
ERTÜCHTIGUNG VON MAUERWERKSBAUTEN MIT SPRITZBETON

SHOTCRETE FOR THE UPGRADE OF MASONRY STRUCTURES

Roland **Heere**, Metro Testing Laboratories Burnaby, Vancouver, Canada

Dieser Artikel bietet eine Übersicht über Erfahrungen mit Spritzbeton bei der Ertüchtigung von historischen Mauerwerksbauten in Vancouver, Kanada. Mauerwerksbauten aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts sind nicht darauf ausgelegt, einem realistisch zu erwartenden Erdbeben standzuhalten. Bewehrte Spritzbetonstützen und -wände werden daher sowohl in ein- als auch mehrgeschossigen Wohn-, Geschäfts- und Schulgebäuden zur Erdbebenertüchtigung eingebaut.

The paper presents the state-of-the-art in the seismic upgrade of historical masonry buildings using shotcrete, in Vancouver, Canada. Residential, commercial and school buildings erected in the early 1900's are not capable to resist seismic events expected to occur in the future. In order to strengthen such buildings, additional structural components like reinforced shotcrete walls or reinforced shotcrete columns are incorporated into the original structure. Shotcrete upgrades have been used for single- and multi-storey buildings.

1. Einleitung

Vancouver liegt an der Westküste Kanadas in einer seismisch aktiven Zone. Die Stadt wurde 1886 formal gegründet und brannte noch im selben Jahr ab. In den Folgejahren wurden nicht nur Holzgebäude, sondern auch Mauerwerksbauten und Gebäude mit Ziegelverblendung errichtet, auch um das Brandrisiko zu vermindern. Eine Vielzahl von Gebäuden, die häufig älter als etwa 80 Jahre sind, werden inzwischen als historisch betrachtet, was Eingriffe in ihre Architektur erschwert. Oft werden daher Kompromisse ausgehandelt, nach denen Mauerwerksfassaden erhalten werden, während der Rest des Gebäudes zeitgemäß umgerüstet und statisch aufgewertet wird. Insbesondere bei höheren Mauerwerksbauten, die 4 bis 6 Obergeschosse erreichen, ist die Erdbebenertüchtigung sehr aufwändig. Neben einer wesentlichen Vergrößerung der Fundamente fordert die Statik neue, massive Stahlbetonwände, welche die angenommenen Erdbebenlasten vollständig ableiten können. Im Zuge der Ertüchtigung von denkmalgeschützten Bauwerken kann durch zusätzliche Untergeschosse Nutzraum oder Parkfläche gewonnen werden. In solchen Fällen müssen die Fundamente nicht nur vergrößert, sondern auch tiefergelegt werden.

2. Typische Projekte

Zu den ertüchtigten Gebäuden in Vancouver zählen Wohn- und Geschäftsgebäude, Hotels, Schulen und Universitätsbauten. Neben reinen Ziegelmauerwerksbauten befinden sich darunter auch Stahlbetonrahmenkonstruktionen mit Mauerausfachungen und Stahlbeton-Naturstein-Verbundbauwerke. Die folgenden Bilder (Bild 1 bis 4) zeigen willkürlich ausgewählte Bauten, die in den vergangenen zwei Jahrzehnten ertüchtigt wurden. [1, 2, 3]



Bild 1: Iona Building, University of British Columbia. Stahlbeton-Granitmauerwerksmischbauweise. Quelle: LRutt



Bild 2: Woodward's, Obergeschosse nach dem Spritzbetoneinbau



Bild 3: Ridgeway School, North Vancouver, nach dem Entkernen



Bild 4: Queen Mary Elementary School, Vancouver

Quelle: <http://go.vsb.bc.ca/schools/queenmary/Pages/photo-gallery.aspx>

3. Arbeitsschritte

3.1 Planung und Genehmigung

In sehr grober Näherung wird der Statiker damit konfrontiert, dass ein ertüchtigtes Gebäude ca. 50 % seines Eigengewichtes als Horizontalkraft sicher ableiten muss [6, 7]. Das erfordert eine großzügige Verstärkung alter Bausubstanz, die ursprünglich oft ohne Berücksichtigung

von Erdbebenlasten konstruiert wurde. Neu zu errichtenden Wände, Stützen und gelegentlich Träger und Platten werden gewöhnlich so ausgelegt, dass sie alle Eigen- und Gebrauchslasten des Gebäudes aufnehmen können. Das hat zur Folge, dass oftmals massive Fundamentvergrößerungen notwendig werden. Zusätzlich werden stark bewehrte Stahlbetonwände benötigt, die in Spritzbetonbauweise ausgeführt werden. Dadurch kann Schalung eingespart werden. Weiterhin wird das existierende Mauerwerk während der Bauphase weniger beansprucht, als wenn es als Schalttafel beim Einbau von gegossenem Beton dienen würde. Die Querkräfte infolge des hydrostatischen Drucks, den der Frischbeton während der Verdichtung auf die Schalung ausübt, können beim Betonspritzen vermieden werden. Die Kraft, die der aufprallende Spritzbeton auf eine Wand (oder Schalttafel) ausübt, ist erfahrungsgemäß so gering, dass selbst Mauerwerk mit weniger festem Mörtel nicht geschädigt wird. Man bedenke, dass die Aufprallkraft äquivalent der Schubkraft ist, die an der von Hand gehaltenen Düse auftritt.

Im Zuge der Planung muss der Zustand des Bestandsmauerwerkes quantifiziert werden. Das geschieht durch Mauerwerksprüfungen, die die folgenden Schritte umfassen können:

- Visuelle Begutachtung
- Bestimmung der Schubfestigkeit des Mörtels durch Schubversuche im Bauteil (Bild 5)
- Abschätzen der Mörteldruckfestigkeit, beispielsweise durch Eindringversuche mit dem Bolzensetzgerät DX-450 (Bild 6) [9]
- Entnahme von Mauersteinen und deren Druckfestigkeitsprüfung im Labor
- Einbau von Probeankern und Auszugsversuche.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß die Bestimmung der Druckfestigkeit von Mauerwerksmörtel mit dem DX-450-Gerät erfolversprechend ist. Solange die Bolzen parallel zu den Mauersteinkanten in den Mörtel geschossen werden und die Fugenbreite deutlich größer als der Bolzendurchmesser ist, sind die Prüfergebnisse plausibel und korrelieren annäherungsweise mit den Werten der Schubversuche oder mit der Druckfestigkeit von Mörtelwürfeln (wo solche hergestellt werden konnten).



Bild 5: Bestimmung der Schubfestigkeit von Mauerwerk



Bild 6: Abschätzen der Mörtelfestigkeit mit dem DX-450 Bolzensetzgerät

3.2 Abstützen, Teilabriss oder Entkernen

Während der Ertüchtigung eines Gebäudes können zwischenzeitlich Bauwerksteile gegenüber ihrem Originalzustand weiter geschwächt werden. Im Extremfall, bei der Entkernung, werden mehrgeschossige Fassaden zeitweilig vollständig von allen anderen Tragwerksteilen, mit Ausnahme ihrer Fundamente, getrennt. Im derartigen Zustand sind die

Fassaden einsturzgefährdet. Schwere Stahlskelette, meist an der Außenseite der Fassade angebracht, sorgen für hinreichende Stabilität während des Bauzustandes. Solche Abstützungen sind jedoch nicht für seltene Lastfälle, wie Erdbebenzustände, ausgelegt. Anschlüsse zwischen den Stahlskeletten und dem Mauerwerk müssen so konstruiert werden, dass sie den Spritzbetoneinbau nicht über Gebühr behindern. In komplizierten Fällen müssen Anschlüsse jeweils auf der Ebene demontiert sein, auf der gerade Spritzbeton eingebaut wird.



Bild 7: Beispiel einer Fassade nach dem Entkernen. Innenansicht. Stützskelett größtenteils verdeckt auf der abgewandten Seite, aber Anschlüsse sichtbar als horizontale Gerüstelemente. Quelle: ITC

3.3 Oberflächenvorbehandlung, Verankerung

Um einen guten Verbund zwischen Mauerwerk und Spritzbeton zu erzielen, ist neben einer angemessenen Oberflächenvorbereitung die Installation von Klebeankern notwendig. Typische Klebeanker bestehen aus Edelstahlstäben (ca. 5 mm Durchmesser) oder Bewehrungsstählen mit 10 bis 15 mm Durchmesser, die eine 90° Biegung haben. Edelstahlanker werden bei Ziegelmauerwerksbauten bevorzugt, da anderenfalls der im Mauerwerk eingebettete Teil nicht durch die Passivierung des Betons vor Korrosion geschützt werden kann. Die Verankerungslänge im Mauerwerk wird so groß wie möglich gewählt. Allerdings sollten die Bohrlöcher mindestens 7 cm Abstand von der Außenseite der Wand einhalten, um keine Absprengungen in der Ziegeloberfläche zu verursachen. Der Rasterabstand zwischen Ankern beträgt oft um die 0,6 m vertikal und horizontal.

Bevor Anker eingeklebt werden, müssen die Bohrlöcher ausgeblasen, oder besser noch, ausgewaschen und ausgeblasen werden. Nachdem alles stehendes Wasser beseitigt ist, wird Epoxidharz in die Bohrlöcher injiziert, in den die Anker eingefügt werden. Ankerabstände sind gewöhnlich 0,25 m bis 1 m vertikal und horizontal.

Derartige Mauerwerksanker sind hoch belastbar. Oft führen Prüflabore im Rahmen der Qualitätssicherung Auszugversuche durch. Je nach Anzahl und Planlast der Anker werden ca. 1 bis 10% der Anker geprüft. Bei vorzeitigem Versagen der Anker erhöht sich automatisch die Anzahl der Prüfungen. Typisch sind Ausschreibungen, die festlegen, dass bei Versagen eines einzelnen Ankers alle benachbarten Anker geprüft werden müssen. Falls ein weiterer Anker vorzeitig versagt, vervielfacht sich die Anzahl der zu prüfenden Anker. Im Zweifelsfalle werden dann sogar sämtliche installierten Anker geprüft. Die Lastprüfungen sind im Regelfall Auszugsversuche, bei denen die Reaktionskraft des Prüfgerätes nahe dem Anker in das Mauerwerk zurückgeleitet wird. Lastversuche mit Lastverteilungsbrücken, die Spannweiten von mindestens dem Dreifachen der Verankerungslänge haben, sind eher selten. Derartige Lastversuche würden nicht nur den Auszugswiderstand der Anker prüfen, sondern auch den Widerstand des Mauerwerkes gegen Punktbelastung quer zur Wandebene. Typische Prüflasten in Auszugsprüfungen liegen zwischen 1 bis 2 kN für Edelstahl-Mauerwerksanker und 5 bis 20 kN für Anker aus Bewehrungsstahl, welche in Altbeton oder Betonsteinmauerwerk eingesetzt sind. Nur vereinzelt werden Auszugsversuche bis zum Versagen des Ankers, Klebers oder Mauerwerks durchgeführt; nämlich meist nur dann, wenn der Statiker seine Lastannahmen vor Baubeginn verifizieren möchte.

Soweit möglich verzichtet der Statiker nicht komplett auf den direkten Verbund zwischen Spritzbeton und Mauerwerk oder Originalbeton. Deren Oberflächen werden daher mit Hochdruckwasserstrahlen von Verschmutzung und loseem Material befreit. Mauerwerk erfordert Wasserdrücke von ca. 100 bis 200 bar, während Betonoberflächen mit über 300 bar Wasserdruck behandelt werden. Derartig behandelt können Zugspannungen von über 0,2 MPa zwischen Ziegelmauerwerk und Spritzbeton, sowie mehr als 0,9 MPa zwischen Altbeton und Spritzbeton erreicht werden. Ziegelmauerwerk muss jedoch unmittelbar vor dem Spritzbetoneinbau ausreichend vorgehästet werden. Anderenfalls diffundiert Anmachwasser in die porösen Ziegel und der Spritzbeton nahe der Grenzfläche zum Mauerwerk „verbrennt“. Das hat geringen oder komplett fehlenden Verbund zur Folge.

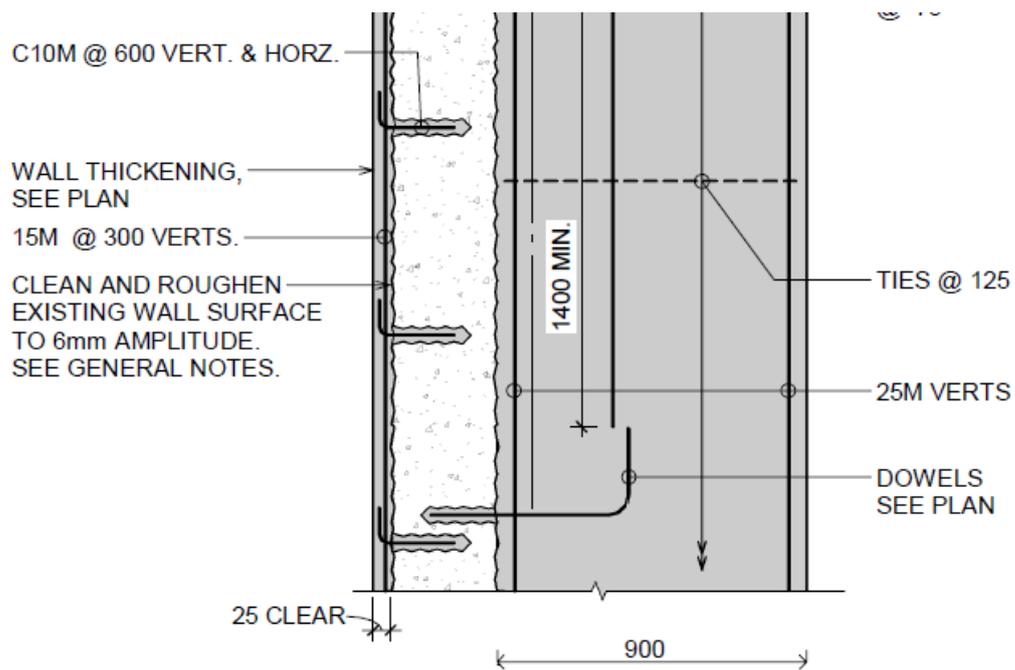


Bild 8: Anker- und Bewehrungsdetail. Quelle: Read Jones Christoffersen



Bild 9: Anker installiert in historische Beton- und Natursteinwand. Quelle: LRutt



Bild 10: Installierte Bewehrung. Quelle: LRutt



*Bild 11: Ortbeton- und Natursteinwand nach dem Spritzbetoneinbau auf der Innenseite.
Quelle: LRutt*

Mit bewehrtem Spritzbeton werden jedoch nicht nur Mauerwerkswände direkt verstärkt. Bewehrter Spritzbeton wird auch eingesetzt, um komplett neue Wände und Stützen innerhalb des Altbaus zu errichten. Diese nehmen dann Vertikal- und Horizontalkräfte aus Deckenplatten und Trägern auf. Ihre Bewehrung kann bei Bedarf mehrlagig und mit schweren Stäben (bis ca. 30 mm Durchmesser) ausgeführt werden.



Bild 12: Detail einer schweren Bewehrung

Im günstigen Fall können Spritzbetonwände geschosshoch eingebaut und mittels Bewehrungsstäben (meist mit 10 bis 20 mm Nenndurchmesser), die die Deckenplatten des Bestandsbauwerkes penetrieren, miteinander verbunden werden. Falls Geometrie oder Materialgüte der ursprünglichen Deckenplatten unzulänglich sind, werden Schlitze parallel zur Altbauwand gestemmt, durch die der bewehrte Spritzbeton über mehrere Geschosse ohne Unterbrechung eingebaut werden kann.

3.4 Spritzbetonmischung

Die zur Ertüchtigung von Mauerwerksbauten eingesetzten Spritzbetone unterscheiden sich nicht von den Spritzbetonen, die lokal im Hochbau verwendet werden [4, 10]. Charakteristische Mischungen haben etwa 40 MPa 28-Tage-Druckfestigkeit und werden mit GU-Zement („general use“) hergestellt. Das Bindemittel enthält oft Anteile an gemahlenem Kalkstein, Flugasche und Hochofenschlacke, die insgesamt jedoch 15% der Gesamtmasse des Binders nicht überschreiten. Neben gängigen Zusatzmitteln wie Betonverflüssigern, Luftporenbildnern und Erstarrungsverzögerern enthalten Mischungen bei Bedarf Zusätze, die die Schwindneigung reduzieren oder das Mischgut thixotrop einstellen. Typisch ist ebenfalls, dass die Mischungen mit relativ steifer, aber noch pumpbarer Konsistenz angeliefert werden (ca. 5 bis 8 cm Setzmaß, entspricht etwa 35 cm Ausbreitmaß [8]) und an der Düse keinerlei Beschleuniger zugegeben wird. Lediglich während der kalten Jahreszeit sorgen niedrig dosierte Zusätze von Beschleunigern im Bereitstellungsgemisch für vertretbare Erstarrungszeiten (ca. 3 bis 6 Stunden). Auf diese Weise ist der Spritzbeton sofort nach dem Einbau

formstabil, seine Oberfläche kann aber mit Handwerkzeugen geformt und geglättet werden. Spritzbetonmischungen, insbesondere wenn sie über mehrere Geschosse und durch Schlauchleitungen gepumpt werden, erfordern hohe hydraulische Pumpdrücke, die zwischen 100 und 200 bar liegen. Das entspricht Betondrücken von schätzungsweise ungefähr 50 bar am Ausgang der Pumpe. Typische Fördermengen liegen bei etwa 5 bis 10 m³/h, sind aber bei filigranen Bauteilen deutlich niedriger.

3.5 Geräte und Einbringen der Mischung

Die Spritzbetonausrüstung für Mauerwerkertüchtigung unterscheidet sich nicht von den Geräten, die beim Neubau zum Einsatz kommen. Im Wesentlichen benutzt eine Spritzbetonfachfirma die folgende Ausrüstung:

- Betonpumpe mit mindestens 20 m³/h nominaler Förderleistung, Dieselantrieb
- Bis zu ca. 100 m Gummischlauchleitungen; bei längeren Förderwegen Ergänzung durch Stahlrohre
- Kompressor (200 L/s oder mehr, 10 bar, Antrieb mit Dieselmotor)
- Handgehaltene Spritzdüse.



Bild 13: Typische Spritzbetonpumpe, Beschickung vom Mischfahrzeug



Bild 14: Fundamentvergrößerung mit Spritzbeton



*Bild 15: Spritzen einer neuen Querwand
Quelle: LRutt*

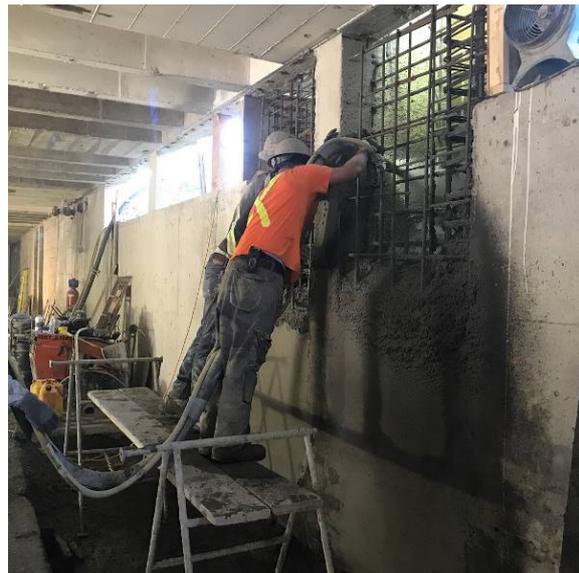


Bild 16: Einspritzen der neuen Bewehrung zwischen den Stützen des Altbestandes

3.6 Oberflächennachbehandlung

In einem ersten Arbeitsgang spritzt der Düsenführer das Bauteil bis auf ca. 7 cm unter der Solldicke. Bei dichter Stahlbewehrung muss die eingebaute Mischung wiederholt und in Lagen durch Innenrüttler nachverdichtet werden. Nachdem der Spritzbeton hinreichend angesteift ist, wird eine zweite Lage bis zur Solldicke aufgetragen. Sobald auch die zweite Lage standfest geworden ist, ziehen Fachkräfte die Oberfläche auf das genaue Sollmaß ab. Je nach Bedarf wird die Oberfläche dann mit Reibebrettern und Stahlwerkzeugen weiter geglättet. Zur selben Zeit werden vertikale Fugen eingearbeitet, welche die Positionen der Schwindrisse vorbestimmen. Deren Regelabstand beträgt 10 m, was nicht immer ausreicht, den Spritzbeton zwischen diesen Fugen rissfrei zu halten. Theoretisch müsste die Oberfläche dann für ca. 3 bis 7 Tage mit Wasser nachbehandelt werden. Das findet jedoch oft nur bei sehr heißem Wetter oder für sehr anspruchsvolle Auftraggeber statt. Mitunter wird ein Verdunstungsschutz aufgesprüht, der jedoch oft mit dem Risiko einhergeht, den Verbund zwischen absichtlich oder auch versehentlich behandelten Oberflächen mit später aufgetragenem Spritzbeton oder mit anderen Beschichtungen zu stören.



*Bild 17: Glätten der Spritzbetonoberfläche
Quelle: LRutt*



*Bild 18: Verbund zwischen neuer
Spritzbetonschale und Altbestand aus Ziegel
und Granitmauerwerk*

3.7 Güteüberwachung

Im Zuge der Güteüberwachung wird auch der Spritzbeton geprüft. Im Wesentlichen führt das Prüflabor folgende spritzbetonspezifische Aufgaben aus:

- Theoretische Bewertung der vom Mischwerk vorgeschlagenen Spritzbetonmischung auf Kompatibilität mit den Bauplänen
- Überwachung des Einbaues von Klebeankern; gegebenenfalls Zugprüfungen an den Klebeankern
- Prüfung der Oberflächenvorbehandlung von Bestandsmauerwerk und Originalbeton. Gegebenenfalls Haftzugversuche mit Stahlprobepplatten
- Frischbetonprüfung am Bereitstellungsgemisch
- Überwachen des Spritzbetoneinbaus
- Bohrkernentnahme von Platten aus Prüfkisten
- Druckfestigkeitsprüfungen [5] und gegebenenfalls Dauerhaftigkeitsprüfungen (z.B. ASTM C642 Determination of Boiled Absorption and Volume of Permeable Voids) an Bohrkernen
- Im Zweifelsfall Verifizierung des Verbundes zwischen Alt- und Neubauteil.

- Überprüfen, dass der Düsenführer ein gültiges Zertifikat des ACI (American Concrete Institute) als Düsenführer besitzt und, falls erforderlich, einen baustellenspezifischen Vorversuch erfolgreich durchgeführt hat.

4. Alternativen

Der Vollständigkeit halber sei hier noch kurz auf gängige Alternativen zur Bauwerksertüchtigung mit Spritzbeton hingewiesen. Diese sind im Wesentlichen:

- Traditioneller Ortbeton, verbunden durch Klebeanker mit dem Originalbauwerk
- Stahlausfachungen, verbunden durch Klebeanker mit dem Originalbauwerk
- Aufgeklebte Kohle- oder Glasfaserverbundmatten oder –platten, unter Umständen zusätzlich durch Stahl- oder Faseranker gesichert.

Mit Ortbeton wird vorwiegend dort gearbeitet, wo zweiseitige Schalungen bequem aufgebaut und verankert werden können, und wo deckenhoher Betoneinbau problemlos möglich ist. Stahlausfachungen hingegen sind dort von Vorteil, wo unter beengten Bedingungen gebaut werden muss und daher vorgefertigte Bauteile den Arbeitsaufwand vor Ort minimieren. Faserverbundwerkstoffe werden ausgewählt, wenn nur minimale Veränderungen der Bauteildicken toleriert werden und wo nur geringe oder keine zusätzlichen Druckkräfte abgeleitet werden müssen.

5. Schlussfolgerungen

Die Ertüchtigung von Mauerwerksbauten mit Spritzbeton ist eine häufig angewendete, relativ bequeme und verlässliche Technologie. Sie ermöglicht relativ kurze Bauzeiten. Qualifizierte Mannschaften, geeignete Technik und passende Baumaterialien sind hinlänglich verfügbar. Die Ertüchtigung mittels Spritzbeton ist robust, und ihre Qualität kann mit moderatem Aufwand verifiziert werden. Im Vergleich zu den Alternativen ist die Ertüchtigung mit Spritzbeton ein günstiger Kompromiss, der häufig und gern dort gewählt wird, wo das Originalbauwerk ohnehin in großem Maße umgebaut wird.

6. Literatur

- [1] Rutt, L.: Loren Rutt, Gespräch, Surrey, 2017.
- [2] Schoenfeld, G.: Glade Schoenfeld, RJC, Gespräch, Vancouver, 2017.
- [3] Tomei, P.: Paul Tomei, BPA, Gespräch, Vancouver, 2017.
- [4] CSA A23.1-14
Concrete materials and methods of concrete construction. CSA Group, Canada.
- [5] CSA A23.2-14
Test methods and standard practices for concrete. CSA Group, Canada.
- [6] CSA A23.3-14
Design of concrete structures. CSA Group, Canada.
- [7] CSA S304-14
Design of masonry structures. CSA Group, Canada.
- [8] Bonzel, J., Krell, J.: Konsistenzprüfung von Frischbeton. <https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Veroeffentlichungeninfachzeitschriften/PDF/24648.pdf>.
- [9] Kusterle, W.: Spritzbeton-Frühfestigkeitsmessungen – Festlegung, Bestimmung, Interpretation. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Tagung 2015, Alpbach 29.+30.1. 2015, Eigenverlag 2015.

[10] Heere, R.:

Spritzbeton im Hochbau – Erfahrungen in Vancouver, In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Tagung 2015, Alpbach 29.+30.1. 2015, Eigenverlag 2015.

Zum Autor

Dipl.-Ing. Roland Heere, M.A.Sc.

Studium des Bauingenieurwesens an der TH Leipzig, anschließend Master of Applied Science an der University of British Columbia – Vancouver, seit 2002 Senior Ingenieur bei Metro Testing Laboratories Burnaby, British Columbia, Canada, a Division of CCMET Inc.

rheere@metrotesting.ca