatzstoffe

Sekundärreaktive Stoffe wie Hüttensand oder Flugasche können dem Beton entweder als Bestandteil des Zements, zumeist hüttensandhaltige Zemente, oder als Betonzusatzstoff vorliegend ausschließlich in Form von Flugasche zugegeben werden. Beispielsweise bei Chan bzw. Müller [22, 25] ist beschrieben, dass um die Stahlfasern eine minderfeste Schicht, ähnlich der Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Zementstein in normalfesten Betonen existiert. Für hochfeste Betone wird die Steigerung der Druckfestigkeit zu einem wesentlichen Anteil durch die Festigkeitserhöhung in der Kontaktzone infolge der Reaktion des Portlandzements mit dem Hüttensand bzw. der Flugasche erreicht. Damit würde sich eine bessere Einbindung der Stahlfasern in die Betonmatrix ergeben, was einerseits zu einer Erhöhung der Verbundspannung und andererseits zu einer Verfestigung des Faserkanals führen müsste, aus dem der Endhaken herausgezogen

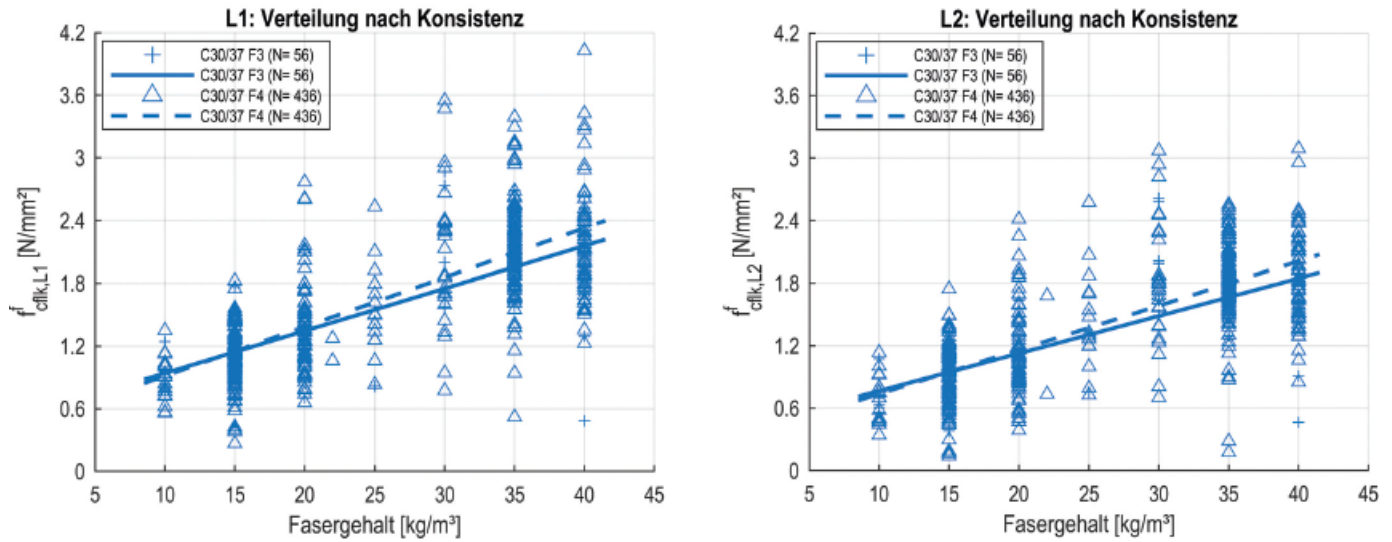


Bild 3 Abhängigkeit der charakteristischen Nachrissbiegezugfestigkeit von der Konsistenzklasse
Effect of workability on the characteristic residual flexural strength

Tab. 3 Einfluss der Konsistenz auf die charakteristische Nachrissbiegezugfestigkeit; Faserzugfestigkeit < 1.250 N/mm²
Effect of workability on the characteristic residual flexural strength for fibres with tensile strength < 1.250 N/mm²

Druckfestigkeitsklasse	Fasergehalt [kg/m ³]	L1		L2	
		F3 [N/mm ²]	F4 [N/mm ²]	F3 [N/mm ²]	F4 [N/mm ²]
C25/30	20	1,14 (N=42)	1,25 (N=46)	0,96 (N=42)	1,01 (N=46)
	40	1,81 (N=42)	2,13 (N=46)	1,54 (N=42)	1,82 (N=46)
C30/37	20	1,35 (N=56)	1,39 (N=436)	1,13 (N=56)	1,16 (N=436)
	40	2,16 (N=56)	2,33 (N=436)	1,85 (N=56)	2,01 (N=436)

wird. Springenschmidt [26] beschreibt analog, dass in hochfesten Betonen eine höhere Verbundfestigkeit für die Stahlfasern erreicht wird. Ähnliche Effekte wurden z. B. von [25, 27] für hoch- und ultrahochfeste Stahlfaserbetone bei der Verwendung von Silikastaub vermutet. Aus dieser Überlegung heraus wurde geprüft, ob sich aus der Biegebalken-Datenbank „Stahlfaserbeton“ ein Einfluss sekundärreaktiver Zusätze auf die Nachrissbiegezugfestigkeit ableiten lässt.

Die Betone der vorhandenen Prüfserien wurden in zwei Gruppen unterteilt:

- Inert: Betone, die keine reaktiven Zusatzstoffe und nur reinen Portlandzement (CEM I) oder CEM II-Zemente mit Kalksteinmehl enthielten (103 Prüfserien für C30/37)
- Reaktiv: Betone, die reaktive Zusatzstoffe (zumeist Flugasche) und/oder hüttensandhaltige Zemente enthielten (371 Prüfserien für C30/37)

Die Ergebnisse sind Bild 4 und Tab. 4 zu entnehmen. Die Regressionsgeraden lassen einen Einfluss der reaktiven Zusätze auf die Fasertragfähigkeit vermuten, der mit zunehmendem Fasergehalt ansteigt. Aufgrund der höheren Serienanzahl für die reaktiven Betonzusammensetzungen ist mit Bestimmtheitsmaßen von über 0,5 eine bessere

Anpassung gegeben als für die inerten Betone mit Bestimmtheitsmaßen von ca. 0,3. Diese vergleichende Gegenüberstellung konnte nur für die Druckfestigkeitsklasse C30/37 durchgeführt werden, da für die anderen Druckfestigkeitsklassen nicht genügend Prüfserien zur Verfügung standen. Der Einfluss der reaktiven Bestandteile scheint für die Leistungsklassen L1 und L2, d. h. für unterschiedliche Durchbiegungen, gleichermaßen ausgeprägt zu sein. Bei einem Fasergehalt von 20 kg/m³ wird eine mittlere Erhöhung der charakteristischen Nachrissbiegezugfestigkeit von ca. 0,2 N/mm² errechnet, für einen Fasergehalt von 40 kg/m³ erhöht sich die charakteristische Nachrissbiegezugfestigkeit um im Mittel 0,5 N/mm². Dies würde nahezu zwei Leistungsklassen entsprechen.

3.5 Einfluss der Faserschlankheit

Der Einfluss der Faserschlankheit auf die Nachrissbiegezugfestigkeit wurde in zahlreichen Quellen dargestellt und wird in Modellen zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit u. a. von Oettel et al. [19] berücksichtigt. Die Überlegung einer erhöhten Tragfähigkeit bei der Verwendung schlanker Fasern, also einem höheren Verhältnis von Länge zu Durchmesser (λ), unterstellt bei gleichbleibender Länge eine Verringerung des Durchmessers. Hieraus würde sich eine größere Faseranzahl bei gleicher Faser-

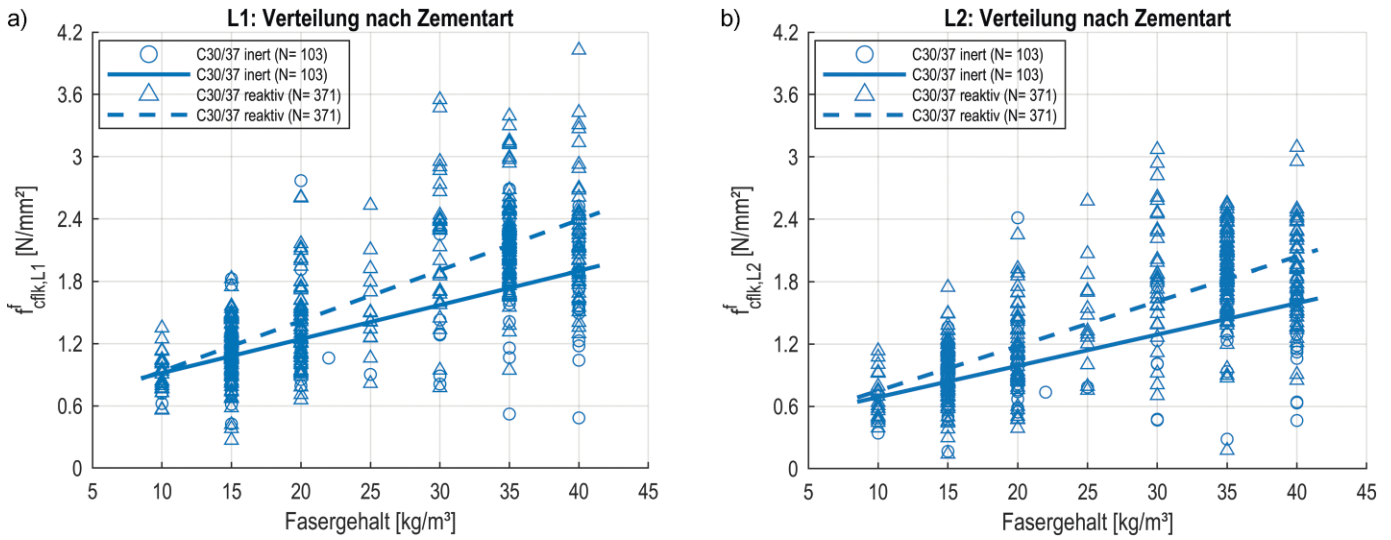


Bild 4 Abhängigkeit der charakteristischen Nachrissbiegezugfestigkeit vom Vorhandensein sekundärreaktiver Zusatzstoffe; Druckfestigkeitsklasse C30/37, Faserzugfestigkeit < 1.250 N/mm²
 Effects of reactive additives and cement type on the characteristic residual flexural strength; compressive strength class C30/37, fibre tensile strength < 1.250 N/mm²

Tab. 4 Einfluss reaktiver Betonzusätze auf die Nachrissbiegezugfestigkeit; Druckfestigkeitsklasse C30/37, Faserzugfestigkeit < 1.250 N/mm²
 Effect of reactive additives and cement type on the characteristic residual flexural strength; compressive strength class C30/37, fibre tensile strength < 1.250 N/mm²

Druckfestigkeitsklasse	Fasergehalt [kg/m ³]	L1		L2	
		inert [N/mm ²]	reaktiv [N/mm ²]	inert [N/mm ²]	reaktiv [N/mm ²]
C20/25	20	– (N=0)	1,26 (N=36)	– (N=0)	1,06 (N=36)
	40	– (N=0)	2,12 (N=36)	– (N=0)	1,84 (N=36)
C25/30	20	– (N=0)	1,23 (N=72)	– (N=0)	1,01 (N=72)
	40	– (N=0)	2,09 (N=72)	– (N=0)	1,81 (N=72)
C30/37	20	1,24 (N=103)	1,42 (N=371)	0,99 (N=103)	1,18 (N=371)
	40	1,90 (N=103)	2,39 (N=371)	1,59 (N=103)	2,04 (N=371)

menge je Kubikmeter Beton ergeben. Bei Verringerung des Durchmessers steigt mit zunehmender Faserschlankheit die Wahrscheinlichkeit des Faserreißen [27]. Wird hingegen die Faserlänge verkürzt, sollte bei der Betonentwicklung auf ein ausreichend kleines, auf die Faser angepasstes Größtkorn geachtet werden. Entsprechend dem Beitrag von [14] wurde die Faserschlankheit λ in zwei Gruppen zusammengefasst. Eine Gruppe mit Schlankheiten zwischen 40 und 60 sowie schlankere Fasern zwischen 60 und 80. Schlankere Fasern als $\lambda = 80$ sind in der Datenbank in der Regel glatte Kurzdrahtfasern, die hier nicht weiter betrachtet wurden.

In Bild 5 zusammen mit Tab. 5 ist zu erkennen, dass eine Erhöhung der Faserschlankheit im Allgemeinen zu einer erhöhten Nachrissbiegezugfestigkeit führt. Wie schon bei den anderen Einflussgrößen erkennbar, steigt der Einfluss der Faserschlankheit geringfügig mit steigendem Fasergehalt. Mit zunehmender Druckfestigkeit scheint der Einfluss der Faserschlankheit mit zunehmender Druckfestigkeitsklasse zu sinken. Hierbei sollten die unterschiedlichen Anzahlen der Prüfserien berücksichtigt werden.

4 Bewertung und Zusammenfassung

Auf der Grundlage der sehr umfangreichen Biegebalken-Datenbank „Stahlfaserbeton“ wurden die Auswirkungen verschiedener Einflussgrößen auf die charakteristische Nachrissbiegezugfestigkeit von Stahlfaserbetonen untersucht. Hierbei werden sowohl die Betonzusammensetzungen als auch die Fasern nur anhand ihrer Eigenschaften wie der Druckfestigkeitsklasse, der Faserzugfestigkeit oder der Faserschlankheit beschrieben. Hieraus folgt, dass sehr allgemeine Trends dargestellt werden können, die dafür aber unabhängig vom Betonhersteller und Faserhersteller sind. Zudem können nur Effekte zutreffend beschrieben werden, für die eine ausreichende Anzahl Prüfserien vorliegt.

Einbezogen wurden betontechnologische Parameter wie die Form der Gesteinskörnung oder das Vorhandensein sekundärreaktiver Stoffe in der Betonzusammensetzung sowie Einflüsse der Faserschlankheit und oder der Faserzugfestigkeit. Die Ergebnisse wurden jeweils in Abhängigkeit vom Fasergehalt, von der Betondruckfestigkeit und der Faserzugfestigkeit betrachtet. Durch diese Betrachtung

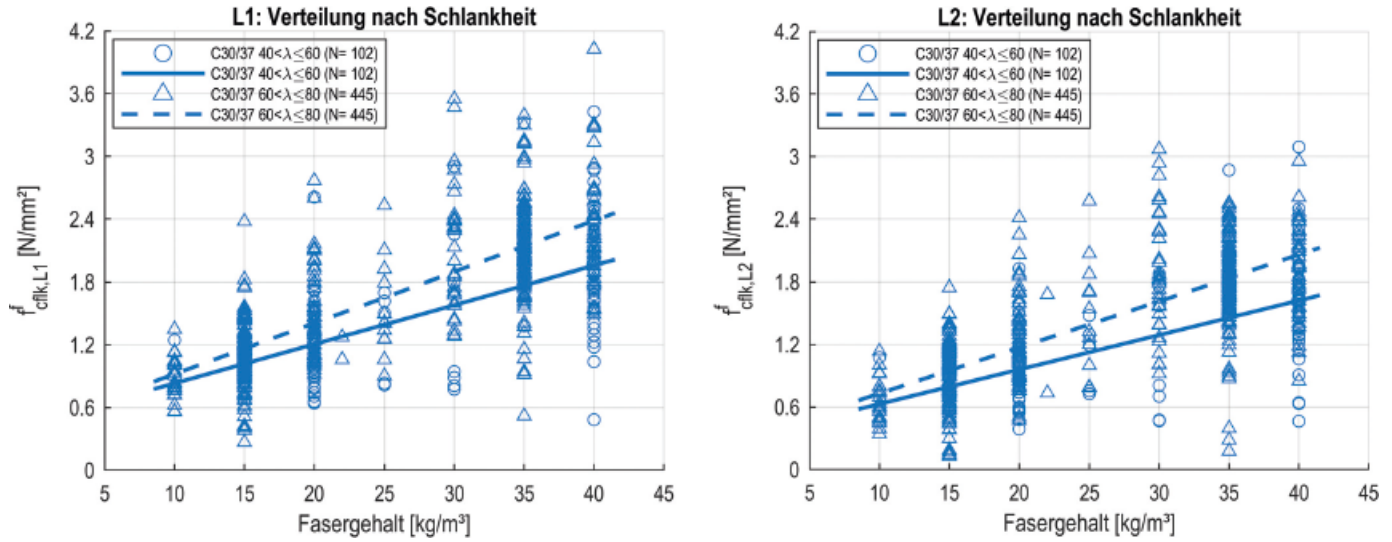


Bild 5 Abhängigkeit der charakteristischen Nachrissbiegezugfestigkeit von der Faserschlankheit; Druckfestigkeitsklasse C30/37; Faserzugfestigkeit < 1.250 N/mm²
 Effect of fibre slenderness on the characteristic residual flexural strength, compressive strength class C30/37, fibre tensile strength < 1.250 N/mm²

Tab. 5 Einfluss der Faserschlankheit λ auf die Nachrissbiegezugfestigkeit; Druckfestigkeitsklasse C30/37, Faserzugfestigkeit < 1.250 N/mm²
 Effect of fibre slenderness λ on the characteristic residual flexural strength; compressive strength class C30/37, fibre tensile strength < 1.250 N/mm²

Druckfestigkeitsklasse	Fasergehalt [kg/m ³]	L1		L2	
		40 < λ ≤ 60 [N/mm ²]	60 < λ ≤ 80 [N/mm ²]	40 < λ ≤ 60 [N/mm ²]	60 < λ ≤ 80 [N/mm ²]
C20/25	20	– (N=0)	1,30 (N=31)	– (N=0)	1,11 (N=31)
	40	– (N=0)	2,30 (N=31)	– (N=0)	2,03 (N=31)
C25/30	20	1,01 (N=30)	1,27 (N=69)	0,77 (N=30)	1,08 (N=69)
	40	1,65 (N=30)	2,20 (N=69)	1,29 (N=30)	2,00 (N=69)
C30/37	20	1,21 (N=102)	1,41 (N=445)	0,96 (N=102)	1,17 (N=445)
	40	1,96 (N=102)	2,38 (N=445)	1,62 (N=102)	2,06 (N=445)

tungswise ergeben sich Stichprobengrößen zwischen 50 und 500 Prüfserien. Gleichzeitig ergeben sich zwangsläufig große Streuungen, da unterschiedliche Zementarten verschiedener Hersteller, Fasern verschiedener Produzenten und unterschiedliche Gesteinskörnungen in die Stichproben eingeflossen sind. Die Ergebnisse zeigen daher, in welcher Größenordnung die verschiedenen Parameter die Nachrissbiegezugfestigkeit im Allgemeinen verändern. Aus der Auswertung der Datenbank im Hinblick auf die charakteristische Nachrissbiegezugfestigkeit können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Mit einer Erhöhung der Druckfestigkeitsklasse von C25/30 auf C30/37 steigt die charakteristische Nachrissbiegezugfestigkeit im Mittel um 0,2 N/mm² bis 0,3 N/mm². Für höhere Druckfestigkeitsklassen ab C35/45 standen nicht genug Versuchsserien zur Verfügung.
- In der Datenbank hat eine Erhöhung des Fasergehalts nahezu durchgehend zu einer Erhöhung der Nachrissbiegezugfestigkeiten geführt. Ob diese Entwicklung auf Fasergehalte größer als 40 kg/m³ übertragen werden kann, sollte weiter untersucht werden. Die Ergebnisse deuten an, dass der Anstieg der Nachrissbiege-

zugfestigkeit von einem Fasergehalt von 35 kg/m³ auf 40 kg/m³ gering zu sein scheint.

- Die Auswertungen für die Faserzugfestigkeit sind aufgrund einer geringen Probenanzahl schwierig. In einigen unmittelbaren Vergleichsuntersuchungen konnte ein Einfluss der Faserzugfestigkeit gezeigt werden. In der Datenbank sind jedoch nur wenige vergleichbare Serien enthalten, da in der Praxis „mittelfeste“ Fasern sinnvollerweise mit höheren Betondruckfestigkeiten kombiniert werden.
- Als gesichert kann angesehen werden, dass die Kornform keinen signifikanten Einfluss auf die Nachrissbiegezugfestigkeit darstellt. Die Ergebnisse runder Gesteinskörnungen und gebrochener Gesteinskörnungen sind im Mittel nahezu identisch.
- Werden sekundärreaktive Zusätze wie hüttensandhaltige Zemente oder Flugasche als Zusatzstoffe verwendet, ergeben sich teils deutliche Erhöhungen der Nachrissbiegezugfestigkeit. Für einen Fasergehalt von 20 kg/m³ wurden im Mittel um ca. 0,2 N/mm² höhere Werte ermittelt, für einen Fasergehalt von 40 kg/m³ ergeben sich im Mittel 0,4 N/mm². Dies entspricht in etwa einer Leistungsklasse des Stahlfaserbetons.

- Der Unterschied der Nachrissbiegezugfestigkeit zwischen üblichen Konsistenzen F3 und F4 ist sehr gering. Bei einem Fasergehalt von 40 kg/m^3 ergibt sich allenfalls eine Tendenz von $0,1 \text{ N/mm}^2$. Diese Tendenz sinkt zudem mit geringerem Fasergehalt.
- Eine höhere Faserschlankheit hat einen eindeutig positiven Effekt auf die Nachrissbiegezugfestigkeit. Die Erhöhungen liegen in einer Größenordnung, die

dem Einfluss der sekundärreaktiven Bestandteile entspricht.

Hieraus ergibt sich, dass sich die statistisch gesehen größten Einflüsse neben dem Fasergehalt aus einer Erhöhung der Druckfestigkeit, dem Einsatz sekundärreaktiver Bestandteile und der Faserschlankheit ergeben.

Literatur

- [1] Schnütgen, B. (1981) *Bemessung von Stahlfaserbeton und ihre Problematik* in: *Stahlfaserbeton und Stahlfaserverstärkter Stahlbeton*. Ruhr-Universität Bochum, Essen: Vulkan Verlag, S. 9–13.
- [2] Falkner, H.; Teutsch, M. (1993) *Neue Erkenntnisse mit Faserbeton* in: Fachseminar Stahlfaserbeton [Hrsg.] *Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz*. Braunschweig, Braunschweig, S. 5–16.
- [3] Gossila, U. (2006) *Flachdecken aus Stahlfaserbeton* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 101, H. 2, S. 94–102. <https://doi.org/10.1002/best.200500461>
- [4] Brux, G. (2005) *Tosbecken mit Unterwasser-Stahlbeton in Stand gesetzt* in: *Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau*, H. 1–2, S. 58–59. ISSN: 0941-1038
- [5] Jegorow, M. (1982) *Stahlfaserbetonrohre für Entwässerungsleitungen. Erste Erfahrungen in Österreich* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 77, H. 11, S. 278–282. <https://doi.org/10.1002/best.198200380>
- [6] Bielecki, R.; Magnus, W. (1981) *Stahlfaser-Pumpbeton – Ein Baustoff für den Tunnelbau* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 76, H. 2, S. 42–46. <https://doi.org/10.1002/best.198100100>
- [7] Deutscher Betonverein (1991) *Grundlagen zur Bemessung von Industriefußböden aus Stahlfaserbeton*. Berlin: Eigenverlag.
- [8] Deutscher Betonverein (1992) *Bemessungsgrundlagen für Stahlfaserbeton im Tunnelbau*. Berlin: Eigenverlag.
- [9] Deutscher Betonverein (1992) *Technologie des Stahlfaserbetons und Stahlfaserspritzbetons*. Berlin: Eigenverlag.
- [10] Deutscher Betonverein (2001) *DBV-Merkblatt Stahlfaserbeton*. Berlin: Eigenverlag.
- [11] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2012) *DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“*. Berlin: Beuth-Verlag. ISBN: 9783410650508
- [12] JSCE-SFRC Research Subcommittee Japan (1983) *Recommendation for design and construction of steel fiber reinforced concrete* in: *JSCE-SF 7: Concrete library of JSCE*, No. 50.
- [13] The Concrete Society (1988) *Ground Floors – A guide to design and construction* in: *Concrete Industrial: Technical Report No.34*. Berkshire.
- [14] Look, K.; Landler, J.; Mark, P.; Fischer, O. (2021) *Fasermengen und Leistungsklassen* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 116, Sonderheft Stahlfaserbeton S1, April 2021, S. 13–23. <https://doi.org/10.1002/best.2021000004>
- [15] Holschemacher, K.; Dehn, F.; Klug, Y. (2011) *Grundlagen des Faserbetons in: Betonkalender 2011: Kraftwerke Faserbeton*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 21–88. <https://doi.org/10.1002/9783433606803.ch7>
- [16] Heek, P. et al. (2021) *Bemessung von Stahlfaserbeton und stahlfaserbewehrtem Stahlbeton* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 116, Sonderheft Stahlfaserbeton S1, April 2021, S. 2–12. <https://doi.org/10.1002/best.2021000009>
- [17] Weber, F.; Anders, S. (2021) *Vergleich von 3-Punkt- und 4-Punkt Biegezugversuchen zur Bestimmung der Nachrissbiegezugfestigkeit* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 116, Sonderheft Stahlfaserbeton S1, April 2021, S. 47–57. <https://doi.org/10.1002/best.2021000013>
- [18] Falkner, H.; Teutsch, M. (1992) *Untersuchung des Biegetragverhaltens von Stahlfaserbetonbalken unter Variation der Faserart* in: *iBMB-Forschungsbericht: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz*. Braunschweig.
- [19] Oettel, V.; Schulz, M.; Lanwer, J.-P. (2021) *Empirischer Ansatz zur Bestimmung der Nachrissbiegezugfestigkeit* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 116, Sonderheft Stahlfaserbeton S1, April 2021, S. 24–34. <https://doi.org/10.1002/best.2021000002>
- [20] Breitenbücher, R.; Meschke, G.; Song, F.; Zhan, Y. (2014) *Experimental, Analytical and Numerical Analysis of the Pullout Behaviour of Steel Fibres considering different Fibre Types* in: *Inclinations and Concrete Strengths*, pp. 126–135. <https://doi.org/10.1002/suco.201300058>
- [21] Breitenbücher, R.; Song, F. (2014) *Experimentelle Untersuchungen zum Auszugsverhalten von Stahlfasern in höherfesten Betonen* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 109, H. 1, S. 43–52. <https://doi.org/10.1002/best.201300049>
- [22] Müller, H. S.; Wiens, U. (2019) *Beton* in: *Beton-Kalender*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 1–172. <https://doi.org/10.1002/9783433607534.ch1>
- [23] Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S. (2001) *Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften*. Berlin: Ernst & Sohn. https://doi.org/10.1007/978-3-322-84845-1_2
- [24] Kustermann, A. (2005) *Einflüsse auf die Bildung von Mikrorissen im Betongefüge – Dissertation* in: *Berichtsreihe des Institutes für Werkstoffe des Bauwesens*. Universität der Bundeswehr München. ISSN 1436-4409
- [25] Chan, Y.-W.; Chu, S.-H. (2004) *Effect of Silica Fume on Steel Fiber Bond Characteristics in Reactive Powder Concrete* in: *Cement and Concrete Research*, S. 1167–1172. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.023>
- [26] Springenschmidt, R. (2007) *Betontechnologie für die Praxis*. Berlin: Bauwerk Verlag. <https://doi.org/10.1002/best.200890006>
- [27] Gebuhr, G. et al. (2019) *Analysis and evaluation of the pull-out behavior of hooked steel fibers embedded in high and ultra-high performance concrete for calibration of numerical models* in: *Structural Concrete* 20, Nr. 4, pp. 1254–1264. <https://doi.org/10.1002/suco.201900034>

Autorin und Autoren



Fabian Weber, M.Sc. (Korrespondenzautor)
fweber@uni-wuppertal.de
Bergische Universität Wuppertal
Lehr- und Forschungsgebiet Werkstoffe im
Bauwesen
Pauluskirchstraße 11
42285 Wuppertal



Dipl.-Ing. (FH) Jeannette Orben
jeannette.orben@dyckerhoff.com
Dyckerhoff GmbH
Dyckerhoff Str. 7
65203 Wiesbaden



Andreas Haus, M.Sc.
andreas.haus@bekaert.com
Bekaert GmbH
Siemensstraße 24
61267 Neu-Anspach



Prof. Dr.-Ing. Steffen Anders
s.anders@uni-wuppertal.de
Bergische Universität Wuppertal
Lehr- und Forschungsgebiet Werkstoffe im
Bauwesen
Pauluskirchstraße 11
42285 Wuppertal

Zitieren Sie diesen Beitrag

Weber, F.; Orben, J.; Haus, A.; Anders, S. (2021) *Betontechnologische Einflüsse auf die Leistungsklassen von Stahlfaserbeton*. Beton- und Stahlbetonbau 116, Sonderheft Stahlfaserbeton S1, April 2021, S. 36–47. <https://doi.org/10.1002/best.202100011>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 19. Januar 2021; angenommen: 25. Februar 2021.

5 Anhang

		Faserzugfestigkeit			Kornform				
		L1		L2		L1		L2	
Druckfestigkeitsklasse	Fasergehalt [kg/m³]	1250 N/mm² [N/mm²]	1750 N/mm² [N/mm²]	1250 N/mm² [N/mm²]	1750 N/mm² [N/mm²]	rund [N/mm²]	gebrochen [N/mm²]	rund [N/mm²]	gebrochen [N/mm²]
C20/25	20	1,25	-	1,05	-	-	-	-	-
	40	2,10	-	1,83	-	-	-	-	-
C25/30	20	1,20	-	0,99	-	1,21	-	1,01	-
	40	1,97	-	1,70	-	2,08	-	1,83	-
C30/37	20	1,38	1,52	1,14	1,23	1,37	1,36	1,15	1,15
	40	2,27	1,93	1,94	1,48	2,21	2,32	1,95	1,97
C30/37	20	1,42	-	1,09	-	1,42	-	1,09	-
	40	1,77	-	1,24	-	1,77	-	1,24	-
Regression abhängig von Fasergehalt (x) in kg/m³									
C20/25	Regression	0,042·x+0,407	-	0,039·x+0,280	-	-	-	-	-
	R²	0,74	-	0,61	-	-	-	-	-
	Anzahl	N=37	N=7	N=37	N=7	N=14	N=0	N=14	N=0
C25/30	Regression	0,038·x+0,434	-	0,035·x+0,285	-	0,044·x+0,337	-	0,041·x+0,182	-
	R²	0,49	-	0,43	-	0,64	-	0,59	-
	Anzahl	N=99	N=7	N=99	N=7	N=55	N=13	N=55	N=13
C30/37	Regression	0,045·x+0,479	0,021·x+1,104	0,040·x+0,333	0,013·x+0,978	0,042·x+0,524	0,048·x+0,405	0,040·x+0,352	0,041·x+0,323
	R²	0,49	0,04	0,48	0,02	0,54	0,41	0,53	0,41
	Anzahl	N=547	N=39	N=547	N=39	N=248	N=168	N=248	N=168
C30/37	Regression	0,017·x+1,071	-	0,007·x+0,945	-	-	-	-	-
	R²	0,03	-	0,01	-	0,03	-	0,01	-
	Anzahl	N=24	N=13	N=24	N=13	N=24	N=13	N=24	N=13

Druckfestigkeitsklasse	Fasergehalt [kg/m ³]	Konsistenz				Zementart				Faserschlankheit			
		L1		L2		L1		L2		L1		L2	
		F3 [N/mm ²]	F4 [N/mm ²]	F3 [N/mm ²]	F4 [N/mm ²]	inert [N/mm ²]	reaktiv [N/mm ²]	inert [N/mm ²]	reaktiv [N/mm ²]	40<λ≤60 [N/mm ²]	60<λ≤80 [N/mm ²]	40<λ≤60 [N/mm ²]	60<λ≤80 [N/mm ²]
C20/25	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1250 N/mm ²	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C25/30	20	1,14	1,25	0,96	1,01	-	1,23	-	1,01	1,01	1,27	0,77	1,08
1250 N/mm ²	40	1,81	2,13	1,54	1,82	-	2,09	-	1,81	1,65	2,20	1,29	2,00
C30/37	20	1,35	1,39	1,13	1,16	1,24	1,42	0,99	1,18	1,21	1,41	0,96	1,17
1250 N/mm ²	40	2,16	2,33	1,85	2,01	1,90	2,39	1,59	2,04	1,96	2,38	1,62	2,06
C30/37	20	-	1,56	-	1,26	-	1,56	-	1,26	-	1,56	-	1,28
1750 N/mm ²	40	-	1,96	-	1,53	-	1,96	-	1,53	-	2,12	-	1,68
Regression abhängig von Fasergehalt (x) in kg/m³													
C20/25	Regression	-	-	-	-	-	0,043·x+0,41	-	0,039·x+0,28	-	0,050·x+0,29	-	0,046·x+0,19
1250 N/mm ²	R ²	-	-	-	-	-	0,75	-	0,62	-	0,88	-	0,74
C25/30	Anzahl	N=16	N=20	N=16	N=20	N=0	N=36	N=0	N=36	N=0	N=31	N=0	N=31
1250 N/mm ²	Regression	0,034·x+0,45	0,044·x+0,35	0,029·x+0,37	0,040·x+0,20	-	0,043·x+0,37	-	0,040·x+0,21	0,032·x+0,36	0,047·x+0,34	0,026·x+0,23	0,046·x+0,15
1250 N/mm ²	R ²	0,43	0,59	0,36	0,52	-	0,61	-	0,55	0,40	0,64	0,35	0,64
C30/37	Anzahl	N=42	N=46	N=42	N=46	N=0	N=72	N=0	N=72	N=30	N=69	N=30	N=69
1250 N/mm ²	Regression	0,041·x+0,53	0,047·x+0,44	0,036·x+0,40	0,042·x+0,31	0,033·x+0,58	0,049·x+0,44	0,030·x+0,38	0,043·x+0,31	0,037·x+0,45	0,049·x+0,43	0,033·x+0,29	0,044·x+0,28
1250 N/mm ²	R ²	0,47	0,54	0,44	0,53	0,34	0,55	0,34	0,53	0,32	0,57	0,33	0,56
C30/37	Anzahl	N=56	N=436	N=56	N=436	N=103	N=371	N=103	N=371	N=102	N=445	N=102	N=445
1750 N/mm ²	Regression	-	0,020·x+1,16	-	0,014·x+0,97	-	0,020·x+1,16	-	0,014·x+0,97	-	0,028·x+1,00	-	0,020·x+0,89
1750 N/mm ²	R ²	-	0,03	-	0,03	-	0,03	-	0,03	-	0,05	-	0,04
C30/37	Anzahl	N=0	N=36	N=0	N=36	N=0	N=36	N=0	N=36	N=0	N=34	N=0	N=34

Leistungsfähige Spezialbetone für Industrieböden

Beton für Darmstädter Hersteller von Hochleistungsbatterien

Die Veränderlichkeit der Ausgangsstoffe verlangt, zusammen mit den zunehmend höheren Anforderungen an den Baustoff Beton selbst, eine ständige Weiterentwicklung der bestehenden Rezepturen. Das BV „Akasol“ in Darmstadt spiegelt den Bedarf nach anspruchsvollen Betonen wider, die neben ihren normativen Eigenschaften auch noch ausführungsrelevante Anforderungen zu erfüllen haben. Durch den Einsatz von Dyckerhoff FERRODUR und VELODUR konnten nicht nur die Prozesse der Bauausführung wirtschaftlicher und ökonomischer gestaltet werden, sondern auch die Belastungen für Umwelt und Anwohner wirksam reduziert werden.

Stichworte Stahlfaserbeton; Industrieböden; Spezialbetone

1 Der Auftraggeber

Die Akasol AG ist ein führender deutscher Entwickler und Hersteller von Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batteriesystemen. Die Batterien kommen in Bussen, Nutzfahrzeugen, Schiffen und Schienenfahrzeugen zum Einsatz. Akasol wurde 2008 gegründet und ist seit 2018 an der Börse notiert. Der Hochleistungsbatteriehersteller wächst weiter und errichtete im Südwesten Darmstadts einen neuen Firmensitz auf einem 20000 m² großen Grundstück. Zu diesem gehören neben der Produktionshalle auch ein modernes Verwaltungsgebäude sowie ein Test- und Prüfzentrum. Dyckerhoff erhielt den Auftrag für die Lieferung von Betonen für Hallenböden und Außenflächen einer 15000 m² großen, doppelstöckigen Produktions-, Montage- und Logistikhalle. Insgesamt umfasst der Auftrag die Lieferung von

- 1050 m³ Stahlfaserbeton nach DAfStb-Richtlinie (FERRODUR) Leistungsklasse 1,2/1,2,
- 200 m³ Stahlfaserbeton nach Richtlinie (FERRODUR) Leistungsklasse 1,5/1,2,
- 975 m³ beschleunigtem Industrieboden (VELODUR Floor) sowie
- 260 m³ LP-Beton für Außenflächen.

Im Herbst 2020 begann die Serienproduktion der ersten Batteriesysteme auf dem neuen Campus.

2 Exkurs: Tragende Industriefußböden

Grundsätzlich sind tragende und aussteifende Industrieböden gemäß Eurocode 2 [1] in Verbindung mit der DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ [2] auszuführen. Als

Powerful special concretes for industrial floors – Concrete for a producer of high performance batteries in Darmstadt

The variability of the raw materials, together with the increasingly higher demands on the building material itself, requires permanent further developments of the existing formulations. The “Akasol” building project in Darmstadt reflects the need for high-quality concretes which, in addition to their standardised properties, also have to meet construction-specific requirements. By using Dyckerhoff FERRODUR and VELODUR, not only could the construction processes be carried out more economically, but also the impact on the environment and local residents was effectively reduced.

Keywords steel fibre concrete; industrial floors; special concrete

tragend gelten Industrieböden immer dann, wenn sie Lasten aus dem Gebäude abtragen oder wenn begehbare Stahlbaubühnen oder Ähnliches auf der Platte gegründet wird. Weiterhin sind, abhängig von der Landesbauordnung, Regalanlagen ab einer gewissen Oberkante Lagergut genehmigungspflichtig.

Weiterhin muss ein Bodengutachten vorliegen, in dem der Schichtenverlauf oder zumindest Bettungsmodule für die auftretenden Lasten angegeben werden. Besonders bei Hochregallagern (HRL) und automatischen Kleinteilelagern ist zu differenzieren, ob diese ein automatisches Bediengerät haben oder nicht. Liegen Regalsysteme vor, die automatisiert sind, werden seitens der Regalhersteller hohe Anforderungen an die Verformungen gestellt, die in der Praxis sehr schwer zu realisieren sind.

3 Rezepturformulierung und Erstprüfung

Dyckerhoff Beton verfolgt bereits seit der Einführung der DAfStb-Richtlinie „Stahlfaserbeton“ [1] im Jahr 2010 das Ziel, den hauseigenen hohen Qualitätsanspruch auch auf diese Produktparte zu übertragen. Das über zahlreiche Vergleichsprüfungen erstellte Rezepturenkataster bildet das Fundament für eine qualitätsorientierte Rezepturformulierung. Auf diese Weise erhält der Kunde eine auf ihn zugeschnittene Baustofflösung in Form eines dauerhaften Stahlfaserbetons, der gleichzeitig auch dem Anforderungsprofil des Verarbeiters hinsichtlich Konsistenz und Förderfähigkeit gerecht wird.

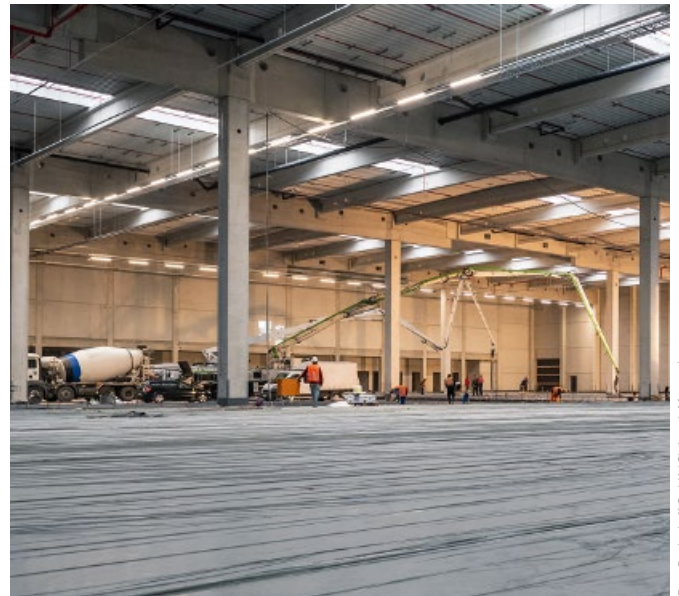
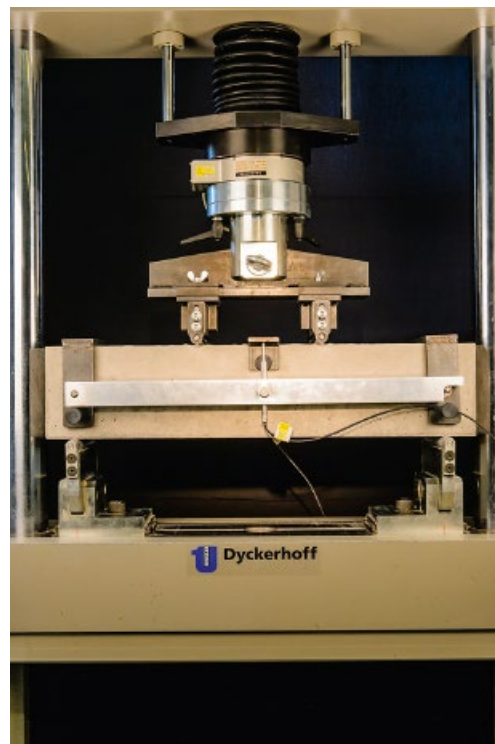
Moderne Betone basieren auf Hochleistungsfließmitteln der neuesten Generation, die umgangssprachlich unter

Tab. 1 Anforderungen an den Beton
Requirements for the concrete

Festigkeitsklasse	C30/37
Expositionsclassen	XC4, XA1, XF1, XM2
Leistungsklasse	L1,2/1,2 (L1,2/1,5)
Konsistenzklasse	F4 (nach Pumpe)
Glättzeitpunkt	≤ 5 Stunden

der Abkürzung PCE (für: Polycarboxylatether) bekannt geworden sind. Diese Art von Zusatzmitteln ermöglicht eine präzise Ausrichtung der Frischbetoneigenschaften wie z. B. das Fließvermögen (Konsistenz) auch bei niedrigen Wasserzementwerten. Darüber hinaus sind auch Eigenschaften wie die „Offenzeit“ bzw. die Tragfähigkeit des Zementleims bedarfsgerecht steuerbar. Letztere spielen beim Industrie- und Hallenbodenbau eine übergeordnete Rolle, da sowohl die Bearbeitung der Betonoberfläche als auch die homogene Verteilung der enthaltenen Stahlfasern maßgeblich zur Qualität des (statisch wirksamen) Bauteils beitragen. Um dem Anforderungsprofil (Tab. 1) des angefragten Betons zu entsprechen, wurde im Wilhelm Dyckerhoff Institut eine Erstprüfung auf Basis der regionalen Ausgangsstoffe durchgeführt.

Auch in diesem Fall wurde die bereits bestehende Grundrezeptur, deren Leistungsfähigkeit (Statik) bekannt ist, an die individuellen Rahmenbedingungen des Einbaus (Einsatz zweier großer Betonpumpen, Bilder 1 und 2) sowie an die Anforderungen des Ausführenden in punkto Glättbarkeit (Mehlkorngehalt) und Glättbeginn (Zementart) angepasst. Hierfür war eine umfassende Erstprüfung erforderlich, in der zunächst die Eigenschaften des Frischbetons bewertet wurden. Die Kombination aus einem CEM III/A 42,5 N (na) aus dem Dyckerhoff Werk Amöneburg und einem PCE-basierten Zusatzmittel war der Schlüssel zu Erreichung des beschriebenen Anforderungsprofils. Darüber hinaus wurden zahlreiche Prüfkör-

**Bild 1** Vorbereitung des Bodens für die Betonage
Preparing the floor for the concrete**Bild 2** Einbau mit Pumpe
Installation with pump**Bild 3** Eingespannter Prüfbalken
Clamped test bar

per für die nachgelagerte Überprüfung der Festbetoneigenschaften hergestellt. Gemäß DAfStb-Richtlinie müssen allein zur Bestimmung des Biegezugs mindestens sechs Betonbalken (150 mm × 150 mm × 800 mm, nach DIN EN 12390-1 [3]) nach 28 Tagen geprüft werden (Bilder 3 bis 5).

4 Vorplanung

Für die Belieferung eines Bauvorhabens, bei der eine Industriesohle mittels Stahlfaserbeton bei hoher Stunden-



(Foto: Dyckerhoff GmbH)

Bild 4 Erstriss nach Belastung
First Crack after load



(Foto: Dyckerhoff GmbH)

Bild 5 Rissüberbrückung durch Stahlfasern
Crackbridging by steel fibre

leistung erstellt werden soll, ist seitens des Baustofflieferants ein Konzept zur Bewerkstelligung der logistischen Anforderungen erforderlich. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die durch den Ausführenden festgelegte



(Foto: Dyckerhoff GmbH)

Bild 6 Stahlfaserdosierung mit Einblasgerät
Steel fibre dosage by means a dosage advice



(Foto: Dyckerhoff GmbH)

Bild 7 Stahlfaservereinzelnung
Steel fibre separation

Stundenleistung (Einbauleistung) ganztägig, vor allem während des morgentlichen Verkehrsaufkommens, erbracht werden kann. Weitere Herausforderungen ergeben sich aus der Bevorratung der Stahlfasern und auch aus dem Prozess der Stahlfaserdosierung. Allein für das o.g. Projekt mussten 38 Tonnen Stahlfasern witterungsgeschützt eingelagert werden. Um unnötigen (Zeit-)Aufwand in der Handhabung der Fasern zu vermeiden, sollten die Wegstrecken (Fasern → Dosiervorrichtung, Betonanlage zur Ladestelle der Fasern) möglichst kurz geplant werden, ohne dabei den regulären Arbeitsbetrieb zu stören. Bezüglich der dem Mischprozess nachfolgenden Faserdosierung fiel die Entscheidung auf ein Einblasgerät. Gegenüber einem üblichen Förderband zeichnen sich diese Geräte durch die Fähigkeit aus, die komprimiert gepackten Fasern zu vereinzeln und somit den Effekt der „Igelbildung“ zu vermeiden (Bilder 6 und 7).

5 Ausführung

Ende Mai 2020 fiel für das Betonwerk Gießheim der Dyckerhoff Beton Niederlassung Rhein-Main-Taunus der Startschuss für die Herstellung und Auslieferung des Stahlfaserbetons FERRODUR. Ab dem 27.05.2020 wurden täglich bis zu 270 m³ FERRODUR per Fahrmischer auf die Baustelle transportiert. Der F4-Beton konnte im Baufeld ohne weiteren Zeitverlust ins Bauteil eingebracht und verarbeitet werden. Durch die definierte Offenzeit des Betons wurde die Einbaukolonne nicht nur dem Tagesziel von 1 000 m² gerecht, sondern auch die nachgelagerten Prozesse (Flügelglätten, Nachbehandlung) konnten plangemäß durchgeführt werden.

Bereits im Dezember 2019 sollte der Aufbeton des aus Fertigteilen konstruierten Obergeschosses eingebracht werden. Die winterlichen Temperaturen und die für die Jahreszeit üblichen nasskalten Baustellenbedingungen drohten den Baufortschritt zu verlangsamen. Deshalb entschied man sich bei diesem Bauabschnitt für VELODUR Floor. Dieser Premiumbeton wurde so optimiert, dass er wie ein Turbo wirkt und die Abbindezeiten in allen Temperaturbereichen erheblich verringert. Die Wartezeit bis zum Flügelglätten konnte somit signifikant um etwa vier Stunden gegenüber einem Standardbeton reduziert werden. Auch der Zeitaufwand für die Nacharbeiten wurde im Vergleich zum Einbau einer Standardrezeptur um die Hälfte reduziert (Bild 8). Die Firma CBL Chemobau Industrieböden aus Leingarten baute an drei aufeinanderfolgenden Tagen insgesamt 975 m³ VELODUR Floor mit der Festigkeitsklasse C30/37 ein.

Literatur

- [1] DIN EN 1992: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*. Berlin: Beuth Verlag.
- [2] DAfStB-Richtlinie *Stahlfaserbeton*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Ausgabe 10.2012, Berlin: Beuth Verlag.

Autor



Sven Kuhfeldt (Korrespondenzautor)
sven.kuhfeldt@dyckerhoff.com
Dyckerhoff Beton GmbH & Co. KG
Fixheider Str. 8
51381 Leverkusen



Foto: Dyckerhoff GmbH / Christoph Mertens

Bild 8 VELODUR Floor ermöglicht deutlich früheren Glättbeginn auch bei nasskaltem Wetter
VELODUR Floor allows previous smoothing start even in wet-cold weather

6 Zusammenfassung und Ausblick

Leistungsfähige Baustoffe ermöglichen einen effizienten Bauablauf auch unter anspruchsvollen Rahmenbedingungen. Stahlfaserbetone nach DAfStB-Richtlinie (FERRODUR) leisten darüber hinaus noch weit mehr: Über die enthaltenen Stahlfasern verfügt dieser moderne Baustoff über eine innewohnende Statik, die Vorarbeiten wie das Verlegen des Baustahls oftmals überflüssig macht bzw. auf ein Minimum in statisch kritischen Bereichen reduziert. Es bleibt abzuwarten, ob sich diese ökonomische und somit wirtschaftliche Bauweise in Deutschland durchsetzen und etablieren wird.

- [3] DIN EN 12390-1 *Prüfung von Festbeton – Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen*. Ausgabe 12.2012, Berlin: Beuth Verlag.

Zitieren Sie diesen Beitrag

Kuhfeldt, S. (2021) *Leistungsfähige Spezialbetone für Industrieböden*. Beton- und Stahlbetonbau 116, Sonderheft Stahlfaserbeton S1, April 2021, S. 91–94. <https://doi.org/10.1002/best.202100018>