
SPRITZBETON IM HOCHBAU – ERFAHRUNGEN IN VANCOUVER

STRUCTURAL SHOTCRETE IN VANCOUVER

Roland **Heere**, Metro Testing Laboratories Ltd., Burnaby, Canada

Vancouver ist eine Domäne des Stahlbeton-Hochbaus. Auf Grund der benachbarten Subduktionszone zwischen der Nordamerikanischen Kontinentalplatte und der Juan-de-Fuca-Platte ist Vancouver erdbebengefährdet. Die daraus folgenden Lastannahmen zwingen Statiker, stark bewehrte Stahlbetontragwerke zu konstruieren. Demzufolge findet man häufig tragende Wände, die mit zwei schweren Stahlmatten bewehrt sind. Dafür werden oft Stäbe mit Durchmessern von 20 bis 30 mm Durchmesser verarbeitet. Dennoch setzen Bauunternehmen gern Nassspritzbeton für das Betonieren solcher Elemente ein, wenn schnellstmöglicher Baufortschritt wichtig ist. Dichte Bewehrung und hohes Bautempo erfordern spezielle Betonmischungen, geeignete Spritzbetonpumpen und handwerkliches Geschick der Mannschaften. Auf vielen Baustellen führen Prüflabors nicht nur die Fremdüberwachung der Betongüte durch, sondern begleiten auch die Bauausführung.

Vancouver has a vibrant structural shotcrete industry. However, it is earth-quake prone due to its proximity to the subduction zone between the North American and Juan-de-Fuca Plates. Consequently, shotcrete structures require heavy reinforcement. Frequently structural walls are reinforced with two rebar mats. Rebar diameters of 20 to 30 mm diameter are not uncommon. Enticed by the short construction cycles possible with the shotcrete process, structural shotcrete applicators have adapted to such heavy reinforcement. They are aided by specialist equipment, ready-mix suppliers, experienced nozzlemen, and testing laboratories, which provide not only materials testing but also placement monitoring services.

1. Einleitung

Aus historischen Gründen werden Hochbauten in Vancouver vorrangig in Stahlbeton errichtet. Die erdbebengefährdete Lage stellt hohe Anforderungen an Betongüte und Bewehrungsgrad. Das hat einen prägenden Einfluss auf die örtliche Spritzbetontechnologie. Mannschaften und Ausrüstungen sind darauf spezialisiert, ca. 25 bis 45 m³ Nassspritzbeton pro Tag in stark bewehrte Bauteile einzubringen. Transportbetonwerke haben ihre Mischungen darauf abgestimmt, dass sie pumpbar sind und dennoch eine gute Standfestigkeit im frischen Zustand erreichen. Prüflaboratorien bieten oft neben den routinemäßigen Materialprüfungen auch die Überwachung des Spritzbetoneinbaus an. Der vorliegende Beitrag beschreibt wichtige Details.

2. Moderne Spritzbetonbauten in Vancouver

Spritzbeton wird schon seit Jahrzehnten im Hochbau bei der Reparatur und Instandsetzung eingesetzt. Obwohl in diesem Zusammenhang Spritzbeton früher vorwiegend bei Infrastrukturprojekten wie Dämmen, Industrieanlagen und Wasserbauten verwendet wurde, kamen in den 90er Jahren vermehrt Wohn- und Geschäftsgebäude dazu. Beispielsweise spielte Nassspritzbeton bei der Instandsetzung des *Vancouver Block*, einem historischen Hochhaus in der Innenstadt von Vancouver, im Jahre 1998 eine tragende Rolle.

Schon bald nach der Jahrtausendwende begannen findige Spritzbetonfirmen ihre Erfahrungen im Neubau anzuwenden. Nach Erinnerung des Autors wurde Nassspritzbeton erstmalig in großem Umfang für tragende Wände ab 2005 verarbeitet, und zwar beim Bau von Haltestellen der S-Bahn zwischen Vancouver-Stadt, dem Flughafen von Vancouver und der südlichen Vorstadt Richmond. Bei der Errichtung von zwei Untergrundstationen in der Innenstadt von Vancouver wurden mehrlagig bewehrte Außenwände (gegen den Baugrund) und freistehende Innenwände mittels Transportbeton gespritzt. Zum Teil musste der Beton dabei mehr als 150 m durch Stahlleitungen zum Einbauort gepumpt werden. Bereits damals kamen spezielle Betonpumpen zum Einsatz, die als LKW-Anhänger bequem auch in schmalen Seitenstraßen der Innenstadt aufgestellt werden konnten. Die theoretischen Volumenförderleistungen von ca. 40 m³/h konnten dabei niemals auch nur annähernd erreicht werden, da der Beton ausschließlich von Hand gespritzt wurde. Das beschränkte die Spritzleistung auf etwa 10 m³/h. Allerdings stiegen die Pumpdrücke trotz geringem Volumenstrom mitunter auf über 200 bar (im Hydraulikkreislauf), da lange Pumpwege und relativ steife Betone große Reibungsverluste verursachten.

2.1 Baunormen

Das Normenwerk hinkt der Spritzbetontechnologie zeitlich hinterher. Die folgenden Normen gehören zum Standardrepertoire des Betonbaues in Vancouver. Sie bieten dem Konstrukteur und den Ausführenden folgende spritzbetonspezifischen Informationen:

- Vancouver Building Code [1] – keine Angaben.
- BC Building Code [2] – keine Angaben.
- (Canadian) National Building Code [3] – keine Angaben.
- CSA A23.1/2-14 [4] – generelle Informationen und Richtlinien zu Spritzbetoneigenschaften und Prüfungen, keine normierenden Bezüge spezifisch für den Hochbau.
- CSA A23.3-14 [5] - keine Angaben.
- ACI 506 [6] – Allgemeine Informationen zur Spritzbetontechnologie und Ausschreibung.
- BC MoT SS209 [7] – Detaillierte Informationen zu Materialien, Prüfungen und Ausführungen, allerdings nur zur Hangsicherung.

Dadurch kam es bis vor kurzem zu der kuriosen Situation, dass Konstrukteure im Wesentlichen alle Regeln des Stahlbetonbaues anwandten und die Spritzbetonfirmen im Nachhinein konstruktive Änderungen vorschlagen mussten, um die Arbeiten auch ausführen zu können. Inzwischen haben einige Konstruktionsbüros ihre eigenen Details hinsichtlich Bewehrungsführung, Materialien und Prüfungen entwickelt, was die Situation entspannt.

2.2 Schalung und Bewehrung

In Untergeschossen werden Spritzbetonaußenwände meist als Blindwände ausgeführt. Dazu werden Drainagevlies und Drainmatten auf die Baugrubenwände aufgebracht, die Stahlbewehrung eingebaut und Markierungsdrähte gespannt, welche die geplanten Innenflächen der Wände markieren sollen. Obwohl typische Spritzbetonelemente oft circa 30 cm dick sind und ein- bis zweilagige Bewehrung enthalten, finden sich doch häufige beträchtliche Abweichungen. Infolge großer dynamischer Lastannahmen für den Lastfall Erdbeben findet man mitunter Wände mit bis zu einem halben Meter Dicke, bei denen vor allem in Ecken oder bei Anschlüssen zu Querwänden die dichte Bewehrung den Blick auf die dahinterliegende Drainagematte oder Schalttafel komplett verstellt. Bewehrungsstäbe mit 20 mm Durchmesser gehören zum Alltag. Dennoch werden Düsenführer gelegentlich mit bis zu 30 mm starken Stabstählen konfrontiert. Besonders in Bereichen, in denen solche Stäbe

überlappen und von Bügelbewehrung umgeben sind, wird der Spritzbetoneinbau zur Herausforderung (siehe Bild 1). Schließlich ist noch erwähnenswert, dass die Eisenflechter lernen mussten, Bewehrungsmatten und Körbe so zu fertigen, dass sie während des Spritzvorganges nicht vibrieren oder einzelne Stäbe aus ihrer Sollposition gedrückt werden. Dazu gehört, die Bewehrung in Haupt- und Sekundärriechtung wesentlich häufiger und fester miteinander zu verrödeln, als das im regulären Betonbau üblich ist. Weiterhin müssen Stäbe so angeordnet werden, dass Spritzschatten minimiert werden. Diese Forderungen erhöhen die Bewehrungskosten.



Bild 1a/1b/1c: Typische Bewehrungsdetails (Bild: Metro Testing Laboratories Ltd.)

2.3 Mannschaft und Ausrüstung

In Vancouver besteht die typische Spritzbetonmannschaft aus etwa 7 bis 10 Personen. Dazu gehören:

- Ein bis zwei erfahrene Düsenführer.
- Ein Assistent, welcher den Betonschlauch positioniert und die Befehle des Düsenführers, meist per Sprechfunk, an den Pumpenfahrer weitergibt.
- Ein Pumpenfahrer, der auch auf die Einhaltung der Betonkonsistenz und die Funktion des Kompressors achtet.
- Zwei bis drei qualifizierte Mitarbeiter, welche für die abschließende Oberflächenbehandlung der Spritzbetonbauteile zuständig sind.
- Zwei bis drei Hilfskräfte, welche Rückprall und Verschnitt aus dem Arbeitsbereich entfernen.

Zur typischen Ausrüstung der Spritzbetonmannschaften gehören die folgenden Elemente (siehe auch Bild 2):

- Mobiler Kompressor (~150 - 250 l/s und 10 bar).
- Mobile Betonpumpe (~40 m³/h maximale Pumpleistung, ~150 kW Dieselmotor, 2 Pumpzylinder, 300 bar Hydraulik, über 100 bar Förderdruck, Reduzierstück am Auslass).
- Betonschläuche (50 mm Innendurchmesser).
- Düse mit kurzem Gummimundstück.
- Leichte Arbeitsbühnen mit A-Böcken und Planken oder Holzbohlen (ca. 1 – 1,5 m Arbeitshöhe).
- Diverse Werkzeuge zur Betonoberflächenbearbeitung.



Bild 2: Typisches Einsatzfahrzeug mit Kompressor, Pumpe and Arbeitsbühnen (Bild: Torrent)

2.4 Mischung

Nassspritzbeton wird in Vancouver schon seit Jahrzehnten zur Stabilisierung von Böschungen und Baugruben verwendet. Bereits in den 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts war allgemein bekannt, dass Nassspritzbeton unter Zugabe von ca. 7 bis 13 % Microsilika zum Zement die nützliche Eigenschaft entwickelt, bei relativ geringem Pumpwiderstand hohe Standfestigkeit unmittelbar nach dem Spritzen zu entwickeln. Das führte dazu, dass Mischungen für den bewehrten Spritzbetonbau anfänglich mit hohen Microsilikaanteilen verwendet wurden. Als Düsenführer mehr Erfahrungen mit dem Einspritzen von Bewehrungsstählen sammelten, konnte die Industrie auf kostengünstigere Mischungen mit geringerem und sogar ohne Microsilikaanteil übergehen.

Derzeit übliche Mischungen erreichen nominell 28-Tage-Druckfestigkeiten von 35 MPa bis zu 60 MPa. Die gebräuchlichsten Mischungen am unteren Ende des Normfestigkeitsbereiches enthalten etwa 400 bis 420 kg/m³ Portlandzement und um die 60 kg/m³ Flugasche. Der Wasser/Bindemittel-Wert solcher Mischungen liegt um 0,45. Hier hat die Bauchemie nur geringe Verdienstmöglichkeiten, da abgesehen von Luftporenbildnern (für 6 bis 9 % Luftporengehalt) lediglich ein geringfügiger Zusatz von konventionellen Verflüssigern gebraucht wird. Allerdings setzen die Mischwerke im Sommer Erstarrungsverzögerer zu, um die Mischungen etwa 1,5 Stunden spritzfähig zu halten. Im Winter, oder wenn erstarrungsverzögernde Dichtungsmittel beigegeben werden, benötigen die Mischungen oft einen geringfügigen Zusatz eines Erstarrungsbeschleunigers, um zu verhindern, dass frisch eingebauter Spritzbeton absackt. Mischungen mit nominell 50 bis 60 MPa 28-Tage-Druckfestigkeit haben einen Microsilikagehalt von ca. 8 % im Bindemittel. Mittels Fließmittel wird der Wasser/Bindemittel-Wert auf ca. 0,35 abgesenkt.

Gegenwärtig experimentieren Mischwerke mit Konsistenzreglern. Sie sollen die Konsistenz des angelieferten Frischbetons für etwa eine Stunde konstant halten. Das ist jedoch ein zweiseitiges Schwert. Einerseits ist eine konstante Konsistenz hilfreich beim Pumpen und Einbau. Andererseits wünscht sich der Düsenführer, dass der Beton nach dem Einbau möglichst schnell ansteift und standfest wird. Schließlich sei noch anzufügen, dass für das Spritzen von Kellerwänden in wasserführendem Baugrund dem Spritzbeton mitunter Dichtungsmittel beigegeben werden. Da solche Zusatzmittel Betonkonsistenz, Luftporengehalt und Erstarrungsverhalten beeinflussen, muss die Betonrezeptur angepasst werden.

Als Gesteinskörnungen kommen gewöhnlich örtliche Natursande und –kiese zum Einsatz. Brechsande und –kiese sind jedoch ebenfalls anzutreffen. Theoretisch verwenden die örtlichen Mischwerke Körnungen, die der Gruppe 2 nach ASTM C1436 [8] entsprechen sollten (Größtkorn 9,5 bis 12,5 mm erlaubt). Mitunter finden sich aber auch Gesteins-

körnungen bis 14 mm Größtkorn in Spritzbetonmischungen wieder. Diese lassen sich zwar wegen der hohen kinetischen Energie des Größtkorns gut verdichten, verursachen aber mitunter gefährlichen Rückprall, wenn ein Großkorn ungünstig auf einen Bewehrungsstahl trifft. Pumpenfahrer würden zwar Körnungen deutlich unter 10 mm bevorzugen, aber Düsenführer haben die Erfahrung machen müssen, dass solche feinkörnigen Mischungen schwieriger zu verdichten sind und mitunter in der Endfestigkeit und Dauerhaftigkeit enttäuschen. Weiterhin neigen solche Mischungen zu vermehrtem Schwinden.

Mischungen mit sehr geringen Wasser/Bindemittel-Werten oder Microsilikazusatz können aus brandschutztechnischen Gründen bedenklich sein. Solche Mischungen neigen im Brandfall zu explosiven Abplatzungen, wie vor allem Untersuchungen in Europa gezeigt haben [9]. Die örtliche Spritzbetonindustrie in Vancouver beginnt, solche Erfahrungen bei der Mischungserstellung zu beachten. So enthielt eine Grundmischung für tragende Wände beim Bau eines örtlichen Nahverkehrsprojektes Polypropylenfasern zur Erhöhung des Brandwiderstandes. Die Faserbeigabe hatte den nützlichen Nebeneffekt, dass die Mischung trotz relativ weicher Konsistenz eine gute Standfestigkeit aufwies.

2.5 Einbau

Gegenwärtig wird Spritzbeton vorwiegend in tragenden Wänden eingebaut, die nur schwer beidseitig eingeschalt werden können. Daneben ist Spritzbeton dort beliebt, wo möglichst schnell gebaut werden soll. Im Prinzip sind die folgenden Arbeitsschritte erforderlich:

- Einbau der Abdichtungsmatten und -folien, falls gegen die Baugrubenauskleidung eingebaut wird.
- Aufbau einer einseitigen Schalung, falls das Element frei steht.
- Installieren des Bewehrungskorbes (oft mehrlagig, typisch sind Stäbe mit Durchmesser von 15 bis 25 mm, 150 bis 300 mm Stababstand, 10 bis 15 mm starke Bügelbewehrung).
- Installation von Dichtbändern in geplanten Fugen, falls notwendig.
- Markieren der geplanten Sollerflächen, meist mittels straff gespanntem Stahldraht.
- Reinigung existierender Grenzflächen.
- Falls erforderlich, manuelles Einbringen von Dichtmörtel auf Anschlussfugen.
- Einspritzen der Bewehrung bis ca. 3 cm unter Sollmaß der Wandoberfläche. Düsenwinkel ca. 30° bis 45° gegen die Horizontale geneigt, so dass die horizontale Arbeitsfuge während des Spritzens in Richtung Düsenführer geneigt ist („*bench gunning*“ – siehe Bild 3). Oft wird Spritzbeton in ca. 0,5 bis 0,8 m hohen Streifen auf 10 bis 30 m Länge eingebracht.

Nachdem der Beton etwas angesteift ist, wird er um weitere 0,5 bis 0,8 m erhöht. Der Einbauvolumenstrom ist durchschnittlich 5 bis 8 m³/h, je nach Schwierigkeitsgrad.

Bei sehr dichter Bewehrung werden die Streifen flacher gehalten und mittels Innenrüttler nachverdichtet. Dabei werden Rüttelflaschen mit geringen Durchmessern (5 cm Durchmesser oder weniger, je nach Bewehrungsdichte) und geringer Leistung nahe der Rückwand in den Spritzbeton eingeführt, um ihn für wenige Sekunden nachzuverdichten (siehe Bild 4). Ein leichtes Absacken des eingebauten Spritzbetons wird dabei in Kauf genommen.



Bild 3a/3b: „Bench Gunning“ (Bild: Metro Testing Laboratories Ltd.)



Bild 4: Nachverdichten mittels Innenrüttler (Bild: Metro Testing Laboratories Ltd.)

- Bei sehr dichter Bewehrung wird zuerst die Düse durch die dem Düsenführer zugewandte Bewehrungsmatte geführt, um die hintere Matte einzuspritzen. Das geschieht, während die Luftzuführung weit aufgeregelt ist und auch die Pumpleistung kurzfristig auf schätzungsweise 15 bis 20 m³/h hochgefahren wird. Infolge der hohen Förderleistung kann die Düse nur wenige Sekunden in einer Position verharren, dann muss sie der Düsenführer in die nächste Position zwischen benachbarten Bewehrungsstäben einfädeln. Zusätzlich muss der Düsenführer die Düse in jeder Position mindestens einmal schwenken, da er ja von jeder Position aus im Prinzip einen Horizontalstab und zwei Vertikalstäbe einspritzen muss. Diese Schwenkbewegung folgt ungefähr einer u-förmigen Bahn. Bei größerem Stababstand wird diese Bewegung mehrmals ausgeführt. Infolge der großen Düsenführungskräfte ist diese Arbeit sehr ermüdend. Hier kann schnell zwischen guten Düsenführern und dem Rest unterschieden werden. Nachdem die hintere Matte eingespritzt ist, wird die vordere Matte ummantelt. Das geschieht meist mit vergrößertem Düsenabstand und, falls der Düsenführer ermüdet ist, mit reduzierter Betonförderleistung.
- Aufbringen der Oberflächenschicht (ca. 3 – 5 cm dick).

- Zurückschneiden der Oberfläche auf das Sollmaß.
- Oberflächenbehandlung (Glätten, Konturen von Fugen schneiden).
- Entfernen des losen Spritzbetons von den Wandabschlüssen (insbesondere obere Horizontalfuge).
- Entfernen von Rückprall, Verschnitt und anderen Materialverlusten (gewöhnlich ca. 10 % des angelieferten Betons).
- Falls notwendig, Aufbringen eines Verdunstungsschutzes.
- Reinigen der überstehenden Bewehrungsstäbe und anderen Oberflächen von niedergeschlagenem Spritzstaub mittels Druckluft.

2.6 Güteüberwachung

Die Güteüberwachung und –prüfung wird gewöhnlich von unabhängigen Prüflaboratorien durchgeführt. Die Arbeit der Prüflabore beginnt mit der Sichtung von Bauplänen und Ausschreibungsunterlagen. Dabei richtet sich das Augenmerk auf die Ausführbarkeit von Bewehrungsdetails, Normenkonformität der Betonmischung, Qualifikation der Düsenführer und Planung der notwendigen Güteprüfungen. In vielen Fällen schließt sich ein Erstversuch (siehe Bild 5) an, bei dem der Düsenführer nachweisen muss, dass er im Zusammenwirken mit seiner Mannschaft, dem Gerät und der Mischung das schwierigste Bewehrungsdetail erfolgreich einspritzen kann. Nachdem der Spritzbeton des Erstversuches ausreichend erhärtet ist, entnimmt das Prüflabor Bohrkerne, um die Spritzbetonverdichtung zu bewerten.

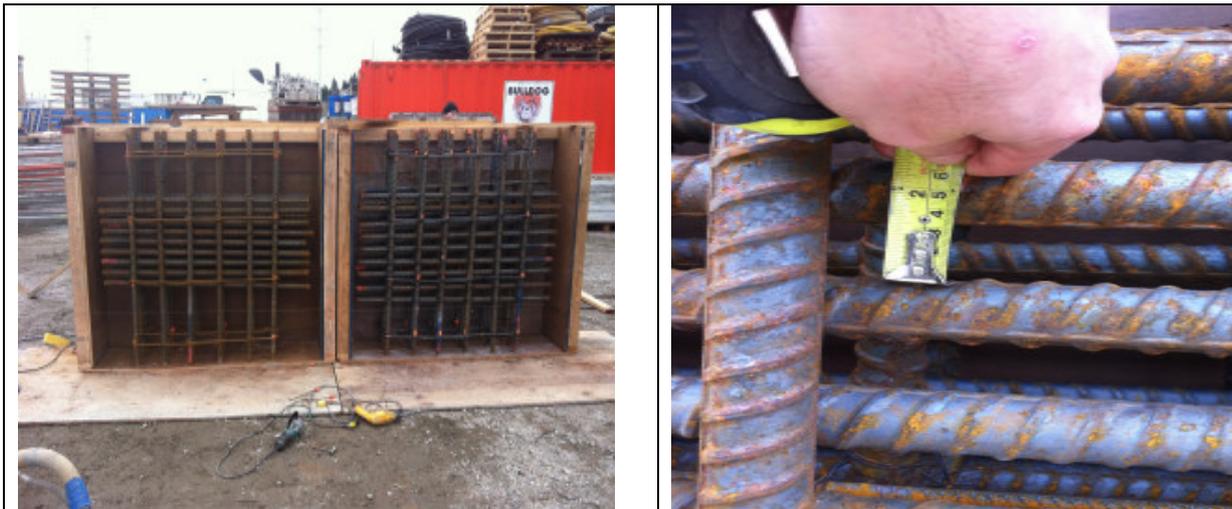


Bild 5a/5b: Bewehrungsmuster für Erstversuch (Bild: Metro Testing Laboratories Ltd.)

Während der Bauausführung stark bewehrter Bauteile stellt das Prüflabor einen Techniker oder Ingenieur, der den Einbau und die Verdichtung des Spritzbetons überwacht. Falls notwendig, greift dieser Inspektor in den Bauablauf ein, um Fehler sofort zu korrigieren. Wo Zweifel an der Spritzbetonqualität nicht sofort ausgeräumt werden können, ordnet der Inspektor weitere Prüfungen an.

Angelieferter Beton wird gewöhnlich einmal täglich auf Luftporengehalt, Temperatur und Konsistenz (Slump) geprüft. Spritzbetone werden meist mit 5 bis 8 % Luftporengehalt angeliefert. Dieser Wert reduziert sich normalerweise auf 3 bis 6 % nach dem Spritzen. Die Transportbetonwerke bemühen sich, Frischbetontemperaturen im Bereich von 15°C bis 25°C zu halten. An heißen Sommertagen werden bis zu 30°C toleriert. Beton mit höheren Temperaturen wird zurückgewiesen. Im Winter wiederum wird, wenn nötig, angewärmtes

Wasser verwendet, um Mischungen mit etwa 20°C anliefern zu können. Zusätzlich geben die Mischwerke mitunter geringe Mengen an Erstarrungsbeschleunigern zu. Diese Beschleuniger basieren auf Kalziumnitrit, Kalziumnitrat oder auch Natriumthiocyanat und sind so dosiert, dass der Frischbeton zwar für etwa zwei Stunden verarbeitbar bleibt, danach aber deutlich ansteift und innerhalb von drei bis fünf Stunden erstarrt. Typische Spritzbetonmischungen haben Setzmaße („Slumps“) um die 50 bis 60 mm. Bei geringer Bewehrung kann der Frischbeton auch etwas steifer sein. Material mit Setzmaßen („Slumps“) über 70 mm findet mitunter eine Nische in schwer bewehrten Bauteilen, in denen der Spritzbeton zusätzlich mit Innenrüttlern verdichtet werden muss. (Anmerkung: dem Autor ist keine allgemein gültige Korrelation zwischen Slump und Ausbreitmaß bekannt. Karden [10] hat Daten publiziert, nach denen Slumps von ca. 30, 50 und 80 mm ungefähr mit Ausbreitmaßen von jeweils ca. 360, 400 und 450 mm korrelieren).

Zur Güteüberwachung des erhärteten Betons werden vorrangig Probekisten gespritzt. Obwohl ASTM C1140 [11] eine bestimmte Plattengeometrie (Minimum 610 x 610 x 89 mm) vorgibt, werden oft auch kleinere Probekisten (ca. 40 x 40 x 10 cm) akzeptiert. Nach ein bis zwei Tagen Aushärtezeit auf der Baustelle entnimmt das Prüflabor Bohrkerne (gewöhnlich mit ca. 7 cm Durchmesser und etwa 10 cm Länge) zur Bestimmung der 7- und 28-Tage-Druckfestigkeit. Im Falle von Unregelmäßigkeiten werden zusätzlich Bohrkerne aus dem Bauwerk entnommen. Das unterliegt jedoch häufig Einschränkungen, da Bewehrung und Wasserabdichtung (wo vorhanden) geschützt werden müssen.

In Einzelfällen fordert der Statiker, dass das Prüflabor den Zeitpunkt bestimmt, zu dem der eingebaute Spritzbeton eine bestimmte Mindestdruckfestigkeit (z.B.: 2 MPa) erreicht. Solche Fälle treten auf, wenn tragende Wände von Untergeschossen gleichzeitig das dahinterliegende Erdreich stützen müssen. Da Bohrkernentnahmen aus jungen Betonen mit sehr geringer Festigkeit nicht möglich ist, verwenden Prüflabore indirekte Messmethoden, insbesondere die vom Bolzensetzgerät DX-450 der Firma Hilti abgeleiteten Verfahren.

Zu Vergleichsmessungen ziehen Prüflabore mitunter Rückprallhammermessungen heran. Solche Messungen sind nur bedingt nützlich. Wände werden im Laufe einer Arbeitsschicht gewöhnlich zuerst zu 80 bis 90 % ihrer Solldicke gespritzt und erst am Ende des Tages zur vollen Dicke gebracht. Das bedeutet, dass insbesondere bei Kelleraußenwänden nur ein Bruchteil der im Laufe einer Schicht angelieferten Betonladungen überhaupt an zugänglichen Oberflächen zu finden ist. Falls geformte Rückseiten von Wänden nicht zugänglich sind, eignen sich Rückprallhammermessungen daher nicht, um die Festigkeit des erhärteten Spritzbetons aller Mischungen zu vergleichen.

Wenn an der Verdichtung des Spritzbetons und der korrekten Einbettung des Bewehrungsstahles gezweifelt wird, dann stehen dem Prüflabor neben der visuellen Inspektion akustische Methoden wie Ultraschallprüfung und Puls-Echo-Verfahren zur Verfügung. Gebräuchliche Geräte zur Ultraschallprüfung arbeiten im 50-kHz-Bereich und finden Auffälligkeiten bis zu etwa 0,5 m Tiefe. Puls-Echo-Verfahren sprechen auch auf kleinere Fehlstellen an. Ihre Eindringtiefe ist jedoch oft auf etwa 0,3 m beschränkt

3. Ungelöste Probleme

Trotz jahrelanger Erfahrungen mit Spritzbeton im Hochbau bleibt eine Vielzahl von Problemen ungelöst. Dazu zählt:

- Die statische Berechnung von stark bewehrten Spritzbetonbauteilen folgt vollständig den Richtlinien des konventionellen Betonbaus. Einflüsse von Spritzschatten, beispielsweise auf die Verankerungslänge von Bewehrungsstäben, werden kaum

beachtet. Es wird inoffiziell diskutiert, ob beispielsweise die rechnerische Verankerungslänge linear im Verhältnis zur Oberfläche von Fehlstellen vergrößert werden soll. Demnach sollte die Verankerungslänge beispielsweise um 10 % erhöht werden, falls 10 % der Staboberfläche ungenügend in Spritzbeton eingebettet ist. Jedoch sind solche Empfehlungen bisher nicht bindend. In dem Zusammenhang soll hier auf einen guten Ansatz hingewiesen werden, den Fischer und Hoffmann auf dieser Spritzbeton-Tagung vorstellen [12].

- Pumpen und Einspritzen von Bewehrung erfordert eine ausreichend weiche Betonkonsistenz. Um den Beton nach dem Spritzen möglichst schnell gegen Absacken zu schützen, sollte er nach dem Einbau allerdings schnell ansteifen. Das führt dazu, dass Betonmischungen ohne Konsistenzregler angeliefert werden. Um dem graduellen Ansteifen des Betons im Mischfahrzeug gegenzusteuern, wird daher der Restmischung im Fahrzeug während der Entladezeit ein- oder mehrmals eine geringe Menge Wasser beigemischt. Festigkeitsprüfungen zeigen, dass sich das auf die Druckfestigkeit auswirkt, aber hinnehmbar sein kann, wenn die Mischung ausreichende Festigkeitsreserven besitzt. Grundsätzlich ist ein solcher Wasserzusatz jedoch nicht erlaubt, was zu Zielkonflikten führt.
- Düsenführer arbeiten oft aus Positionen, bei denen der obere Wandabschluss (Horizontalfuge) über Augenhöhe liegt. Dort wird der Spritzbeton rechtwinklig zur Wandoberfläche aufgetragen, was zu schlechter Verdichtung führt.
- Das Nachbehandeln von Spritzbeton wird oft vernachlässigt. In einzelnen Fällen, insbesondere bei Instandsetzungsmaßnahmen, wird der Spritzbeton mit Wasser mehrere Tage lang nachbehandelt. In typischen Neubauprojekten findet jedoch keinerlei Nachbehandlung statt.
- Bohrkerne aus Prüfkisten werden im Labor im Kalkwasserbad oder Feuchtraum gelagert. Der auf der Baustelle eingebaute Spritzbeton erfährt oft keine Nachbehandlung mit Wasser. Anhand der Bohrkerne wird daher das Druckfestigkeitspotential des angelieferten Spritzbetons ermittelt, nicht aber seine tatsächliche in-situ Druckfestigkeit.
- Spritzbeton in Bauteilen mit sehr dichter Stahlbewehrung erschließt sich nicht der routinemäßigen zerstörungsfreien Prüfung. Fehlstellen wie Spritzschatten sind kaum ohne zerstörende Verfahren zu finden.
- Die Düsenführerausbildung ist im Wesentlichen den Spritzbetonunternehmen überlassen. Die Qualifikation gemäß *ACI nozzleman certification* [13] ist nicht ausreichend, um sachgerechtes Einspritzen von stark bewehrten Bauteilen zu garantieren. Häufige und wiederholte Erstversuche und Eignungsprüfungen für spezifische Bauprojekte sind daher die Regel, verursachen aber auch hohe Kosten.
- Beim Errichten von geschosshohen Wänden arbeiten Düsenführer zeitweise auf Arbeitsbühnen, die nur etwa 0,5 m breit sind und keinen Handlauf haben. Bei starken Schwankungen des Spritzbetonvolumenstromes riskiert der Düsenführer einen Sturz von der Arbeitsbühne.
- Der Arbeitsschutz schreibt vor, dass Mannschaften, die dem Spritzstaub ausgesetzt sind, geeigneten Atemschutz tragen. Oft sieht man jedoch, dass Nebengewerke ohne Atemschutz arbeiten, selbst wenn sie der Spritzstaub erfasst.

4. Zusammenfassung

Die Bauindustrie an der Westküste Kanadas kann auf jahrzehntelange Erfahrung mit Nassspritzbeton zurückgreifen. In den 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts bildete sich in Vancouver dank hohem Kostendruck und Bautempo ein geeigneter Nährboden für die sich entwickelnde Spritzbetontechnologie im Hochbau. Düsenführer erlernten das Ein-

spritzen von dichter Bewehrung, Statiker sammelten Erfahrungen mit der Konstruktion von spritzbaren Bewehrungsdetails, Eisenflechter mussten neue Regeln beim Stahleinbau beachten, Transportbetonwerke entwickelten kostengünstige Grundmischungen mit hinreichender Verarbeitbarkeit, und Prüfeinrichtungen nahmen sich der Einbauüberwachung an. Dennoch warten noch genügend Probleme auf ihre Lösung. Sie schließen das präzise Einhalten der Mischungskonsistenz, die Stabilität des frisch eingebauten Betons, die Materialverluste durch Rückprall und abschließende Oberflächenglättung, die Nachbehandlung zur Vermeidung von Schwindrissen und den Arbeits- und Gesundheitsschutz ein.

5. Literatur

- [1] City of Vancouver:
Building By-law 2007. City of Vancouver, Canada.
- [2] British Columbia:
Building Code 2012. Province of British Columbia, Canada.
- [3] National Building Code of Canada. 2010, National Research Council.
- [4] CSA A23.1/2-14:
Concrete materials and methods of concrete construction / Test methods and standard practices for concrete. Canadian Standards Association.
- [5] CSA A23.3-14
Design of concrete structures. Canadian Standards Association.
- [6] ACI 506-05
Guide to Shotcrete. American Concrete Institute.
- [7] British Columbia Ministry of Transportation and Infrastructure:
2012 Standard Specifications for Highway Construction Section 209.
- [8] ASTM C1436-13:
Standard Specification for Materials for Shotcrete. ASTM International.
- [9] Kusterle, W.; Lindlbauer, W.; Zeiml, M.; Muchsel, H.:
Fire Resistance of Concrete Tunnel Linings – Conclusions from Large-Scale Tests. Proceedings ConMat 05, Vancouver, 22-14 August 2005.
- [10] Karden, A.:
Untersuchung und Bewertung des Systems Verifi zur Online-Produktionskontrolle von Transportbeton im Fahrmischer. 1. Phase, TU Darmstadt, 2011.
- [11] ASTM C1140-11:
Standard Practice for Preparing and Testing Specimens from Shotcrete Panels. ASTM International.
- [12] Fischer, M.; Hofmann, M.:
Reinforced Shotcrete with Bar Diameters up to 32 mm. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Proceedings, Spritzbeton-Tagung 2015, Alpbach, 29.-30. Januar 2015.
- [13] ACI CP-60(09):
Shotcrete Nozzelman Certification. American Concrete Institute, 2009.

Zum Autor

Dipl.-Ing. Roland Heere

Studium des Bauingenieurwesens an der TH Leipzig, dann Masters of Applied Science an der University of British Columbia – Vancouver, seit 2002 Ingenieur bei Metro Testing Laboratories Ltd., Burnaby, British Columbia, Canada.

rheere@metrotesting.ca