

---

## SPRITZBARER GEOPOLYMERBETON ALS BRANDSCHUTZCOATING ZUR ERTÜCHTIGUNG VON TUNNELINNENSCHALEN

---

### **SPRAYABLE GEOPOLYMER CONCRETE AS FIRE PROTECTION COATING FOR THE REINFORCEMENT OF TUNNEL INNER LININGS**

Anna-Lena **Hammer**, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Bochum, Deutschland

Sebastian **Kube**, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Bochum, Deutschland

Joachim **Budnik**, Porr GmbH & Co. KGaA, Tunnelbau, Düsseldorf, Deutschland

Christoph **Klaproth**, Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA – e. V., Köln, Deutschland

Götz **Vollmann**, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Bochum, Deutschland

Eugen **Kleen**, MC Bauchemie, Bottrop, Deutschland

Markus **Thewes**, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Bochum, Deutschland

Im Rahmen des Forschungsprojekts KOINOR („Konzepte und Verfahren zur brandschutztechnischen Ertüchtigung und Nachrüstung unterirdischer Infrastruktur“) wird ein Brandschutzcoating für bestehende Tunnelbauwerke auf Basis eines spritzbaren Geopolymerbetons entwickelt. Dieser kann sowohl als Spritzmörtel- als auch als Spritzbetonsystem für die Instandsetzung sowie die bauliche Verbesserung eingesetzt und im Nass- sowie Trockenspritzverfahren appliziert werden. Entscheidende Vorteile von zementfreien Systemen sind a) die thermischen Eigenschaften, mit denen die aktuellen Anforderungen der Richtlinien an den Brandschutz von Tunnelbauwerken erfüllt werden und ohne Zugabe von PP-Fasern (mono-/multifilamentale Mikrofasern) Abplatzungen im Brandfall vermieden werden, b) die sehr hohe Sulfatbeständigkeit und der hohe Chlorideindringwiderstand des erhärteten Betons sowie c) die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Bilanz im Rahmen der Ertüchtigung des gesamten Tunnelbauwerks. In dieser Veröffentlichung wird die Praxistauglichkeit der entwickelten Spritzmörtel- und Spritzbetonsysteme diskutiert. Auf Grundlage der Auswahl einer Basisrezeptur werden neben Untersuchungen zur Verfahrenstechnik (Maschinenauswahl, Arbeitssicherheit, Rückprallanalysen etc.) auch Materialuntersuchungen vorgestellt. Mechanische Kennwerte, thermische Belastungen, Dauerhaftigkeit sowie das Verbundverhalten des neu entwickelten Materials bilden die Basis für umfassende Untersuchungsprogramme. In allen Untersuchungen zeigt sich, dass die spritzbaren Geopolymersysteme verfahrenstechnisch sehr gut funktionieren und eine überraschend gute Performance im Hinblick auf die erwarteten Vorteile aufweisen.

*Within the framework of the research project KOINOR ("Concepts and methods for fire protection upgrading and retrofitting of underground infrastructure"), a fire protection coating for existing tunnel structures based on a sprayable geopolymer concrete is being developed. This can be used both as a sprayed mortar and as a sprayed concrete system for repair and structural improvement and can be applied by wet-mix and dry-mix method. Decisive advantages of cement-free systems are a) the thermal properties with which the current requirements of the guidelines for fire protection of tunnel structures are met and by which*

*spalling in the event of fire is prevented without the addition of polypropylene fibres (mono-/multifilament microfibres), b) the very high sulphate resistance and the high chloride penetration resistance of the hardened concrete and c) the reduction of the CO<sub>2</sub> balance in the context of the strengthening of the entire tunnel structure.*

*This publication discusses the practical suitability of the developed sprayed mortar and shotcrete systems. Based on the selection of a basic formulation, material investigations are presented in addition to investigations on process engineering (machine selection, occupational safety, rebound analyses etc.). Mechanical parameters, thermal loads, durability and the composite behaviour of the newly developed material form the basis for comprehensive investigation programmes. All investigations show that the sprayable geopolymer systems work very well in terms of process engineering and show a surprisingly good performance regarding the expected advantages.*

## 1. Einleitung

### 1.1 Hintergrund

Die bestehenden Tunnelbauwerke der Verkehrsträger Straße, Schiene und U-Bahn sind im Laufe ihrer Nutzungsdauer zeitweise starken Belastungen ausgesetzt, die zu Schäden an der Tunnelsubstanz führen können. Zusätzlich sind etwa 15 % der Bahntunnelbauwerke älter als 150 Jahre und auch die ältesten Straßentunnel sind über 50 Jahre in Betrieb. Dementsprechend wird es zukünftig vermehrt Instandsetzungsbedarf geben bzw. bauliche Verbesserungen notwendig werden. [1, 2]

Entscheidend für die entsprechenden baulichen Maßnahmen sind – neben der Alterung der Bausubstanz – auch die Veränderungen der Vorschriften und die daraus resultierenden steigenden Sicherheitsanforderungen an die Tunnel selbst. Die Tunnelbrände im Mont-Blanc-Tunnel (1999), im Tauerntunnel (1999), im Gotthardtunnel (2001) und im Eurotunnel (2008) haben gezeigt, dass neben den betrieblichen Verbesserungen auch Verbesserungen im Bereich des baulichen Brandschutzes erforderlich sind. Die gültigen Normen und Vorschriften wurden dahingehend novelliert und berücksichtigen nun auch diese Verbesserungen. [3]

### 1.2 Problem- und Zielstellung

Ein erhöhtes Verkehrsaufkommen, auch in Verbindung mit alternativen Antriebssystemen, kann zusätzlich zu einer Erhöhung der potentiellen Brandlasten in Tunneln sowie zu einem Anstieg von schweren Unfällen führen. Das aktuelle Regelwerk berücksichtigt letztere Szenarien auf der Einwirkungsseite bereits weitgehend – die geänderten Vorschriften für den baulichen Brandschutz decken eine Vielzahl denkbarer Situationen und Auswirkungen ab. Die überwiegende Mehrheit der bestehenden Gebäude wurde jedoch nach Vorgaben gebaut, die heute als veraltet angesehen werden können. Dies bedeutet, dass im Ereignisfall erhebliche Probleme auf der Widerstandsseite und damit potenziell große Schadensausmaße bei Brandereignissen möglich sind. Eine Instandsetzung oder bauliche Verbesserung auf das heutige Sicherheitsniveau ist daher zeitnah, spätestens aber bei einer alterungsbedingten Instandsetzung des Bauwerks erforderlich. Dies kann den Bestandsschutz bestehender Bauwerke auflösen und damit die Konformität mit geltenden Vorschriften unumgänglich machen.

Vor diesem Hintergrund zielt das Projekt KOINOR („Konzepte und Verfahren zur brandschutztechnischen Ertüchtigung und Nachrüstung unterirdischer Infrastruktur“) darauf ab, neue Methoden für die Instandsetzung von Tunneln zu entwickeln und deren Wirksamkeit durch geeignete Untersuchungen sicherzustellen. Erste Voruntersuchungen haben gezeigt, dass Geopolymerbetone gute Eigenschaften hinsichtlich hoher thermischer Einwirkungen aufweisen, wie sie bei Tunnelbränden vorauszusetzen sind. Deswegen hat sich das Forschungsprojekt zum Ziel gesetzt, ein Brandschutzcoating aus Geopolymerbeton zu entwickeln. Um

den mitunter anspruchsvollen Geometrien einer Tunnelinnenschale gerecht zu werden, soll dieses Coating auf die zu verbessernde Innenschale aufgespritzt werden. Daher werden sowohl Spritzmörtel als auch Spritzbetone auf Geopolymerbetonbasis entwickelt, um sowohl Instandsetzungen als auch in die Statik eingreifende bauliche Verbesserungen durchführen zu können.

In dieser Veröffentlichung wird die Praxistauglichkeit der entwickelten Spritzmörtel- und Spritzbetonsysteme diskutiert. Dazu werden sowohl Materialuntersuchungen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und dem Verhalten unter thermischer Belastung vorgestellt als auch Untersuchungen zur Verfahrenstechnik dargestellt. Abschließend werden weitere geplante Versuche zur Analyse der Wirksamkeit des Brandschutzcoatings aufgezeigt.

## 2. Spritzbarer Geopolymerbeton als Brandschutzcoating

### 2.1 Geopolymerbeton

Geopolymere sind anorganische Bindemittel. Buchwald [4] definiert Geopolymerbinder als anorganische Zweikomponentensysteme bestehend aus einer reaktiven Feststoffkomponente auf Basis von reaktiven  $\text{SiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -haltigen Rohstoffen wie Metakaolin, Hüttensanden oder Flugaschen und einer alkalischen Aktivatorlösung. Bild 1 veranschaulicht die Definition eines Geopolymers im Herstellungsprozess. Der Kontakt der beiden Komponenten Bindemittel (Feststoff) und Aktivator führt zu einer Aushärtung des Gemisches. In einem ersten Reaktionsschritt setzt der alkalische Aktivator den Feststoff frei, in einem zweiten Reaktionsschritt kondensiert ein Alumosilikatpolymer aus der Lösung. Das Ergebnis ist eine wasserbeständige Netzwerkstruktur, die alumosilikatisch, amorph bis teilkristallin ist. [4, 5]

Im Vergleich zu konventionellen Mörteln ist der Anteil von gebundenem Wasser in diesem Alumosilikatnetzwerk verhältnismäßig gering. Auch der Anteil von Kapillarporen in erhärteten Geopolymeren ist geringer als bei Materialien mit zementbasierten Bindern. Durch diese Eigenschaften weisen Geopolymere insgesamt einen geringeren Wassergehalt als zementbasierte Baustoffe auf, was ihr Materialverhalten (bspw. hinsichtlich ihrer Abplatzneigung unter Temperatureinfluss) maßgeblich beeinflusst. [6]

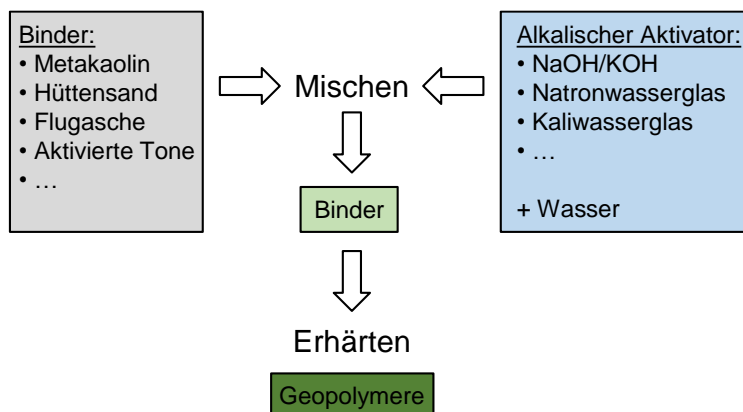


Bild 1: Mögliche Ausgangsstoffe und Verfahrensweg zur Herstellung von Geopolymeren nach [4]

Als umweltschonende Alternative zu Zement bekommen Geopolymere in der Bauindustrie eine immer größere Bedeutung [7]. Durch die Verwendung von Sekundärrohstoffen, wie beispielsweise Steinkohleflugaschen oder Hüttensanden kann im Gegensatz zur Gewinnung von Rohstoffen für die Zementproduktion ressourcenschonender gearbeitet werden. Hinzu kommt eine deutliche Einsparung von  $\text{CO}_2$ -Emissionen, die bei der Verwendung zementbasierter Baustoffe durch das Brennen des Zements im Herstellungsprozess entstehen [6].

Zudem werden Geopolymerbetonen, je nach verwendeten Ausgangsstoffen, eine Reihe verbesserter Eigenschaften gegenüber herkömmlichen zementgebundenen Betonen zugesprochen. Für den Einsatz als Reparatursystem sind dies nach Buchwald [4] und Uebachs [8] vor allem:

- a) Beständigkeit gegen Chemikalien, insbesondere Säuren
- b) hohe Temperatur- bzw. Brandbeständigkeit
- c) hohe Dichtigkeit und geringe Permeabilität
- d) schnelle Aushärtungszeit bei hohen Endfestigkeiten

## 2.2 Spritzbares Brandschutzcoating

Die Instandhaltung von Tunneln aller Bauweisen (Tübbingtunnel, Bergmännische zweischalige Tunnel sowie Mauerwerkstunnel und Tunnel in offener Bauweise) wird aufgrund der für die kommenden Jahre prognostizierten Bauwerkszustände erheblich zunehmen [9]. Hierbei können Instandsetzungen notwendig werden. Wenn diese nicht mehr genügen, können ebenso bauliche Verbesserungen, welche in die bestehende Statik eingreifen, unumgänglich sein. Daher werden in KOINOR sowohl Geopolymermörtel- als auch Geopolymerbetonrezepturen für die Anwendungsfälle als Instandsetzungsschicht oder tragfähige Innenschale entwickelt.

Damit das Brandschutzcoating auf jegliche, mitunter geometrisch anspruchsvolle, Tunnelinnenschale aufgebracht werden kann, wird ein Coating in spritzbarer Form ausgeführt. Je nach verfahrenstechnischen Anforderungen, die insbesondere bei einer Tunnelinstandhaltung unter laufendem Betrieb komplex sein können, werden sowohl Rezepturen für das Trocken- als auch das Nassspritzverfahren entwickelt.

Dazu wurden in einem ersten Schritt Anforderungen an die Innenschalen von Tunneln aller Verkehrsträger identifiziert und analysiert. Ziel ist es, dass das Brandschutzcoating jeweils den höchsten geltenden Anforderungen gerecht werden kann. Die zu erfüllenden Anforderungen sind in [10] zusammengefasst.

## 2.3 Brandszenarien

Die maßgeblichen, in Deutschland behördlich festgelegten Anforderungen an die Konstruktion sind die Sicherstellung einer Mindestbetondeckung von 6 cm und einer Stahlbewehrungstemperatur von maximal 300 °C. Zur Bemessung im Brandfall werden Temperatur-Zeit-Kurven berücksichtigt. International gibt es jedoch keine einheitlichen Kurven; daher verweisen viele Behörden auf ihre nationalen Richtlinien. In Deutschland sind dies die geschlossenen Brandkurven nach ZTV-Ing.- und EBA-Richtlinie [11, 12]. Die Temperatur-Zeit-Kurven bestehen aus einer fünfminütigen Aufheizphase, die zu einer maximalen Temperatur von 1.200 °C führt, gefolgt von einer Vollbrandphase von 25 bzw. 55 Minuten.

Bei Normalbetonen ist in fast allen Brandfällen die Entstehung von Abplatzungen zu beobachten [13], wodurch entweder die Bewehrung direkt der thermischen Einwirkung ausgesetzt wird oder die verbleibende Schichtdicke so durchwärmt wird, dass das 300 °C-Kriterium in der Bewehrung überschritten wird. Beides kann zum Ausfall der Bewehrung, zu einem partiellen strukturellen Versagen der Tunnelschale, verbunden mit dem Verlust der Gebrauchstauglichkeit bis hin zum vollständigen Bauwerksverlust führen. Daher ist nach deutschen Vorschriften [11, 14] die Zugabe von PP-Fasern (mono-/multifilament Mikrofaser) für den Beton von Tunnelinnenschalen vorgeschrieben. Der Einsatz der Fasern soll das Abplatzverhalten des Betons verringern und die daraus resultierenden beschriebenen Folgen verhindern. Praxiserfahrungen zeigen jedoch, dass es trotz Einbringen von PP-Fasern zu Abplatzungen der Innenschale bei einem Brandfall kommen kann [15].

### 3. Experimentelles Konzept zur Entwicklung eines spritzbaren Geopolymerbetons

Um die Entwicklung eines spritzbaren Geopolymerbetons zur Instandsetzung bzw. baulichen Verbesserung von Tunnelbauwerken durchzuführen, wird im Forschungsprojekt die in Bild 2 dargestellte Konzeption verfolgt.

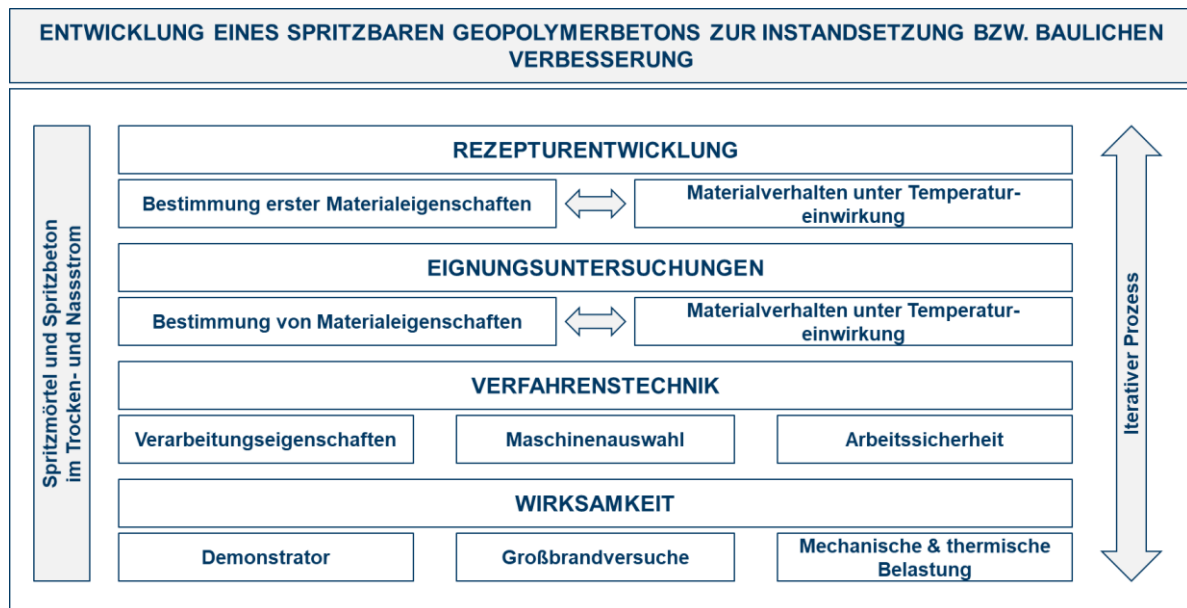


Bild 2: Versuchskonzeption zur Entwicklung eines spritzbaren Geopolymerbetons

In einem ersten Schritt wird eine Rezeptur entwickelt, für die die mechanischen Werkstoffparameter und die Eigenschaften unter Temperatureinfluss an kleinformatischen Probekörpern geprüft werden. Nach dem Best-Way-Out-Prinzip wird in einem iterativen Prozess eine geeignete Rezeptur ausgewählt und Eignungsuntersuchungen mit dieser durchgeführt. Auf Grundlage der dadurch gewonnenen Erkenntnisse werden bei Bedarf weitere Anpassungen vorgenommen. Die Ergebnisse der Eignungsuntersuchungen werden im Rahmen dieser Veröffentlichung ausführlich diskutiert.

Parallel dazu werden sowohl Nass- als auch Trockenspritzversuche mit Spritzmörteln und Spritzbetonen durchgeführt, um geeignete Maschinen je Verfahren auszuwählen sowie weitere Aspekte (Arbeitssicherheit, Verarbeitungseigenschaften etc.) hinsichtlich der Verfahrenstechnik zu analysieren. Abschließend wird die Wirksamkeit des entwickelten Brandschutzcoatings an großformatigen Probekörpern untersucht.

## 4. Rezepturentwicklung

### 4.1 Versuchskonzept

Die Entwicklung einer Betonrezeptur auf Geopolymerbasis zur Anwendung bei der Instandhaltung von Tunnelbauwerken kann viele Vorteile bieten. Im Speziellen steht hier die Brandbeständigkeit und die damit verbundene verringerte Abplatzneigung im Vordergrund, die durch die besonderen Materialeigenschaften eines Geopolymerbetons erreicht wird (vgl. Kapitel 2.1). [10]

Bild 3 veranschaulicht das Vorgehen der Rezepturentwicklung im Projekt KOINOR. Zu Beginn werden unterschiedliche zementfreie Ausgangsrezepturen entwickelt und kleinformatische Versuche bzgl. erster Materialeigenschaften sowie des Materialverhaltens unter Temperatureinwirkung durchgeführt. Die in diesen Versuchen erzielten Ergebnisse geben Aufschluss über mögliche notwendige Modifikationen der Rezeptur und sind somit als iterativer Prozess anzusehen.

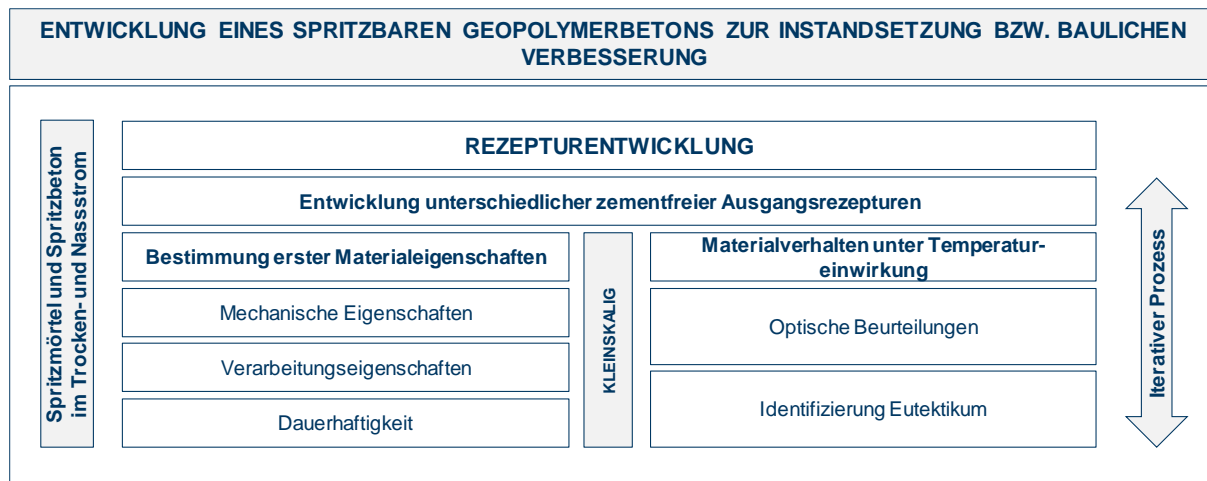


Bild 3: Vorgehen KOINOR

### 4.2 Versuchsdurchführung

Das übergeordnete Ziel des Projekts KOINOR die Entwicklung eines spritzbaren Materials auf Geopolymerbasis, welches sowohl baustofftechnische als auch mechanische Anforderungen erfüllen muss. Die Basis für die Entwicklung bietet eine zementfreie Rezeptur, die für erste Materialuntersuchungen anhand verschiedener Ausgangsstoffe und deren Gehalten variiert wird. Die insgesamt neun Änderungen der Basisrezeptur sind in Tab. 1 dargestellt. [10]

Tab. 1: Betonrezepturen für erste Brandversuche nach [10]

Rezeptur	Änderung bezogen auf Basisrezeptur
1	(Basis)
2	Reduzierter Anteil Hüttensandmehl, erhöhter Anteil Flugasche
3	Deutlich reduzierter Anteil Hüttensandmehl, deutlich erhöhter Anteil Flugasche
4	Austausch Aktivator
5	Ohne Microsilica
6	Nassstrom, Austausch Flugasche
7	Nassstrom, mit Schwindreduzierer
8	Reduzierter Anteil feines Hüttensandmehl
9	Reduzierter Anteil feines Hüttensandmehl, ohne Aktivator
10	Austausch Flugasche durch Bauxit

Die Beurteilung der Materialeigenschaften erfolgt über die Druck- sowie Biegezugfestigkeiten an Mörtelprismen als spezifische Kenngrößen. Weiterhin entscheidet das Verhalten unter Brandlast über die Auswahl der besten Betonrezeptur. Zur Beurteilung des Materialverhaltens unter Brandbeanspruchung wurden kleinformatige Prismen (4,0 x 4,0 x 16,0 cm<sup>3</sup>) hergestellt. Diese wurden annähernd mit der Normlast (EBA Brandkurve, vgl. Kapitel 2.3) in einem Muffelofen untersucht. In Bild 4 sind der verwendete Muffelofen mit eingebauter Betonprobe sowie die maßgebende Temperatur-Zeit-Kurve der EBA-Richtlinie "Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln" [12] und die tatsächlich beaufschlagten Temperatur-Zeit-Kurven dargestellt.

Zur Abbildung des ersten Lastfalls wird der Prüfkörper für 55 Minuten in den auf 1.200 °C vorgeheizten Muffelofen gesetzt und unmittelbar nach der Prüfzeit wieder herausgeholt. Im Unterschied zum dargestellten Lastfall wird beim zweiten Lastfall der Ofen nach 55 Minuten ausgeschaltet und der Prüfkörper bis zum vollständigen Abkühlen des Ofens darin belassen. [10]

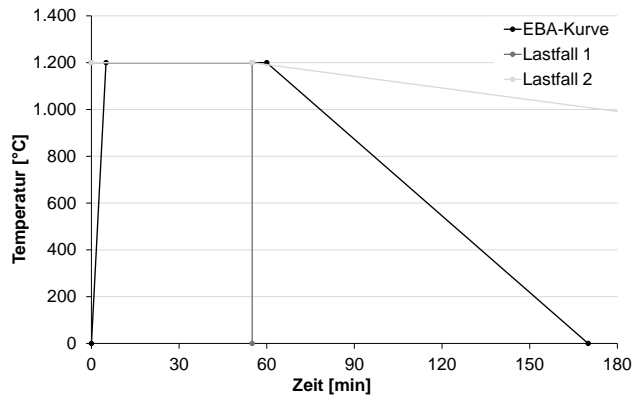
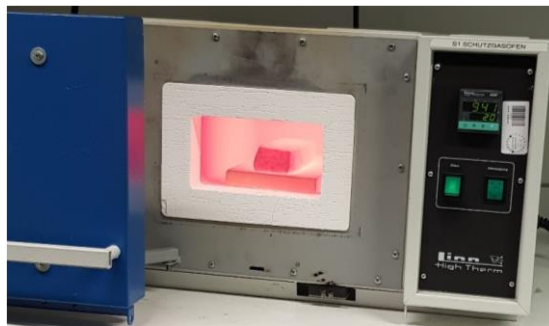


Bild 4: a) Linn High Term Muffelofen mit eingesetzter Materialprobe [10],  
b) Temperatur-Zeit-Kurven

Die Probekörper haben bei einer bestimmten Temperatur zwischen 1.100°C und 1.200°C ihren Schmelzpunkt (Eutektikum) erreicht und sintern. Das Material beginnt zu fließen und Verformungen sowie veränderten Materialeigenschaften sind die Folge. In Bild 5 sind exemplarisch die Probekörper der Rezepturen 3 und 8 dargestellt, die Verformungen sind deutlich zu erkennen. Hervorzuheben ist, dass es an keinem Probekörper zu Abplatzungen gekommen ist, unabhängig davon, ob eine langsame Ofenabkühlung (Lastfall 1) oder eine schlagartige Abkühlung (Lastfall 2) erfolgte. Eine Verformungsbehinderung, die mögliche Abplatzungen begünstigt, wurde im Rahmen der Rezepturentwicklung jedoch noch nicht berücksichtigt. Diese Versuche bilden die Basis für die Auswahl der Rezeptur, die für weitere Untersuchungen verwendet wird. [10]



Bild 5: Probekörper der Rezepturen 3 und 8 nach Temperaturbeaufschlagung nach [10]

Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse folgende in Tab. 2 dargestellte Rezepturen verwendet.

Tab.2: Zusammensetzung der verwendeten Mörtel- und Betonrezeptur

Komponente	Anteil im Mörtel [M.-%]	Anteil im Beton [M.-%]
Wasser	10,00	10,30
Hüttensand	6,00	4,31
Flugasche	18,00	9,21
Aktivator	2,75	1,72
Microsilica	1,50	1,85
Quarzsand F 36	17,20	-
Quarzsand 0,2-0,6	13,40	-
Quarzsand 1-2	22,50	-
Quarzsand 2-3	18,65	-
Quarzsand 0-2	-	43,13
Quarzsand 2-8	-	29,47

### 5. Eignungsuntersuchungen

Die Eignungsuntersuchungen bezüglich der Parameter Verarbeitbarkeit, Nachbehandlung, mechanische Materialkennwerte, Dauerhaftigkeit, Verbundeigenschaften und Brandverhalten des neu entwickelten Geopolymerbetons stehen im Fokus dieses Kapitels. Grundsätzlich existieren zwei Rezepturen des neuen Materials, eine für das Trockenspritzverfahren und eine für das Nassspritzverfahren. Aufgrund der jeweiligen verfahrenstechnischen Anforderungen ist diese Unterscheidung erforderlich. Des Weiteren kann jede Rezeptur sowohl als Mörtel, als auch als Beton verarbeitet werden. Da sich das Projekt KOINOR gegenwärtig noch in Bearbeitung befindet und nicht alle geplanten Untersuchungen zum derzeitigen Projektstand abgeschlossen sind, ist in Bild 6 das gesamte Versuchsprogramm dargestellt, wobei die noch durchzuführenden Untersuchungen grau hinterlegt sind. Die bereits durchgeführten Untersuchungen werden im Folgenden erläutert.

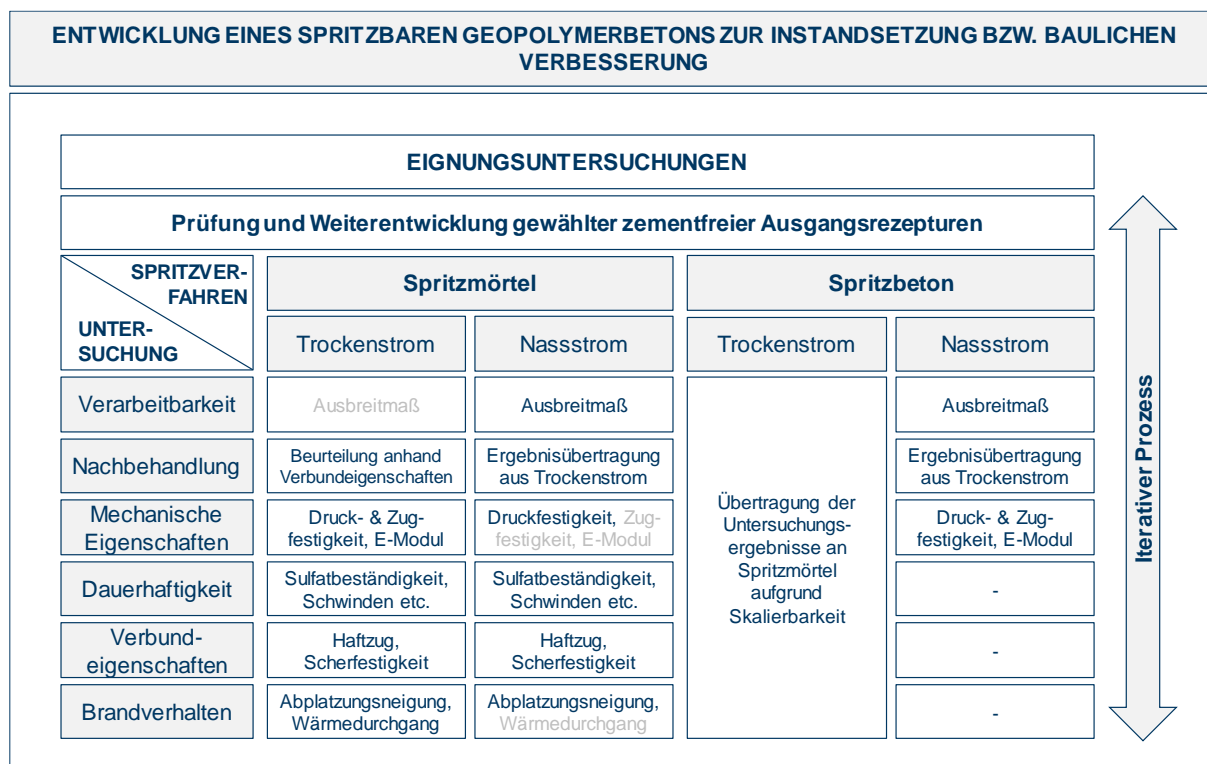


Bild 6: Eignungsuntersuchungen KOINOR

#### 5.1 Verarbeitbarkeit

Die Untersuchung der Verarbeitbarkeit des neu entwickelten Materials fand im ersten Schritt am Nassmörtel statt. Das Ausbreitmaß wurde an zwei Nassmörtelproben mit unterschiedlichem Wassergehalt nach DIN EN 1015-3 [16] zu drei Zeitpunkten untersucht (5, 30 und 60 Minuten nach Herstellung). In Bild 7 sind die Ergebnisse der Ausbreitversuche dargestellt. Es zeigt sich sowohl in den Versuchen mit dem Hägermann Ausbreittisch, als auch nach der augenscheinlichen Beurteilung der Konsistenz eine sehr gute Verarbeitbarkeit.

Die Untersuchung der Verarbeitbarkeit des Nassspritzbetons erfolgte nach DIN EN 12350-5 [17] über einen Zeitraum von 180 min. In Bild 8 sind die Ergebnisse der Ausbreitversuche von drei Untersuchungen dargestellt: Nassspritzbeton ohne Fließmittel, Nassspritzbeton mit Fließmittel bei 16,6°C und Nassspritzbeton mit Fließmittel bei 18,0°C. Es ist zu erkennen, dass das Fließmittel einen positiven Einfluss auf die Verarbeitbarkeit hat und im Geopolymerbeton funktioniert. Nach 120 Minuten liegt das Ausbreitmaß unter der Verwendung von Fließmittel noch über 550mm und erfüllt somit die Anforderungen an einen Spritzbeton.



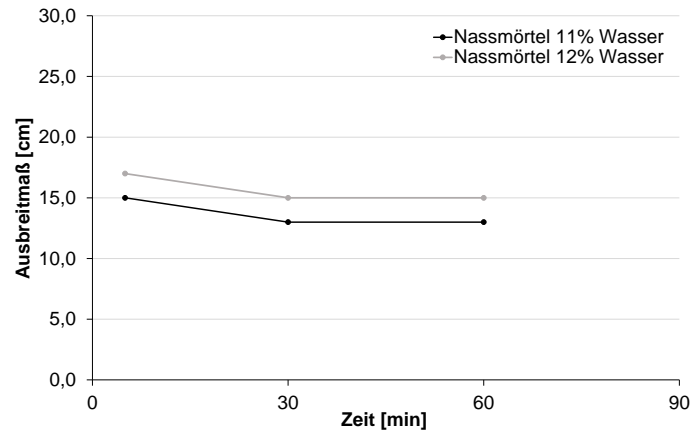


Bild 7: Ausbreitmaß nach DIN EN 1015-3 [16] mit dem Hägermantisch

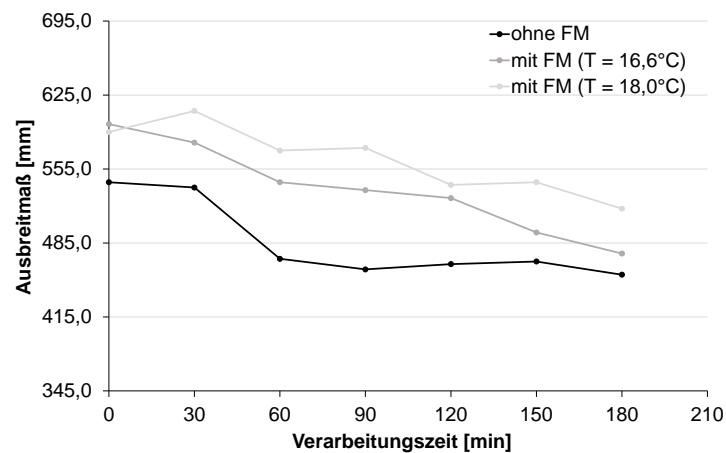


Bild 8: Einfluss der Verarbeitungszeit auf das Ausbreitmaß

## 5.2 Nachbehandlung

In einem weiteren Schritt wurden mögliche Nachbehandlungsmethoden untersucht, die einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität von Geopolymerbetonen haben, vor allem dann, wenn diese als Coating aufgetragen werden. Für diese Untersuchung wurde eine ca. drei Zentimeter dicke Spritzmörtelschicht sowohl im Trocken- als auch im Nassspritzverfahren auf herkömmliche Gehwegplatten aufgetragen (Bild 9). Im Anschluss wurde das Coating auf den unterschiedlichen Probenträgern sowohl mit verschiedenen chemischen Nachbehandlungsmitteln behandelt als auch mit einer dampfdurchlässigen Folie möglichst luftdicht eingedeckt. Als effektivste Nachbehandlungsmethode hat sich dabei das Abdecken mit der dampf- und durchlässigen Folie herausgestellt. Mithilfe dieser Nachbehandlung konnten Haftzugfestigkeiten des behandelten Spritzbetoncoatings von bis zu 2,0 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden, die für einen ausreichenden Verbund notwendig sind.

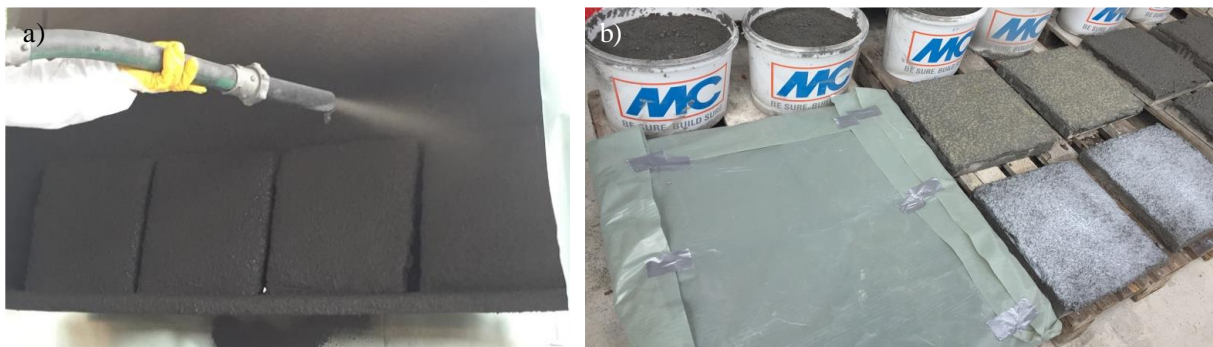


Bild 9: a) Trockenspritzprozess; b) Gehwegplatten mit nachbehandeltem Spritzmörtel

### 5.3 Mechanische Materialeigenschaften des Spritzmörtels

Zunächst wurden Trockenspritzversuche mit der ausgewählten Basisrezeptur im Spritzbetonversuchsstand der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt (Bild 10). Zur Ermittlung der charakteristischen Eigenschaften Druckfestigkeit, E-Modul sowie Spaltzugfestigkeit wurden nach vollständiger Aushärtung Bohrkerne aus der hergestellten Spritzpalette gezogen und ohne Brandbeaufschlagung geprüft [10].



*Bild 10: Applikation des Geopolymerspritzbetons im Spritzbetonversuchsstand der Ruhr-Universität Bochum nach [10]*

### 5.4 Mechanische Materialeigenschaften

Die Untersuchungen der mechanischen Materialeigenschaften des Mörtels erfolgten an Bohrkernen aus gespritzten Mörtelkörpern, während die Probekörper zur Untersuchung der mechanischen Materialeigenschaften des Betons aus Gründen der lokalen Verfügbarkeit in Schalungen gegossen wurden.

#### 5.4.1 Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul

##### **Spritzmörtel**

Die einaxiale Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 [18] wurde an Bohrkernen mit 100 mm Durchmesser ermittelt. Der Trockenmörtel erreichte eine mittlere Druckfestigkeit von 58,0 N/mm<sup>2</sup> nach 28 Tagen, der Nassmörtel von 20,6 N/mm<sup>2</sup> nach 24 h.

Die Druckfestigkeit ist für ein Instandsetzungssystem als sehr hoch zu bewerten, ebenso das Verhältnis von Druckfestigkeit zu E-Modul. Nach Provis & van Denter [19] ist eben dieses Verhältnis im Vergleich zu Normalbetonen grundsätzlich höher. Weiterhin ist die ermittelte Spaltzugfestigkeit verhältnismäßig hoch.

##### **Spritzbeton**

Für den Spritzbeton wurde die Druckfestigkeit an Zylindern mit 150 mm Durchmesser ermittelt. Diese ergab sich im Mittel für die Nassrezeptur ohne Fließmittel zu 25,48 N/mm<sup>2</sup> und unter Verwendung von Fließmittel zu 23,59 N/mm<sup>2</sup> bei üblichem Fließmittelgehalt und 22,68 N/mm<sup>2</sup> bei erhöhtem Fließmittelgehalt. Die Betonprobekörper unter Verwendung von Fließmittel erreichten somit eine um etwa 7,5 % bis 11 % geringere Druckfestigkeit.

#### 5.4.2 Elastizitätsmodul

##### **Spritzmörtel**

Der Elastizitätsmodul unter Druckbeanspruchung nach DIN EN 12390-13 [20] wurde bisher nur für das Trockenspritzverfahren ermittelt. Bohrkern mit 100 mm Durchmesser aus Spritzpaletten erreichten einen mittleren E-Modul von 28.550 N/mm<sup>2</sup>.

## Spritzbeton

Die E-Moduln des Festbetons (Nassrezeptur) wurden anhand von Zylindern gemäß Methode A der DIN EN 12390-13 [20] bestimmt. Der gemittelte E-Modul liegt bei 20.500 N/mm<sup>2</sup> und damit deutlich unterhalb von denen üblicher zementgebundener Betone mit vergleichbaren Druckfestigkeiten. Dieses Verhalten ist typisch für flugaschebasierte Geopolymerbetone. [21]

### 5.4.3 Biegezugfestigkeit

#### Spritzmörtel

Die Zugfestigkeit wurde aus der Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-6 [22] ermittelt. Geprüft wurde die Spaltzugfestigkeit bisher an Bohrkernen mit 100 mm Durchmesser aus Spritzpaletten, welche im Trockenspritzverfahren hergestellt wurden. Im Mittel erreichte das Material eine Spaltzugfestigkeit von 14,8 N/mm<sup>2</sup>, was in etwa einer Zugfestigkeit von 13,3 N/mm<sup>2</sup> entspricht (90% der Spaltzugfestigkeit).

#### Spritzbeton

Durchgeführt wurden statisch bestimmte Biegezugversuche an balkenförmigen Prüfkörpern gemäß DIN EN 14488-3 [23]. Die Prüfung erfolgte mittels eines weggesteuerten 4-Punkt-Biegezugversuchs. Im Mittel erreichte die Nassspritzrezeptur eine Biegezugfestigkeit von 2,6 N/mm<sup>2</sup>.

### 5.4.4 Dauerhaftigkeit

#### Spritzmörtel

Zur Überprüfung der Dauerhaftigkeit wurden bisher Untersuchungen zum Schwindverhalten als auch zur Sulfatbeständigkeit an Mörtelprismen (Herstellung in Anlehnung an DIN EN 196-1 [24]) durchgeführt. In Bild 11 ist das Schwindverhalten des Trockenmörtels bis zum Alter von 32 Tagen sowie des Nassmörtels (12% Wassergehalt) dargestellt.

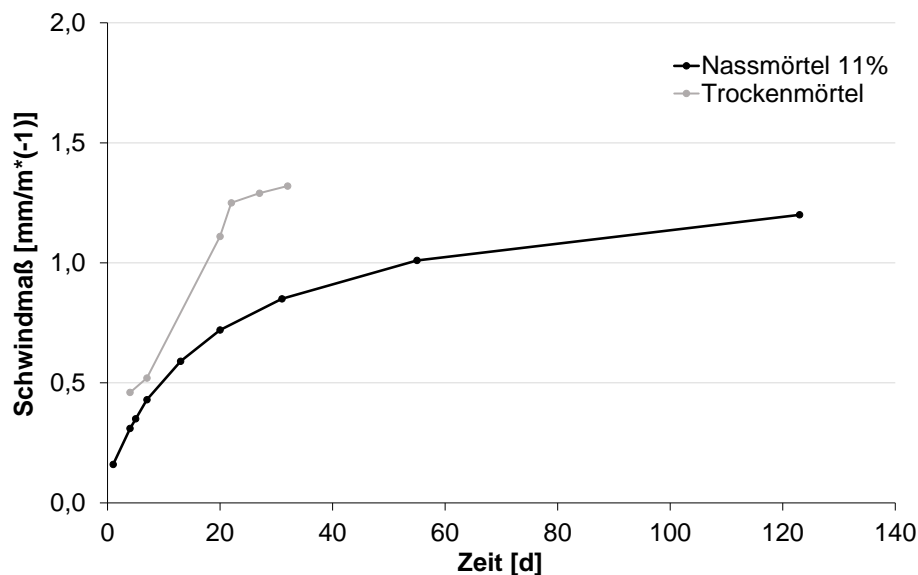


Bild 11: Entwicklung des Schwindmaßes des Nass- und Trockenmörtels

Bild 12 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen zur Sulfatbeständigkeit nach dem Wittekind Verfahren. Die Probekörper wurden bei 20°C für 13 Tage unter Wasser vorgelagert. Das Prüfkriterium des Wittekind-Verfahrens ist eine Dehnung von <0,5 mm/m nach 56 Tagen Sulfatlagerung, welche mit 0,03 mm/m erfüllt und sogar nach 91 Tagen mit 0,047 mm/m deutlich unterschritten wurde.

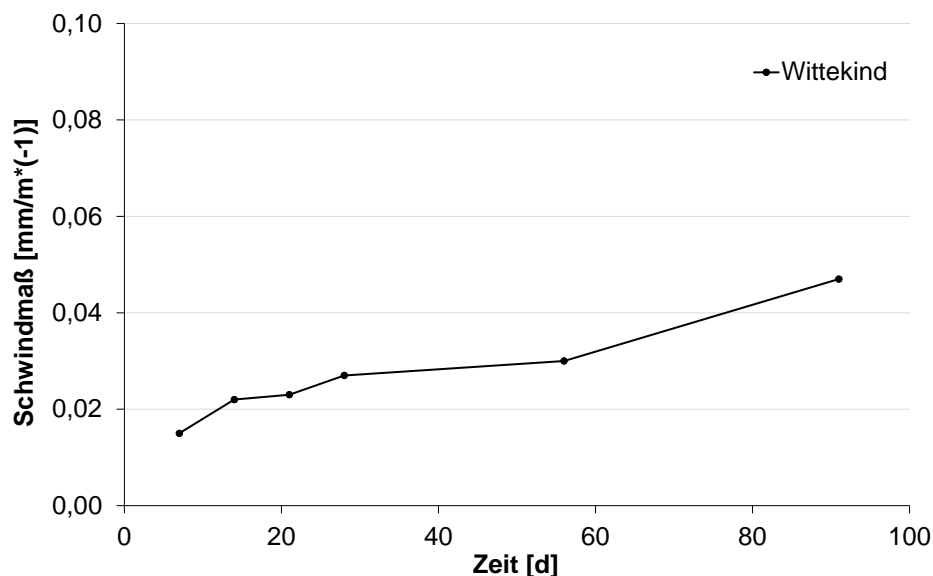


Bild 12: Sulfatbeständigkeit des Trockenmörtels

## 5.5 Verbundeigenschaften

Bei der brandschutztechnischen Ertüchtigung durch den vorgestellten Spritzmörtel bzw. Spritzbeton spielt die sogenannte Verbundfestigkeit eine zentrale Rolle, d. h. die dünne nachträglich applizierte Schicht des Instandsetzungssystems muss schlussendlich monolithisch mit der bestehenden Tunnelschale verbunden sein. Dazu wurde sowohl Untersuchungen bezüglich der Haftzugfestigkeiten durchgeführt als auch die Verbundeigenschaften mittels eines Scherversuchs bestimmt. Die Verbundfestigkeit wurde zum jetzigen Zeitpunkt ausschließlich am Spritzmörtel untersucht. Dabei betrug die Auftragsdicke ca. 3 bis 5 cm.

### 5.5.1 Haftzugfestigkeit

#### Spritzmörtel

Die Haftzugfestigkeit des neu entwickelten Spritzmörtels ist für den Einsatz der Tunnelinstandsetzung von besonderer Relevanz. Zur Abdeckung des Untergrundspektrums bestehender Tunnelbauwerke wurden in einem ersten Schritt großformatige Probekörper (ca. 120 x 220 cm<sup>2</sup>) aus Mauerwerk, Ortbeton sowie konventionellem Spritzmörtel hergestellt. Im zweiten Schritt wurde sowohl im Trocken- als auch im Nassspritzverfahren der Geopolymerspritzmörtel im Spritzbetonversuchsstand der Ruhr-Universität Bochum auf diese Untergründe aufgetragen Bild 13. Die Hauptanwendung der großformatigen Probekörper wird in Kapitel 5.5.2 erläutert.



Bild 13: Spritzbetonversuchsstand der Ruhr-Universität Bochum; Auftrag Geopolymerspritzmörtel auf Mauerwerk

Die für die Scherfestigkeitsprüfungen nicht benötigten Bereichen wurden genutzt, um Haftzugprüfungen durchzuführen. Die Vorbereitung der Prüfkörper erfolgt mit Hilfe eines

Kernbohrers nach DIN EN 1542 [25], welcher eine Bohrnut bis  $15 \pm 5$  mm in der Untergrundkonstruktion erzeugt. Nach Erstellen der Nut ist es erforderlich die Prüfflächen zu schleifen, um Verschmutzungen und Unebenheiten zu entfernen. Im Anschluss kann der kreisförmige Prüfstempel ( $50 \pm 0,5$  mm) auf die Prüfstelle geklebt werden. Nach vollständiger Aushärtung des Klebers wird die Prüfung mit dem in Bild 14 dargestellten Prüfgerät durchgeführt. Die Prüfung erfolgt bis zum Bruch automatisch.



Bild 14: Haftzugerät Gesamtansicht sowie Detailansicht

Insgesamt zehn Messstellen wurden gleichmäßig auf die jeweils zur Verfügung stehende Messfläche verteilt. Für die Ermittlung der Haftzugfestigkeiten wurden alle ausgewählten Messstellen nach dem beschriebenen Verfahren vorbereitet, im Anschluss geprüft und die erzielten Messwerte gemittelt. In Bild 15 sind diese gemittelten Ergebnisse für die drei Untergründe und zwei Spritzverfahren zusammenfassend dargestellt.

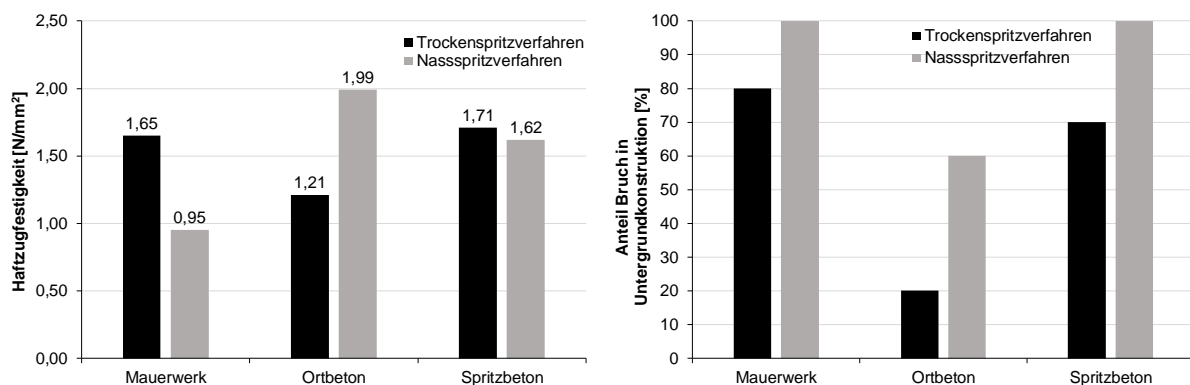


Bild 15: Zusammenfassung der Haftzugfestigkeitsprüfungen

Bei der Betrachtung der Haftzugergebnisse mit Mauerwerksuntergrund fällt die große Differenz zwischen den Messwerten der beiden unterschiedlichen Spritzverfahren auf. Die Analyse des großformatigen Probekörpers nach den Haftzugprüfungen ergab, dass sich beim Transport Risse gebildet haben, die die Festigkeit der Konstruktion deutlich beeinträchtigt und zu sehr niedrigen Haftzugwerten im Vergleich zum Nassspritzverfahren geführt haben. Unterstützt werden die Ergebnisse durch den Anteil der Brüche in der Unterkonstruktion von 100% im Nassspritzverfahren.

Die Analyse der Ortbetonprobekörper mit Spritzbetoncoating ergibt, dass die Haftzugfestigkeiten im Trockenspritzverfahren nur knapp 60% der Festigkeiten im Nassspritzverfahren betragen. Im Gegensatz zum Mauerwerk sind hier jedoch keine Beschädigungen in der Untergrundkonstruktion aufgetreten. Wird berücksichtigt, dass der Anteil an Brüchen in der Untergrundkonstruktion 20% beim Trockenspritzverfahren beträgt, ist anzunehmen, dass für

den Auftrag auf Ortbeton das Nassspritzverfahren hinsichtlich der Haftzugeigenschaften besser geeignet ist, der Haftverbund aber in beiden Verfahren als gut zu bewerten ist.

Die Haftzugfestigkeiten bei den Probekörpern mit Spritzbetonuntergrund liegen sehr nahe beieinander und sind vergleichbar. Der Verbund war bei allen Proben gewährleistet und es ist zu keinem Bruch in der Verbundfuge gekommen. 70% der Brüche in der Unterkonstruktion beim Trockenspritzverfahren und 100% beim Nassspritzverfahren deuten auf einen leicht besseren Verbund beim Nassspritzverfahren hin.

### 5.5.2 Scherfestigkeit

Zur Ermittlung der Verbundfestigkeit wurden daher umfangreiche Versuchsreihen am Scherversuchsstand der STUVA durchgeführt. Der Scherversuchsstand besteht dabei aus zwei übereinander angeordneten Stahlformteilen, wobei das Stahlformoberteil feststehend und das Stahlformunterteil mittels einer hydraulischen Presse horizontal verschieblich ist (Bild 16). Die einzelnen Probekörper wurden so in die Stahlform eingebaut, dass die Verbundfuge in der Mitte zwischen den beiden Stahlformteilen lag. Die Altoberfläche befand sich dabei in der unteren Stahlform, das Instandsetzungssystem in der oberen.

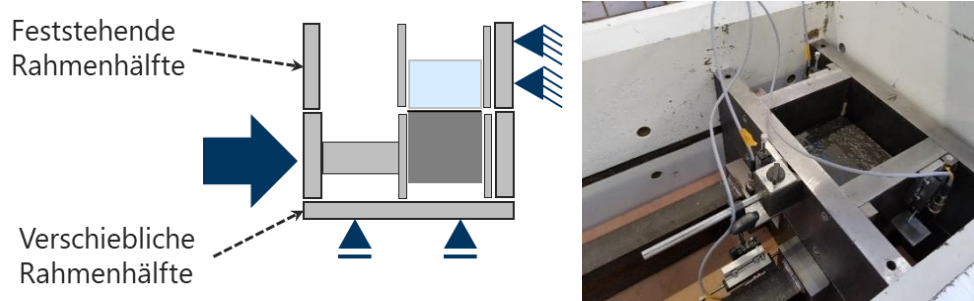


Bild 16: Probekörper in Stahlform

Aus den in Kapitel 5.5.1 beschriebenen großformatigen Probekörpern wurden für die Scherfestigkeitsversuche 30 quaderförmige Probekörper ( $19,0 \times 19,0 \times 19,0 \text{ cm}^3$ ) hergestellt. Diese teilen sich auf die drei Untergrundmaterialien Mauerwerk, Ortbeton und Spritzbeton sowie die zwei Herstellverfahren (Trocken- und Nassspritzverfahren) auf.

Exemplarisch sind die ermittelten Scherfestigkeiten am Beispiel der Oberfläche „Mauerwerk“ dargestellt. Es zeigt sich, dass die mittleren Scherfestigkeiten rund  $2,8 \text{ N/mm}^2$  (Trockenspritzverfahren) bzw.  $3,3 \text{ N/mm}^2$  (Nassspritzverfahren) betragen. Damit liegen die ermittelten Scherfestigkeiten im Bereich der maximalen Steinzugfestigkeit typisch anzutreffender Mauerwerkssteine. Bild 17 zeigt die beiden Stahlformteile nach Beendigung des Scherversuchs einer Mauerwerksprobe mit im Trockenspritzverfahren appliziertem Instandsetzungssystem. Es wird ersichtlich, dass die Scherfläche in beiden Stahlformteilen größtenteils aus Mauerwerk besteht. Daraus lässt sich ableiten, dass das Verbundversagen überwiegend in der Ebene des Mauerwerkssteins aufgetreten ist und somit knapp unterhalb der eigentlichen Verbundfuge. Ähnliches Verhalten ist auch bei den Probekörpern aus Beton aufgetreten.

Im Ergebnis bleibt festzuhalten, dass nach Durchführung aller Scherversuche die mittlere Scherfestigkeit im Bereich von minimal  $2,1 \text{ N/mm}^2$  (Ortbeton; Nassspritzverfahren) bis maximal  $3,3 \text{ N/mm}^2$  (Mauerwerk, Nassspritzverfahren) liegt. In allen Versuchen lag die Scherfläche dabei in der Ebene der Altoberfläche. Es lässt sich also daraus schließen, dass die Verbundfestigkeit zwischen neuem Instandsetzungssystem und Altoberfläche maßgeblich von der Scherfestigkeit bzw. Zugfestigkeit des Baustoffs der Bestandstunnelschale abhängt. Von einem ausreichend guten Verbund des neuen Instandsetzungssystems kann somit ausgegangen werden.



Bild 17: Links: Stahlformunterteil mit Mauerwerk, Rechts: Stahlformoberteil mit Instandsetzungssystem

5.6 Branduntersuchungen

5.6.1 Wärmedurchgangsverhalten

**Spritzmörtel**

Um das Wärmedurchgangsverhalten zu optimieren, wurde die Grundrezeptur im Rahmen einer Machbarkeitsstudie durch verschiedene Additive sukzessive erweitert. Aus der Grundrezeptur und vier weiteren Varianten wurden kubische Probekörper hergestellt. Im Inneren dieser Probekörper wurden nach einem festen Schema Thermolemente platziert, mithilfe derer die Temperaturverteilung innerhalb der Probekörper bei Temperaturbeaufschlagung gemessen werden konnte (Bild 18 a). Basierend auf den Ergebnissen der Primäruntersuchungen wurde dazu die maximale Temperatur auf 1.100 °C reduziert, um eine Verformung der Probekörper zu vermeiden und eine exakte Erfassung der Temperaturverteilung durch die Thermolemente sicherzustellen. Die Untersuchungen wurden in einem größer dimensionierten Muffelofen als im Rahmen der Rezepturentwicklung (Kapitel 4) durchgeführt. Aus technischen Gründen entspricht auch bei diesem Ofen die Aufheizgeschwindigkeit nicht der in der Norm festgelegten Aufheizphase der Brandkurve. Aufgrund der im Vergleich zur EBA-Kurve längeren Aufheiz- und Abkühlphasen des Ofens und der normgerechten Dauer der Vollbrandphase von 55 Minuten bei Maximaltemperatur, ist der Expositionszeitraum im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie größer als durch die EBA-Richtlinie vorgesehen, sodass von einer Worst-Case-Betrachtung ausgegangen werden kann. Daher stellen diese Untersuchungen im Rahmen der Machbarkeitsstudie einen adäquaten Ansatz zur Bestimmung des Wärmedurchgangs im Brandfall dar.

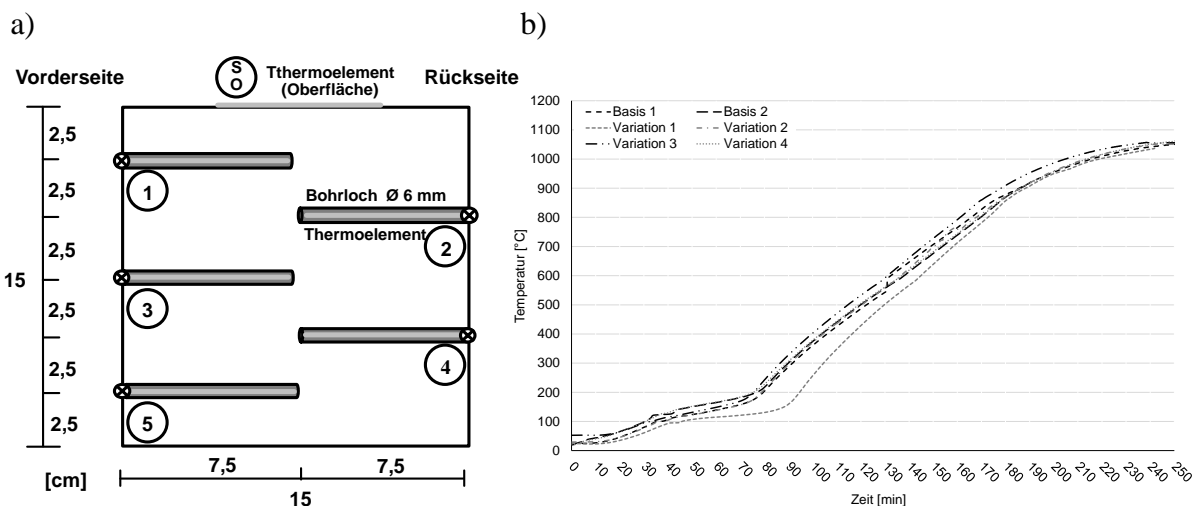


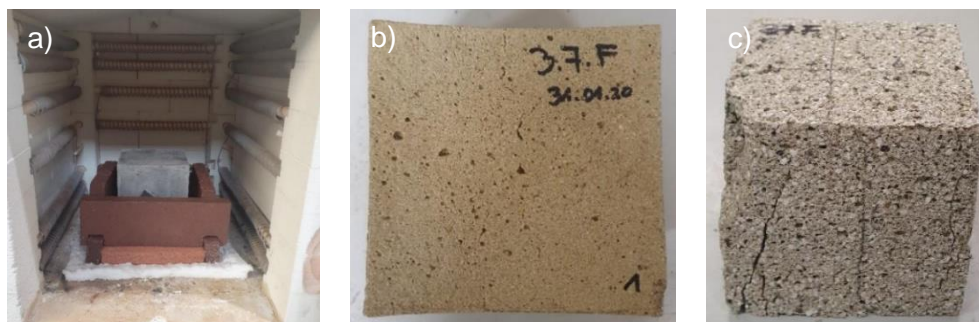
Bild 18: a) Anordnung der Thermolemente; b) Temperatur-Zeit-Kurven für Thermolemente 5 aller getesteten Rezepturen

Die dargestellten Kurven zeigen exemplarisch die Temperaturentwicklung für das Thermoelement 5 (Bild 18 b) innerhalb der verschiedenen Probekörper. Die Kurven zeigen, dass die Probekörper der Rezepturen 3, 4 und 5 einen ähnlichen Temperaturanstieg aufweisen wie die beiden Probekörper der Grundrezeptur 1. Nur Rezeptur 2, bei der die Grundrezeptur mit Mikrohohlkugeln, dem sog. „Luftpolymer“ als Additiv angepasst wurde, zeigt während der Aufheizphase eine um bis zu 100°C niedrigere Temperatur. Die Messkurven der anderen Thermoelemente bestätigen diese Beobachtung.

### 5.6.2 Materialverhalten nach Temperaturbeaufschlagung

#### Spritzmörtel

Für die Untersuchung der Druckfestigkeit des Materials wurden weitere Probekörper erstellt und mit 1.200°C für 55 Minuten beaufschlagt. In Bild 19 ist der Versuchsaufbau (a) dargestellt, der neben dem Probekörper auch eine Schutzvorrichtung aus Schamottestein beinhaltet, der den Ofen vor unerwarteten Schmelzvorgängen des Materials schützt. Nach der Temperaturbeaufschlagung war eine Verformung des Probekörpers (b) festzustellen. Aufgrund dieser Verformung war es vor weiterführenden Untersuchungen notwendig, diesen auf das größtmögliche Maß (10 x 10 x 10 cm<sup>3</sup>) zuzuschneiden und die Prüfflächen zu schleifen. Der Probekörper ist in Bild 19 (c) dargestellt. Es sind deutliche Risse zu erkennen, die in dieser Form an der Oberfläche nicht erkennbar waren.



*Bild 19: a) Probekörper vor Brandbeaufschlagung, b) Probekörper nach Brandbeaufschlagung, c) Probekörper nach Zuschnitt für Druckfestigkeitsprüfung*

Die gemittelte Druckfestigkeit der beaufschlagten Probekörper beträgt 14,4 N/mm<sup>2</sup> und somit ca. 25% der Druckfestigkeit vor der Temperaturbeaufschlagung.

In einer weiteren Untersuchung wurde der in Bild 20 dargestellte Verbundprobekörper (Kapitel 5.5.2) mit einer Temperatur von 1.100°C für 55 Minuten beaufschlagt und im Anschluss optisch begutachtet. Es ist zu erkennen, dass die im Ortbeton entstandenen Risse sich durch das Coating bis an die Oberfläche fortpflanzen, im Coating selbst jedoch keine weiteren Risse auftreten.



*Bild 20: Verbundprobekörper aus Ortbeton und Spritzmörtel nach Temperaturbeaufschlagung*



## 6. Verfahrenstechnik

### 6.1 Versuchskonzept

Parallel zu den materialtechnologischen Untersuchungen wurden verfahrenstechnische Parameter analysiert, um einen arbeitssicherheitstechnisch sinnvollen und wirtschaftlichen Auftrag aller entwickelten Rezepturen zu gewährleisten. Bild 21 stellt die zu analysierenden Aspekte dar.

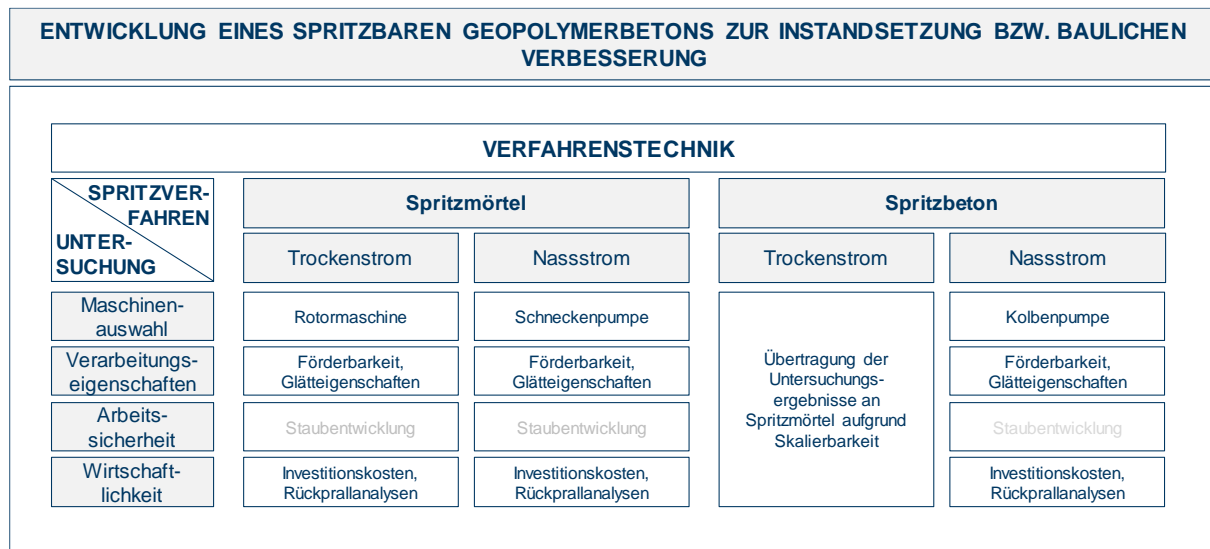


Bild 21: Versuchskonzept zur Bestimmung verfahrenstechnischer Randbedingungen

Zur Bestimmung der verfahrenstechnischen Randbedingungen wurde in Spritzversuchen jeweils die passende Maschinenteknik gewählt, die Verarbeitungseigenschaften bestimmt, die Arbeitssicherheit bewertet sowie die Wirtschaftlichkeit berücksichtigt.

### 6.2 Versuchsdurchführung und -ergebnisse

In einem ersten Schritt wurden für die einzelnen Verfahren Untersuchungen zur Maschinen- auswahl durchgeführt. Für das Trockenspritzverfahren beispielsweise bieten sich vor allem Rotormaschinen zur Materialförderung an, da diese eine unterbrechungslose und gleich- mäßige Materialförderung zur Düse gewährleisten. Zur Maschinenauswahl wurden mehrere Maschinen in einer Kosten-Nutzen-Analyse gegenübergestellt und auf Grundlage des Spritz- bildes, des Arbeitsschutzes, des Rückpralls, des Reinigungsaufwandes sowie der Wirtschaft- lichkeit bewertet.

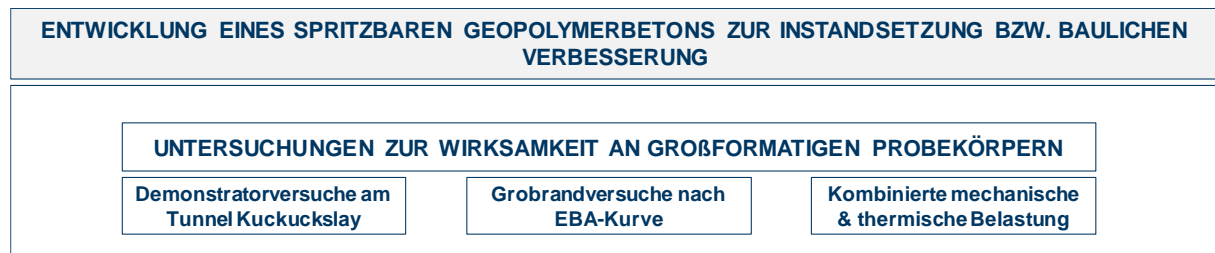
Generell sind das Spritzbild und die damit verbundene Spritzbetonqualität sowohl beim Spritzmörtel als auch beim Spritzbeton im Trocken- und Nassstrom als gut zu bewerten. Die Materialförderung erfolgt mit den ausgewählten Maschinen problemlos und der aufgetragene Spritzmörtel/-beton ließ sich leicht glätten. Der Rückprall bei beiden Versuchen wurde als gering eingeschätzt.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Verbundforschungsprojekt KOINOR wurde ein spritzbarer Geopolymerbeton als Brandschutzcoating entwickelt. Es konnte anhand diverser Untersuchungen (Bild 6) zur Verarbeitbarkeit, Nachbehandlung, mechanischen Eigenschaften, Dauerhaftigkeit, Verbund- eigenschaften sowie des Brandverhaltens gezeigt werden, dass das entwickelte Material in allen untersuchten Kategorien gute Ergebnisse liefert. Der entwickelte Geopolymerbeton ist sowohl im Nass- als auch im Trockenspritzverfahren einsetzbar. Es zeigt sich, dass eine Übertragung der Erkenntnisse aus den Untersuchungsergebnissen an Spritzmörtel auf

Spritzbeton, aufgrund der Skalierbarkeit möglich ist. Auch dieser weist bisher gute Ergebnisse auf.

Im nächsten Forschungsschritt sind Untersuchungen zur Wirksamkeit an großformatigen Probekörpern (Bild 22) geplant. Im Detail sollen Demonstratorversuche am Tunnel Kuckuckslay, Großbrandversuche sowie Versuche mit kombinierter mechanischer sowie thermischer Belastung durchgeführt werden. Weiterhin soll das in Bild 6 vorgestellte Versuchsprogramm vervollständigt werden und um weiterführende Versuche zur Dauerhaftigkeit (Wasserdurchlässigkeit, Frost-Tausalz-Widerstand, Chloridmigration, Säurewiderstand) ergänzt werden.



*Bild 22: Geplante Untersuchungen zur Wirksamkeit*

## Literatur

- [1] Haack, A.:  
1 Einführung und Zielsetzung. In: ASFINAG, DB Netz AG, STUVA (Hrsg.): Sachstandsbericht 2017 „Instandsetzungsstrategien und -verfahren für Verkehrstunnel“. Forschung + Praxis 50. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 2018, S. 1-3.
- [2] DB Netz AG;  
Tunnel- und Erdbau Technik. I.NPF 23(T), 2019.
- [3] Goj, K., Fischer, O., Ettelt, B.:  
Instandsetzung und Nachrüstung, Tunnel Pfaffenstein – Nachrechnung eines Straßentunnels im Bestand. In: Taschenbuch für den Tunnelbau (DGGT, Hrsg.), Verlag Ernst & Sohn, S. 76-81, 2018.
- [4] Buchwald, A.:  
Was sind Geopolymere? Stand von Forschung und Technik sowie Chancen und Bedeutung für die Fertigteileindustrie. Betonwerk + Fertigteile-Technik, 2, 42-49, 2006.
- [5] Davidovits, J.:  
Geopolymer Chemistry and Applications. Institut Geopolymere, 3<sup>rd</sup> ed., 1999.
- [6] Pistol, K., Rickard, W. D. A., und Gluth, Gregor, J. G.:  
Mechanische Hochtemperatureigenschaften von flugaschebasierten Geopolymerbetonen. Bautechnik 93, 2016, Heft 8, 521–530.
- [7] Vogt, O., Ukrainczyk, N. und Koenders, E:  
Geopolymere als Spezialbaustoff. Nachrichten aus der Chemie, 65, 1198–1202, 2017.
- [8] Uebachs, S.:  
Geopolymerbeton und seine Eigenschaften. BetonWerk International, 2, 42-46, 2018.
- [9] Jüngst, C.; Gabl, Th.; Pucher, M.; Reichl, Ch.; Schnabl, R.; West, T.:  
2 Ausgangslage. In: ASFINAG, DB Netz AG, STUVA (Hrsg.): Sachstandsbericht 2017 „Instandsetzungsstrategien und -verfahren für Verkehrstunnel“. Forschung + Praxis 50. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 2018, S. 4-25.
- [10] Hammer, A.-L. et al.:  
KOINOR – Brandschutztechnische Ertüchtigung und Nachrüstung unterirdischer Verkehrsbauelemente. Tunnel 06/2019, S. 27-39.
- [11] ZTV-ING (2018):  
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Stand 01/2018.
- [12] Eisenbahn Bundesamt (EBA) (Hrsg.):  
Richtlinie Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und Betrieb von Eisenbahntunneln. 2008.

- [13] Janson, R.:  
Fire Spalling of Concrete. Dissertation, KTH Stockholm, Schweden, 2013.
- [14] Richtlinie 853 (2018):  
Eisenbahntunnel planen, bauen und instandhalten. DB Netz AG, Frankfurt am Main, Stand 09/2018.
- [15] Ring, B. et al.:  
Auswirkungen eines Brandes während der Bauausführung im Tunnel Follo – Untersuchungen zum Brandschaden an der Tübbingschale. Standsicherheitsberechnungen und Instandsetzung. In: Forschung + Praxis 53: STUVA Tagung 2019, Bauverlag, Gütersloh, 2019, S. 183-189.
- [16] DIN EN 1015-3:2007-05:  
Prüfverfahren für Mörtel und Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [17] DIN EN 12350-5:2019-09  
Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [18] DIN EN 12390-3:2009-07:  
Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [19] Provis, J., und van Deventer, J.:  
Alkali Activated Materials - State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM (unedited version). s.l.: Springer, 2014.
- [20] DIN EN 12390-13:2014-06:  
Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [21] Yang, K.-H. und Song, J.-K.:  
Empirical Equations for Mechanical Properties of Ca(OH)<sub>2</sub>- Based Alkali-Activated Slag Concrete. ACI Materials Journal, 109, 2012, 431–440.
- [22] DIN EN 12390-6:2010-09:  
Prüfung von Festbeton – Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [23] DIN EN 14488-3:2006-09:  
Prüfung von Spritzbeton – Teil 3: Biegefestigkeiten (Erstriss-, Biegezug- und Restfestigkeit) von faserverstärkten balkenförmigen Betonprüfkörpern. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [24] DIN EN 196-1:2016-11:  
Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [25] DIN EN 1542:1999-07:  
Prüfverfahren – Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

## Zu den Autoren

Dr.-Ing. Anna-Lena Hammer

Studium Bauingenieurwesen und Promotion an der Ruhr-Universität Bochum, seit 2009 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb  
*anna-lena.hammer@rub.de*

Sebastian Kube, M.Sc.

Studium Bauingenieurwesen an der Ruhr-Universität Bochum, seit 2018 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb  
*sebastian.kube@rub.de*

Dr.-Ing. Joachim Budnik

Studium Bauingenieurwesen und Promotion Ruhr-Universität Bochum; 1986-1990 Bundesanstalt für Straßenwesen; 1990 bis 2016 Verschiedene Positionen als Leiter der Baustofftechnologie in der Transportbetonindustrie (Readymix, Cemex), der Porenbetonindustrie (Xella) und der Bauausführung (Heitkamp); seit 2016 Leiter der Baustofftechnologie bei der PORR GmbH & Co. KGaA in Düsseldorf  
*joachim.budnik@porr.de*

Dipl.-Ing. Christoph Klaproth

Studium Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen, seit 2016 Projektingenieur bei der STUVA e. V., Bereich Tunnelbau & Bautechnik  
*c.klaproth@stuva.de*

Dr.-Ing. Götz Vollmann

Studium Bauingenieurwesen und Promotion Ruhr-Universität Bochum; 1999-2001 Bau- und Projektleitung im SF-Bau, seit 2005 Oberingenieur Lehrstuhl Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb  
*goetz.vollmann@rub.de*

Dipl.-Min. Eugen Kleen

Diplom an der TU Clausthal-Zellerfeld mit Schwerpunkt „Chemische Verfahrenstechnik“. Anschließend Auslandstätigkeit in Südafrika und Südamerika bei Bergbau-Gesellschaften. Seit 1984 Mitarbeiter bei der MC-Bauchemie und heute verantwortlich für den Bereich „Mineralische Baustoffe und Betontechnik“  
*eugen.kleen@mc-bauchemie.de*

Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes

Studium Bauingenieurwesen RWTH Aachen; Promotion Universität Wuppertal; 1993-2005 verschiedene Tätigkeiten in Planung, Bau und Forschung für den Tunnelbau; seit 2005 Professur für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb Ruhr-Universität Bochum  
*markus.thewes@rub.de*