

---

# BRANDSCHÄDEN AN SPRITZBETON

---

## ***FIRE DAMAGED STRUCTURAL SHOTCRETE***

Roland **Heere**, Metro Testing & Engineering Ltd., Burnaby, Kanada  
Wolfgang **Kusterle**, OTH Regensburg, Regensburg, Deutschland  
Luke **Bisby**, University of Edinburgh, Großbritannien

Da in zunehmendem Maße Spritzbeton auch im Hochbau verwendet wird, muss zwangsläufig auch mit Feuerschäden an solchen Spritzbetonen gerechnet werden. Deren Untersuchung und Reparatur ähneln denen von Ortbeton. Jedoch unterscheiden sich Spritzbetonmischungen von typischen Ortbetonen in der Sieblinie und zum Teil im Poren- und Bindemittelgehalt. Dieser Beitrag summiert wichtige Elemente der Untersuchung und Reparatur von Feuerschäden an Beton im Allgemeinen. Dem folgt als Fallbeispiel die Untersuchung und Reparatur einer feuergeschädigten Spritzbetonwand in einem Wohngebäude in Vancouver, Kanada.

*The increasing use of structural shotcrete in residential and commercial buildings increases the probability of fire damage to structural shotcrete. Therefore, more investigations and repairs of fire damaged shotcrete will be required in the future. Such investigations and repairs are similar to those for cast-in-place concrete. However, aggregate gradations and some binder properties of shotcrete mixtures differ from cast-in-place concrete. This paper summarises important elements of investigating and repairing fire damaged concrete in general. In addition, the paper presents a case study involving a structural shotcrete wall in Vancouver, Canada.*

### **1. Einleitung**

Untersuchungen von Brandschäden an Betonbauten gehören vielleicht nicht zum täglichen Broterwerb vieler bautechnischer Labore und Betontechnologie-Lehrstühle. Traurigerweise mussten sich die Autoren jedoch wiederholt mit Brandschäden befassen, die mitunter einschneidende Konsequenzen für die Geschädigten hatten. Literatur und Fallbeispiele vermitteln inzwischen umfangreiches Wissen zu den Abhängigkeiten zwischen Branddauer, Temperaturen, Betonmischungen, Bewehrung, Feuerschäden, Schadensdiagnosen und geeigneten Reparaturen. Jedoch beziehen sich Literatur und Fallbeispiele vorwiegend auf Ortbeton und Fertigteile. Erfahrungen mit feuergeschädigtem Spritzbeton im Hochbau sind hingegen eher mager. Mit dem vielseitigen und häufigen Gebrauch von Spritzbeton für Bauteile und ganze Bauwerke, erhöht sich jedoch zwangsläufig die statistische Wahrscheinlichkeit von Brandschäden an diesem Werkstoff. Die einschlägige Literatur vermittelt Erfahrungen aus einigen spektakulären Tunnelbränden [1] und dem Versuchsstollen Hagerbach [2]. Hingegen liegen den Autoren kaum Berichte zu Bränden vor, die Spritzbeton in Wohn- oder Geschäftsgebäuden beschädigt haben. Daher soll dieser Beitrag zu Brandschäden an Beton auch ein Fallbeispiel für Spritzbeton liefern.

### **2. Betonschäden durch Feuer**

Feuer schädigt Beton vorwiegend durch Hitzeeinwirkung und nur selten (wie bei Bränden von PVC) durch aggressive Stoffe in den Rauchgasen. Spritzbeton, wie auch Ort- und Fertigteilbeton, besteht im Wesentlichen aus inerten Gesteinskörnungen, die durch

Zementstein miteinander verbunden sind. Ausgangsstoffe wie Kies, Sand, Bindemittel, Zusatzmittel und eventuell Fasern für Ort- und Spritzbeton sind vergleichbar, wenn auch nicht immer identisch. Spritzbeton unterscheidet sich von anderen Betonen vorwiegend durch die Sieblinien der Gesteinskörnungen, hohe Anteile produktoptimierte Bindemittel und Zusatzmittel, und natürlich durch den Einbauprozess. Daher ist nicht zu erwarten, dass sich Spritzbeton im Brandfall fundamental anders verhält als Ortbeton oder Betonfertigteile. Die folgende Tabelle beschreibt allgemeine Zusammenhänge zwischen Betontemperatur und Schadensbild, die jedoch nicht universelle Gültigkeit haben und genaugenommen auch von der Einwirkdauer und damit von der Erwärmungsgeschwindigkeit abhängen. Ein Teil der Schäden, speziell durch Abplatzungen, kann durch die Zugabe von Polypropylenfasern zum Beton oder Spritzbeton vermieden werden. Feinste Polypropylenfasern in Dosierungen zwischen 1,5 und 3 kg/m<sup>3</sup> helfen mit den bei Erhitzung entstehende Dampfdruck abzubauen.

Tab. 1: Zusammenhang zwischen Temperatur und Schaden (Beton, allgemein) [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 20]

Temperatur	Beton	Bewehrungsstahl
<b>&lt; 200°C</b>	<p>Vorwiegend reversibles Austrocknen.</p> <p>Geringfügige Erhöhung von Festigkeit und E-Modul möglich.</p> <p>Ca.160°C - Polypropylenfasern (falls vorhanden) schmelzen.</p> <p>Abbau von Ettringit und Calciumaluminathydrat, Dehydrierung C-S-H</p>	<p>Schlaffer Bewehrungsstahl: Einfluss vernachlässigbar. Reversibel.</p> <p>Spannstahl: je nach Typ geringfügige Festigkeitsverluste möglich.</p>
<b>200 – 400°C</b>	<p>Starkes Austrocknen.</p> <p>Erste permanente Veränderungen an einigen Zuschlagstoffen und Hydraten des Zementsteines (Zerstörung C-S-H Phasen).</p> <p>Lokale Rissbildung an der Grenzfläche zwischen Korn und Zementstein.</p> <p>Deutliche, aber vorübergehende Erhöhung der Festigkeit im warmen Zustand. Nach dem Abkühlen jedoch geringfügiger permanenter Festigkeitsverlust verglichen mit der ursprünglichen Festigkeit.</p> <p>Ultraschallgeschwindigkeit kann messbar absinken.</p> <p>250 - 270°C - Sattedampfdruck übersteigt typische Zugfestigkeit von Beton (ca. 4 - 5 MPa). Abplatzungen möglich, vor allem falls Beton &gt;2% Feuchtigkeit enthält und dichten Zementstein besitzt (insbesondere mit w/b&lt;0.35, und Microsilica).</p> <p>&gt;300°C - Bildung von feinen Haarrissen an der Oberfläche.</p>	<p>Schlaffer Bewehrungsstahl: je nach Typ bis 30% Festigkeitsverluste möglich. Reversibel.</p> <p>Spannstahl: je nach Typ zum Teil bis zu 50% Festigkeitsverluste möglich.</p> <p>Gelbes Eisenhydroxyd wandelt sich in rotes Eisenoxyd um.</p>

Tab. 1: Fortsetzung

Temperatur	Beton	Bewehrungsstahl
<b>400 – 600°C</b>	<p>Extremes Austrocknen.</p> <p>Teilweise irreversible Veränderungen an Silikaten und Klinkerhydraten. Calciumhydroxydkristalle beginnen sich zu zersetzen.</p> <p>10 – 50% Festigkeitsverlust, besonders bei Betonen mit silikatischen Zuschlagstoffen.</p> <p>Ultraschallgeschwindigkeit kann um bis zu 40% absinken.</p> <p>Zementstein verfärbt sich in Richtung rosa.</p> <p>Deutliche Rissbildung, vor allem innerhalb des Zementsteines. Abplatzungen möglich.</p> <p>&gt;500°C - Zementstein erscheint beige-gelblich unter gekreuzten Polfiltern.</p> <p>&gt;550°C – stark erhöhtes Kriechen.</p> <p>573°C – Quarzprung. 0,8% Volumenzunahme. Phasenumwandlung in silikatischen Zuschlagstoffen, verbunden mit deutlicher Ausdehnung.</p>	<p>Schlaffer Bewehrungsstahl: je nach Typ deutliche Festigkeitsverluste. Teilweise reversibel.</p> <p>Spannstahl: je nach Typ erheblicher bis nahezu vollständiger Festigkeitsverlust.</p> <p>Geringfügiges Aufkohlen in Gegenwart von CO möglich.</p> <p>500°C - Haftverbund zwischen Stahl und Beton um ca. 50% reduziert.</p>
<b>600 - 800°C</b>	<p>Calciumhydroxyd zerfällt. Weiterer Zerfall der CSH-Phase.</p> <p>20 – 70% Festigkeitsverlust. Beton wird statisch nahezu unwirksam.</p> <p>Ultraschallgeschwindigkeit sinkt um 40 – 70%.</p> <p>Beton verfärbt sich weißlich.</p> <p>Zementstein beginnt zu zerbröseln.</p> <p>Tiefe Rissbildung. Abplatzungen.</p> <p>&gt;700°C - zunehmende Zersetzung nun auch von karbonatischen Zuschlagstoffen.</p>	<p>Deutliches Erweichen. Bewehrung wird statisch unwirksam.</p> <p>Geringfügiges Aufkohlen in Gegenwart von CO.</p> <p>700°C - Haftverbund zwischen Stahl und Beton um ca. 75% reduziert.</p> <p>&gt;720°C – Umkristallisierung.</p>
<b>&gt; 800°C</b>	<p>Zementstein verliert chemisch gebundenes Wasser vollständig.</p> <p>Calciumkarbonat zerfällt.</p> <p>Netto-Festigkeitsverluste &gt;50%, bis zur völligen Gefügezerstörung.</p> <p>Großvolumige Abplatzungen.</p>	<p>Bewehrungsstahl statisch unwirksam.</p> <p>Grobkornbildung.</p> <p>Aufkohlen in Gegenwart von CO.</p>
<b>&gt;1100°C</b>	Zementstein beginnt zu schmelzen.	

Tab. 1: Fortsetzung 2

Temperatur	Beton	Bewehrungsstahl
Rapides Abkühlen (Abschrecken)	Zusätzlich zu Hitzeschäden: starke Rissbildung und Abplatzungen. Rasches Abkühlen führt zu deutlichen und bleibenden Festigkeitsverlusten.	Abschreckung, kann zur Erhärtung und Versprödung führen.
Langsames Abkühlen	Feine Haarrisse. Festigkeitsverlust gegenüber dem warmen Zustand, aber weniger ausgeprägt als nach rapidem Abkühlen.	Kaum Schäden.

Feuerschäden können folgende Ursachen haben:

- 1) Risse und Abplatzungen infolge globaler temperaturbedingter Zwängung.
- 2) Ablösungen und Abplatzungen infolge interner Spannungen durch Temperaturdifferenzen.
- 3) Abplatzungen infolge rapider Verdampfung von Porenwasser, falls es nicht durch Poren im Zementstein entweichen kann.
- 4) Zerstörung des Verbundes zwischen Zuschlagkorn und Zementstein durch thermische Spannungen.
- 5) Zerstörung des Zementsteines durch chemische Umwandlung der Klinkerhydrate (zuerst Calciumhydroxyd, bei höheren Temperaturen dann auch andere Klinkerhydrate).
- 6) Ausdehnung von Zuschlagstoffen durch Phasenumwandlung, z.B.: Quarzprung.
- 7) Chemische Zersetzung von Zuschlagstoffen, z.B. Entsäuerung von kalkhaltigen Gesteinskörnungen, dem sogenannten Kalkbrennen.
- 8) Indirekte Schäden, beispielsweise durch Aufprall anderer Bauteile oder rapide Abkühlung.

### 3. Indirekte Hinweise auf tatsächlich erreichte Temperaturen

Um die tatsächlich erreichten Temperaturen während eines Feuers im Nachhinein zu schätzen, können aus dem Zustand verschiedener an der Brandstelle befindlicher Materialien Rückschlüsse gezogen werden. Schmelz- und Entzündungstemperaturen sowie andere thermische Kennwerte vieler Materialien finden sich in der einschlägigen Literatur [7, 13].

### 4. Feststellen der tatsächlichen Schädigung

In der Folge eines Brandschadens müssen Eigentümer und Ingenieure entscheiden, ob das geschädigte Bauwerk oder Bauteil lediglich kosmetisch wiederhergestellt, repariert, oder sogar ersetzt werden muss. Voraussetzung für eine solche Entscheidung ist, zu verstehen, wieweit das Bauteil oder Bauwerk geschädigt und geschwächt ist. Dabei gilt das Augenmerk nicht nur dem Festigkeitsverlust, sondern auch der möglichen Verringerung der Dauerhaftigkeit. Für die Untersuchung stehen unter anderem die folgenden Methoden zur Verfügung (siehe auch [21]):

#### 4.1 Sichtprüfung

Hier wird die Betonoberfläche nach Anzeichen von Hitzeschäden, wie Risse, Abplatzungen oder Verfärbungen begutachtet. Sichtprüfungen müssen gegebenenfalls nach dem Reinigen der Oberfläche wiederholt werden, da Rußablagerungen feine Risse verdecken können.

#### 4.2 Abklopfen

Oberflächen im Brandbereich und Referenzflächen werden mit einem Hammer abgeklopft. Der Prüfer kann aus dem Klang der Klopfgeräusche Rückschlüsse auf Betonschädigung an der Oberfläche und dem Vorhandensein von Ablösungen ziehen. Stark verrußte Oberflächen

müssen gegebenenfalls vor dem Abklopfen gereinigt werden, da eine dicke, weiche Rußschicht die Klangfarbe beim Abklopfen verändern kann.

#### 4.3 Rückprallhammerprüfung

Rückprallhammerprüfungen [18] sollten nach dem Reinigen der Oberfläche durchgeführt werden. Betonoberflächen, die stark hitzegeschädigt sind, werden in der Regel niedrigere Rückprallwerte erzielen als schadfreie Referenzflächen. Jedoch kann moderate Wärme- einwirkung zum Austrocknen und Nachhärten, und in Verbindung mit CO<sub>2</sub> zu Karbonatisierung führen, in deren Konsequenz die Rückprallwerte steigen könnten.

#### 4.4 Ultraschallprüfung

Bei der Ultraschallprüfung [19] wird im einfachsten Fall ein Betonbauteil mit Kompressionswellen direkt durchschallt. Aus Signallaufzeit und Weglänge berechnet man die Schallgeschwindigkeit. Typische Geräte für Beton arbeiten im Bereich von ca. 50 kHz und erlauben Pfadlängen von mehreren Metern. Stark hitzegeschädigter Beton wird gegenüber Referenzbeton allgemein eine niedrigere Schallgeschwindigkeit aufweisen. Direktes Durchschallen mag jedoch in solchen Fällen, in denen dicke Bauelemente nur kurzzeitig überhitzt wurden, unbrauchbare Ergebnisse liefern, da nur ein geringer Teil des Signalpfades durch oberflächennahen und damit potentiell geschädigten Beton führt. Indirekte Messungen, bei denen Sender und Empfänger parallel auf derselben Oberfläche angeordnet werden, sind ebenfalls möglich. Solche Messungen werden etwas stärker von oberflächennahem Beton beeinflusst.

Detailliertere Ultraschallprüfungen werden mit Geräten durchgeführt, die eine Vielzahl von Sensoren haben. Solche Geräte senden Schallpulse in den Probekörper, empfangen die gestreuten und reflektierten Signale mittels rasterförmig angeordneter Empfänger und analysieren die empfangenen Signale hinsichtlich Amplitude, Frequenzspektrum und Laufzeit. Damit können Fehlstellen, im günstigen Falle aber auch örtliche Veränderungen der Betongüte, infolge von Variationen in der Materialdichte und dem dynamischen E-Modul, gefunden werden.

#### 4.5 SonReb-Verfahren (Kombination von Rückprallhammerprüfung und Ultraschallprüfung, [14])

Mit diesem Verfahren werden Betondruckfestigkeiten geschätzt. Aus Rückprallwerten und der Geschwindigkeit von Ultraschall-Kompressionswellen wird mittels einer Eichkurve die wahrscheinliche Druckfestigkeit berechnet. Da die Rückprallhammermessungen maßgeblich durch den oberflächennahen Beton beeinflusst werden, das Ultraschallsignal jedoch bei direkter Durchschallung des Bauteiles die gesamte Dicke des Bauteiles erfasst, ist die SonReb-Methode zweckdienlicher als die beiden einzelnen Testverfahren allein. Falls Rückprallhammermessungen mit indirekter (einseitiger) Ultraschallprüfung verbunden werden, beeinflusst oberflächennaher Beton das Gesamtergebnis stärker als im vorhergehenden Fall.

#### 4.6 Bohrkernentnahme und -prüfung

Zum Standardrepertoire einer Brandschadensanalyse gehört die Entnahme und Prüfung von Bohrkernen. Bohrkerndurchmesser sollten mindestens das Dreifache, und besser das Fünffache des Größtkorndurchmessers betragen. Bohrkernentnahmen werden auf sichtbare Risse, Verfärbung und andere Anzeichen von Hitzeschäden begutachtet. Solche „andere“ Anzeichen sind beispielsweise der Zustand von eingeschlossenen Hüllrohren, veränderte Kratzfestigkeit, oder auffällig hohe Karbonatisierungstiefen.

Nach der visuellen Begutachtung folgt gewöhnlich die Bestimmung der Dichte und der Druckfestigkeit [15]. Weitere Tests, wie zum Beispiel die Prüfung der Wasseraufnahmefähigkeit, oder der Zugfestigkeit in verschiedenen tiefen Ebenen parallel zur ursprünglichen Oberfläche erscheinen auf den ersten Blick verführerisch. Messwerte streuen jedoch oft so stark, dass derartige Prüfungen nur dann sinnvoll sind, wenn eine große Anzahl an Prüfkörpern aus der geschädigten Zone mit einer ähnlich großen Anzahl Prüfkörper aus unbeschädigtem Beton verglichen werden können. Unter „großer Anzahl“ sollte man ca. 10 Probekörper oder mehr je Population verstehen.

#### 4.7 In-situ Haftzugprüfungen [16]

Feuerschäden reduzieren die Zugfestigkeit von Beton. Um die Einflusstiefe von Feuerschäden zu schätzen, können Haftzugprüfungen in verschiedenen Tiefen durchgeführt werden. Dazu werden mit einem Schleifgerät Prüfoberflächen so vorbereitet, dass beispielsweise der Beton in 2 mm, 5 mm, 10 mm und 25 mm Tiefe freigelegt wird. Auf die freigelegten Flächen werden Prüfstempel aufgeklebt. Nach dem Aushärten des Klebers wird der ein 25 mm tiefer Ringspalt um den Prüfstempel gebohrt. Dem folgt die eigentliche Haftzugprüfung. Im Idealfall kann man aus den Haftzugprüfungen ableiten, wie tief der Beton nennenswert geschädigt ist, insbesondere wenn man Vergleichsmessungen in unbeschädigten Bereichen durchführen kann. Leider unterliegen auch die Haftzugprüfungen großen Streuungen, so dass eine Vielzahl von Messungen notwendig ist, um sinnvolle Ergebnisse zu erhalten.

#### 4.8 Petrographische Analyse

Mittels petrographischer Analyse von Bohrkernen kann die Tiefe der Hitzeschäden ermittelt werden. Da derartige Untersuchungen im Zusammenhang mit dem unten angeführten Fallbeispiel nicht durchgeführt wurden, soll auf dieses Verfahren hier jedoch nicht näher eingegangen werden.

#### 4.9 Zug- und Biegeversuche an Bewehrungsstahl [17]

Gegebenenfalls werden die Untersuchungen mit Zug- und Biegeversuchen an Bewehrungsstahl abgerundet. Die Autoren haben jedoch keine Fälle untersucht, bei denen schlaffer Bewehrungsstahl durch Aufkohlung oder Abschrecken deutliche Duktilitätsminderungen erlitten hat. Spannstahl muss hingegen sorgfältig untersucht werden, falls es einen begründeten Verdacht auf Überhitzung gibt. In jedem Fall muss der Stahl die Mindestanforderungen der einschlägigen Normen, beispielsweise CSA G30.18, vollständig erfüllen. Anderenfalls ist der Einbau zusätzliche Bewehrung, oder ein Auswechseln der Bewehrung notwendig.

## 5. Reparatur

Nachdem die Schadensuntersuchung geklärt hat, welche Bauteile in welchem Umfang geschädigt sind, kann die Instandsetzung geplant werden. Generell stehen drei Strategien zur Auswahl:

- Kosmetische Instandsetzung, z.B. Oberflächenreinigung oder Neuanstrich.
- Entfernen und Ersetzen von feuergeschädigten Betonschichten.
- Entfernen und Ersetzen von kompletten Bauteilen oder Bauwerken.

Kosmetische Verbesserungen beginnen normalerweise mit dem Reinigen der Betonoberfläche, beispielsweise durch Hochdruck-Wasserstrahlen oder durch Abwaschen mit Wasser und Reinigungsmitteln. Gesäuberte und getrocknete Oberflächen können anschließend versiegelt werden, um den Brandgeruch einzudämmen. Bei Bedarf runden Oberflächenanstriche die kosmetische Instandsetzung ab.

Bei tiefergehenden Hitzeschäden kann eine Betonreparatur notwendig werden. Wesentliche Elemente sind:

- Mechanisches Entfernen von Ablösungen.
- Vollständiges Freilegen von Bewehrungsstahl an den Stellen, an denen bereits >20% seiner Oberfläche freiliegt. Abstand des freigelegten Bewehrungsstahles zum Beton sollte dann mindestens 2 cm betragen.
- Entfernen von geschädigtem Beton, vorzugsweise durch Hochdruckwasserstrahlen (>1000 bar), um eine feste und raue Oberfläche zu schaffen.
- Reinigen und gegebenenfalls Ergänzen der Stahlbewehrung.
- Einbau zusätzlicher Anker, falls statisch notwendig für einen quasi-monolithischen Verbund.
- Abschließende Oberflächenreinigung. Wassersättigung des Altbetons.
- Spritzbetonauftrag:
  - Installation von Konturlehren wo notwendig.
  - Auswahl einer geeigneten Spritzbetonmischung. Die Mischung muss die für das Bauteil vorgeschriebene Festigkeit und Dauerhaftigkeit erreichen. Das Verfahren muss der Auftragsmenge und Baustellenlogistik angepasst sein.
  - Manueller Spritzbetonauftrag. In Vancouver meist Standard-Nassspritzbetonpumpe (Maximale Pumpleistung 40 m<sup>3</sup>/h, effektiv 5-10 m<sup>3</sup>/h Auftragsrate), meist 50 mm Düsendurchmesser, aber bei kleineren Reparaturen auch 38 mm. Schichtdicke mindestens 3 cm bei 10 mm Größtkorn. Nur selten dünnere Schichten, dann aber mit Spritzmörtel (5 mm Größtkorn).
  - Oberfläche glätten.
- Nachbehandlung, falls erforderlich.

Im Extremfall muss ein feuergeschädigtes Bauteil oder Bauwerk abgerissen und ersetzt werden. Das ist jedoch nicht Gegenstand dieses Beitrages.

## 6. Fallbeispiel

Im Frühjahr 2020 beschädigte ein Feuer die Tiefgarage eines Wohnhochhauses in Vancouver, Kanada. Der Rohbau des Hauses stand kurz vor der Fertigstellung. Das Feuer wurde vorwiegend von bituminösen Abdichtungsbahnen genährt, die in großer Anzahl in der Garage zwischengelagert waren. Weitere Baumaterialien, Baugeräte und gefüllte Propangasflaschen trugen zur Brandlast bei. Dem Feuer direkt ausgesetzt waren Ortbetonbauteile wie die Betonplatte des obersten Garagengeschosses, die darüber liegende Deckenplatte des zu begrünenden Innenhofes, sowie mehrere Stützen und massive Unterzüge. Ebenfalls direkt den Flammen ausgesetzt war eine Spritzbetoninnenwand, die Gegenstand der weiteren Betrachtungen ist. Nach mündlicher Information von der Baustelle benötigte die Feuerwehr Infolge starker Sichteinschränkungen und unvorhersehbarer Explosionen von Gasflaschen über 5 Stunden, um den Brand zu löschen. Die betroffenen Betonbauteile waren für einen Brandwiderstand von 2 Stunden ausgelegt.

Die Spritzbetonwand ist 20 cm stark und aus bewehrtem Nassspritzbeton hergestellt. Nach Baustellenangaben hatte der Spritzbeton eine Nennfestigkeit von 40 MPa und enthielt keine Kunststofffasern. Die Wand war während des Feuers einseitig und auf einer Länge von etwa 40 m hohen Temperaturen ausgesetzt. Die feuerzugewandte Seite hatte auf ca. 20 m Länge tiefe Abplatzungen [Bild 1], die die Bewehrungsmatte zum Teil vollständig freilegte. Auf weiteren ca. 20 m gab es örtliche Abplatzungen und Ablösungen [Bild 2], die mitunter den Bewehrungsstahl teilweise freilegten. Die restlichen ca. 30 m der Wand waren lediglich verrußt. Auf der feuerabgewandten Seite der Wand fanden sich ausgeprägte Rissbilder (Bild 3). Diese Risse waren deutlicher ausgeprägt als die Risse in den aus Ortbeton hergestellten

Stützen und der Deckenplatte. Das liegt jedoch wahrscheinlich eher am geringen Bewehrungsgrad der Spritzbetonwand als an Materialunterschieden zwischen Spritzbeton und Ortbeton.



*Bild 1: Tiefe Abplatzungen und freigelegte Bewehrung (Bild: Metro)*



*Bild 2: Lokale Abplatzungen und Ablösungen (Bild: Metro)*



*Bild 3: Rissbildung auf der feuerabgewandten Seite. Ebenso sichtbar sind Bohrkernentnahmestellen rechts, und abgeschliffene Stellen für die zerstörungsfreie Prüfung links. (Bild: Metro)*



Um die Betonfestigkeit zu schätzen, verwendeten die Prüfer das SonReb Verfahren. Dazu musste die Betonoberfläche leicht abgeschliffen werden, um guten Kontakt für den Rückprallhammer und das Ultraschallprüfgerät zu schaffen. Die Ultraschallmessungen wurden im direkten Modus durchgeführt. Messwerte von 8 Messstellen streuten zwischen 26 MPa und 42 MPa scheinbarer Druckfestigkeit, mit einem Mittelwert von 37 MPa. Die Druckfestigkeit von 7 Bohrkernen (7 cm Durchmesser, ursprüngliche Länge = Wanddicke. Kerne vor der Prüfung gekürzt, um maximal zulässige Prüflänge = 2 x Durchmesser einzuhalten und um sichtbar geschädigten Beton zu entfernen. Effektive Prüflängen 10 bis 14 cm) streute zwischen 45 MPa bis 52 MPa, mit einem Mittelwert von 48 MPa. Dabei muss beachtet werden, dass die SonReb-Werte von oberflächennahem Beton beeinflusst werden. Hingegen werden die Bohrkernge kürzt, so dass geschädigter oberflächennaher Beton vor der Prüfung entfernt wird. Unter diesem Gesichtspunkt widersprechen sich die SonReb-Ergebnisse und die tatsächlichen Druckfestigkeiten der Bohrkernge nicht.

Die Prüfer führten in zwei weiteren, größeren Arealen direkte Ultraschall-Transmissionsmessungen durch. Die Signalfrequenz war 54 kHz. Jedes Areal war ungefähr 1,2 x 0,5 m groß. Die individuellen Prüfstellen waren in Rastern von ca. 10 x 10 cm angeordnet, wodurch ja Areal ungefähr 50 Messwerte gewonnen wurden. In dem Areal, das keine deutlichen Feuerschäden zeigte, variierte die über die Dicke der Wand gemittelte örtliche Ultraschallgeschwindigkeit zwischen 4499 m/s und 4821 m/s, mit einem Durchschnittswert für alle Messungen von 4620 m/s. Solche Werte sind allesamt indikativisch für eine hohe Betongüte. In dem Areal, das vom Feuerangriff deutlich gezeichnet war, lagen die über die Dicke der Wand gemittelten örtlichen Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen 2967 m/s und 4201 m/s, mit einem Durchschnittswert für alle Messungen von 4085 m/s. Etwa 1/3 der Messwerte lag unter 3700 m/s, dem hier gewählten Grenzwert für Beton mit hoher Schadenswahrscheinlichkeit. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass vor den Ultraschallprüfungen der Beton an den Kontaktstellen nur um wenige Millimeter abgeschliffen wurde, um eine glatte Oberfläche zu schaffen.

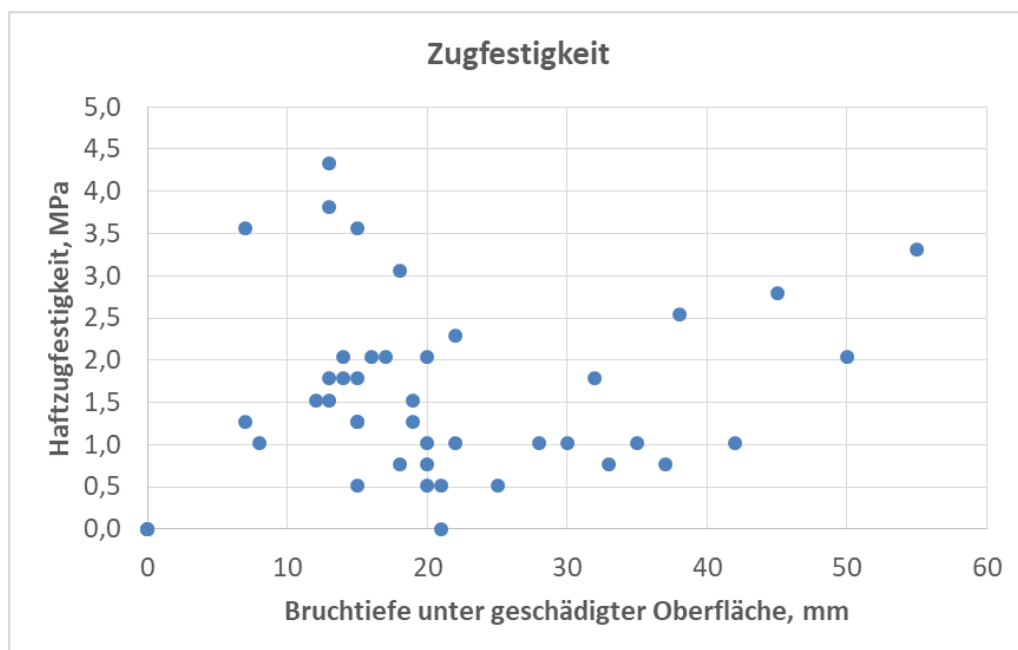


Bild 4: Haftzugfestigkeit und Bruchtiefe unterhalb der Betonoberfläche nach dem Feuer.  
(Bild: Metro)

Eine wichtige Rolle in der Bewertung der Betongüte spielte die Haftzugfestigkeit. In einer ersten Versuchsreihe wurden Haftzugfestigkeiten ermittelt, indem offensichtlich geschädigter

Oberflächenbeton abgeschliffen wurde und auf der so freigelegten Oberfläche Prüfstempel mit 5 cm Durchmesser aufgeklebt und abgezogen wurden. Bild 4 zeigt die Haftzugfestigkeit des Betons in verschiedenen Tiefen, gemessen von der nach dem Feuer vorgefundenen Oberfläche. Der Mittelwert von 44 gültigen Haftzugprüfungen ist 1,6 MPa. Infolge der weiten Streuung (Standardabweichung 1,1 MPa) ist die untere 10%-Vertrauensgrenze jedoch nur 0,2 MPa. Hingegen war die durchschnittliche Haftzugfestigkeit der 9 gültigen Prüfungen auf der feuerabgewandten Seite 3,2 MPa. Mit einer Standardabweichung von 0,9 MPa ergibt sich daraus eine untere 10%-Vertrauensgrenze von 2,0 MPa.

Zum weiteren Vergleich sei hinzugefügt, dass Haftzugprüfungen an 12 Bohrkernen im Labor eine mittlere Zugfestigkeit von 1,9 MPa ergaben. Die Standardabweichung war 0,4 MPa und die unterer 10%-Vertrauensgrenze war 1,4 MPa.

Die Haftzugprüfungen führten zu der Entscheidung, den Spritzbeton in stark feuergeschädigten Bereichen der Wand durch robotergestütztes Hochdruck-Wasserstrahlen (1500 bar) ca. 5 cm bis 7 cm tief abzutragen (Bild 5). In weniger tief geschädigten Abschnitten genügte eine Abtragtiefe von ca. 3 cm. Eine günstige Eigenschaft des Hochdruck-Wasserstrahlens war, dass es geschwächten Beton wesentlich aggressiver abtrug als festen Beton, weil geschwächter Beton dem Wasserstrahl eben weniger Widerstand leisten kann als intakter Beton. Dazu müssen jedoch Wasserdruck, Wasservolumenstrom, Düsenwinkel, Düsenabstand und Vortriebsgeschwindigkeit fachgerecht eingestellt werden. Infolgedessen konnten wir beobachten, dass in besonders geschädigten Stellen die Abtragtiefe durchaus 10 cm übersteigen konnte.

Haftzugprüfungen an den wassergestrahlten Flächen ergaben dann die folgenden Messwerte:

- Tief abgetragener Beton: durchschnittliche Haftzugfestigkeit = 1,9 MPa.
- Weniger tief abgetragener Beton: durchschnittliche Haftzugfestigkeit = 1,9 MPa.



*Bild 5: Oberfläche nach dem Wasserstrahlen. Hüllrohre für Kabelstränge wurden kaum unbeschädigt. (Bild: Metro)*

Dem Hochdruck-Wasserstrahlen folgte ein traditioneller, händischer Spritzbetonauftrag. Nach Baustelleninformationen wurde folgendes Gerät und Material verwendet:

- Spritzbetonpumpe mit ca. 40 m<sup>3</sup>/h Förderleistung
- Nassspritzbeton mit 12 mm Größtkorn, nominal 5-8% Luftporengehalt, w/b ≤ 0.45 und 40 MPa Druckfestigkeit. Zementsorte: GU („General Use“ Portlandzement). Maximal 10% Flugaschezusatz. Das Mischwerk behandelt das Mischkonzept vertraulich, daher keine genaueren Angaben möglich.

Zusätzliche Anker waren nicht notwendig. Die Oberfläche wurde vor dem Erstarren des Betons von Hand geglättet.

## 7. Zusammenfassung

Feuer verursacht eine Reihe von Schäden, die von Verunreinigungen bis zur völligen Zerstörung von Beton führen. Branddauer, Oberflächentemperaturen, aber auch Lösungsverfahren beeinflussen das Schadensbild. Falls der Brandschaden in einem Rahmen liegt, der die Instandsetzung noch erlaubt, muss das geschädigte Materialvolumen identifiziert und entfernt werden. Hochdruckwasserstrahlen ist dafür besonders gut geeignet, da es ein selbstkorrigierendes Verfahren ist: Bei geeignetem Wasserdruck und Volumenstrom wird geschwächtes Material vorrangig entfernt, während unbeschädigtes Material deutlich weniger erodiert. Nach dem Wasserstrahlen wird das geschädigte Bauteil repariert. Falls die erforderliche Schichtdicke ≥ 3 cm beträgt, ist Spritzbeton oft eine gute Wahl. An einem Fallbeispiel aus Vancouver, Kanada, wird demonstriert, dass eine richtig entworfene und errichtete Spritzbetonwand selbst nach einem schweren Feuer mittels Spritzbeton hinreichend repariert werden kann. Hinsichtlich Brandschädigung und notwendigen Reparaturverfahren unterschied sich die Spritzbetonwand nicht wesentlich von Ortbetonbauteilen. Der ursprüngliche, feuergeschädigte Spritzbeton musste zwar stellenweise tiefer als 5 cm abgetragen werden, jedoch hatte die durch Hochdruckwasserstrahlen freigelegte Oberfläche ein ausreichendes Haftpotenzial, um einen hinlänglichen Verbund mit dem Reparaturmaterial zu erlauben.

## 8. Literatur

- [1] Kusterle, W.A.:  
Sprayable fire-protective layers in traffic tunnels. In: Bernard, S. (ed) Shotcrete: Elements of a System © 2010 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-47589-1.
- [2] Wetzig, V.: Destruction Mechanisms in Concrete Material in Case of Fire and Protection Systems. Hagerbach Test Gallery Ltd. Schweiz, 2000.
- [3] Neville, A.:  
Properties of Concrete, 4th Edition, Pearson, pp. 385-391.
- [4] de Lange, G.:  
Structural Repair of Fire Damaged Concrete, Concrete International, September 1980, pp. 27-29.
- [5] Riley, M.A.:  
Assessing Fire Damaged Concrete, Concrete International, June 1991, pp. 60-63.
- [6] Lee, J. et al.:  
Properties of Concrete after High-temperature Heating and Cooling, ACI Materials Journal, July-August 2008, pp. 334-341.
- [7] Hütte:  
Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, 29. Auflage, Springer-Verlag, ISBN 3-540-19077-5.
- [8] Lublóy, É.; Balázs, G. L.:  
Temperature effects on bond between concrete and reinforcing steel. Zbornik radova Građevinskog fakulteta 30(26), January 2014, Seiten: 27-35. DOI: 10.14415/zbornikGFS26.03.

- [9] Bisby, L. et al.:  
State-of-the-Art on Fire Resistance of Concrete Structures: Structure-Fire Model Validation. University of Edinburgh, 18 June 2014.
- [10] Bailey, C.G., Khoury, G.A.:  
Performance of Concrete Structures in Fire. ISBN 978-1-904818-83-0. Published by MPA – The Concrete Centre, February 2011.
- [11] Wikipedia Stichwort "Schmelztemperaturen".
- [12] Ortner, J; Hensler; G.:  
Beurteilung von Kunststoffbränden. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 1995:
- [13] Lutz, P: et al.:  
Lehrbuch der Bauphysik. B.G.Teubner, Stuttgart, 1985:
- [14] RILEM Draft Recommendation, 43-CND. (1993):  
Combined non-destructive testing of concrete. Draft recommendation for in situ concrete strength determination by combined non-destructive methods. Materials and Structures, 26, pp.43-49.
- [15] CSA A23.2-14C:  
Obtaining and testing of drilled cores for compressive strength testing (Kanadische Norm).
- [16] CSA A23.2-6B:  
Determination of bond strength of bonded toppings and overlays and of direct tensile strength of concrete, mortar, and grout (Kanadische Norm).
- [17] CSA G30.18:  
Carbon steel bars for concrete reinforcement (Kanadische Norm).
- [18] DIN EN 13791:  
Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken und in Bauwerksteilen.
- [19] DIN EN 12504-4:  
Prüfung von Beton in Bauwerken - Teil 4: Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit.
- [20] Kusterle, W. et al.:  
Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Straßenforschung Heft 544, Wien, 2004.
- [21] Albrektsson, J. et al.: Assessment of concrete structures after fire. SP Technical Research Institute of Sweden, SP Report 2011:19, Borås.

## Zu den Autoren

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 and Engineering Ltd., Burnaby, British Columbia, Canada.

*rheere@metrotesting.ca*

Prof. Dipl.-Ing. Dr. Wolfgang Kusterle

Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Innsbruck, Mitarbeit im Ingenieurbüro (Brückenbau), Dozent an der Universität Innsbruck. Beratungstätigkeit für Spritzbeton, Baustoffe im Tunnelbau, Betoninstandsetzung, Faserbetone, Brandschutz im Tunnelbau und Betontechnologie. 2001 bis 2020 Prof. an der OTH Regensburg.

*wolfgang@kusterle.net*

Prof. Luke A. Bisby, PhD, FStructE, FIFireE, FRSE

Studium des Bauingenieurwesens und Maschinenbau an der McGill University, Kanada. Danach Masters of Science und Promotion an der Queens University, Kanada. Seit 2013 Prof. an der Universität Edinburgh, Fachbereich Statik und Brandschutz, Chartered Structural Engineer, Chair of Fire and Structures, Co-Editor-in-Chief, Fire Safety Journal, Vorstand des Institute for Infrastructure and Environment.

*Luke.Bisby@ed.ac.uk*