
Feuerwiderstand verschiedener Spritzbetone

THE RESISTANCE TO FIRE OF VARIOUS FORMS OF SPRAYED CONCRETE WITH DIFFERENT MIXTURE DESIGN

VOLKER WETZIG, FELIX AMBERG

In den vergangenen Jahren wurden im VersuchsStollen Hagerbach gemeinsam mit Industriepartnern spritzbare Betonrezepturen entwickelt und geprüft, die eine erhöhte Brandbeständigkeit aufweisen. Eine absolute Brandbeständigkeit ist nach heutigem Kenntnisstand nicht wirtschaftlich erreichbar und wird daher nicht näher betrachtet.

Ausgehend von den Schadensmechanismen, die im Brandfall zur Zerstörung der Spritzbetonstruktur führen, werden Spritzbetonsysteme vorgestellt, die einer thermischen Belastung eines Brandes einen erhöhten Widerstand entgegensetzen.

Die Beurteilung der untersuchten Systeme erfolgte aufgrund der Abplatzungen an der Oberfläche und des Temperaturverlaufes im Spritzbetonkörper in unterschiedlichen Tiefen während des Brandes. Klassische Prüfungen wie Druckfestigkeiten und Arbeitsvermögen vor und nach einer Brandbelastung haben die Untersuchungsprogramme abgerundet. Die Brandbelastungen erfolgten gemäss den RWS-Anforderungen. Darüber hinaus wurde der Zustand der Systeme nach Abschluss der Brandprüfung beurteilt.

In past years, working jointly with industrial partners, it was found possible to develop and test in the Hagerbach Test Gallery sprayed concrete mix designs that display a heightened resistance to fire. An absolute imperviousness to fire, in the state of our current knowledge, is not economically viable and so will not be further considered here.

Taking as a starting point the damaging processes that in a fire lead to the destruction of the concrete structure, sprayed concrete systems will be described which bring a heightened resistance to bear on the thermal stress of a fire.

The systems investigated were assessed on the basis of the spalling on the surface, as well as of the temperature levels at various depths within the concrete mass. The programme of investigation was rounded off with classical tests of compressive strength and toughness both before and after the exposure to thermal stress. Thermal stress was induced in accordance with RWS requirements. In addition, the state of destruction of the various systems was assessed after the conclusion of the thermal tests.

1. Einleitung

Die verheerenden Unfälle in verschiedenen Tunnelbauwerken während der letzten Jahre in Europa haben primär den Beton der Ortbetonschale bzw. die Zwischendecken geschädigt. Das Verhalten des Spritzbetons hat in diesen Fällen keine oder nur eine untergeordnete Rolle gespielt.

Jedoch haben die Unfälle zu einer Sensibilisierung im Hinblick auf Fragen der Standsicherheit und des Schutzes von Betonkonstruktionen geführt. Für den Bereich des Tunnelbaus gilt daher auch, die Frage nach der Tragfähigkeit von Spritzbeton als Auskleidung zu untersuchen.

Für den Spritzbeton können sich an dieser Stelle allenfalls vielfältige weitere Anwendungen ergeben, wenn mit dieser Technik ein nachträglicher Schutz von bestehenden Tunnelbauten, die bekanntlich in grosser Zahl ohne Brandschutzmassnahmen erstellt wurden, auf einfache und wirtschaftliche Art und Weise erreicht werden kann. Mit der gleichen Technologie kann dann auch der Schutzgrad von anderen Bauwerken, wie z. B. Parkgaragen etc., gesteigert werden.

Im folgenden werden zunächst die Einflüsse vorgestellt, die zu einer Schädigung des Betons bzw. Spritzbetons führen, um anschliessend Lösungsansätze zur Erhöhung des Feuerwiderstandes von Spritzbeton vorzustellen, die in den letzten Jahren Gegenstand von Untersuchungen im Versuchsstollen Hagerbach waren.

2. Themenabgrenzung

Mit der Fokussierung auf den Feuerwiderstand von Spritzbetonen, wird nur ein kleiner Teil aller Massnahmen, die zum Schutz eines Bauwerkes vor thermischen Schädigungen in Folge eines Brandereignisses ergriffen werden können, betrachtet. Auf alle Mörtel und vorgefertigten Produkte, die dem Brandschutz dienen, wird im Rahmen dieser Ausführungen nicht weiter eingegangen.

Zum besseren Verständnis werden zunächst die beiden Begriffe Spritzbeton und Feuerwiderstand definiert, wie sie im Rahmen dieser Ausführungen verwendet werden.

2.1 Spritzbeton

Im Sinne dieser Ausführungen werden unter dem Begriff Spritzbeton all diejenigen Stoffgemische mit hydraulischem Bindemittel sowie einem Grösstkorn

über 4 mm verstanden, die im Spritzprozess verarbeitet werden. Das Spritzverfahren, Trocken- oder Nassspritzverfahren, ist da beliebig.

Damit wird im Rahmen der folgenden Ausführungen bewusst auf alle Mörtelapplikationen nicht näher eingegangen.

Diese Begrenzung erfolgt allein zur Begrenzung des Themas und stellt keine Wertung bezüglich des Feuerwiderstandes der jeweiligen anderen Produktgruppen dar.

2.2 Feuerwiderstand

Die Begriffsdefinitionen im Bezug auf die Bezeichnung des Feuerwiderstandes von Beton sind zum Teil widersprüchlich. Es spiegeln sich unterschiedliche Zielrichtungen und Anforderungen in den Begriffen wider. Alle Definitionen sind im Hinblick auf Ortbeton formuliert. Es sind aber keine Gründe offensichtlich, die gleiche Nomenklatur nicht auch auf den Bereich der Spritzbetone zu übertragen.

Für die Beschreibung der Verhältnisse im Bauwesen scheinen die Definitionen gemäss DIN 1045 [1] am zweckmässigsten. Entsprechend den Umgebungstemperaturen werden die folgenden Gruppen eingeteilt:

Bezeichnung gemäss DIN 1045	Temperaturbereich [°C]
Beton für Normaltemperatur	bis 80
Beton für hohe Gebrauchstemperaturen	80 - 250
Feuerbeton	ab 250

Diese Einteilung korrespondiert mit den im weiteren beschriebenen Schädigungsmechanismen und ist auch aus dieser Sicht gerechtfertigt.

Eine ganz andere Klassifizierung findet sich im Cement Bulletin (CB) der TFB, CH-Wildegger [2]. Die aufgeführten Temperaturbereiche lassen vermuten, dass die Einteilung aus dem Bereich der Hochofenindustrie stammt.

Bezeichnung gemäss CB	Temperaturbereich [°C]
Hitzebeständige Werkstoffe	< 1'520
Feuerfeste Werkstoffe	1'520 - 1'830
Hochfeuerfeste Werkstoffe	> 1'830

Für die Klassifikation im allgemeinen Bauwesen liegen die genannten Werte weit über den dort auftretenden Temperaturen und sind aus diesem Grund für diesen Bereich nicht zweckmässig.

Neben der Bezeichnung der Betone, die allein auf der Feuertemperatur beruht, erfolgt eine Einteilung in Brand- und/oder Feuerwiderstandsklassen.

Die Brandklasseneinteilung gemäss DIN 4102 [3] hat für den Baustoff Beton in der Regel keine Bedeutung. Bei dieser Einteilung wird die Feuerempfindlichkeit eines Werkstoffes beurteilt. Normalbeton wird in die Klasse A1 nicht brennbar eingeordnet.

Bei modifizierten Betonen, durch Zusatz von Leichtzuschlagstoff in Form von Styropor oder Kunstharzen als Bindemittel, ist die Brandklasse neu zu beurteilen.

Nebst der Beurteilung der Baustoffe erfolgt auch eine Beurteilung von Bauteilen, die unterschiedliche Feuerwiderstandsklassen kennt. Es wird die Dauer beurteilt, die ein Bauteil oder eine Bauteilgruppe einem Brand, gemäss Einheitstemperaturkurve, die für den Bereich des Tunnelbaus wenig Bedeutung hat, ohne Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit standhält. Übliche Klassen sind F30 bis F90 die eine Widerstandsdauer von 30 bzw. 90 Minuten bezeichnen.

Die verschiedenen Brandlastkurven für die Beurteilung der Brandbeständigkeit von Tunnelkonstruktionen folgen im Prinzip der Idee der Einteilung in Feuerwiderstandsklassen. Es wird jeweils eine Brandlast definiert der, der Beton während einer

definierten Zeit widerstehen muss. Allerdings ist eine Abstufung des Feuerwiderstandes nicht vorgesehen. Es erfolgt eine Beurteilung Anforderung erfüllt bzw. nicht erfüllt.

3. Brandlastkurven

Europaweit sind bisher sehr unterschiedliche, und werden immer noch neue, Brandlastkurven, definiert. Zur Dimensionierung von Schutzmassnahmen gegen Brandlasten werden Zeit-Temperaturverläufe angenommen, die sich z.T. deutlich voneinander unterscheiden.

Brände von Kohlenwasserstoffen, wie sie bei einem Fahrzeugbrand vielfach vorzufinden sind, werden durch den Kurvenverlauf der Einheitstemperaturkurve ETK nach ISO 834 nur unzureichend repräsentiert. Die Erwärmungsphase, die für den langsamen Temperaturanstieg verantwortlich ist, schrumpft auf wenige Minuten zusammen. Bei allen Fahrzeugbränden wird die Maximaltemperatur bereits nach wenigen Minuten erreicht. Die übrigen in Europa gebräuchlichen und in *Bild 1* dargestellten Kurven berücksichtigen diesen schnellen Anstieg.

Die höchsten Anforderungen werden in den Niederlanden von Rijkswaterstaat (RWS) gestellt. Dieser

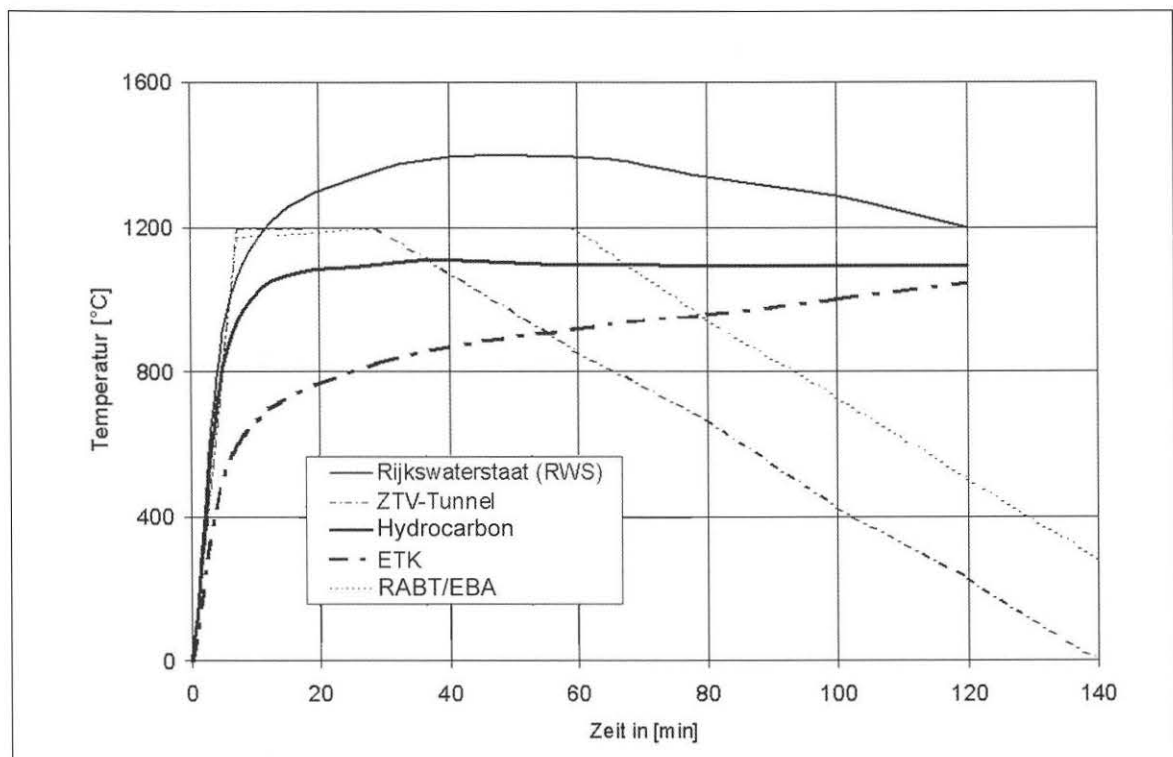


Bild 1: Brandlastkurven

Anforderungskurve liegt der Brand eines Treibstoff-tankwagens in einem Tunnel zu Grunde. Die exponierte Lage der Niederlande mit Tunnels im Grundwasser und einem grossen Teil der Landesfläche unter dem Meeresspiegelniveau führt zu höchsten Sicherheitsanforderungen gegen allfällige Zerstörungen von Bauwerken, deren Beschädigung für das gesamte Land katastrophale Folgen haben könnte.

In Deutschland kommen die Brandlasten gemäss ZTV-Tunnel bzw. RABT und EBA zur Anwendung. Sie unterscheiden sich einzig in der Branddauer, die bei 30 bzw. 60 Minuten liegt. Im Unterschied zu allen anderen Brandlastkurven berücksichtigen diese Anforderungen auch das Verhalten nach dem Brand während der Abkühlphase. Je nach Werkstoff und für den jeweiligen Anwendungsfall gestellten Anforderungen kann das Verhalten während und nach der Abkühlphase für die Beurteilung ebenfalls von Bedeutung sein.

Konsequenterweise müsste auch die Einwirkung von Löschmitteln, die zu einer schockartigen Abkühlung führen, in die Prüfung mit einbezogen werden.

Die vorgestellten Brandlastkurven sind auch nach den deutlich längeren Branddauern bei den vergangenen Tunnelunglücken nicht zwangsläufig anzupassen. Die höheren Branddauern, die teilweise über 50 Stunden betragen, sind auf den Feuerübersprung und das damit zeitlich und räumlich gestaffelte Abbrennen von verschiedenen Fahrzeugen zurückzuführen.

Beurteilung von Brandlastkurven

Bei der Festlegung und Dimensionierung von Bauteilen, und damit auch bei der Beurteilung von Prüf- anforderungen ist das Gefahrenpotential und das daraus resultierende Risiko abzuschätzen.

In der ersten Phase eines Brandunfalls muss gewährleistet sein, dass Personen, die sich im Brandbereich aufhalten, diesen ohne Gefährdung verlassen können. Aber bereits nach wenigen Minuten der Brandentwicklung besteht bei Temperaturen von mehreren 100 °C für jegliche Lebewesen keine Überlebenschance mehr. In den geschlossenen Räumlichkeiten kann die Wärme nicht entweichen. Sie kumuliert sich auf und führt zu einem rasanten Temperaturanstieg.

Zur Gewährleistung der Standsicherheit der Bauteile während der Fluchtphase von Personen sind daher die Brandlasten gemäss RWS, ZTV oder EBA als gleichwertig zu beurteilen.

Für die anschliessende Brandphase, in der nur noch der Sachschutz zu beurteilen ist, sollte eine Risikoabwägung erfolgen, in welchem der Umfang des Schutzes auf einen grösst anzunehmenden Brandunfall erforderlich ist. Kommt es nur zur Beschädigung der Betonstruktur ist mittels Wirtschaftlichkeitsrechnungen zu beurteilen, welcher Aufwand zur Erzielung eines höheren Feuerwiderstandes zu rechtfertigen ist.

4. Schadensmechanismen

Das Ausmass der Betonertörung im Brandfall ist bei konventionellem Spritzbeton auf mehrere Schadensmechanismen zurückzuführen. Die einzelnen Schadensbilder überlagern sich in der Regel und können in die folgenden Kategorien eingeteilt werden:

- Wasserdampfbildung
- chemische Umsetzungen
- Armierungsversagen
- Thermische Längenänderungen

Wasserdampfbildung

Die Wirkungsweise des Wassers im Beton erfolgt in vielfältiger Weise, wobei die schädigenden Einflüsse überwiegen. Der Phasenübergang flüssig - gasförmig des Wassers, der bekanntermassen bei 100 °C erfolgt, ist mit einer Energieaufnahme von 2'257 kJ/kg verbunden. In Anbetracht der Energiemengen, die bei einem Brand freigesetzt werden, ist diese Energieaufnahme unbedeutend und bewirkt nur eine Kühlwirkung während weniger Augenblicke.

Neben der Energieaufnahme beim Phasenübergang flüssig - gasförmig kommt es zu einer massiven Volumenzunahme, die für das Abplatzen von Bauteilen verantwortlich ist. Das Dampfvolumen beträgt bei gleichen Druckbedingungen das ca. 1'100-fache der gleichen Masse flüssigen Wassers. Da dieses Volumen im Spritzbeton nicht zur Verfügung steht, kommt es zum Druckaufbau im Beton, der sich bis zum Erreichen der Zugfestigkeit des Spritzbetons aufbaut und sich beim Abplatzen schlagartig entspannt. Es handelt sich dabei um ein dynamisches System, da die Wasserdampfbildung als Funktion der Zeit erfolgt und ein Teil des Wasserdampfes über die bestehende Porenstruktur entweichen kann. Erst wenn im Bauteil mehr Wasserdampf entsteht als über die Porenstruktur entweichen kann, kommt es zur Schädigung. Dies bedeutet, dass

- Brandintensität
- Porosität des Spritzbetons

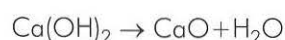
den Schädigungsvorgang beeinflussen. Bei einem kleinen Brand mit einem geringen Energieeintrag und einer entsprechend hoher Porosität sind weniger Schäden zu erwarten, als bei einem Grossbrand im Bereich eines dichten Spritzbetons. Die, aus konstruktiven Überlegungen gerechtfertigterweise gestellte Forderung eines Spritzbetons mit hoher Festigkeit und Dichtigkeit, zur Erzielung einer ausreichender Beständigkeit, erweist sich im Hinblick auf den Feuerwiderstand als kontraproduktiv.

Chemische Umwandlungen

In Abhängigkeit vom Temperaturniveau im Spritzbeton kommt es zu chemischen Umsetzungen von Mineralien aus dem Zementstein und den Zuschlagstoffen.

Dehydrierung

Ab 400 °C im Beton kommt es zur Dehydrierung des Calciumhydroxydes des Zementsteins nach folgendem Reaktionsmechanismus:



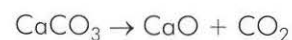
Durch die Zersetzung nimmt die Festigkeit des Zementsteins ab bis hin zum vollständigen Zerfall des Betons. Das in Form von Dampf frei werdende Wasser beschleunigt den Zerstörungsprozess wie bereits dargestellt zusätzlich.

Quarzümbildung

Temperaturen von 575 °C führen beim Quarz zur Mineralumbildung, die mit einer Volumenzunahme verbunden ist. In der Folge kommt es zum Aufsprengen des Spritzbetongefüges und der quarzhaltigen Zuschlagstoffe.

Dekarbonatisierung

Im Temperaturbereich von über 800 °C kommt es zur Dekarbonatisierung von Kalkgesteinen gemäss folgender Reaktionsgleichung:



Kalkhaltige Gesteine zerfallen. Das, abgespaltene CO₂ entweicht als Gas dem Spritzbetongefüge. Bei unzureichenden Wegigkeiten wird es Gefügestörungen verursachen.

Armierung

Mit zunehmender Temperatur nehmen die Festigkeitseigenschaften von metallischen Werkstoffen

ab. Stähle mit niedrigem C-Gehalt, zu denen üblicherweise auch die Armierungsstähle gehören, weisen im Bereich zwischen 200 und 300 °C eine Ungleichförmigkeit auf (Blausprödigkeit), die auf ausscheidungsbedingte Gleitblockierungen im Gitter zurückzuführen sind.

Im Temperaturbereich bis 200 °C weist das Spannungs-Dehnungsverhalten von Stahl keine Temperaturabhängigkeit auf. Ab der Temperaturgrenze von 200 °C kommt es zu einem Abfall der Tragfähigkeit, die bei 700 °C nur noch ca. 20 % des Wertes bei Normaltemperatur beträgt. Die Tragfähigkeit eines Bauteiles wird hierdurch massiv beeinträchtigt, weshalb die Temperaturen denen die Armierung ausgesetzt ist, begrenzt sind. In der Praxis werden geringfügige Tragvermögensverluste toleriert, so dass Temperaturgrenzwerte im Bereich von 250 °C bis 300 °C festgelegt werden.

Thermische Längenänderung

Wie alle Werkstoffe weist auch Beton, eine temperaturabhängige Längenänderung auf. Bereits unter hiesigen Klimabedingungen muss diesen Längenänderungen durch entsprechende Ausgleichstreifen oder Dehnfugen Rechnung getragen werden. Berichte über durch Sommerhitze verbogene Schienen sind auf eben dieses Phänomen zurückzuführen.

Im Brandfall treten deutlich höhere Temperaturen auf, entsprechend höher sind auch die Längenänderungen. Ist hier nicht genügend Raum vorgesehen, der in Abhängigkeit von Temperatur und absoluter Länge des Bauteils mehrere Zentimeter betragen kann, kommt es zu Zwängungen und damit zum Kollaps der Struktur.

Daneben entstehen durch die von Aussen nach Innen fortschreitende Erwärmung der Bauteile Eigen- und Zwangsspannungen. Die Eigenspannungen können zu einem schalenförmigen Abplatzen des Betons führen, wodurch die Bewehrung ihren Schutz teilweise verliert und der Verbund beeinträchtigt wird. Darüber hinaus ist das temperaturbedingte Dehnungsverhalten von Stahl und Beton nur im Bereich von ca. 0 °C bis ca. 400 °C identisch. Bei höheren Temperaturen werden auch hier schädigende Spannungen induziert.

Bewertung Schadensmechanismen

Die beschriebenen Schadensmechanismen greifen bereits bei niedrigen Temperaturen ab 100 °C die Betonstruktur an. Untersuchungen an konventionel-

lem Spritzbeton haben gezeigt, dass der Zerstörungsprozess mit einer hohen Geschwindigkeit abläuft. Die Abtragraten erreichte bei diesen Prozessen Werte von 0,33 mm/min bzw. 20 cm/h. Durch das Abplatzen und Aufbrechen des Gefüges frisst sich die Schadensfront in das Bauteil hinein. Armierungen, die nur wenige Zentimeter unter der Oberfläche verlegt sind, werden freigelegt und verlieren durch die extrem hohen Temperaturen im Brandbereich ihre Funktionsfähigkeit vollständig.

Ist die Personenschutzrettung das einzig relevante Beurteilungskriterium, ist eine Auslegung der Auskleidung gemäss EBA Brandlast ausreichend. Während der Fluchtphase ist eine ausreichende Festigkeit der Struktur nachgewiesen.

Völlig anders sind die Verhältnisse zu beurteilen, wenn

- das Bauwerk einen Flusslauf unterquert und/oder im Grundwasser liegt
- das Bauwerk in wenig standfestem Gebirge mit geringem Abstand unter bestehenden Bebauungen verläuft
- Fluchtnischen oder Kammern durch eine zerstörte Tunnelkonstruktion unerreichbar werden sollten

In den genannten Fällen könnte es durch die Folgeschäden aus dem Brandfall zu unermesslichen Schäden kommen, die durch einen Mehraufwand bei der Wahl geeigneter Schutzsysteme hätten vermieden werden können.

Unabhängig von den gewählten Sicherungsmassnahmen, die neben den baulichen Aspekten auch die weiteren eingangs genannten Faktoren umfassen, wird immer ein gewisses Restrisiko bestehen bleiben, dessen Folgen nicht verhindert werden können. Wie man bei anderen Katastrophen von 100 oder 1'000 -jährigen Ereignissen spricht, und damit impliziert, dass es auch noch verheerendere Ereignisse gibt, die allerdings entsprechend selten eintreten, muss beim Brandschutz damit gerechnet werden, dass es zu Zwischenfällen kommt, für die, die getroffenen Schutzmassnahmen unzureichend sind. Das zu erreichende Schutzziel muss jedoch politisch und gesellschaftlich definiert und akzeptiert sein. Aufgabe aller Brandschutzmassnahmen ist es dann, dieses Ziel mit möglichst geringem Aufwand zu verwirklichen. Dabei muss allen Beteiligten bewusst sein, dass in jedem Fall ein Unfallszenario denkbar ist, das nicht abgedeckt wird. Eine 100 %ige Sicherheit gegen Unglücksfälle wird es nie geben können.

5. Prüfverfahren

Prüfungen von Tunnelauskleidungen erfolgen nur an wenigen Stellen in ganz Europa. Es wird jeweils eine der oben genannten Temperaturkurven nachgefahren. Die geforderte Temperatur der Brandlastkurve wird dabei im Abstand von 10 cm vor der Plattenoberfläche gemessen. Für Routineuntersuchungen wird vielfach eine Plattengrösse 1,6 x 1,6 x 0,15 m verwendet. Diese Platte wird auf einen Schachtofen aufgelegt und von unten mit einem Ölbrenner beflammt. Die Temperaturen werden mit speziellen Thermoelementen in und auf der Plattenunterseite gemessen. Die Messdaten werden Online mit einer Frequenz von 1 Hz erfasst. Mit einer solchen Prüfanordnung wurden auch die im folgenden beschriebenen Untersuchungen ausgeführt.

Die Beurteilung der Beständigkeit bzw. der Schutzwirkung eines Systems erfolgt aufgrund der gemessenen Temperaturen an der, der Brandseite zugewandten Armierung und allfälligen Abplatzungen an der Oberfläche.

Bild 2 zeigt die Temperaturverläufe im Brandraum und in zwei unterschiedlichen Tiefen unter der Oberfläche der brandzugewandten Bauteilseite, wie sie typischerweise mit dem im folgenden vorgestellten Spritzbeton mit erhöhtem Feuerwiderstand erreicht werden.

6. Spritzbetonsysteme

Alle untersuchten Spritzbetone wurden gemäss den RWS-Anforderungen untersucht.

Eine allfällige andere Beurteilung der Spritzbetone bei niedrigeren thermischen Belastungen bleibt daher vorbehalten.

Die folgenden Parameter bzw. Systeme wurden im Sinne von Eignungsprüfungen auf ihren Einfluss auf den Feuerwiderstand des Spritzbetons untersucht:

- Standard-Spritzbeton
- Stahlfasern
- Polypropylenfasern
- Zuschlagstoffe
- Zemente

Zu diesem Zweck wurden Platten mit einer Kantenlänge von 1,6 m und einer Dicke von 0,15 m gespritzt. Nach 28 Tagen Lagerung im Stollen bei 70 % Luftfeuchtigkeit wurden die Brandprüfungen an den unbehandelten Oberflächen ausgeführt. Neben der Messung der Temperatur im Brandraum

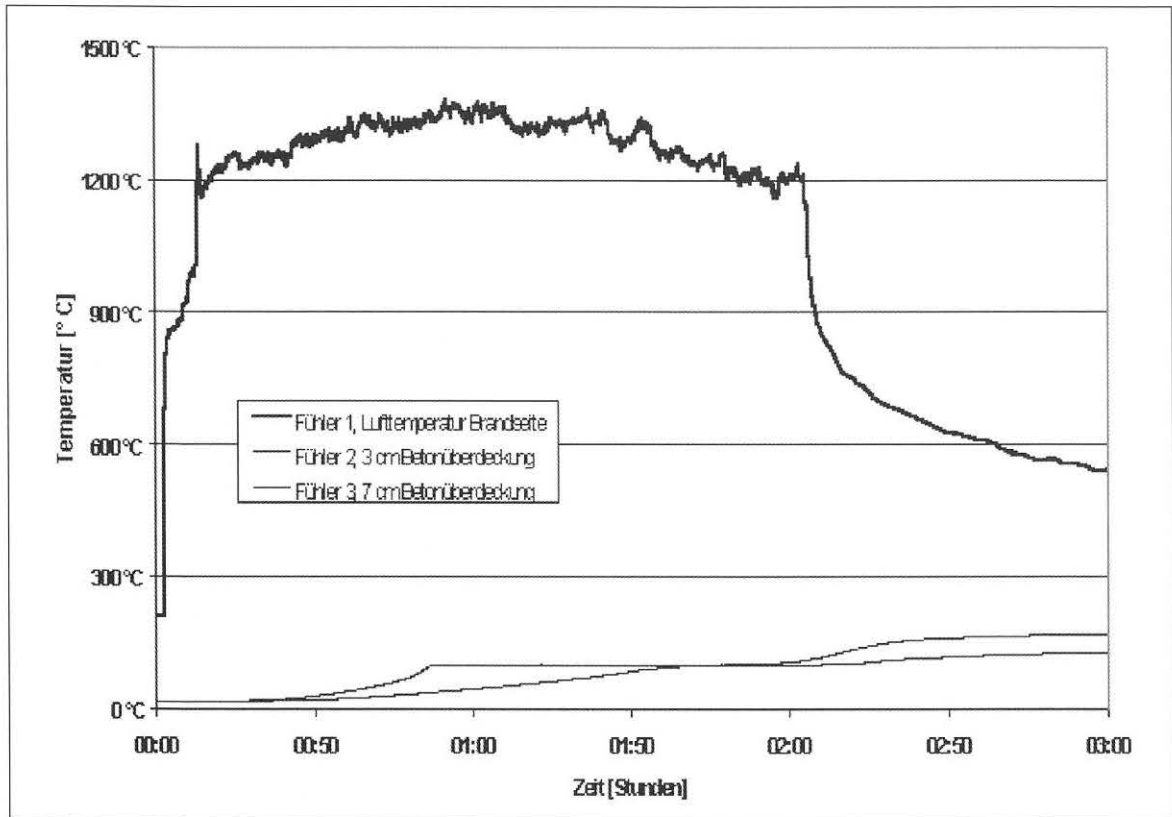


Bild 2: Temperaturverlauf im Spritzbeton

wurden die Temperaturen in 3 und 7 cm Tiefe unter der Oberfläche gemessen.

6.1 Standard-Spritzbeton

Als Standard-Spritzbeton wurde der Spritzbeton untersucht, der heute typischer Weise bei Spritzanwendungen appliziert wird. Diese Untersuchungen erfolgten auch zur Schaffung einer Referenz, bezüglich der Veränderungen des Feuerwiderstandes der Spritzbetone.

Folgende Rezeptur wurde im Nassspritzverfahren appliziert:

0 - 8 mm	Alluviale Zuschlagstoffe
450 kg/m ³	CEM I 42.5 R
0,50	w/z-Wert
1 %	Hochleistungsverflüssiger
6 %	Beschleuniger (alkalifrei)

Die Prüfungen auf dem Brandofen zeigten massive Abplatzungen auf der gesamten Spritzbetonoberfläche, die innerhalb der ersten 2 Prüfminuten einsetzten. Nach 12 Minuten wurde die Prüfung abgebrochen, da die Abplatzungen unvermindert anhielten und die Gefahr einer vollständigen Prüfkörperzerstörung bestand.

Bei dieser Abtragsrate war auch eine Temperaturmessung in unterschiedlichen Tiefen ab der Betonoberfläche gemessen, nicht möglich. Das bedeutet auch, dass Überlegungen zum Wärmefluss im Spritzbeton bedeutungslos sind, da der Beton unter dem Einfluss der Brandeinwirkungen abplatzt und sich die Ausgangssituation damit ständig verändert.

Vor den ersten Untersuchungen war nicht vollständig auszuschließen, dass Spritzbeton allenfalls prinzipiell einen höheren Feuerwiderstand als ein vergleichbarer Ortbeton aufweist. Aufgrund der höheren Porosität die Spritzbeton gegenüber Ortbeton aufweist, wäre denkbar, dass dieses zusätzliche Porenvolumen ausreicht, um das Abplatzen beim Spritzbeton zu verhindern.

6.2 Einfluss von Stahlfasern

In der Literatur wird verschiedentlich beschrieben, dass Stahlfasern zur Erhöhung des Feuerwiderstandes von Beton und Spritzbeton eingesetzt wurden.

Bei den im Rahmen der im VersuchsStollen Hagerbach bisher ausgeführten Prüfungen, wurde die oben beschriebene Standardrezeptur mit Stahlfa-

sern modifiziert. Die Faserzugabe im Ausgangsgemisch betrug 45 kg/m^3 .

Bezüglich der Verarbeitung und des Faserrückpralls gelten, die für Stahlfaserspritzbeton bekannten Randbedingungen.

Während des Brandversuches zeigte sich eine Verminderung der Abplatzungen gegenüber dem Standard-Spritzbeton. Vollständig konnten die Abplatzungen jedoch nicht verhindert werden.

Nach Abschluss der Prüfungen wurde an der Prüfkörperoberfläche deutlich, in welcher Weise die Stahlfasern im Brandfall wirken. Der Spritzbeton weist wie bei dem Standardspritzbeton, Abplatzungen auf. Die Stahlfasern bilden jedoch teilweise Verankerungen in den noch ungestörten Untergrundspritzbeton aus, die bewirken,

- dass die Zugfestigkeit des Spritzbetons erhöht wird
- dass die abgesprengten Betonteile wie eine vorgehängte Decke an der Oberfläche verbleiben.

Mit zunehmender Prüfdauer wurden entweder die Stahlfasern durch die Temperaturen oder das Betongefüge vollständig zerstört, so dass die Betonteile abfielen. In diesem Moment war die Spritzbetonoberfläche wiederum ungeschützt den Prüftemperaturen ausgesetzt. In der Folge ist es zu erneuten Abplatzungen gekommen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch die Zugabe von Stahlfasern zum Spritzbeton der Abplatzprozess verlangsamt, aber nicht vollständig verhindert wird.

6.3 Einfluss von Polypropylenfasern

Aufgrund von Literaturhinweisen und entsprechenden Versuchen im Ortbetonbereich ist bekannt und nachgewiesen, dass Polypropylenfasern im Betongefüge das Abplatzen von Beton verhindern können.

Für den Nachweis im Spritzbeton wurden zur oben genannten Basismischung unterschiedliche Fasergehalte zwischen 2 und 4 kg/m^3 zudosiert. Zum Einsatz kamen sowohl fibrillierte als auch monofile Fasern.

Der grösste Teil der ausgeführten Versuche bezieht sich auf Anwendungen im Nassspritzverfahren. In einigen wenigen Fällen konnten aber auch Erfahrungen im Trockenspritzverfahren gesammelt werden.

Im Hinblick auf den Faserrückprall weisen die Verfahren deutliche Unterschiede auf. Die Ermittlung der effektiven Faserverluste ist bisher nicht möglich, da die einzelnen Fasern aufgrund ihrer Grösse und feinen Verteilung im Spritzbeton nicht nachgewiesen werden können.

Offensichtlich ist, dass im Trockenspritzverfahren höhere Faserverluste auftreten als im Nassspritzverfahren. Im Trockenspritzverfahren werden alle Komponenten praktisch einzeln im Luftstrom gefördert. Die sehr leichten Fasern am Rande des Spritzstrahls werden durch Turbulenzen aus dem Strahl gerissen, gelangen in die Umgebungsluft und lagern sich als Rückprall ab. Im Gegensatz dazu sind beim Nassspritzverfahren die Fasern im Betongemisch eingebettet und werden durch den Luftstrom nur in Ausnahmefällen aus dem Spritzbeton gerissen und in die Umgebungsluft abgegeben.

Mit Fasergehalten von 2 bis 4 kg/m^3 im Ausgangsgemisch können Abplatzungen an der Spritzbetonoberfläche wirkungsvoll verhindert werden. Voraussetzung dafür ist jedoch der Aufbau einer homogenen und spritzschattenfreien Spritzbetonschicht. Vereinzelt ist es zu Abplatzungen von dünnen flächigen Bereichen von bis zu $30 \times 40 \text{ cm}^2$ gekommen. Es wird vermutet, dass hierfür Spritzschatten im Betongefüge die Ursache sind.

Einige Versuche mit hochporösen Zuschlagstoffen haben jedoch gezeigt, dass auch die Prozesse in den Zuschlagstoffkörnern über das Abplatzen entscheiden können. Unabhängig von der Faserdosierung kam es hier zu Abplatzungen des Betongefüges.

6.4 Einfluss der Zuschlagstoffe

Die Zuschlagstoffe beeinflussen durch ihre Mineralogie und Porenstruktur massgeblich den Feuerwiderstand eines Spritzbetonsystems. Folgende Zuschlagstoffsysteme wurden im Rahmen von Versuchen untersucht:

- Kalksteine
- Granite/Gneise
- Schlacken (natürliche + künstliche)
- Gesinterte Flugaschen

Spritzbeton mit Kalksteinzuschlag und Polypropylenfasern weist keinerlei Abplatzungen während der Brandversuche auf, sofern die oben geschilderten Randbedingungen eingehalten werden.

Es zeigt sich jedoch, dass sich ca. 24 Stunden nach dem Brandversuch die Oberfläche mit einer

Schichtstärke von ca. 1 cm vollständig abschält und zerfällt. Ursache hierfür sind die Hydratationsprozesse des ausgebrannten Kalkes (CaO), die nach dem Auskühlen mit der Feuchtigkeit aus der Luft einsetzen.

Die Reaktionsprodukte aus diesem Prozess sind nicht schädlich und stellen auch keine Gefährdung für Personen dar, die sich in entsprechen Bereichen aufhalten. Es ist einzig zu beachten, dass die Bauteilstärke reduziert ist und ein weiterer Schadensfall am gleichen Ort zu einem weiteren Eindringen der Schandesfront in das Bauteil führt. Eine umgehende Sanierung dieses Bereiches ist angezeigt.

Die Verwendung von Graniten und Gneisen als Zuschlagstoffe setzt ebenfalls den Einsatz von Polypropylenfasern voraus, um Abplatzungen zu verhindern. Versuche mit diesen Zuschlagstoffen haben gezeigt, dass es bereits bei Temperaturen im Bereich von 1000 °C zu Sintererscheinungen und Aufschmelzungen kommt.

Eine nähere Betrachtung der Schmelzprodukte zeigt, dass sich in deren Inneren weitere unveränderte Gesteinsbestandteile befinden. Aufgrund dieser Randbedingungen sollten diese natürlichen Zuschlagstoffe bei der Herstellung von Spritzbetonen mit erhöhtem Feuerwiderstand gemieden werden.

Mit gesinterten Flugaschen als Zuschlagstoff konnten die besten Resultate bezüglich der Festigkeiten des Systems erreicht werden. Voraussetzung war auch hier die Zugabe von Polypropylenfasern um das Abplatzen des Spritzbetons zu verhindern.

Die relativ niedrige Wärmeleitfähigkeit der Zuschlagstoffe führt zu einem, gegenüber anderen Versuchen, verlangsamten Temperaturanstieg im Innern der Prüfplatten.

Die Gefügestruktur des Spritzbetons ist im Oberflächenbereich geschädigt. Mit Haftzugfestigkeiten von ca. 0,5 N/mm² werden aber Werte erreicht, die zeigen, dass der Beton noch eine deutliche Restfestigkeit aufweist.

6.5 Einfluss des Zementtyps

Zum Einfluss des Zementtyps auf das Verhalten im Brandfall liegen bisher keine systematischen Untersuchungen vor.

Aufgrund von theoretischen Überlegungen wurden für alle Versuche zum Nachweis einer erhöhten Feuerbeständigkeit Zemente mit einem hohen Anteil an thermisch inerten Bestandteilen eingesetzt.

7. Ausblick

Die bisher ausgeführten Untersuchungen bezüglich Feuerwiderstand von Spritzbeton zeigen, dass sich dieser ähnlich verhält wie Ort beton.

Mit der Zugabe von Polypropylenfasern wird das Abplatzen von Betonteilen wirksam verhindert. Dadurch wird die Schädigung durch die Brandeinwirkung auf wenige Zentimeter an der Oberfläche begrenzt. Mit der Wahl geeigneter Zuschlagstoffe kann der Feuerwiderstand erhöht und die Wärmeleitfähigkeit verringert werden.

Unter diesen Randbedingungen ist zu prüfen in welchem Umfang modifizierter Spritzbeton mit einem erhöhten Feuerwiderstand auch für den Schutz von Konstruktionen im allgemeinen Bauwesen eingesetzt werden kann.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass trotz aller technischen Massnahmen zur Steigerung der Standfestigkeit und Tragfähigkeit von Konstruktionen im Bauwesen und im Tunnelbau die Sicherheit gegen einen Unfall und dessen verheerende Folgen vom schwächsten Glied aller am Unfallgeschehen beteiligten Faktoren abhängig ist. Hier ist vor allem der Mensch gefordert, ein verantwortungsbewusstes Verhalten bei der Nutzung von Tunnelbauwerken zu zeigen.

8. Literatur

- [1] DIN 1045:
Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Juli 2001.
- [2] TFB:
Cement Bulletin.
- [3] DIN 4102-1:
Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1. Baustoffe: Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Ausgabe 05. 1988.
- [4] DIN 4102-2:
Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 2. Bauteile: Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Ausgabe 09. 1977.