

Stahlfaserspritzbeton

Eigenschaften, Herstellung und Prüfung

Von Michael Schmidt, Düsseldorf

Übersicht

Stahlfaserspritzbeton weist bei sachgerechtem Vorgehen eine gegenüber gleichem Beton ohne Fasern höhere Zugfestigkeit und ein wesentlich größeres Arbeitsvermögen auf. Dadurch kann z. B. bei seiner Anwendung im Tunnel- und Bergbau der Aufwand für den Streckenausbau deutlich verringert werden.

Über die im Einzelfall zu erreichenden Verbesserungen der Betoneigenschaften liegen recht unterschiedliche Erfahrungen vor. Orientierende Versuche im Forschungsinstitut der Zementindustrie und Erfahrungen bei der Prüfung von Stahlfaser- und Stahlfaserspritzbeton ergaben, daß diese Unterschiede vor allem auf eine verfahrensbedingte Orientierung der Stahlfasern sowie auf unterschiedliche Prüfverfahren zurückzuführen sind. So orientieren sich die Fasern bei Stahlfaserspritzbeton überwiegend senkrecht zur Spritzrichtung. Darüber hinaus werden seine Festbetoneigenschaften durch den ebenfalls verfahrensbedingt auftretenden Rückprall beeinflusst, der jedoch durch eine zweckmäßige Betonzusammensetzung und durch die Wahl nicht zu langer und ausreichend steifer Stahlfasern relativ klein gehalten werden kann.

1. Anwendung

Stahlfaserspritzbeton ist Beton, dem zur Verbesserung bestimmter Eigenschaften, wie z. B. seiner Zug-, Biegezug- und Schlagfestigkeit sowie seines Verformungsverhaltens, geeignete Stahlfasern zugegeben werden und der als Spritzbeton nach DIN 18551 aufgetragen und dabei verdichtet wird.

Stahlfaserspritzbeton wurde bislang überwiegend im Tunnel- und Bergbau verwendet. Beim Tunnelbau nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT) wurde Stahlfaserspritzbeton auch ohne die sonst übliche Bewehrung als Konsolidierungsschicht unmittelbar hinter dem Ausbruch eingebaut. Den endgültigen Ausbau bildeten später hergestellte tragende Schalen aus bewehrtem Ort beton mit oder ohne Stahlfasern, aus bewehrtem Spritzbeton oder aus unbewehrtem Stahlfaserspritzbeton, der als wasserundurchlässiger Beton nach DIN 1045 hergestellt wurde. Im Bergbau wurde Stahlfaserspritzbeton als alleinige Ausbau- und Sicherungsmaß-

nahme in Streckenbereichen eingesetzt, in denen nur geringe Gebirgsverformungen zu erwarten waren. In beiden Anwendungsbereichen kann mit Stahlfaserspritzbeton der Aufwand für den Ausbau verringert und die Ausbaugeschwindigkeit erhöht werden. Versuche ergaben, daß der für den Ausbau einer Tunnelstrecke nach der NÖT beim herkömmlichen Verfahren notwendige effektive Zeitaufwand von rd. 4 h je Ausbauabschnitt durch einschaligen Ausbau mit Stahlfaserspritzbeton auf unter 2 h reduziert werden konnte [1]. Die Arbeit unter Tage wird zusätzlich dadurch erleichtert, daß die einzelnen Ausbauschritte – Konsolidierungsschicht und endgültiger Ausbau – mit größerem zeitlichen Abstand hergestellt werden können. Die speziellen Anforderungen, die an Stahlfaserspritzbeton als Sicherungs- und Ausbaumittel im Tunnel- und Bergbau gestellt werden sowie die Bemessung der damit hergestellten Bauteile werden in [1] und [2] näher beschrieben.

Stahlfaserspritzbeton wurde darüber hinaus zur Sanierung von Bauteilen verwendet, bei denen weitgehende Rissefreiheit gefordert wird [4], sowie zur Hangsicherung und für Stützwände. Einen umfassenden Überblick über den Stand der Erkenntnisse und die Anwendung von Stahlfaserbeton und Stahlfaserspritzbeton gibt [3].

2. Eigenschaften von Stahlfaserbeton

Durch Zugabe einer ausreichenden Menge geeigneter Stahlfasern können die Frühfestigkeit des grünen und jungen Betons sowie die Eigenschaften des erhärteten Betons zum Teil deutlich verbessert werden. Dies gilt sowohl für sachgerecht hergestellten üblichen Stahlfaserbeton als auch für Stahlfaserspritzbeton. Die Modellvorstellungen, die für die Wirkungsweise der Fasern im Beton entwickelt wurden, sind bereits in zahlreichen Veröffentlichungen vorgestellt worden, z. B. in [5, 6 und 7]. Im folgenden werden die wichtigsten Eigenschaften von Stahlfaser- und Stahlfaserspritzbeton im Vergleich zu Beton ohne Fasern angegeben.

Bei grünem Beton kann bereits eine relativ kleine Menge von rd. 1 Vol.-% Stahlfasern einen deutlich verbesserten Zusammenhalt bewirken. Sein Verformungswiderstand wird dadurch erhöht, insbesondere bei Betonen mit steifer Konsistenz, wie unter anderem Versuche in [8] zeigten.

Den Einfluß von 2 Vol.-% Stahlfasern auf die Druckfestigkeit von jungem Beton zeigt beispielhaft Bild 1. Die hierzu durchgeführten orientierenden Versuche ergaben, daß die Druckfestigkeit des Stahlfaserbetons von Beginn der Erhärtung an größer war als die des gleichen Betons ohne Fasern. Die relative Verbesserung der Druckfestigkeit war dabei, wie im Bild deutlich zu erkennen ist, vom Erhärtungszustand des Betons abhängig. Die größte Festigkeitssteigerung auf rd. das Dreifache ergab sich nach etwa 4 h. Allerdings blieb die Druckfestigkeit dabei mit rd. 1,5 N/mm² noch gering. Die danach bei fortschreitender Erhärtung ermittelten Steigerungen bedeuten jedoch für die Anwendung als Sicherungsbauweise im Berg- und Tunnelbau eine deutliche Verbesserung. Nach 48 h hatte der Beton auch ohne Fasern bereits eine Druckfestigkeit von 30 N/mm² erreicht. Die relative Festigkeitsverbesserung betrug dann, wie im Alter von 28 Tagen, nur noch rd. 15 %.

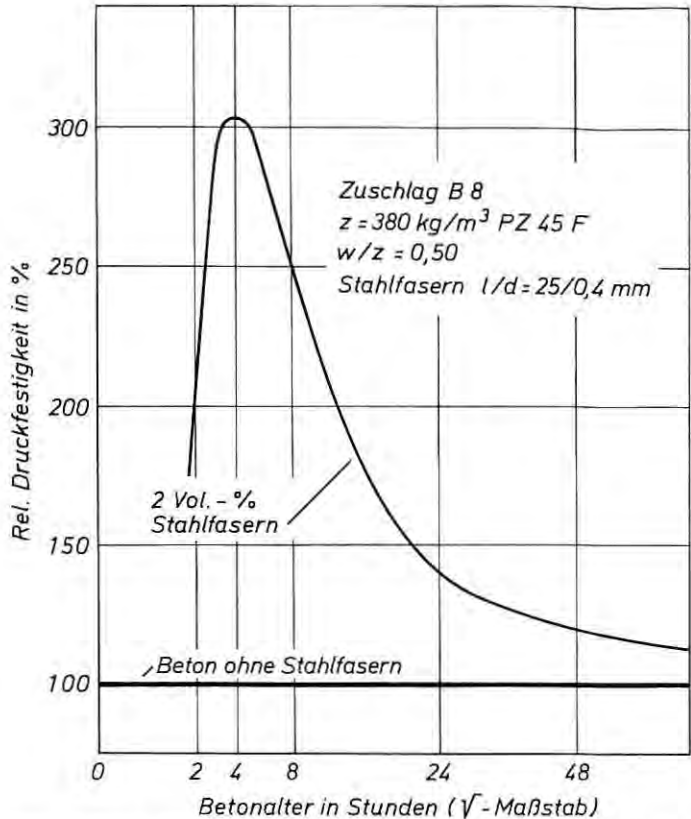


Bild 1 Relative Druckfestigkeit von jungem Beton ohne und mit 2 Vol.-% Stahlfasern

Bei erhärtetem Beton werden durch die Stahlfaserzugabe in erster Linie das Arbeitsvermögen, ausgedrückt durch die Energieaufnahme des Betons bei statischer oder dynamischer Belastung, und die Zugfestigkeit, ermittelt als Zug-, Spaltzug- oder Biegezugfestigkeit, erhöht. In Bild 2 sind die im Kurzzeit-Druckversuch ermittelten Spannungs-Stauchungs-Kurven des gleichen Betons ohne sowie mit 1 und 2 Vol.-% Stahlfasern dargestellt. Die Fläche unter den Kurven ist ein Maß für die Energieaufnahme dieser Betone. Durch Zugabe der Stahlfasern steigt die Energieaufnahme deutlich an. Die Fasern bewirken auch eine größere Stauchung bei der Höchstlast, d. h. der Scheitel der Kurven wird zu höheren Verformungswerten verschoben. Schließlich fällt die Spannungs-Stauchungs-Kurve bei größerer Zugabe von Stahlfasern nur sehr flach ab; das bedeutet, daß Stahlfaserbeton auch nach Überschreiten der Höchstlast sowie der zugehörigen Stauchung noch erhebliche Tragreserven aufweist. Bei stahlfaserreichen Betonen (mindestens 2 Vol.-% Stahlfasern) erschöpft sich das Trag- und Energieaufnahmevermögen erst

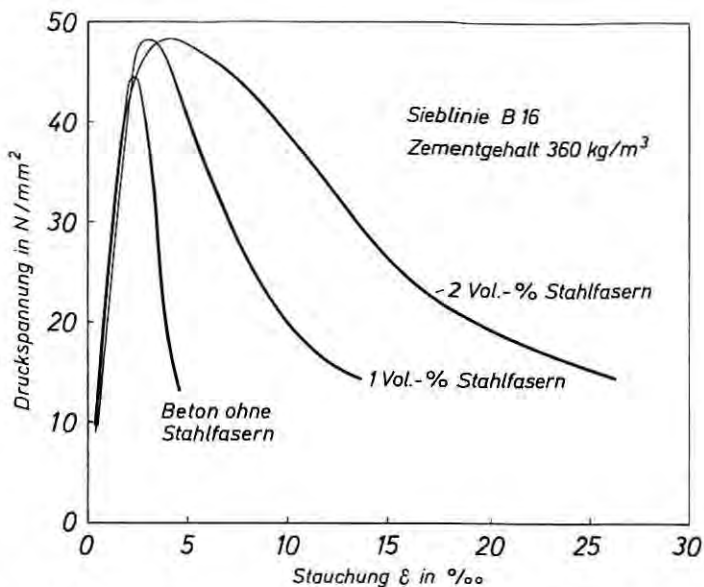


Bild 2 Arbeitslinien vergleichbarer Betone mit und ohne Stahlfasern

dann, wenn ein erheblicher Anteil der Stahlfasern weitgehend aus dem Beton herausgezogen worden ist. Die Energieaufnahme ist dann bis zu rd. zehnmal größer als die des gleichen Betons ohne Fasern.

Die von Dahms [6] an üblichen Stahlfaserbetonen mit Stahlfasergehalten bis zu 3 Vol.-% ermittelten relativen Festigkeitsverbesserungen sind in Tafel 1 aufgetragen. Sie entsprechen größenordnungsmäßig den Ergebnissen einer Vielzahl anderer, in der Literatur veröffentlichter Untersuchungen. Bei Stahlfaserspritzbeton sind wegen des verfahrensbedingt auftretenden Rückpralls im fertig verarbeiteten Beton nur Stahlfasergehalte bis zu rd. 2 Vol.-% erreichbar.

Tafel 1 Festbetoneigenschaften von Stahlfaserbeton mit unterschiedlichen Fasergehalten nach [6]

| Fasergehalt Vol.-% | Druck- festigkeit | Spaltzug- festigkeit | Schlagfestig- keit als Anzahl der Schläge |
|------------------------------------|----------------------|-------------------------|---|
| Anteil in % des Betons ohne Fasern | | | |
| 0 | 100 | 100 | 100 |
| 1 | 117 | 105 | 470 |
| 2 | 126 | 166 | 800 |
| 2,5 | 133 | 189 | 1815 |
| 3 | 144 | 211 | 2070 |

Inwieweit die in Tafel 1 aufgeführten Festigkeitsverbesserungen im Einzelfall erreicht werden, hängt von der sachgerechten Zusammensetzung und – besonders bei gespritztem Beton – der Herstellung des Betons sowie von der Menge, der Art und den Abmessungen der verwendeten Stahlfasern ab. Bei sonst gleichen Verhältnissen wird die Wirksamkeit der Stahlfasern darüber hinaus ganz wesentlich von ihrer Lage im Beton beeinflusst: Die Fasern müssen im Beton so verteilt sein, daß ausreichend viele Stahlfasern in Richtung der im Gebrauchszustand überwiegend auftretenden Zug-(Querzug-)Spannungen oder senkrecht zu den auftretenden Schubspannungen liegen und damit ganz oder teilweise wirksam an der Lastaufnahme beteiligt sind. Orientierende Versuche an Bohrkernen aus einem Stahlfaserspritzbeton mit der in Bild 3 angegebenen

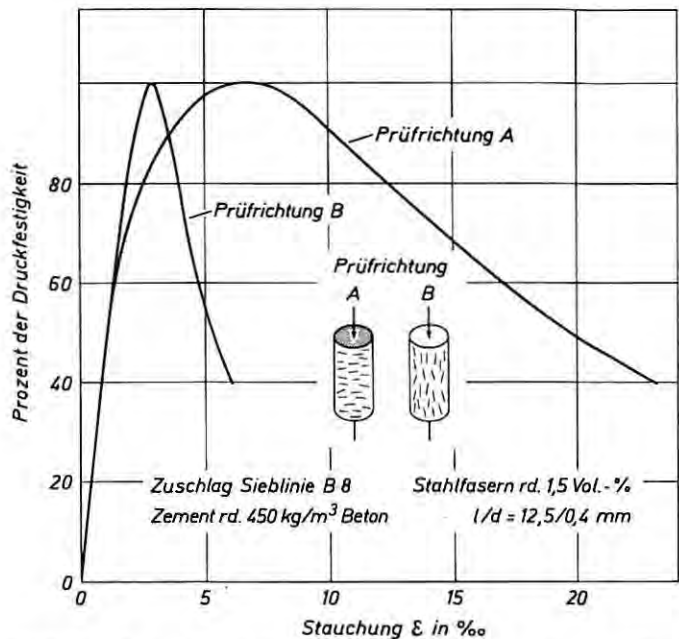


Bild 3 Einfluß der Faserorientierung auf das Arbeitsvermögen von Stahlfaserspritzbeton

Zusammensetzung bestätigten, daß sich die Stahlfasern bei der Verarbeitung des Stahlfaserbetons im Spritzverfahren bevorzugt senkrecht zur Spritzrichtung orientieren. Die Bohrkern mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 20 cm wurden z. T. in der Spritzrichtung (Richtung A) und z. T. senkrecht zur Spritzrichtung (Richtung B) aus Prüfplatten herausgebohrt. Im untersuchten Fall war dadurch die mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 2‰ pro Minute im Kurzzeit-Druckversuch ermittelte, in Tafel 2 angegebene und in Bild 3 dargestellte Energieaufnahme bei Prüfung in

Tafel 2 Festbetoneigenschaften des untersuchten Stahlfaserspritzbetons mit rd. 1,5 Vol-% Stahlfasern bei Prüfung senkrecht zur überwiegenden Lage der Fasern (A) sowie in Richtung der Fasern (B)

| | Festbetoneigenschaften von Stahlfaserspritzbeton in Prüfrichtung | | |
|--------------------------------------|--|-----------------------|----------------|
| | A | B | Verhältnis A/B |
| Druckfestigkeit N/mm ² | 35 | 36 | ~ 1 |
| Spaltzugfestigkeit N/mm ² | 7,6 | 4,8 | 1,6 |
| Energieaufnahme ¹⁾ | 289 · 10 ⁻³ | 83 · 10 ⁻³ | 3,5 |

¹⁾ Rechenwert; ermittelt als Fläche unter der Druckspannungs-Längsstauungs-Kurve von 0% der Druckfestigkeit bis 40% Restspannung nach Überschreiten der Druckfestigkeit

Richtung A entsprechend der größeren Wirksamkeit der Stahlfasern um rd. das 3,5fache größer als in Richtung B. Bei lastgesteuerter Prüfung war der Unterschied in den Spaltzugfestigkeiten mit rd. dem 1,6fachen geringer. Bei der Druckfestigkeitsprüfung war praktisch kein Unterschied feststellbar. Dies bestätigt frühere Feststellungen, daß durch Stahlfasern die Druckfestigkeit des Betons meist wenig beeinflußt wird. Die in Tafel 2 aufgeführten Werte gelten zunächst nur für den untersuchten Beton. Weitergehende, allgemeingültige Aussagen über die Größenordnung der Orientierung sowie den Einfluß der Betonzusammensetzung und des Spritzverfahrens sind erst nach weiterführenden systematischen Untersuchungen möglich. Bild 4 zeigt die fertige Oberfläche eines Stahlfaserspritzbetons. Die Faserorientierung ist zu erkennen.



Bild 4 Oberfläche von frisch verarbeitetem Stahlfaserspritzbeton; Lage der Fasern überwiegend senkrecht zur Spritzrichtung

Die bei Stahlfaserspritzbeton zu erwartende Orientierung der Fasern senkrecht zur Spritzrichtung sollte bereits vor Beginn der Bauausführung berücksichtigt werden. Ihre Größenordnung muß durch geeignete Vorversuche in der Eignungsprüfung ermittelt werden, wenn der Bemessung der Bauteile bestimmte Zug- oder Schubfestigkeiten des Stahlfaserspritzbetons als gesichert zugrunde gelegt werden. In den meisten Anwendungsfällen, wie z. B. für Auskleidungsschalen im Berg- und Tunnelbau, ist zu erwarten, daß sich die Faserorientierung günstig auf das Tragverhalten des Bauteils auswirkt. Die Stahlfasern liegen dabei nämlich bevorzugt in der Wandebene und können sich so überwiegend wirksam an der Aufnahme der Zug- und Schubkräfte sowie der auftretenden Verformungen beteiligen. Die gleichzeitig in Wandebene auftretenden Drucknormalkräfte können dagegen bei ausreichender Bemessung des Schalenquerschnitts auch vom Beton allein ohne wirksame Fasern aufgenommen werden.

3. Zusammensetzung und Herstellung

Ein wesentlicher Unterschied zwischen üblichem Ortbeton und Beton, der im Spritzverfahren verarbeitet wird, liegt darin, daß sich die Zusammensetzung des fertig verarbeiteten Spritzbetons von derjenigen der Ausgangsmischung immer unterscheidet und vorher nicht genau zu bestimmen ist. Die Zusammensetzung der Ausgangsmischung ändert sich durch den verfahrensbedingt auftretenden Rückprall beim Auftreffen des Betons auf das Bauteil. Die Menge und die Zusammensetzung des Rückpralls werden von einer Vielzahl von Einflußgrößen bestimmt, wie z. B. vom guten Zusammenhaltvermögen des Betons, dem Größtkorn des Zuschlags, der überwiegenden Spritzrichtung, dem Spritzdruck und der Schichtdicke des gespritzten Betons. Beim Trockenspritzverfahren kommt hinzu, daß das Anmachwasser dem Ausgangsgemisch erst an der Spritzdüse zugegeben wird. Die Zugabemenge wird dabei vom Düsenführer aufgrund seiner Erfahrung und seines handwerklichen Geschickes so gewählt, daß der Beton gut am Bauteil haftet und daß der Rückprall möglichst gering ist. Änderungen in der Ausgangsmischung, aber z. B. auch der Spritzrichtung machen dabei eine wiederholte, nicht genau vorhersehbare Änderung der Wasserzugabe erforderlich.

Der Rückprall beträgt beim Spritzbeton ohne Fasern im allgemeinen rd. 25 Gew.-% des eingesetzten Betons. Er besteht überwiegend aus den größeren Körnern des Zuschlags. Dies bewirkt eine Veränderung der Kornzusammensetzung des verarbeiteten Betons hin zur feineren Sieblinie und eine relative Erhöhung des Zementgehaltes.

Beim Stahlfaserspritzbeton ist im Rückprall zusätzlich ein Teil der Stahlfasern enthalten. Er beträgt auch bei Stahlfaserspritzbeton mit kleinem Größtkorn und optimierter Zusammensetzung im allgemeinen kaum weniger als 20 % der in der Ausgangsmischung vorhandenen Stahlfasermenge. Während die vorgenannten Einflußgrößen, wie z. B. Spritzrichtung, Spritzdruck und Schichtdicke, sowohl für den Spritzbeton ohne Fasern als auch für Stahlfaserspritzbeton gelten, wird der Gesamtrückprall beim Stahlfaserspritzbeton zusätzlich von der Fasermenge sowie der Länge und der durch das Ver-

hältnis Länge zu Durchmesser bestimmten Steifigkeit der Fasern beeinflusst: In Bild 5 sind der in [1] für unterschiedlich zusammengesetzte Stahlfaserspritzbetone mit verschiedenen Anteilen unterschiedlicher Stahlfasern ermittelte mittlere Zusammenhang zwischen dem Gesamtrückprall in Gew.-% der Ausgangsmischung und dem sogenannten Stahlfaserindex sowie der ungefähre Gesamtstreubereich der einzelnen Versuche angegeben. Der Stahlfaserindex ergibt sich als Produkt aus dem Stahlfaseranteil in Gew.-% und dem Quotienten aus Stahlfaserlänge und -durchmesser, dem sogenannten l/d-Verhältnis.

Bei gleicher Art und Abmessung der Fasern steigt der Rückprall mit zunehmendem Stahlfaseranteil an. Gleiches gilt, wenn bei gleichbleibendem Stahlfasergehalt die Länge der Fasern zunimmt oder wenn die Steifigkeit der Fasern abnimmt. Die Länge der Stahlfasern sollte deshalb und aus verarbeitungstechnischen Gründen 30 mm nicht überschreiten. Kurze Fasern weisen einen geringeren Rückprallanteil auf, sie bewirken jedoch bei gleicher Zugabemenge in der Regel auch nur eine geringere Verbesserung der Betoneigenschaften. Hier ist eine Optimierung im Einzelfall erforderlich. Das Bild zeigt darüber hinaus den starken Einfluß der Spritzrichtung auf

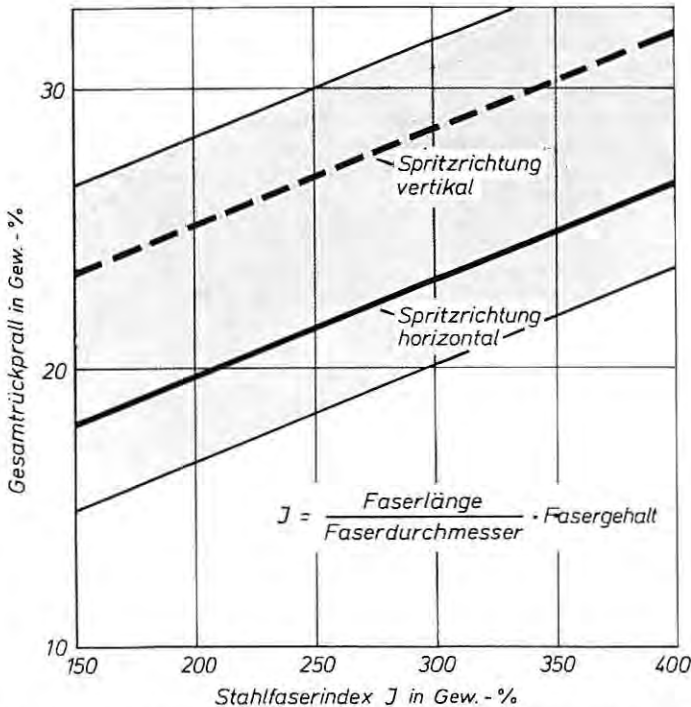


Bild 5 Gesamtrückprall bei Stahlfaserspritzbeton in Abhängigkeit vom Stahlfaserindex und von der Spritzrichtung nach [1]

den Rückprall. Während bei horizontalem Spritzen der Rückprall im Mittel zwischen 18 und 25 Gew.-% betrug, stieg er beim Spritzen überkopf auf 23 bis 30 Gew.-% an. Im Einzelfall kann der Rückprall allerdings auch deutlich größer oder kleiner sein, wie der Gesamtstreubereich zeigt. Die Darstellung erklärt auch, warum der Rückprall an Stahlfasern nur bedingt durch ein Vorhaltemaß bei der Ausgangsmischung ausgeglichen werden kann: Bei größerem Fasergehalt in der Ausgangsmischung ergibt sich ein wiederum vergrößerter Rückprallanteil. Da zudem die Verarbeitungsschwierigkeiten mit steigendem Fasergehalt ansteigen, wird im fertig verarbeiteten Stahlfaserspritzbeton mit den üblicherweise verwendeten Stahlfasern ein Stahlfasergehalt von 2 Vol.-% praktisch nicht zu überschreiten sein.

Hinweise auf die sachgerechte Zusammensetzung von Spritzbeton gibt Dahms in [9]. Sie gelten sinngemäß auch für Stahlfaserspritzbeton und sind in erster Linie darauf abgestellt, einen Beton zu verwenden, der bei möglichst geringem Rückprall gut haftet und eine ausreichende Dichtigkeit erreicht. Spezielle Angaben zur Wahl der Ausgangsstoffe einschließlich der Stahlfasern sowie zur Zusammensetzung und Verarbeitung von Stahlfaserspritzbeton enthält das Merkblatt Stahlfaserspritzbeton [10], das gegenwärtig überarbeitet wird. Einige Angaben sollen nachfolgend kurz wiedergegeben werden:

Der Zuschlag soll möglichst rundkörnig und stetig zusammengesetzt sein. Kornzusammensetzungen, die etwa der Sieblinie B der DIN 1045 entsprechen, sind günstig. Das Größtkorn beträgt in der Regel höchstens 8 mm, um den Rückprall gering zu halten. Bei Stahlfaserspritzbeton erleichtert die Begrenzung des Größtkorns darüber hinaus die vollständige Einbettung der Fasern in den Feinmörtel und erhöht damit ihre Wirksamkeit. Der Zementgehalt soll bei 8 mm Größtkorn des Zuschlags rd. 350 bis 400 kg und bei 4 mm Größtkorn rd. 400 bis 450 kg je m³ verdichteten Betons betragen. Im Berg- und Tunnelbau werden wegen des erwünschten schnellen Erstarrens und Erhärtens des Betons Zemente der Festigkeitsklasse Z 45 F und Z 55 bevorzugt. Aufgrund ihrer größeren Mahlfeinheit ergeben sie zugleich einen Feinmörtel mit gutem Zusammenhaltvermögen. Für besonders schnelles Erstarren und Erhärten werden auch Spezialzemente verwendet, die bereits nach wenigen Minuten beginnend eine nutzbare Betonfestigkeit bewirken [11]. Bei Verwendung von zugelassenen Erstarrungs- und Erhärtungsbeschleunigern als Zusatzmittel ist zu beachten, daß in vielen Fällen die verbesserte Frühfestigkeit eine zum Teil deutlich verringerte Endfestigkeit des Betons zur Folge hat. Ihre Verwendung bedarf deswegen einer eingehenden Prüfung und Abstimmung der Dosierung auf die für die Bauausführung vorgesehenen Betonausgangsstoffe. Die Wirkung der Zusatzmittel ist darüber hinaus deutlich temperaturabhängig. Auch dies muß bei der Festlegung der Dosierung berücksichtigt werden. Hinweise auf die Wirkungsweise unterschiedlicher Zusatzmittel für Spritzbeton sind u. a. [12] zu entnehmen.

Bei der Herstellung von Stahlfaserspritzbeton ist darauf zu achten, daß die Fasern dem Ausgangsgemisch ausreichend vereinzelt und gleichmäßig zugegeben werden. Zusammengeballte Fasern können zu verstopften Förderleitungen führen oder Fehlstellen im gespritzten Beton bilden. Wird der Beton nicht senkrecht, sondern

schräg auf das Bauteil gespritzt, so steigt der Rückprallanteil stark an. Gleichzeitig können sich Schichtungen innerhalb des Betons ausbilden, die z. T. aus Stahlfasern bestehen, die nicht ausreichend von Beton umhüllt sind. In Japan wurden aus diesem Grund zum Einsatz bei besonders ungünstigen Baustellenbedingungen Spritzroboter entwickelt und bei der Verarbeitung von Stahlfaserspritzbeton im Tunnelbau eingesetzt. Sie stellen sicher, daß immer senkrecht und in gleichem Abstand zum Bauteil gespritzt wird [13].

Bei zweckmäßiger Zusammensetzung des Betons und sorgfältiger Verarbeitung kann Stahlfaserspritzbeton bis zu einer Betonfestigkeitsklasse B 35 nach DIN 1045 hergestellt werden. Für die Herstellung einschaliger Tunnelauskleidungen wurde Stahlfaserspritzbeton auch als wasserundurchlässiger Beton im Sinne von DIN 1045 eingebaut. Bild 6 zeigt das sehr dichte und gleichmäßige Gefüge eines sachgerecht hergestellten Stahlfaserspritzbetons.

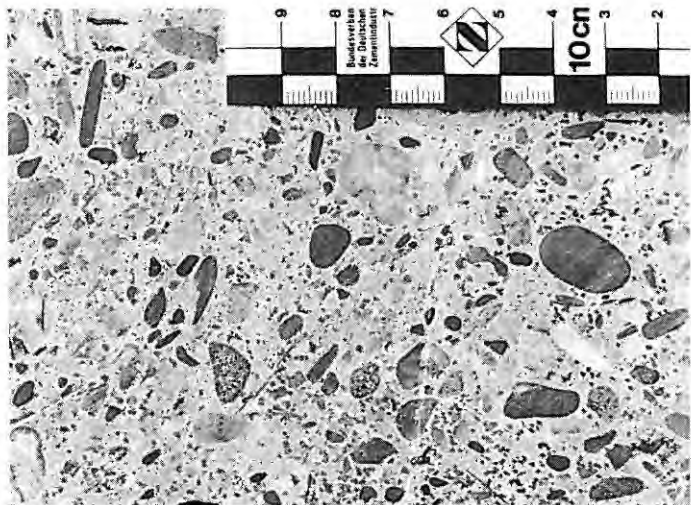


Bild 6 Gefügeaufnahme eines Stahlfaserspritzbetons

4. Prüfung

Die Eigenschaften des frischen und des erhärteten Stahlfaserspritzbetons sind wegen des Rückpralls und der übrigen verfahrenstechnischen Einflüsse nur am fertig gespritzten Beton zu ermitteln. Der Literatur sind z. T. sehr unterschiedliche Aussagen über die Festbetoneigenschaften von Stahlfaserbetonen scheinbar ähnlicher Zusammensetzung zu entnehmen. Dies ist zum großen Teil auf nicht einheitliche Herstell-, Lagerungs- und Prüfbedingungen und auf unterschiedliche Abmessungen der Prüfkörper zurückzuführen. Darüber hinaus spielt bei Stahlfaserspritzbeton die verfahrensbedingt größere Streuung der Versuchsergebnisse eine Rolle. Leider fehlen in einer Vielzahl von Veröffentlichungen die für die vergleiche-

chende Beurteilung der Prüfergebnisse notwendigen Angaben zu diesen Einflußgrößen ganz oder teilweise.

Bereits bei der Eignungsprüfung müssen die für die Bauausführung vorgesehenen Baustoffe und Geräte verwendet werden. Art und Umfang der in der Regel erforderlichen Prüfungen und die Prüfverfahren einschließlich der Herstellung und Lagerung der Prüfkörper sind in [10] und in DIN 18 551 [14] beschrieben. Im folgenden werden einige ergänzende Hinweise zur Durchführung der Prüfungen gegeben.

Die Prüfung des Festbetons geschieht an Bohrkernen, die aus gespritzten Prüfplatten oder Prüfflächen herausgebohrt werden. Der Durchmesser der Bohrkern soll mindestens 10 cm betragen. Ihre Höhe richtet sich nach dem Zweck der Prüfung. Der Nachweis der geforderten Druckfestigkeit im Sinne von DIN 1045 erfolgt in Anlehnung an DIN 1048 an Bohrkernen mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser $h/d = 1$. Die Umrechnung von Prüfergebnissen, die an Prüfkörpern anderer Form und Abmessung ermittelt werden, ist mit den in DIN 1045 für Beton ohne Stahlfasern oder z. B. mit den in [15] für Bohrkern mit unterschiedlichen Durchmessern und unterschiedlicher Schlankheit angegebenen Umrechnungsfaktoren nicht möglich. Diese Faktoren berücksichtigen die mit größer werdender Schlankheit der Prüfkörper ansteigende Wirksamkeit der Stahlfasern nicht ausreichend. Die Auswertung zahlreicher Prüfungen läßt vermuten, daß z. B. der Unterschied zwischen den an Bohrkernen mit 10 cm Durchmesser oder 15 cm Durchmesser und einer Schlankheit $h/d = 2$ ermittelten Druckfestigkeiten bis zu rd. 20 % betragen kann, während im gleichen Fall für Beton ohne Fasern in [15] Unterschiede von nur rd. 5 % angegeben werden. Bei der Prüfung der Spaltzugfestigkeit haben Form und Abmessung der Prüfkörper nur einen vergleichsweise geringen Einfluß. Die Höhe der Prüfkörper sollte dennoch mindestens 10 cm betragen, um die räumliche Faserverteilung ausreichend zu erfassen.

Soll über den Nachweis der Festigkeitsanforderungen hinaus der Einfluß der Stahlfasern auf das Arbeitsvermögen des Stahlfaser-spritzbetons im Kurzzeit-Druckversuch untersucht werden, so sind dafür zweckmäßigerweise Bohrkern mit einem Verhältnis $h/d \geq 2$ zu verwenden. Sie ermöglichen eine deutlichere Differenzierung der Prüfergebnisse nach dem Fasergehalt und der Lage der Fasern im Beton.

Bei der Prüfung wenig berücksichtigt wurde bislang der in Abschnitt 2 beschriebene Einfluß der Faserorientierung auf die Festbetoneigenschaften, der z. T. auch bei der Herstellung von Prüfkörpern aus Stahlfaserbeton auf dem Rütteltisch beobachtet wird. Wie in Abschnitt 2 angegeben, können allein durch die Orientierung Unterschiede z. B. in der Energieaufnahme um mehr als das Dreifache erklärt werden.

Bei der Prüfung des Verformungsverhaltens sowie der Zug- und Spaltzugfestigkeit sind nur dann beurteilbare Ergebnisse zu erwarten, wenn die Richtungen, in denen die Bohrkern aus den Platten oder Prüfflächen herausgebohrt werden – in Spritzrichtung oder senkrecht dazu –, und die Lasteintragsrichtung bei der Prüfung auf die bevorzugte Lage der Fasern im Beton abgestimmt und im Prüfbericht mit angegeben werden. Bei der versuchstechnisch ein-

fachen Prüfung der Spaltzugfestigkeit ist darüber hinaus zu beachten, daß der Spaltzugversuch nur dann eine Aussage über die Zugfestigkeit des Stahlfaserspritzbetons zuläßt, wenn der im allgemeinen am ersten Riß erkennbare Bruch des Prüfkörpers in der Mitte des Prüfkörperquerschnittes beginnt und nicht zuvor ein Versagen der Lasteintragungsbereiche durch undefinierte Druck- und Schubbeanspruchungen auftritt. Bei Stahlfaserbeton mit deutlich erhöhter Zugfestigkeit ist letzteres häufig zu beobachten. In solchen Fällen ist es zweckmäßig, statt des Spaltzugversuches direkte Zugversuche durchzuführen.

Bei Festigkeitsprüfungen an Stahlfaserbetonen hat die Art der Laststeuerung einen noch deutlich größeren Einfluß auf die Prüfergebnisse als bei Beton ohne Fasern. Die Prüfung der Druckfestigkeit zum Nachweis ausreichender Festigkeit im Sinne von DIN 1045 sollte immer mit der in DIN 1048 Teil 1 angegebenen konstanten Belastungsgeschwindigkeit von etwa 0,5 N/mm² in der Sekunde erfolgen, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Die Prüfung der Zug- oder Spaltzugfestigkeit als Grundlage für Bemessungszwecke sowie der Energieaufnahme zur Ermittlung des Fasereinflusses sollte dagegen mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit erfolgen. Nur so können die speziellen Eigenschaften von Stahlfaserbeton, wie etwa seine vergrößerte Bruchdehnung, ausreichend erfaßt werden.

Für die Ermittlung der Spannungs-Stauchungs-Linie im Kurzzeit-Druckversuch hat sich eine Verformungsgeschwindigkeit von 2‰ bis 3‰ pro Minute als günstig erwiesen. Die Beanspruchung bis zum Bruch und die Druckfestigkeit stimmen dabei noch ausreichend genau mit derjenigen beim lastgesteuerten Druckfestigkeitsversuch nach DIN 1048 überein. Zugleich wird die Dauer jedes Einzelversuchs sinnvoll begrenzt. Bei der Prüfung der Zug- und Spaltzugfestigkeit im Kurzzeitversuch empfiehlt sich entsprechend der gegenüber dem Druckversuch deutlich geringeren Bruchlast und Bruchverformung eine Verformungsgeschwindigkeit von 0,2 bis 0,3‰ pro Minute.

5. Zusammenfassung und Folgerungen

5.1 Stahlfaserspritzbeton wurde bislang überwiegend im Berg- und Tunnelbau angewendet. Seine speziellen stofflichen Eigenschaften ermöglichen es, den Aufwand für den Streckenausbau deutlich zu verringern und die Vortriebsgeschwindigkeit zu erhöhen.

5.2 Die Zugabe einer ausreichenden Menge, d. h. von im allgemeinen rd. 2 Vol.-%, geeigneter Stahlfasern bewirkt bei sachgerecht zusammengesetztem Beton im jungen Alter eine Verbesserung seiner Druckfestigkeit bis zu rd. dem Dreifachen sowie im erhärteten Zustand seiner Zugfestigkeit bis zu rd. dem Doppelten und seines Arbeitsvermögens bis zu rd. dem Zehnfachen. Voraussetzung dafür ist, daß die Stahlfasern im Beton so verteilt sind, daß sie sich ausreichend an der Aufnahme der im Gebrauchszustand auf den Beton einwirkenden Belastungen beteiligen können. Bei Stahlfaserspritzbeton tritt verfahrensbedingt eine Orientierung der Stahlfasern überwiegend senkrecht zur Spritzrichtung auf. Orientierende Versuche ergaben, daß sich dadurch je nach der gewählten Beanspru-

chungsrichtung die am gleichen Beton ermittelten Spaltzugfestigkeiten um rd. das 1,6fache und die Energieaufnahme unter Druckbelastung um rd. das 3,5fache unterscheiden können. Die mögliche Orientierung der Stahlfasern muß bereits bei der Bemessung von Bauteilen aus Stahlfaserspritzbeton berücksichtigt werden.

5.3 Die Eigenschaften des fertig verarbeiteten Stahlfaserspritzbetons werden von der Menge und der Zusammensetzung des verfahrensbedingt auftretenden Rückpralls beeinflusst. Der Rückprallanteil wird durch eine sachgerechte Betonzusammensetzung und durch die Wahl geeigneter Stahlfasern relativ gering gehalten. Nach Versuchen in [1] kann er unter sonst gleichen Bedingungen z. B. um nahezu ein Drittel kleiner ausfallen, wenn ausreichend kurze und steife Stahlfasern verwendet werden. Kürzere Stahlfasern verbessern aber bei gleicher Zugabemenge die Betoneigenschaften im allgemeinen weniger als gleichartige, jedoch längere Fasern. Im Einzelfall muß deshalb geprüft werden, welche Stahlfasern das günstigste Ergebnis bringen. Stahlfasern mit einer Länge von mehr als rd. 30 mm sollten nicht verwendet werden.

5.4 Die Prüfung von Stahlfaserspritzbeton bedarf einer noch weitergehenden Vereinheitlichung, um besser vergleich- und beurteilbare Ergebnisse zu erhalten. Die Betondruckfestigkeit sollte an Bohrkernen mit einem Durchmesser von mindestens 10 cm und einer Schlankheit $h/d = 1$ in Anlehnung an DIN 1048 geprüft werden. Die Energieaufnahme im Kurzzeit-Druckversuch wird zweckmäßigerweise an Bohrkernen mit einer Schlankheit $h/d \geq 2$ und mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit von 2 bis 3‰ pro Minute ermittelt; die Verformungsgeschwindigkeit bei Zug- und Spaltzugprüfungen sollte 0,2 bis 0,3‰ pro Minute betragen. Bei Stahlfaserspritzbeton mit Stahlfasergehalten von rd. 2 Vol. % und dementsprechend stark verbesserter Zugfestigkeit kann es empfehlenswert sein, statt des Spaltzugversuchs direkte Zugversuche durchzuführen. Bei der Durchführung der Prüfungen und der Beurteilung der Prüfergebnisse muß in jedem Fall die mögliche Orientierung der Stahlfasern, z. B. durch die passende Wahl der Lasteinleitungsrichtung, erfaßt werden.

SCHRIFTTUM

- [1] Rapp, R.: Stahlfaserspritzbeton im Bergbau und Tunnelbau. Glückauf-Betriebsbücher 20 (1979), Essen 1979.
- [2] Schikora, K., und T. Fink: Berechnungsmethoden moderner bergmännischer Bauweisen beim U-Bahn-Bau. Bauingenieur 57 (1982) H. 5, S. 193/198.
- [3] State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. Report No. ACI 544.1 R-82. Concrete International 4 (1982) H. 5, S. 9/30.
- [4] Ruffert, G.: Stahlfaserspritzbeton zur Sanierung vorgespannter Stahlbetonkonstruktionen. Straßen- und Tiefbau 32 (1978) H. 7, S. 10/12.
- [5] Wischers, G.: Faserbewehrter Beton. beton 24 (1974) H. 3, S. 95/99, und H. 4, S. 137/141; ebenso Betontechnische Berichte 1974, Beton-Verlag, Düsseldorf 1975, S. 45/70.
- [6] Dahms, J.: Herstellung und Eigenschaften von Stahlfaserbeton. beton 29 (1979) H. 4, S. 139/143; ebenso Betontechnische Berichte 1979, Beton-Verlag, Düsseldorf 1980, S. 29/42.

- [7] Stahlfaser- und Stahlfaserspritzbeton – Herstellung, Eigenschaften, Anwendung. Konstruktiver Ingenieurbau, H. 31, Essen 1978.
- [8] Dartsch, B.: Beton hoher Grünstandfestigkeit für vorfabrizierte Bauteile. Vorberichte zum 10. Kongreß der Int. Vereinigung für Brückenbau und Hochbau, Tokyo 1976, S. 537/542.
- [9] Dahms, J.: Spritzbeton – Anforderungen, Zusammensetzung, Überwachung. beton 23 (1973) H. 10, S. 441/445; ebenso Betontechnische Berichte 1973, Beton-Verlag, Düsseldorf 1974, S. 139/151.
- [10] Merkblatt Stahlfaserspritzbeton. Hrsg. Deutscher Beton-Verein. beton 27 (1977) H. 2, S. 66/69.
- [11] Dahms, J.: Beton hoher Frühfestigkeit. Betonwerk + Fertigteil-Technik 40 (1974) H. 6, S. 402/408.
- [12] Huber, H.: Neue Entwicklungen bei Spritzhilfen. Zement und Beton 26 (1981) H. 3, S. 103/105.
- [13] Kobayashi, K.: Development of fibre reinforced Concrete in Japan. Cement and Lightweight Concrete 5 (1983) H. 1, S. 27/40.
- [14] DIN 18551 Spritzbeton – Herstellung und Prüfung.
- [15] Lewandowski, R.: Beziehungen zwischen Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit des Betons. Betonstein-Zeitung 37 (1971) H. 9, S. 562/566.