
BEGRENZUNG DER FESTIGKEIT VON SPRITZBETON

LIMITATION OF STRENGTH OF SPRAYED CONCRETE

Prof. Dr.-Ing. Rolf **Breitenbücher**,
Dipl.-Ing. Björn **Siebert**,
Lehrstuhl für Baustofftechnik, Ruhr-Universität Bochum, Deutschland

Bei Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen mit Spritzbeton ist anzustreben, dass die Steifigkeit und Festigkeit des Betons der Verstärkungsschicht und die des Altbetons etwa in gleicher Größenordnung liegen. Spritzbeton, im Trockenverfahren appliziert, weist jedoch aufgrund des verfahrensbedingten niedrigen w/z-Werts häufig deutlich höhere Festigkeiten auf. Ziel eines Forschungsvorhabens am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum war es daher, die Eigenschaften des Spritzbetons wie z. B. Festigkeit, Steifigkeit, Haftung etc. durch betontechnologische und verfahrenstechnische Optimierungen denen eines typischen Altbetons mit moderater Festigkeit anzupassen. Gleichzeitig sollte dabei der Rückprall auf niedrigem Niveau gehalten werden. Als zweckmäßig erwies sich dabei ein teilweiser Austausch von Zement gegen hydraulischen Kalk sowie die Verwendung einer calcitischen Gesteinskörnung an Stelle von quarzitischen Gesteinen.

For concrete repair and strengthening measures with sprayed concrete the stiffness and strength of the reinforcing concrete is aimed to be similar to the old concrete. Sprayed concrete applied by dry mix shotcrete process exhibits significantly higher strengths due to the process-related lower w/c-ratio. The aim of a research study at the Institute for Building Materials of the Ruhr-Universität Bochum was to adapt the properties of the sprayed concrete e.g. strength, stiffness, bond etc. to such of a typical old concrete with not too high strength by means of concrete technological and procedural optimisation. Simultaneously, the rebound should be kept as low as possible. It proved to be advantageous to replace cement partly with hydraulic limestone or to use calcitic aggregates instead of quartzitic ones.

1. Einleitung

Bei Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen von Betonbauteilen wird häufig Spritzbeton im Trockenspritzverfahren eingesetzt. Dabei wird eine werkgemischte oder auf der Baustelle hergestellte Trockenmischung verwendet. Die Wasserzugabe erfolgt erst an der Düse. In der Regel ergibt sich bei diesem Verfahren ein w/z-Wert zwischen 0,45 und 0,48. Aufgrund dieses w/z-Wertes sowie des Verfahrens ist beim Trockenspritzverfahren mit einem Rückprallanteil - je nach Oberfläche (Wand- oder Überkopfbereich) - von 15 M.-% bis 35 M.-% zu rechnen [1]. Da sich der entstehende Rückprall im Allgemeinen vorwiegend aus zurückprallenden, groben Gesteinskörnern zusammensetzt, erhöht sich der Zementgehalt in der anhaftenden Spritzbetonschicht gegenüber dem Bereitstellungsgemisch deutlich. Daher weisen diese Spritzbetone im erhärteten Zustand oftmals Festigkeiten und Steifigkeiten auf, die deutlich höher als im darunter liegenden Altbeton sind.

Ist die äußere Schicht jedoch erheblich steifer als der darunter im Verbund stehende Untergrund, bauen sich bei Temperatur- und Feuchteänderungen, die naturgemäß in der äußersten Schicht auch stärker ausgeprägt sind als in der darunter liegenden Schicht, rasch hohe Zwangs- und Eigenspannungen auf. Die Folge sind oft vergleichsweise breite Risse. Liegen

dagegen die Festigkeiten und Steifigkeiten der beiden Schichten in ähnlicher Größenordnung, bilden sich mehr schmale, fein verteilte, oberflächennahe Risse.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum wurden praxisübliche Spritzbetonzusammensetzungen unter Berücksichtigung der angewendeten Verfahrenstechnik so optimiert, dass die Eigenschaften des Spritzbetons denen eines moderaten Altbeton-Untergrunds sehr nahe kommen. In der Regel bedeutet dies, dass der applizierte Spritzbeton eher zu einem weicheren Verhalten als zu einem steiferen hin verändert werden muss. Dazu wurden die maßgebenden Festbetoneigenschaften wie Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Schwinden und Haftzugfestigkeit von verschiedenen Spritzbetonproben ermittelt.

Um die Festbetoneigenschaften des Spritzbetons denen des Untergrunds (Altbeton) weitgehend anzupassen, bietet sich seitens der Betontechnologie an, den Zementgehalt im Bereitstellungsgemisch zu reduzieren. Diese Alternative wurde auch schon gelegentlich angewandt. Allerdings führt dies unter Umständen zu erhöhtem Rückprall, was im Endeffekt wiederum in einer Erhöhung des Zementgehalts und damit der Schwindverformungen im applizierten Spritzbeton mündet [2]. Daher ist eine Reduzierung des Zementgehalts allein nicht immer zielführend; dann gilt es gleichzeitig den Rückprall eher zu vermindern, anstatt ansteigen zu lassen. Dazu besteht die Möglichkeit, entweder einschlägige Rückprallreduzierer einzusetzen, oder den reduzierten Zementgehalt durch entsprechend mehlfine Zusätze zu kompensieren, die jedoch nicht gleichzeitig wiederum zu einem Festigkeitsanstieg führen dürfen. Darüber hinaus bieten auch verfahrenstechnische Modifikationen, insbesondere in den verwendeten Spritzmaschinen oder Spritzdüsen, Möglichkeiten, die Spritzbetoneigenschaften entsprechend zu beeinflussen.

2. Umfang der Laboruntersuchungen

Vor dem Hintergrund dieser betontechnologischen und verfahrenstechnischen Möglichkeiten zur Reduzierung der Festigkeit und Steifigkeit des Spritzbetons, wurden diverse Spritzbetone unter Modifikationen einer praxisüblichen Zusammensetzung sowie der Spritzgeräte untersucht.

Die Grundzusammensetzung des Referenz-Spritzbetons enthielt 320 kg/m^3 Zement CEM I 32,5 R, sowie 1936 kg/m^3 Gesteinskörnung (quarzitisch, Rundkorn, Größtkorn 8 mm, Sieblinie B8). Diese Zusammensetzung wurde durch folgende Maßnahmen verändert:

- Reduktion des Zementgehalts auf einen minimalen Gehalt von 230 kg/m^3 , wobei die Reduzierung ausschließlich durch eine Erhöhung des Anteils der Gesteinskörnung kompensiert wurde.
- Austausch von Zement gegen Betonzusatzstoffe wie hydraulischen Kalk (HK) oder Kalksteinmehl (KSM). Hiermit sollte der Zementgehalt reduziert werden, ohne dass sich der Gesamtgehalt an Feinstoffen verändert.
- Austausch der Gesteinskörnung. Durch den Einsatz einer calcitischen Gesteinskörnung mit gegenüber der ursprünglichen quarzitischen Gesteinskörnung geringerer Steifigkeit sollte zum einen die Energie beim Aufprall der Gesteinskörnung verringert und so die Menge der zurückgeprallten Feststoffe reduziert werden. Zum anderen wird dadurch auch der Elastizitätsmodul des applizierten Spritzbetons abgesenkt, so dass sich in der neuen Schicht auch geringere Zwangsspannungen einstellen.

In Tab. 1 sind die untersuchten Spritzbetonzusammensetzungen (bei einem w/z-Wert von 0,45) aufgeführt. Die Bereitstellungsgemische wurden hierzu im Labor unmittelbar vor der

jeweiligen Verarbeitung zusammengemischt. Zur Verbesserung der Spritzbarkeit wurde dabei eine Eigenfeuchte von 0,5 M.-% eingestellt.

Tab. 1: Zusammensetzungen der untersuchten Spritzbetone [kg/m³]

Spritzbeton- probe	Zement	Gesteinskörnung ¹⁾				Beton- zusatzstoff	
		0-2 mm	2-5 mm	2-8 mm	8-11 mm	HK	KSM
R	320	1162	0	774	0	0	0
M1	230	1271	0	848	0	0	0
M2	260	1187	0	791	0	60	0
M3	260	1187	0	791	0	0	60
M4	260	1186	396	0	396	0	60

Legende:

¹⁾ R, M1 – M3: Sieblinie: 0-2 mm = 60 M.-%, 2-8 mm = 40 M.-%; quarzitisch

M4: Sieblinie: 0-2 mm = 60 M.-%, 2-5 mm = 20 M.-%, 8-11 mm = 20 M.-%; calcitisch

Diese Spritzbetone wurden mit ein- und derselben Spritzmaschine (0,7 l Rotormaschine, Maschinendruck 2-3 bar) und –düse (Schlauchdüse Ø 32 mm) verarbeitet.

Um den verfahrenstechnischen Einfluss auf die Spritzbetoneigenschaften zu erfassen, wurden zum einen die Spritzmaschinen hinsichtlich deren Rotorvolumen und zum anderen die Spritzdüse hinsichtlich dem Düsendurchmesser variiert (Tab. 2). Dabei wurden Geräte / Spritzdüsen von unterschiedlichen Herstellern einbezogen. Für diese Untersuchungen mit dem Fokus auf der Verfahrenstechnik wurde ein praxisüblicher, werkgemischter Spritzmörtel (Größtkorn 2 mm) eingesetzt. Auch diese Trockengemische wurden zur Verbesserung der Spritzbarkeit unmittelbar vor Zuführung zur Spritzmaschine auf eine Eigenfeuchte von 0,5 M.-% vorbefeuchtet.

Tab. 2: Kombinationen der eingesetzten Spritzmaschinen und Spritzdüsen

Kombination	Spritz- maschine	Spritzdüse
1	R1	D1
2	R1	D2
3	R2	D1
4	R2	D2

Legende:

R1: 0,7 l Rotor / Maschinendruck 2-3 bar

R2: 2,0 l Rotor / Maschinendruck 2-3 bar

D1: Schlauchdüse Ø 32 mm

D2: Schlauchdüse Ø 32-35 mm / Hochdruck mit Druckerhöhungspumpe

3. Herstellung der Spritzproben und der Probekörper für Festbetonuntersuchungen

Für jede Spritzbetonzusammensetzung aus Tab. 1 und jede Gerätekombination aus Tab. 2 wurden jeweils eine Spritzkiste (50 x 50 x 12 cm³) und eine Verbundplatte (Altbetonplatte 80 x 100 cm², Dicke des aufgetragenen Spritzbetons: 12 cm) hergestellt, an denen die diversen Festbetoneigenschaften bestimmt wurden (Bild 1). Die Altbetonplatten aus einem Beton der Festigkeitsklasse C25/30 waren dabei während des Spritzbetonauftrags unter einem Winkel von etwa 60° zur Horizontalen geneigt. Die Oberflächen dieser Platten wurden vorab gestrahlt und vorgeätzt, so dass bei Beginn der Spritzbetonarbeiten die Auftragsfläche matt-

feucht war. Der Spritzbeton wurde mit einer planmäßigen Gesamtschichtdicke von 12 cm in mehreren Lagen aufgebracht.

Während des Spritzvorgangs wurde auch der jeweilige Rückprall erfasst. Er lag bei den Variationen der Spritzbetone (R, M1 bis M4) i. Allg. zwischen rund 23 und 30 M.-%. Bei den Spritzversuchen mit dem werkgemischten Spritzmörteln (K1 bis K4) unter Variation der Spritzmaschinen und -düsen war der Rückprall – nicht zuletzt aufgrund des kleineren Größtkorns – geringer, er betrug zwischen 12 und 18 M.-% bezogen auf die gesamte Spritzmörtelmenge.

Alle Spritzkörper wurden 6 Tage lang durch Folienabdeckung und tägliches Befeuchten der Oberfläche nachbehandelt.



Bild 1: Spritzkiste (links) und Betonplatte für Verbundplatte (rechts)

Für die Festbetonuntersuchungen wurden im Alter von 14 Tagen Bohrkerne aus den Spritzkisten und den Verbundplatten entnommen (Bild 2). Die Bohrkerne wurden anschließend auf die prüfungsrelevante Länge geschnitten, planparallel geschliffen und bis zur Untersuchung unter Wasser gelagert.



Bild 2: Entnahme von Probekörpern aus einer Verbundplatte

4. Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen

Für die verschiedenen Spritzbetone wurden an den Probezylindern ($d = 100 \text{ mm}$, $h/d = 1$) die Druckfestigkeiten im Alter von 7, 28 und 91 Tagen nach DIN EN 12390-3, sowie der statische E-Modul im Alter von 28 Tagen nach DIN 1048-5 bestimmt. Die maßgeblichen Ergebnisse hierzu sind in Bild 3 zusammengestellt. Die parallel dazu im Alter von 28 Tagen bestimmten Festbetonrohddichten variierten bei den verschiedenen Spritzbetonen (R, M1 bis M4) mit Werten zwischen 2290 kg/m^3 und 2370 kg/m^3 nur geringfügig.

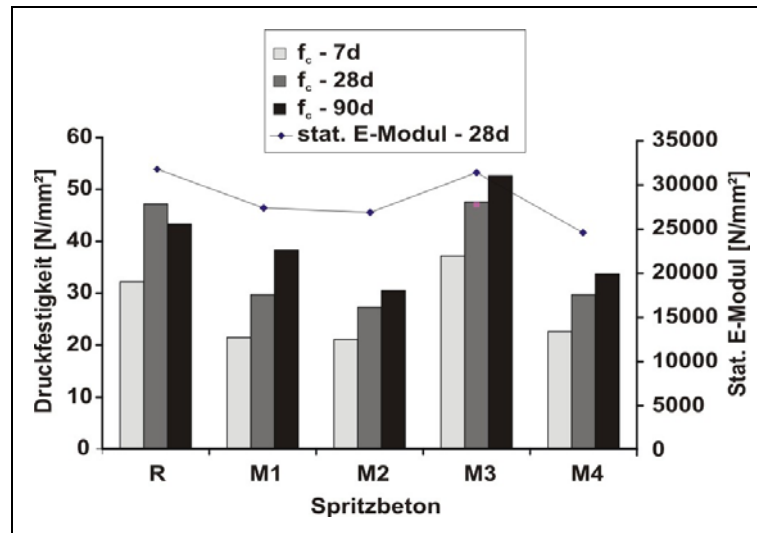


Bild 3: Druckfestigkeiten und E-Moduln der Spritzbetone
(Variation: Betonzusammensetzung)

Für die unter Variation von Spritzmaschine und Spritzdüse hergestellten Spritzmörtelplatten wurden Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen zwischen 43 und 47 N/mm² bestimmt (Bild 4). Diese lagen somit nahezu unabhängig von den eingesetzten Gerätekombinationen auf annähernd gleichem Niveau. Die Festmörtelrohddichten der Spritzmörtel betragen bei allen Gerätevariationen rund 2200 kg/m^3 und unterschieden sich somit auch nur geringfügig.

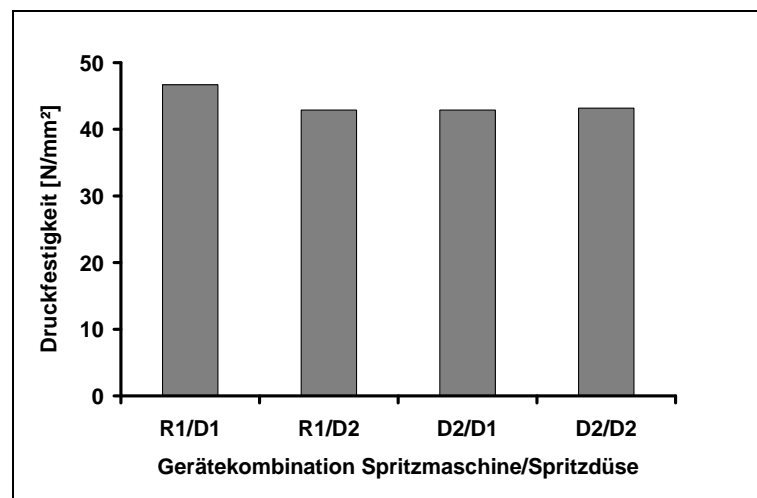


Bild 4: Druckfestigkeiten der Spritzmörtel
(Variation: Gerätekombination Spritzmaschine / Spritzdüse)

Darüber hinaus wurden für die verschiedenen Spritzbetone die Schwindverformungen bis zum Alter von 91 Tagen axial entlang der Mantelflächen der entnommenen Bohrkerns entsprechend dem in Heft 422 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton beschriebenen Verfahren bestimmt. Die dabei ermittelten Verformungen sind in Bild 5 dargestellt.

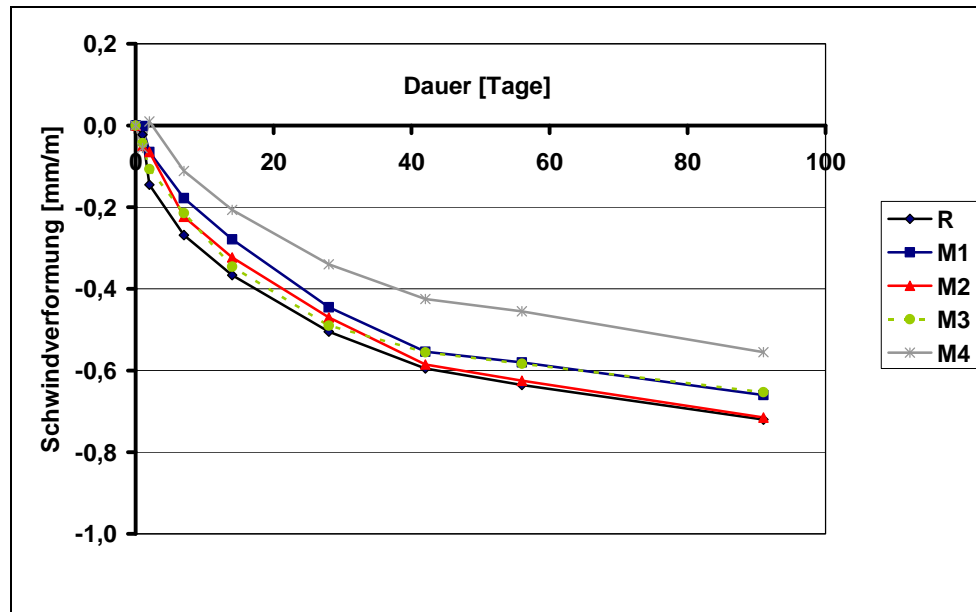


Bild 5: Gemittelte Schwindverformungen der verschiedenen Spritzbetonzusammensetzungen

Des Weiteren wurden sowohl für die unterschiedlichen Spritzbetone als auch für den Spritzmörtel unter Variation der Gerätekombination die Haftzugfestigkeiten auf dem Altbeton bestimmt. Dazu wurden im Alter von 28 Tagen zentrische Zugversuche an Bohrkernen, die den Verbundplatten entnommen wurden, nach DIN EN 14488-4 durchgeführt. Gleichzeitig wurde dabei festgehalten, in welchem Bereich der Bohrkerns das Versagen eintrat. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind in Tab. 3 dargestellt.

Tab. 3: Mittlere Haftzugfestigkeiten und Versagensart der Probekörper aus Verbundplatten im Alter von 28 Tagen

Spritzbeton-variante	Mittl. Haftzugfestigkeit [N/mm ²]	Versagen überwiegend in:
R	2,45	B-Platte
M1	1,39	SP-Beton
M2	n.b.	--
M3	2,51	B-Platte
M4	2,26	B-Platte
Spritzmörtel bei Gerätekombination	Mittl. Haftzugfestigkeit [N/mm ²]	Versagen überwiegend in:
R1/D1	2,95	B-Platte
R1/D2	2,93	B-Platte
R2/D1	3,62	B-Platte
D2/D2	3,09	B-Platte

Legende:

B-Platte: Betonplatte; SP-Beton: Spritzbetonschicht

5. Diskussion der Ergebnisse

Eine Reduzierung des Zementgehalts von 320 kg/m^3 auf 230 kg/m^3 bei Spritzbeton M1 verminderte die 28-Tage-Festigkeit um -37% auf rd. 30 N/mm^2 und damit signifikant. Gleichzeitig konnte dabei der E-Modul um 14% vermindert werden. Dieser Spritzbeton entsprach somit nach Festigkeit und Steifigkeit in etwa einem Beton C25/30. Ebenso konnten aufgrund des geringeren Zementleimgehalts die Schwindverkürzungen um annähernd 10% verringert werden.

Von dieser Seite her würde man den Zielvorstellungen, dass die Eigenschaften des neuen Spritzbetons denen des Altbetons mit mäßiger Festigkeit weitgehend entsprechen, schon nahe kommen. Allerdings wirkte sich bei dieser Modifikation nachteilig aus, dass der Rückprall mit rd. $30 \text{ M.}\%$ deutlich höher als beim Referenzbeton ausfiel, womit diese alleinige Reduzierung des Zementgehalts sich als eine wirtschaftlich wenig sinnvolle Variante herauskristallisierte.

Mit dem Austausch von 60 kg/m^3 Zement gegen hydraulischen Kalk (Spritzbeton M2) konnte ebenso sowohl die Festigkeit (auf 27 N/mm^2 nach 28 Tagen) als auch der E-Modul (auf 27.000 N/mm^2) gegenüber dem Referenzbeton ($f_{c,28} = 47 \text{ N/mm}^2$, $E = 32.000 \text{ N/mm}^2$) z.T. deutlich reduziert werden. Im Gegensatz zum Spritzbeton M1, bei dem lediglich der Zementgehalt reduziert wurde, war bei dem Spritzbeton mit hydraulischem Kalk (M2) eine deutlich geringere Festigkeitszunahme nach 28 Tagen festzustellen. Gleichzeitig wurde bei letzterer Modifikation mit $23 \text{ M.}\%$ der geringste Rückprallanteil der gesamten Spritzbetonreihe erzielt. Das Schwindmaß dieses Betons M2 veränderte sich mit $0,70 \%$ gegenüber dem Referenzbeton nicht signifikant.

Der Austausch von 60 kg/m^3 Zement gegen inertes Kalksteinmehl (Spritzbeton M3) führte zu keiner Absenkung der Festigkeit und Steifigkeit. Nur das Schwindmaß wurde durch diese Maßnahme geringfügig um 10% verringert.

Sowohl in der Festigkeit als auch im E-Modul konnte eine deutliche Absenkung gegenüber dem Referenzbeton erzielt werden, wenn für den Spritzbeton (M4) die quarzitische Gesteinskörnung durch eine calcitische Gesteinskörnung ersetzt wurde und gleichzeitig 60 kg/m^3 Zement gegen Kalksteinmehl ausgetauscht wurden. In diesem Fall betrug die 28 Tage-Festigkeit nur mehr 30 N/mm^2 , der E-Modul wurde zu 25.000 N/mm^2 bestimmt. Bei Letzterem machte sich sicherlich – wie in der Betontechnologie allgemein bekannt – der niedrigere Elastizitätsmodul des Kalkgesteins maßgeblich bemerkbar. Ebenso konnte bei diesem Spritzbeton M4 das Schwinden durch die vorgenommenen Modifikationen merklich, d.h. um rd. 25% , reduziert werden.

Im Hinblick auf die Haftzugfestigkeiten im Alter von 28 Tagen wiesen die Spritzbetone R, M3 und M4 mit mittleren Haftzugfestigkeiten von rd. $2,3$ bis $2,5 \text{ N/mm}^2$ Werte auf, die deutlich über den üblicherweise geforderten $1,5 \text{ N/mm}^2$ liegen. Zwar betrug die Haftzugfestigkeit bei der Mischung M1 (mit dem reduzierten Zementgehalt) im Mittel lediglich rd. $1,4 \text{ N/mm}^2$, jedoch trat auch hier das Versagen nicht im Spritzbeton, sondern in der Betonplatte auf. Die tatsächliche Zugfestigkeit des Spritzbetons liegt daher über diesem Wert.

Bei den verfahrenstechnischen Variationen (Spritzmaschine, Spritzdüse) zeigte sich eine gleich gute Verarbeitung des eingesetzten Spritzmörtels mit jeder untersuchten Gerätekombination. Die Unterschiede im Rückprall lagen ebenso wie die Festigkeiten des Spritzmörtels bei allen 4 Gerätevarianten innerhalb der üblichen Streuungen.

6. Zusammenfassung

Bei Einsatz von Spritzbeton im Trockenspritzverfahren werden in der aufgetragenen Betonschicht verfahrensbedingt oftmals deutlich höhere Festigkeiten und Steifigkeiten erreicht als im darunter liegenden Altbeton. Als Folge können unter Temperatur- und Feuchteänderungen höhere Zwangs- und Eigenspannungen und letztlich auch eine intensivere Rissbildung in der Spritzbetonschicht hervorgerufen werden. Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum untersucht, ob und inwieweit die Festigkeit und die Steifigkeit des Spritzbetons durch verschiedene betontechnologische und verfahrenstechnische Maßnahmen herabgesetzt werden können. Wirkungsvoll erwiesen sich ein teilweiser Austausch von Zement gegen hydraulischen Kalk sowie die Verwendung einer calcitischen Gesteinskörnung an Stelle von quarzitischen Gesteinen.

Durch Variation der Spritzmaschine und der Spritzdüse ließ sich die Festigkeit des eingesetzten Spritzmörtels nicht wesentlich reduzieren. Verfahrenstechnische Maßnahmen sind im Hinblick auf die Zielsetzung, die Festigkeit im Spritzbeton zu verringern, daher von untergeordneter Bedeutung.

7. Literatur

- [1] Maidl, B.:
Handbuch für Spritzbeton. ISBN 3-433-01196-6, Verlag für Architektur und technische Wissenschaft, Berlin, 1992.
- [2] von Diecken, U.:
Möglichkeiten zur Reduzierung des Rückpralls von Spritzbeton aus verfahrenstechnischer und betontechnologischer Sicht. Dissertation. In: Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen des Institutes für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum 1990, Heft 2.

Die Autoren

Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher

Studium und Promotion an der TU München; Leiter des Zentralen Baustofflabors der Philipp Holzmann AG und gleichzeitig Geschäftsführer der Philipp Holzmann Bautechnik GmbH; seit 2003 Inhaber des Lehrstuhls für Baustofftechnik an der Ruhr-Universität Bochum

Rolf.Breitenbuecher@rub.de

Dipl.-Ing. Björn Siebert

Studium des Bauingenieurwesens bis 2003 an der RWTH Aachen; nach kurzer Tätigkeit in einem Technischen Büro seit Ende 2003 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum

Bjoern.Siebert@rub.de