

# Applizierung eines Nachbehandlungsgels (Wassertensidmischung) auf geschalte Betonflächen im Tunnelbau

Andreas Schaab und Andreas Gerdes

## Zusammenfassung

Wie andere technische Bereiche wird auch das Bauwesen im zunehmenden Maße durch Megatrends beeinflusst. Das gilt insbesondere für den Klimawandel. So soll durch Entwicklungen im Bereich der Bindemitteltechnologie die produktionsbedingte CO<sub>2</sub>-Freisetzung drastisch herabgesetzt werden (Vermeidung), auf der anderen Seite führen bereits heute die heißen Sommer in Deutschland zu Einschränkungen bei der Bauausführung (Anpassung). Beide Entwicklungen fordern Veränderungen bei den eingesetzten Baustoffen und Additiven, aber auch bei den Bauweisen. Es ist nachvollziehbar, dass dies insbesondere für die Nachbehandlung von Stahlbetonbauteilen gilt. Die neuen Generationen an Bindemitteln mit deutlich reduzierten Anteilen an Portlandzementklinker, eingesetzt bei erhöhten Temperaturen und geringen Werten für die Luftfeuchtigkeit, erfordern längere Nachbehandlungszeiten, während derer der Wasserverlust praktisch vollständig vermieden werden sollte. Andernfalls wird sich das Gefüge der Betonrandzone nicht so entwickeln können, wie es für eine hohe Dauerhaftigkeit des Bauteils erforderlich wäre. Um bereits heute eine qualitativ hochwertige Qualität der Betonrandzone durch ausreichende Nachbehandlung zu gewährleisten, wurde ein neuartiges Nachbehandlungsgel entwickelt, das, vereinfacht ausgedrückt, Wasser mit einer speziellen Tensidkombination in ein Gel überführt. Der Wasseranteil beträgt dabei über 99 %. Der Anteil der hochwirksamen Tensidkombination beträgt weniger als 1 %, weshalb nach einer einfachen Reinigung mit Wasser keine störenden Rückstände auf der Betonoberfläche verbleiben. Die Wirkung der Nachbehandlungsqualität wurde für ein Pilotprojekt im Labormaßstab überprüft. Dabei konnte eine Qualität bei der Nachbehandlung nachgewiesen werden, wie sie an einem C35/45 mit langsamer Festigkeitsentwicklung bei einer dreitägigen Unterwasserlagerung nachweisbar ist. In Kürze sollen diese Ergebnisse nochmals im Realmaßstab an einem Tunnelbauprojekt verifiziert werden.

## 1 Allgemeines

Die globale Erwärmung unseres Lebensraumes nimmt in der aktuellen öffentlichen Diskussion einen hohen Stellenwert ein, auch weil sich durch den Klimawandel unsere Lebensgrundlage mehr oder weniger stark verändern wird. Aus Sorge vor den Folgen der Klimaerwärmung haben sich eine Vielzahl der Staaten im Pariser Klimaabkommen zu einer spürbaren Reduktion des Treibhausgases CO<sub>2</sub> verpflichtet. Beton, als unser universellster Baustoff, trägt durch seine hohen herstellbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen in der öffentlichen Wahrnehmung mit zur Klimaerwärmung bei. Deshalb arbeitet die Zement- und Bauindustrie seit längerer Zeit an einer kontinuierlichen Reduktion dieser Emission. Deshalb wird in den nächsten Jahren eine neue Generation von Zementen, hergestellt mit einer niedrigeren CO<sub>2</sub>-Freisetzung, die seit Jahrzehnten eingesetzten Zemente verdrängen. Dies wird auch Einfluss auf die Betoneigenschaften haben, vor allem bei jungem Beton.

Wichtige Eigenschaften des Betons in Bezug auf Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit werden neben der Betonzusammensetzung vor allem durch den Einbau und der nach dem Einbau vorzunehmenden Nachbehandlung des Betons bestimmt. Eine Nachbehandlung stellt sicher, dass der Betonrandzone ausreichend

Feuchtigkeit zur Zementhydratation zur Verfügung steht. Dies ist entscheidend, um eine hohe Dichtigkeit des Gefüges zu erreichen, was sich u. a. in einem geringen Kapillarporenanteil ausdrückt. Damit wird auch das Risiko von Schwindrissen durch Austrocknung niedrig gehalten. Die Notwendigkeit einer guten und intensiven Nachbehandlung ist schon lange bekannt, sie war bereits in dem Zeitraum mit überwiegender Verwendung des klassischen Portlandzements CEM I von großer Bedeutung. Die Zemente mit geringerem Klinkeranteil werden aber tendenziell eine längere Nachbehandlungsdauer benötigen bzw. wesentlich sensibler auf eine unzureichende Nachbehandlung reagieren. Daraus lässt sich für alle Akteure der Wertschöpfungskette ein neues und wichtiges Handlungsfeld herleiten. Technische Lösungen müssen dabei wirksam sein, ohne dass die Produktivität gegenüber der aktuellen Bauweise allzu sehr zu beeinträchtigt wird.

## 2 Nachbehandlungsziele und Methoden

Die Nachbehandlung von Betonbauteilen hat im Wesentlichen zwei Hauptziele:

- a) Reduktion von Temperaturdifferenzen zwischen Betonoberfläche und Atmosphäre, um Risse infolge temperaturinduzierter Zwangsspannungen zu vermeiden. So sollte die Betonoberflächentemperatur möglichst nicht mehr als 15 K über der Lufttemperatur liegen, um eine Rissbildung infolge Temperaturzwang zu vermeiden.
- b) Sicherstellung einer für die Zementhydratation notwendigen Wassermenge, um einen irreversiblen Abbruch der zugrundeliegenden chemischen Reaktionen sicher zu vermeiden. Wasser, welches zuvor über die Bauteiloberfläche verdunstet, steht nicht mehr für die Hydratation zur Verfügung und führt zu Gefügestörungen bzw. zu einer erhöhten Porosität. Damit verbunden ist ein reduzierter Eindringwiderstand gegenüber werkstoffaggressiven chemischen Verbindungen, was dann die Schädigung der Betonrandzone bewirkt.

Nachfolgend wollen wir uns primär auf die Sicherstellung eines hohen Hydratationsgrades der oberflächennahen Betonrandzone fokussieren, auch weil die neuen Zementtypen eine moderate Reaktionskinetik aufweisen, d. h. die freigesetzte Hydratationswärme pro Zeiteinheit ist geringer, so dass prinzipiell niedrigere Temperaturdifferenzen zu erwarten sind.

Prinzipiell lassen sich zwei Verfahrenstypen zur Nachbehandlung und damit zur Erhöhung des Hydratationsgrades der Betonoberfläche unterscheiden:

### a) Ersatz des verdunsteten Wassers

Bei diesem Ansatz wird durch das regelmäßige Aufspritzen von Wasser auf die Betonoberfläche der trocknungsbedingte Wasserverlust ausgeglichen. Bei kontinuierlichen Verfahren wird mittels geschlitzter Schläuche oder anderen technischen Einrichtungen, die ein kontinuierliches Aufsprühen von Wasser (z. B. mit Airfog) ermöglichen, der junge Beton ständig mit Wasser versorgt. Dabei entsteht eine Art Wasserfilm auf der Betonoberfläche, der ein unkontrolliertes Austrocknen sicher verhindert. Bei kleineren und/oder gut zugänglichen Bauteilen ist diese Vorgehensweise möglich, bei größeren Bauteilen kann der Aufwand in Zeit und Kosten sehr groß werden, bzw. durch den weiteren Baufortschritt nicht umsetzbar sein.

### b) Verhindern des Wasserverlustes

Bei größeren Flächen, wie z. B. beim Verkehrswegebau, ist eine Nachbehandlung durch den Ersatz des Wassers nicht zweckmäßig bzw. sehr aufwendig. Deshalb wurden bauchemische Produkte entwickelt, die nach dem Aufsprühen auf den Beton eine dünne Schicht bilden, welche den Durchtritt des Wassers in Form von Wasserdampf drastisch reduziert. Die größere Zahl der Produkte basiert auf Polymer- oder Wachsemulsionen. Es werden aber auch Systeme auf Epoxidharz-Basis eingesetzt. Hier ist in der Regel eine nachfolgende Beschichtung mit einer Polymerbeschichtung vorgesehen, so dass

die Nachbehandlung praktisch zum Teil des Beschichtungssystems wird. Aus diesen filmbildenden Eigenschaften leiten sich auch die Nachteile dieses Verfahrens ab. Die Oberfläche wird quasi versiegelt, was den Feuchtehaushalt im Betoninneren längerfristig beeinflusst. Auch können nachfolgende Arbeiten an der Oberfläche, wie z. B. eine Tiefenhydrophobierung oder die Applikation einer Versiegelung, erst nach dem chemischen Abbau dieser Beschichtungen erfolgen. Die Abbaugeschwindigkeit wird dabei durch die Alkalität des Betons und die Wirkung von UV-Strahlung bestimmt. Bei neu erstellten Betonflächen als Teil einer Straße haben wir beide Faktoren vorliegen, im Innenbereich bzw. bei Tunneln wirkt nur die hohe Alkalität des Betons, um den Abbau organischer Verbindungen zu bewirken. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass diese Verfahren zwar effizient sind, aber Einschränkungen im Bauablauf nach sich ziehen können, die nur eingeschränkt zu beeinflussen sind. Diese Tatsache führt deshalb zum Verbot von Nachbehandlungsmitteln an Arbeitsfugen und geschalteten Betonoberflächen im Geltungsbereich der ZTV-ING. Aus der Beschreibung dieser Vor- und Nachteile leitet sich direkt die Notwendigkeit einer alternativen Lösung ab, bei der diese Einschränkungen vermieden werden.

### c) Kombination beider Wirkprinzipien

Es ist naheliegend, dass eine Kombination beider zuvor beschriebenen Verfahren die Nachteile der einzelnen Verfahren minimieren könnte. Diese Idee wurde im Rahmen einer Konzeptstudie verfolgt. Bei diesem technischen Ansatz sollten beide Nachbehandlungsprinzipien, der Ersatz von Wasser und das Verhindern des Wasserverlustes, in einem Produkt umgesetzt werden, ohne dass die Betonoberfläche mit einem störenden Film verschlossen wird.

## 3 Neuartiges Nachbehandlungsgel

Dieser zuvor beschriebene technische Ansatz konnte am besten durch ein Nachbehandlungsgel realisiert werden. Das Nachbehandlungsgel ist vereinfacht ausgedrückt Wasser, das mit einer speziellen Tensidkombination in ein Gel überführt wurde. Der Wasseranteil liegt dabei zwischen 80 und 99 %, der Anteil der hochwirksamen Tensidkombination ist dabei niedriger als 1 %. Bei der Entwicklung der Tensidkombination wurde auf deren Umweltverträglichkeit sehr viel Wert gelegt. Deshalb wurden Rohstoffe, die üblicherweise für kosmetische Produkte verwendet werden, ausgewählt. Die eingesetzten Tenside bauen sich gemäß den gesetzlichen Vorgaben biologisch ab.

Das Nachbehandlungsgel wird auf die junge, bzw. frisch entschaltete Betonoberfläche aufgetragen und bildet dabei einen geschlossenen Gelfilm. Durch diesen Gelfilm wird der Trocknungsverlust, wie bei einem klassischen Nachbehandlungsmittel, drastisch reduziert. An der alkalischen Oberfläche destabilisiert sich durch den gewollten chemischen Abbau der Tensidkombination das Gel langsam und setzt dabei Wasser frei, was durch den hydratisierenden Beton aufgenommen werden kann. Dadurch werden also beide Nachbehandlungsverfahren, Absperrung der Betonoberfläche (Gelfilm) und Bereitstellen von Wasser (gesteuerter Gelabbau), in einem Produkt zusammengeführt.

Nach Beendigung der Nachbehandlung mit dem Gel bleibt nur eine sehr geringe Menge an Tensiden auf der Betonoberfläche haften, die den optischen Eindruck der Betonoberfläche praktisch nicht beeinflusst. Im Außenbereich werden diese durch den Regen entfernt, im Innenbereich können die verbliebenden Tenside abgewaschen werden. Danach können weitere Maßnahmen zur Oberflächenbearbeitung des Betons ausgeführt werden, wobei im Vorfeld der Sorgfalt halber eine Verträglichkeitsprüfung angeraten ist.

## 4 Versuchsprogramm zum Nachweis der Nachbehandlungswirkung

Die Wirkung dieses Nachbehandlungsgels sollte für ein Tunnelbauprojekt vor einem Einsatz zuerst im Labormaßstab überprüft werden. Dazu wurden vergleichend verschiedene Nachbehandlungsmethoden in ihrer Wirkung überprüft. Aus einer Beton-Charge (C35/45) mit langsamer Festigkeitsentwicklung wurden 38 Würfel hergestellt und am Folgetag ausgeschalt. In dieser Zeit verblieben die Würfel im Tunnel. Anschließend wurden die Würfel unterschiedlich nachbehandelt:

- A. Wasserlagerung (3 Tage)
- B. Nachbehandlungswagen (3 Tage)
- C. Nachbehandlungsgel
- C1: Auftragsmenge 400 g/m<sup>2</sup>
- C2: Auftragsmenge 700 g/m<sup>2</sup>
- D. Paraffin Curing (175 g/m<sup>2</sup>)
- E. Kunststoffdispersion (200 g/m<sup>2</sup>)

Bei der chemischen Nachbehandlung (C-E) wurde lediglich eine definierte Würfelseite nachbehandelt. Die Auftragsmenge richtete sich nach den Herstellerangaben bzw. nach den Herstellerempfehlungen. Die Nachbehandlung „endete“ nach drei Tagen, anschließend wurden die Würfel weitere vier Tage bis zu der Lieferung an zwei externe Labore im Tunnelklima in trockenem Zustand belassen.

### 4.1 Untersuchungsmethoden

Es folgten Untersuchungen an den Betonwürfeln, anhand derer die Nachbehandlungsqualität in der Betonrandzone bewertet wurde. Folgende Untersuchungen wurden hierzu durchgeführt:

- Mikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen
- Elektrische Widerstandsmessung (Wenner Prüfung)
- Messung des Elektrolytwiderstandes (Würfelformen mit vorab eingebauten V4A Elektroden), siehe Abbildung 1
- Nachträgliche Beschichtungsapplikation auf nachbehandelter Betonoberfläche
- Untersuchung der Rückstände der Nachbehandlungsmittel

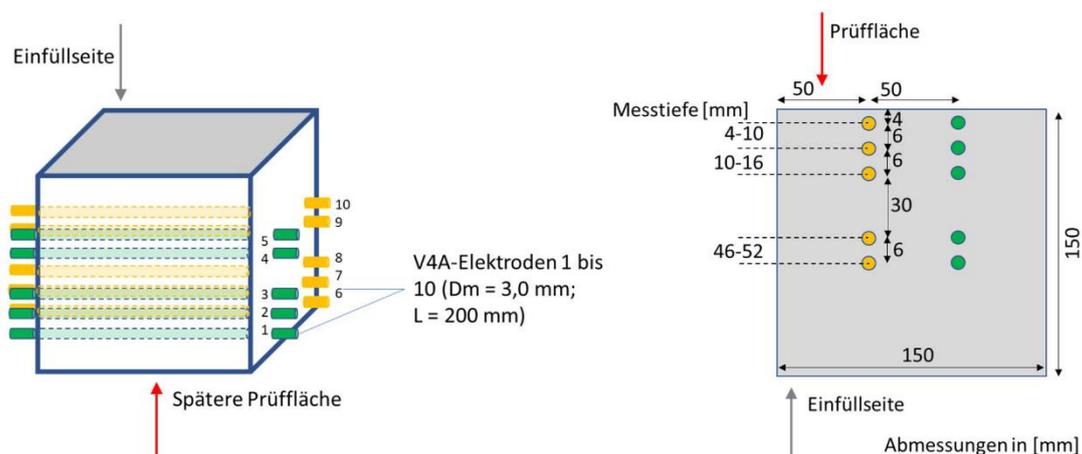


Abb. 1: Skizze zu den Probekörpern mit eingebauten V4A-Elektroden; links: Frontalansicht, rechts: Seitenansicht

## 5 Gutachterliche Einschätzung

Die Gutachterliche Beurteilung und die Untersuchung der Prüfkörper erfolgte durch Prof. Dr.-Ing. Thorsten Stengel vom Ingenieurbüro SGS in München [1], aus der nachfolgend zitiert wird.

Die Beurteilung der Qualität der Nachbehandlung erfolgte durch die Messung des Elektrolytwiderstands. Der (spezifische) Elektrolytwiderstand von Beton ist im Wesentlichen abhängig vom Wassergehalt (d. h. dem Porenvolumen des Zementsteins, dem Sättigungsgrad der Poren sowie der Porengrößenverteilung) und dem Ionengehalt der Porenflüssigkeit. Bei gleichem Ionengehalt der Porenflüssigkeit und gleichem Sättigungsgrad ist der Elektrolytwiderstand somit ein Maß für das Porenvolumen bzw. die Porengrößenverteilung des Zementsteins. Das Porenvolumen bzw. die Porengrößenverteilung des Zementsteins ist bei gleicher Betonzusammensetzung abhängig vom w/z-Wert und der Umsetzung des Bindemittels und somit auch ein Indikator für die Qualität der Nachbehandlung.

Bei schlechter Nachbehandlung verdunstet oberflächennah frühzeitig ein Teil des noch nicht chemisch gebundenen Anmachwassers, sodass für die ablaufende Hydratation des Bindemittels weniger Wasser zur Verfügung steht und in der Folge die Hydratation gebremst oder sogar gestoppt wird. Dies führt dazu, dass das Porenvolumen größer bzw. die Porengrößenverteilung hin zu größeren Poren verschoben ist. Auch eine frühe Carbonatisierung kann zu einer Verringerung des oberflächennahen Porengehalts führen, die Luft- und Wasserpermeabilität bleibt aber im Vergleich erhöht.

Um das Porenvolumen und die Porengrößenverteilung und damit die Güte der Nachbehandlung anhand von Elektrolytwiderstandsmessungen qualitativ bzw. vergleichend zu bestimmen, muss der Sättigungsgrad bei allen zu untersuchenden Proben nahe 100 % liegen, d. h. die Poren müssen vollständig mit Wasser gefüllt sein. Dies kann z. B. durch eine ausreichend lange Lagerung unter Wasser erreicht werden; problematisch ist hierbei jedoch, dass durch das von außen eindringende Wasser ggf. die Hydratation unreakierter Bindemittelanteile wieder beginnt und es außerdem zu einer Auslaugung bzw. Veränderung des Ionengehalts der Porenflüssigkeit kommen kann. Beides führt zu einer Vergrößerung des Elektrolytwiderstands. Unter Berücksichtigung der o. g. Zusammenhänge wurde für die Beurteilung der Messergebnisse wie folgt vorgegangen:

- Zum Vergleich werden die Messergebnisse der Serie „Unterwasserlagerung nach dem Ausschalen (Serie A)“ herangezogen.
- Bei den Proben der Serie A wird die Hydratation im oberflächennahen Bereich wegen des ständig verfügbaren Wassers am wenigsten gestört. Die Gesamtporosität und die Porengrößenverteilung wird daher die vergleichsweise niedrigsten Werte annehmen. Ein leistungsfähiges Nachbehandlungsmittel sollte daher sowohl bzgl. der Elektrolytwiderstände als auch bzgl. des Porenvolumens möglichst vergleichbare Ergebnisse zur Serie A liefern.

Sowohl die tiefenabhängige Elektrolytwiderstandsmessung (2-Elektrodenmessung) als auch die Messung nach Wenner, aber auch die Bestimmung des Porenvolumens zeigen, dass die Serie C2 vergleichbare Ergebnisse zur Wasserlagerung (Serie A) ergibt. Damit ist die Serie C2 die einzige Variante, bei der alle drei angewendeten Untersuchungsmethoden vergleichbare Ergebnisse zur Wasserlagerung (Serie A) erbrachten.

Akzeptable Ergebnisse bzgl. der oberflächennahen Elektrolytwiderstandsmessung (2-Elektrodenmessung) haben sonst nur die Serien C1 und E ergeben; bei beiden Serien ist jedoch der Elektrolytwiderstand an der Oberfläche (Wenner) bzw. das Porenvolumen nicht vergleichbar zur Wasserlagerung (Serie A).

Die im Vergleich zur Wasserlagerung höheren Elektrolytwiderstände (Wenner) sowie der geringere Porenraum der Serien B und C1 sind wahrscheinlich auf eine frühe Austrocknung und Carbonatisierung, d. h. Verringerung des Ionengehalts und Verdichtung der Poren, zurückzuführen.

Die hohen Elektrolytwiderstände (Wenner) der Serien D und E sind u. a. in den oberflächlich per Augenschein noch erkennbaren Rückständen der Nachbehandlungsmittel begründet.

In Anbetracht der o. g. Ergebnisse und Beurteilung gemäß den eingeführten Bewertungskriterien hat sich die Nachbehandlungsmethode C2 als besonders leistungsfähig erwiesen. Aufgrund der Neuartigkeit des Nachbehandlungsmittels sollte nicht weniger als 700 g/m<sup>2</sup> des Nachbehandlungsgels appliziert werden. Die Applizierung erfolgt am besten in zwei Arbeitsgängen.

Die Beurteilung von Rückständen [2] auf der Betonoberfläche erfolgte lichtmikroskopisch, durch die Messung des Benetzungswinkels von Wasser und durch Infrarotspektroskopie. Auf den Betonoberflächen, die mit dem Nachbehandlungsgel Serie C nachbehandelt wurden, konnte visuell und lichtmikroskopisch keine signifikante Filmbildung an der Oberfläche festgestellt werden. Die Benetzbarkeit der Oberfläche im Vergleich mit der nicht nachbehandelten Würfelrückseite wurde nicht beeinflusst, eine wichtige Voraussetzung für eine nachfolgende Beschichtung mit wässrigen Betonbeschichtungen auf Epoxidharzbasis. Eine für einen unbehandelten Beton übliche gute partielle Benetzbarkeit konnte bei allen Probekörpern sowohl vor als auch nach einer Reinigung (Wasser und Wurzelbürste) erkannt werden. Der Nachweis von organischen Verbindungen des Nachbehandlungsmittels kann nicht abschließend erfolgen. In der Randzone der nachbehandelten Oberfläche können zwar Banden erkannt werden, die den Inhaltsstoffen des Nachbehandlungsmittels entsprechen, diese können jedoch auch von anderen organischen Verbindungen, wie beispielsweise vom verwendeten Trennmittel, stammen. Auf Grund der Zusammensetzung des Nachbehandlungsmittels ist nur von einer geringfügigen Anreicherung der dann wasserlöslichen organischen Verbindungen auszugehen.

Der Einsatz des neuartigen Nachbehandlungsgels erfolgt in Kürze an einem Tunnelbauprojekt. Dabei werden die Untersuchungen im Labor nochmals durch Messungen im Realmaßstab verifiziert.

## **6 Zusammenfassung**

Die Verbesserung der Nachbehandlungsqualität der oberflächennahen Betonradzone durch Erhöhung des Hydratationsgrads des Zements wird an Bedeutung gewinnen, denn die zukünftigen Zemente werden einen gegenüber heute deutlich reduzierten Portlandzementklinkeranteil aufweisen, um die Ziele zur CO<sub>2</sub> Reduktion einzuhalten. Dies wird zu zeitlich längeren Nachbehandlungszeiten führen, die auch noch sensitiver auf Qualitätsschwankungen reagieren werden.

Zur Verbesserung der Nachbehandlung der Betonoberfläche haben sich flüssige Nachbehandlungsmittel auf horizontalen Betonoberflächen bewährt. Auf geschalteten Betonoberflächen können diese häufig nicht eingesetzt werden, weil diese die verbleibende Betonoberfläche durch Rückstände negativ beeinflussen können. Deshalb ist diese Anwendung im Geltungsbereich der ZTV-ING [3] bisher nicht zugelassen.

Durch ein neuartiges Nachbehandlungsgel wird, vereinfacht ausgedrückt, Wasser mit einer speziellen Tensidkombination in ein Gel überführt. Der Wasseranteil beträgt dabei bis zu 99 %, der Anteil der hochwirksamen Tensidkombination ist weniger als 1 %. Deshalb verbleiben am Ende der Nachbehandlung nach einer einfachen Reinigung mit Wasser keine störenden Rückstände auf der Betonoberfläche, was für die Ausführung einer nachfolgenden Polymerbeschichtung eine besondere Bedeutung hat.

Die Wirkung des neuen Nachbehandlungsgels im Vergleich zu bereits praktisch eingesetzten Nachbehandlungskonzepten wurde durch Prof. Dr.-Ing. Thorsten Stengel wissenschaftlich an Laborproben untersucht. Mit dem zweimaligen Auftrag des Nachbehandlungsgels konnten Betonoberflächenqualitäten nachgewiesen werden, wie man sie nach einer dreitägigen Unterwasserlagerung als Nachbehandlung findet. In Kürze werden die Tests an einem Tunnelprojekt im Realmaßstab nochmals überprüft, bevor dies dann im Regelbetrieb angewandt werden kann.

## 7 Literatur

- [1] Ingenieurbüro Schiessl, Gehlen, Sodeikat GmbH, Gutachterliche Stellungnahme 20/191 - Beratung Nachbehandlungsmittel (unveröffentlichter Bericht)
- [2] Bericht Nr. 2020-088-1 der IONYS AG, Werkstofftechnologische Untersuchungen Rückstände des Nachbehandlungsmittels (unveröffentlichter Bericht)
- [3] ZTV-ING, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (04/2019) Teil 3; Abschnitt 2; Kapitel 7.5.3. Bundesanstalt für Straßenwesen

## 8 Autoren

### **Dipl.-Ing. Andreas Schaab**

HOCHTIEF Infrastructure GmbH  
Technical Competence Centrum, Materials  
Farmstraße 91-97  
64546 Mörfelden Walldorf

### **Prof. Dr.-Ing. Andreas Gerdes**

Institut für Funktionelle Grenzflächen  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen