

SYMPOSIUM

17. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 11. März 2021

Dauerhafter Beton

Richtige Nachbehandlung



Ulrich Nolting, Frank Dehn, Vanessa Mercedes Kind (Hrsg.)

SYMPOSIUM

Dauerhafter Beton

Richtige Nachbehandlung

SYMPOSIUM

17. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 11. März 2021

Dauerhafter Beton
Richtige Nachbehandlung

Herausgegeben von
Ulrich Nolting, Frank Dehn, Vanessa Mercedes Kind

Mit Beiträgen von

Oliver Blask	Martin Langer
Joachim Budnik	Marcel Löffler
Frank Fingerloos	Thomas Richter
Andreas Gerdes	Andreas Schaab
Wibke Hermerschmidt	Enrico Schwabach
Christoph Müller	Frank Spörel
Hilmar Müller	

Veranstalter:
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
76131 Karlsruhe
VDB – Verband Deutscher Betoningenieure e. V.
Regionalgruppen 9 und 10
InformationsZentrum Beton GmbH
Gerhard-Koch-Straße 2+4
73760 Ostfildern

Titelbildcollage

Alle Bilder von stock.adobe.com, Oben links: © coco, Oben mitte: © ThomBal, Oben rechts: © mimadeo, Unten links: © FreshPaint, Unten rechts: © Jorge

Hinweis der Herausgeber

Für den Inhalt namentlich gekennzeichnete Beiträge ist die jeweilige Autorin bzw. der jeweilige Autor verantwortlich.

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>



The cover page is licensed under a Creative Commons Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>

Print on Demand 2021 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISBN 978-3-7315-1073-4

DOI 10.5445/KSP/1000128088

Vorwort

Die sachgerechte Nachbehandlung von Beton weist bekanntermaßen einen entscheidenden Einfluss auf dessen Qualität und Eigenschaften auf. Sowohl für die Festigkeitsentwicklung des jungen Betons als auch für den Widerstand gegen äußere Einflüsse und die damit verbundene Dauerhaftigkeit ist eine ausreichende und sorgfältige Nachbehandlung zwingend erforderlich.

Das visuelle Erscheinungsbild moderner Betonstrukturen gewann in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung und damit auch die Anforderungen an deren Oberflächenqualität. Fortschritte in der Entwicklung neuartiger Zemente sowie Veränderungen der klimatischen Bedingungen im Laufe der Zeit bedingen wiederum eine Anpassung der bisherigen Vorgehensweisen. Zielsetzung dieses 17. Symposiums Baustoffe und Bauwerkserhaltung ist es, Ihnen einen Überblick über die Methoden und Ansätze einer geeigneten Nachbehandlung aufzuzeigen, anhand derer den verschiedenen Herausforderungen begegnet werden kann.

Das Programm der Veranstaltung beginnt mit einer Einführung in die Notwendigkeit der Nachbehandlung und zeigt die möglichen Folgen im Fall eines unsachgemäßen Umgangs auf. Anschließend erfolgt die Präsentation sowohl jahrelang bewährter als auch neuer, innovativer Nachbehandlungsmethoden und deren jeweiliger Funktionsweisen. Aufbauend auf diesen theoretischen Grundlagen stellen Vertreter des Hoch-, Tief-, Wasser-, und Verkehrswegebbaus die Herausforderungen an die Nachbehandlung der jeweiligen Bereiche des Betonbaus vor und präsentieren anhand spannender Praxisbeispiele bereits realisierte Lösungen.

Die Veranstalter

Inhalt

	Vorwort	I
Christoph Müller Wibke Hermerschmidt	Dekarbonisierung: Weniger CO ₂ - mehr Nachbehandlung?	1
Frank Fingerloos Enrico Schwabach	Einfluss der Nachbehandlung auf die Eigenschaften der Betonrandzone	13
Thomas Richter	Nachbehandlung - Grundlagen, Regelwerk, Randbedingungen	25
Oliver Blask	Wirkungsweise chemischer Nachbehandlungsmittel	35
Frank Spörel Hilmar Müller	Nachbehandlung im Wasserbau	45
Martin Langer	Nachbehandlung im Verkehrswegebau	59
Joachim Budnik Marcel Löffler	Nachbehandlung im Ingenieur- und Hochbau	67
Andreas Schaab Andreas Gerdes	Applizierung eines Nachbehandlungsgels (Wassertensidmischung) auf geschalte Betonflächen im Tunnelbau	79
	Programm der Veranstaltung	87
	Autorenverzeichnis	89
	Übersicht über Tagungsbände vergangener Symposien	91

Dekarbonisierung: Weniger CO₂ – mehr Nachbehandlung?

Christoph Müller und Wibke Hermerschmidt

Zusammenfassung

Die Verwendung klinkereffizienter Zemente (z. B. CEM II- und CEM III-Zemente) ist ein wichtiger Baustein auf dem Weg der Betonbauweise in Richtung Klimaneutralität. Viele Betontechnologen verbinden mit diesen Zementen eine gegenüber Portlandzement im Allgemeinen verzögerte Festigkeitsentwicklung, aus der sich je nach Ausprägung eine verlängerte Nachbehandlung ergeben kann. In welchen Fällen ist diese Sichtweise gerechtfertigt und was bedeutet eine weitere Absenkung des Klinker/Zement-Faktors für die Bauausführung? Dieser Beitrag stellt Informationen und Daten zur Verfügung, die helfen können, diese Fragen zu beantworten.

1 Klinkereffiziente Zemente

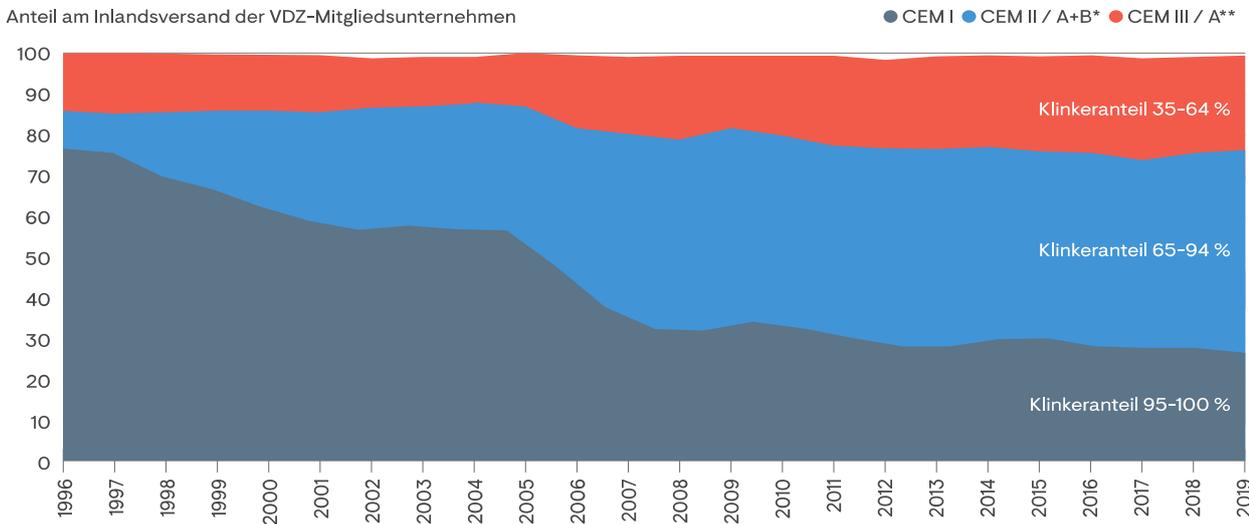
In Summe belaufen sich die CO₂-Emissionen der Zementindustrie in Deutschland aktuell auf etwa 20 Mio. t CO₂. Dies entspricht rund 2 % der nationalen CO₂-Emissionen. Ein Rückblick zeigt, dass es den deutschen Zementherstellern gelungen ist, seit 1990 sowohl spezifisch als auch absolut eine CO₂-Minderung in einer Größenordnung von 20 bis 25 % zu erreichen. Dies ist ein wichtiger Fortschritt. Entscheidend für die bisherigen CO₂-Minderungserfolge waren neben Verbesserungen der thermischen Effizienz vor allem zwei Faktoren: die Steigerung der Klinkereffizienz im Zement sowie der verstärkte Einsatz biomassehaltiger alternativer Brennstoffe. Auf dem Weg zur Klimaneutralität werden aber noch sehr viel tiefgreifendere Schritte notwendig sein. Wie diese Transformation bis 2050 gelingen kann, zeigt die Studie „Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien“ des VDZ [1].

Anhand von zwei Dekarbonisierungspfaden zeigt die Studie, welche CO₂-Einsparungen entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton bis zum Jahr 2050 erreicht werden können. Mit konventionellen Minderungsmaßnahmen würde es bis 2050 gelingen, die CO₂-Emissionen um 36 % gegenüber 2019 zu verringern (-50 % gegenüber 1990). Insofern müssen für eine volle Klimaneutralität komplett neue Wege in der Herstellung des Zements und seiner Anwendung im Beton gegangen werden. Ein wichtiges Handlungsfeld auf dem Weg zu einer klimaneutralen Betonbauweise ist vor allen Dingen der zunehmend geringere Einsatz von Zementklinker, der zu noch deutlich CO₂-effizienteren Zementen und Betonen führen wird.

Klinkereffiziente Zemente kommen in Deutschland seit vielen Jahren zum Einsatz, auch weil dadurch die CO₂-Emissionen aus der Zementherstellung reduziert werden können. Den Trend zu klinkereffizienten Zementen im Produktmix der vergangenen Jahre zeigt Abbildung 1.

Die Studie „Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien“ des VDZ [1] zeigt unter Berücksichtigung für Deutschland verfügbarer Ausgangsstoffe und entsprechender Annahmen in der Betonherstellung und -anwendung neuer klinkereffizienter Zemente das mögliche Zementportfolio für zwei Szenarien auf (Abbildungen 2 und 3). Für die Berechnungen zum Ortbeton wurde angenommen, dass zur Herstellung von Innen- und normalen Außenbauteilen des Hochbaus vermehrt Zemente mit geringerem Klinkeranteil, wie zum Beispiel CEM II/C-Zemente (zwischen 50 und 65 % Portlandzement-

klinker) verwendet werden. So erhöht sich der Anteil dieser Zemente in diesem Marktsegment im ambitionierten Referenzszenario auf 50 % in 2030 bzw. auf 100 % in 2050. Im klimaneutralen Szenario liegt der Anteil von CEM II/C- Zementen in den genannten Anwendungen bereits in 2030 bei 100 %. In 2050 werden für die genannten Anwendungen ausschließlich CEM VI-Zemente eingesetzt. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen das jeweilige Zementportfolio und den zugrunde gelegten Rohstoffmix.



Anmerkungen: Differenz zu 100 % verteilt sich auf CEM IV, CEM V und sonstige Bindemittel;
 * CEM II / A+B unterteilt sich größtenteils in Portlandhütten-, Portlandkalkstein- und Portlandkompositzemente;
 ** Deckt in Deutschland ca. 95 % aller CEM III-Zemente ab

Abb. 1: Trend zu klinkereffizienten Zementen im Produktmix der vergangenen Jahre [1]

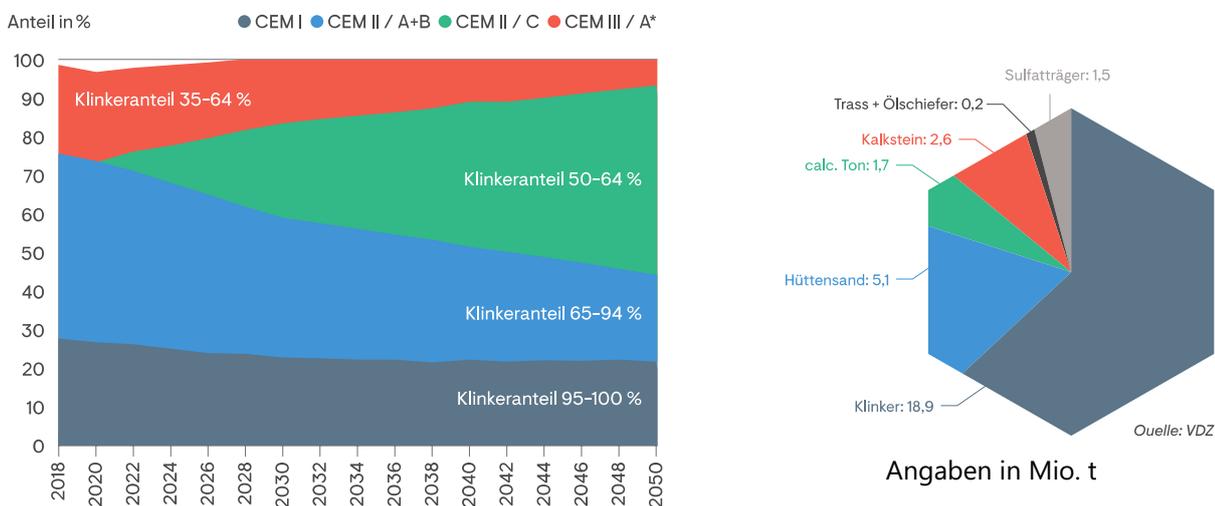


Abb. 2: Zementportfolio (links) und Rohstoffmix (rechts) im ambitionierten Referenzszenario [1]

Bei konstruktiven Fertigteilen - in diese Produktgruppe fallen unter anderem großformatige Wand- und Deckenplatten aus Beton - wurde für das ambitionierte Referenzszenario das gleiche Zementportfolio zugrunde gelegt wie im Status quo. Hintergrund ist, dass hier heute ein schnelleres Aushärten des Betons (kürzere Ausschulfristen) und damit höhere Klinkergehalte im Zement erforderlich sind. Erst im klimaneutralen Szenario werden hier klinkereffizientere CEM II/C-Zemente verwendet (2030: 20 %, 2050: 30 %). Entsprechende Annahmen wurden für Betonwaren getroffen.

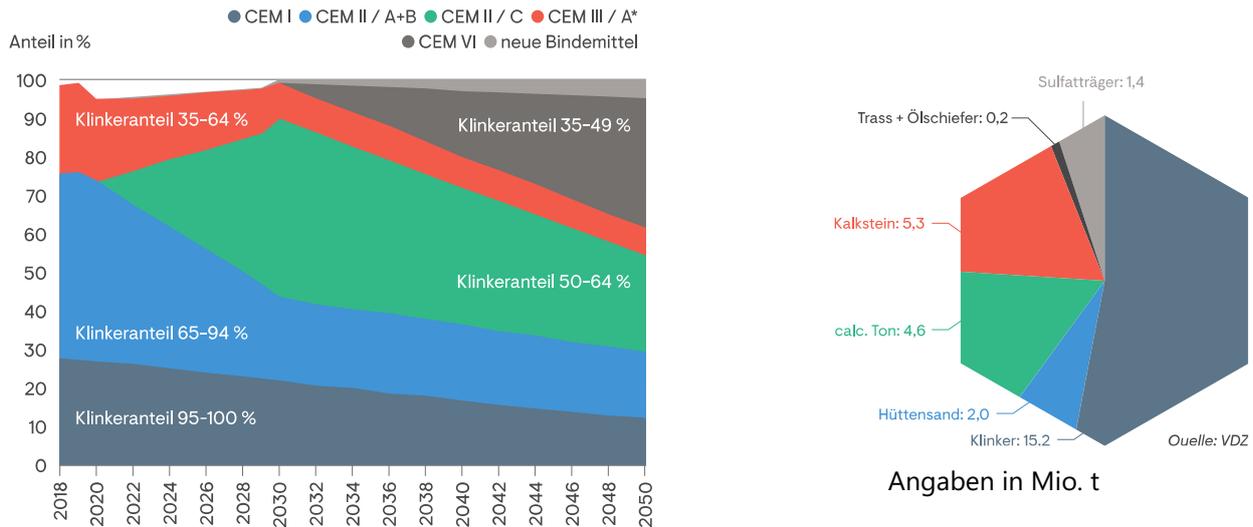


Abb. 3: Zementportfolio (links) und Rohstoffmix (rechts) im Klimaneutralitätsszenario [1]

Nachfolgend werden zunächst einige grundlegende Zusammenhänge zu den Themen Ausschalfrieten, Schutz und Nachbehandlung von Beton angesprochen. Diese Inhalte wurden [4, 5] entnommen. Im Anschluss folgen Informationen/Ergebnisse zum Einfluss klinkereffizienter Zemente auf diese Parameter.

2 Ausschalfrieten, Schutz und Nachbehandlung von Beton

2.1 Festigkeitsentwicklung und Ausschalfrieten

Bei besonderen Anforderungen an die Frischbetonverarbeitung und das Festbetonverhalten können von der Zementart und der Zementfestigkeitsklasse abhängige Einflüsse genutzt werden. Werden sehr frühe Ausschalfrieten für Ortbetonbauteile gefordert oder muss bei niedrigen Außentemperaturen entschalt werden, so eignen sich dafür die auch in der Werkfertigung bevorzugten Zemente mit hoher Anfangsfestigkeit. Zur Verminderung der Hydratationswärmeentwicklung in massigen Bauteilen eignen sich LH-Zemente mit niedriger Hydratationswärmeentwicklung bzw. Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 N mit langsamer Festigkeitsentwicklung und einem etwas längeren Nachbehandlungsbedarf.

Ein Betonbauteil darf erst ausgeschalt bzw. entformt werden, wenn der Beton ausreichend erhärtet ist, um die Beanspruchungen während des Bauzustands mit ausreichender Sicherheit ohne Schädigung aufzunehmen. So ist beispielsweise für die *Gefrierbeständigkeit* eine Frühfestigkeit von etwa 5 N/mm² bis 10 N/mm² notwendig. Schadfrees Stapeln und Transportieren von Betonwaren setzt eine hinreichende Kantenfestigkeit voraus, die im Allgemeinen bei einer Druckfestigkeit von wenigstens 20 N/mm² gegeben ist. Demgegenüber erfordert das Vorspannen oder das Befahren einer Straße i. d. R. eine Druckfestigkeit von mehr als 30 N/mm² oder 40 N/mm². Im Einzelfall können Erhärtungsprüfungen zum Beispiel durch Ermittlung des *Reifegrads* unter den vorgegebenen Bedingungen notwendig sein. Durch eine an den Bautakt und die Jahreszeit angepasste Wahl der Zusammensetzung können die Anforderungen an die *Festigkeitsentwicklung* erfüllt werden. Die erforderliche Nachbehandlungsdauer wird allgemein durch einen Mindesthydratationsgrad definiert, den ein Beton während der Nachbehandlung erreichen muss. Sie kann in Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung des Betons abgeschätzt werden. Art und Festigkeit des Zements sind dabei nur noch indirekt ein Kriterium für den Nachbehandlungsbedarf (s. Abschnitt 2.2). Sobald der Beton ausreichende Festigkeit aufweist, kann er entschalt werden. In besonderen Fällen kann dieses *Entschalen* sofort nach der Verdichtung erfolgen, z. B. bei grünstandfesten Betonen in der Betonwarenherstellung. Nur geringfügig erhärtet darf der Beton sein, wenn er eine Gleitschalung verlässt. DIN 1045-3 enthält keine Anhaltswerte für *Ausschalfrieten*, da es sinnvoller ist, darüber im Einzelfall verantwortlich zu entscheiden. Gerüste und Schalungen dürfen erst dann entfernt werden, wenn der Beton eine ausreichende Festigkeit erreicht hat, um die auf das Bauteil aufgetragenen Lasten aufnehmen zu können und ungewollte Durchbie-

gungen aus elastischem und plastischem Verhalten des Betons sowie eine Beschädigung der Oberflächen und Kanten durch das Ausschalen zu vermeiden. Dafür sind erforderlichenfalls Erhärtungsprüfungen durchzuführen, die den jeweils verwendeten Beton und die Temperatur am Bauwerk berücksichtigen. Für eine optimale Nutzung der Eigenschaften klinkereffizienter Zemente muss deren Erhärtungscharakteristik bei der Planung des Baufortschritts bzw. bei der Produktion von Fertigteilen berücksichtigt werden. Dabei kommt der Anwendung von Modellen zur rechnerischen Prognose der Festigkeitsentwicklung, auch unter Berücksichtigung unterschiedlicher Temperaturen, eine besondere Bedeutung zu. Gemäß fib Model Code 2010 [6] bzw. DIN EN 1992-1-1 [7] kann die Druckfestigkeitsentwicklung von Beton mit einer Exponentialfunktion beschrieben werden, deren Formparameter s in Abhängigkeit der Zementfestigkeitsklasse gewählt wird, vgl. Abbildung 4.

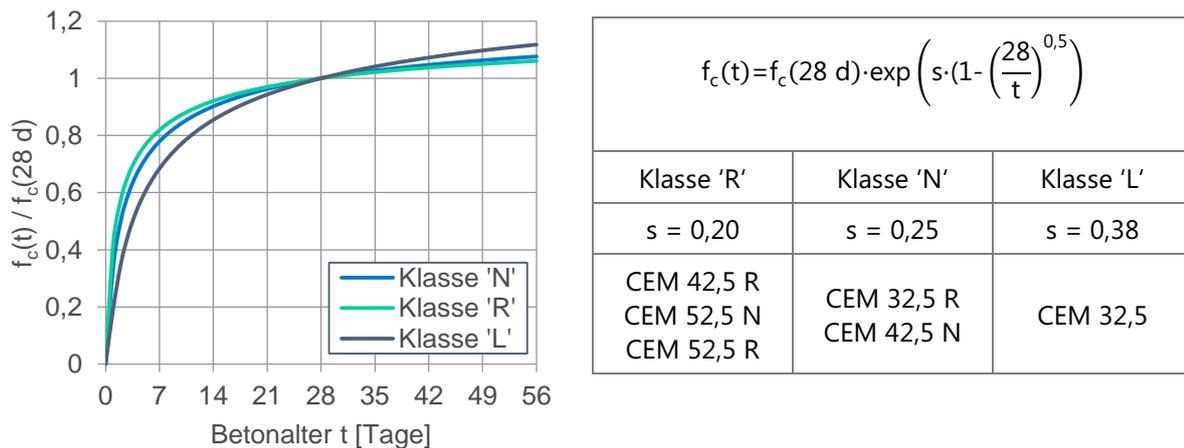


Abb. 4: Prognose der Druckfestigkeitsentwicklung gemäß DIN EN 1992-1-1 (eigene Darstellung)

Diese Vorgehensweise wurde ursprünglich für Betone mit Portlandzementen entwickelt und ist zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung von Betonen mit Zementen mit geringen Klinkeranteilen nur bedingt geeignet [8]. Eine Verbesserung für hüttensandhaltige bzw. flugaschehaltige Zemente kann gemäß [8, 9, 10] erreicht werden, wenn der Formparameter s in Abhängigkeit des Klinkergehalts und weiterer zementtechnischer Parameter bestimmt wird. Es bleibt zu prüfen, ob ein solcher Ansatz auch für Betone mit Zementen mit mehr als zwei Hauptbestandteilen eine ausreichende Genauigkeit liefert. Der Einfluss der Temperatur auf die Erhärtungsgeschwindigkeit wird in der Regel mit sogenannten Reifefunktionen beschrieben. Die am häufigsten verwendete Reifefunktion basiert auf der Arrhenius-Funktion zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeit von chemischen Reaktionen. Die unterschiedliche Temperatursensitivität der Zementhauptbestandteile wird dabei gewöhnlich über eine Anpassung der Aktivierungsenergie berücksichtigt. Für hüttensandhaltige Zemente sind in der Literatur durchgehend höhere Werte für die Aktivierungsenergie zu finden als für Portlandzemente, während die für flugasche- bzw. kalksteinhaltige Zemente angegebenen Werte in der Regel geringer sind als für Portlandzement [10, 11]. Für ternäre Systeme und Zemente mit calcinierten Tonen bedarf es einer breiteren Datenbasis, um die Anwendbarkeit von Reifemodellen zu überprüfen. Zu diesem Thema plant der VDZ aktuell entsprechende Forschung.

2.2 Schutz und Nachbehandlung von Beton

Unter *Nachbehandlung* von Beton werden alle Maßnahmen verstanden, die den Beton bis zur ausreichenden Erhärtung gegen schädliche Einflüsse, wie z. B. sehr niedrige oder auch zu hohe Temperaturen, starkes Austrocknen sowie chemische Angriffe, schützen. Darüber hinaus ist der Beton gegen mechanische Beanspruchungen, wie beispielsweise schädliche Erschütterungen, Stöße oder Beschädigungen, zu schützen. In der Praxis werden die Gefahren zu schnellem Austrocknen oder frühzeitigem Gefrierens häufig nicht ausreichend beachtet.

Wird dem Beton das Wasser, das er für eine ausreichende Erhärtung benötigt, frühzeitig entzogen, so kann es vorwiegend in den oberflächennahen Schichten zu Erhärtungsstörungen kommen. Hierdurch können Festigkeitseinbußen, Absandungen, Schwindrisse und hohe Durchlässigkeiten gegenüber Wasser und Gasen auftreten. Da die Hydratation bzw. die Festigkeitsentwicklung und Zunahme der Dichtigkeit der Betonoberfläche aber direkt von der Dauer des ausreichenden Wasserangebots im Zementleim abhängt, wird anhand der in Abbildung 5 dargestellten Abhängigkeit zwischen Hydratationsgrad und Wasserdurchlässigkeit deutlich, wie ausschlaggebend die Nachbehandlung für die Güte und Dauerhaftigkeit von Betonoberflächen ist.

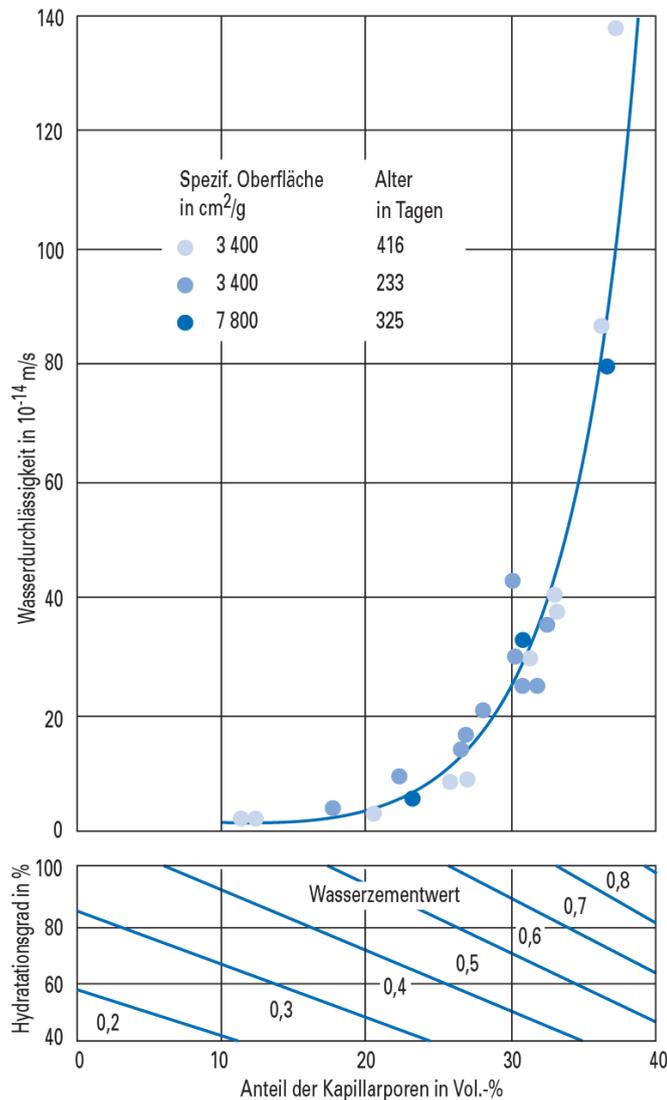


Abb. 5: Wasserdurchlässigkeit von Zementstein in Abhängigkeit von der Kapillarporosität und vom Wasserzementwert (nach [12, 13], entnommen aus [4])

Die Verdunstungsgeschwindigkeit des Wassers aus dem frischen Beton wird vor allem durch die Temperatur (Beton und Umgebung), die relative Luftfeuchtigkeit der umgebenden Luft und durch die Windgeschwindigkeit beeinflusst. Den ungefähren Zusammenhang zwischen diesen Größen zeigt Abbildung 6. Wie aus dieser Darstellung hervorgeht, beträgt die verdunstete Wassermenge aus 1 m² Betonoberfläche 0,6 l Wasser je Stunde bei Luft und Betontemperaturen von 20 °C, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % und einer mittleren Windgeschwindigkeit von 20 km/h. Bei sommerlichen Temperaturen sowie bei höheren Betontemperaturen als die der Luft und größer werdenden Temperaturdifferenzen zwischen Beton und Luft erhöht sich die Wasserverdunstung.

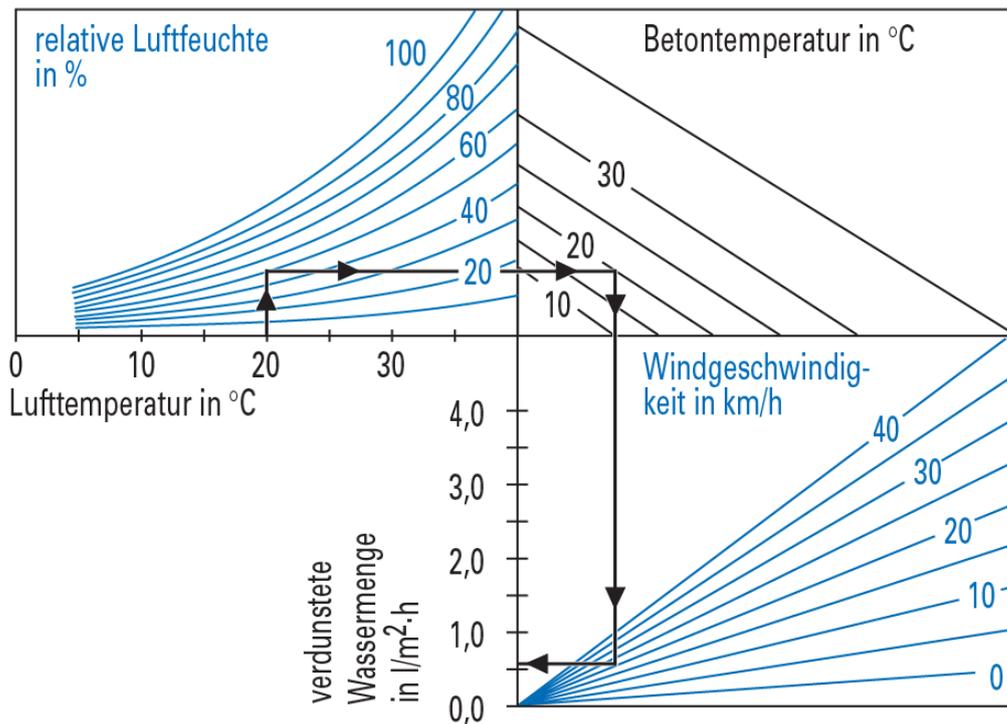


Abb. 6: Austrocknungsverhalten von Beton in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und Temperatur [4]

Das Bild zeigt sehr deutlich, dass die Verdunstung nicht nur durch die Temperatur, sondern noch stärker durch den Wind beeinflusst wird. Darauf ist insbesondere bei flächenhaften und exponierten Bauteilen zu achten, wie beispielsweise bei Decken und Estrichen. Ein Beispiel verdeutlicht die Bedeutung dieser Zahlen für die Praxis: Ein Frischbeton mit 180 l Wasser je m³ enthält je m² in einer 1 cm dicken Schicht 1,8 l Wasser. Die Verdunstungsrate von 0,6 l/m² und Stunde bedeutet rechnerisch, dass dem Beton innerhalb von drei Stunden bereits eine Wassermenge entzogen wird, die dem Gesamtwassergehalt einer 1 cm dicken Betonschicht entspricht. Das damit verbundene Kapillarschwinden, die Neigung zur Rissbildung und die negativen Auswirkungen auf Festigkeit, Verschleißwiderstand und Dichtigkeit der oberflächennahen Bereiche sind erheblich. Die Dauer der Nachbehandlung muss deshalb so bemessen sein, dass auch die oberflächennahen Zonen eine ausreichende Festigkeit und Dichtigkeit des Betongefüges erreichen, die für die Dauerhaftigkeit des Betons und den Korrosionsschutz der Bewehrung erforderlich sind.

Die Mindestdauer der Nachbehandlung richtet sich nach der Expositionsklasse, der Oberflächentemperatur und der Festigkeitsentwicklung des Betons. Die Festigkeitsentwicklung r wiederum hängt von der Betonzusammensetzung ab. Sie wird definiert durch das Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeit nach 2 Tagen (f_{cm2}) und 28 Tagen (f_{cm28}), ermittelt an im Labor gesondert hergestellten Probekörpern bei der Erstprüfung oder an einem vergleichbaren Beton (gleicher Zement, gleicher Wasserzementwert). Bei Umweltbedingungen, die den Expositionsklassen außer X0, XC1 und XM entsprechen, muss der Beton bis zum Erreichen von 50 % seiner charakteristischen Festigkeit im oberflächennahen Bereich nachbehandelt werden. Diese Forderung ist in Tabelle 1 in Abhängigkeit von Festigkeitsentwicklung und Oberflächentemperatur des Betons in eine Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen umgesetzt. Wenn die Mindestdauer der Tabelle 1 nicht eingehalten wird, ist ein spezieller Nachweis der tatsächlichen Festigkeitsentwicklung im Bauteil (z. B. durch eine Berechnung der Reife) erforderlich.

Tab. 1: Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen nach DIN EN 13670/DIN 1045-3 für alle Expositionsklassen außer X0, XC1 und XM [5]

Oberflächentemperatur ϑ [°C] ²⁾	Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen			
	Festigkeitsentwicklung des Betons $r = f_{cm2}/f_{cm28}$ ¹⁾			
	schnell $r \geq 0,5$	mittel $r \geq 0,30$	langsam $r \geq 0,15$	sehr langsam $r < 0,15$
$\vartheta \geq 25$	1	2	2	3
$25 > \vartheta \geq 15$	1	2	4	5
$15 > \vartheta \geq 10$	2	4	7	10
$10 > \vartheta \geq 5$	3	6	10	15

¹⁾ Zwischenwerte dürfen eingeschaltet werden

²⁾ Anstelle der Oberflächentemperatur des Betons darf die morgendliche Lufttemperatur angesetzt werden

³⁾ Betone mit sehr langsamer Festigkeitsentwicklung sind in Deutschland nicht üblich

Tab. 2: Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen nach DIN EN 13670/DIN 1045-3 [3] für die Expositionsklassen XC2, XC3, XC4 und XF1 - Alternativverfahren in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur [5]

Frischbetontemperatur ϑ_{fb} zum Einbaupunkt [°C]	Festigkeitsentwicklung des Betons $r = f_{cm2}/f_{cm28}$ ¹⁾		
	schnell $r \geq 0,5$	mittel $r \geq 0,30$	langsam $r \geq 0,15$
$\vartheta \geq 15$	1	2	4
$15 > \vartheta \geq 10$	2	4	7
$10 > \vartheta \geq 5$	4	8	14

¹⁾ Zwischenwerte dürfen ermittelt werden

Anstelle der Werte nach Tabelle 1 kann alternativ für die Expositionsklassen XC2, XC3, XC4 und XF1 die Ermittlung der Nachbehandlungsdauer über die Messung der *Frischbetontemperatur ϑ_{fb} zum Einbaupunkt* und über die Festigkeitsentwicklung des Betons r erfolgen. Die hiernach erforderliche Nachbehandlungsdauer ist in Tabelle 2 festgelegt.

3 Weniger CO₂ -mehr Nachbehandlung?

3.1 Festigkeitsentwicklung

3.1.1 Allgemeines

Die Festigkeitsentwicklung von Betonen mit CEM II- und CEM III/A-Zementen ist unter baupraktischen Bedingungen vergleichbar mit der von CEM I-Betonen. Um den Anforderungen der Praxis an die Frühfestigkeit zu genügen, werden CEM II/B- und CEM III/A-Zemente in vielen Fällen in der Festigkeitsklasse 42,5 N angeboten. In Abbildung 7 ist die relative Druckfestigkeitsentwicklung von Betonen auf Basis handelsüblicher CEM I-, CEM II- und CEM III/A-Zemente der Festigkeitsklassen 32,5 R und 42,5 N bei vergleichbaren Betonzusammensetzungen und Lagerungsbedingungen beispielhaft dargestellt. Die Relativwerte ergeben sich aus dem Bezug der Betondruckfestigkeit im Alter von 2, 7 bzw. 28 Tagen auf die 28-Tage-Druckfestigkeit des Betons. Zum Vergleich sind ergänzend die Prüfwerte für einen CEM III/A 32,5 N enthalten. Die ausgewiesenen Ergebnisse ermöglichen die Einstufung der untersuchten Betone in die mittlere bzw. langsame Festigkeitsentwicklung. Dem entsprechend ist hier der Beton mit dem Zement CEM III/A 32,5 N als langsam einzustufen. Diese Einstufung ist maßgebend für die Dauer der Nachbehandlung [2] (vgl. Abschnitt 2.2).

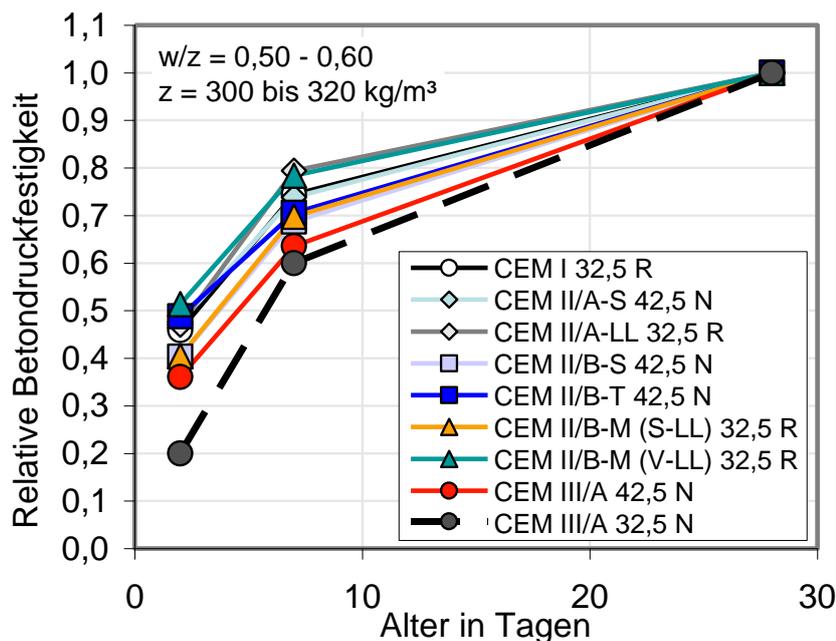


Abb. 7: Relative Druckfestigkeit von Betonen mit verschiedenen CEM II- und CEM III/A-Zementen im Vergleich zum CEM I-Beton [2]

3.1.2 Betonstraßenbau

Die Druckfestigkeit von Fahrbahndeckenbeton wird bisher üblicherweise im Zuge der Abnahme an Bohrkernen im Alter von 60 Tagen ermittelt. In Einzelfällen, z. B. bei nachträglichen Schiedsuntersuchungen, muss ein späterer Prüfzeitpunkt gewählt werden. Zur Rückrechnung der Druckfestigkeit auf die relevanten 60-Tage-Werte enthielt die 2007 zurückgezogene ZTV Beton-StB 01 sogenannte Zeitbeiwerte. Zum Zeitpunkt der Einführung der ZTV Beton-StB 01 (März 2001) wurde standardmäßig PZ 35 F als Fahrbahndeckenzement eingesetzt. Inzwischen sind zusätzliche Anforderungen an die Zementeigenschaften festgelegt worden. Darüber hinaus werden vereinzelt auch hüttensandhaltige Zemente verwendet. Heute werden als Fahrbahndeckenzemente fast ausnahmslos Zemente der Festigkeitsklasse 42,5 N eingesetzt. Da zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der ZTV Beton-StB 07 nicht bekannt war, in welchem Umfang die Zemente die Nacherhärtung des Betons und damit die Zeitbeiwerte verändern, wurde die zeitabhängige Druckfestigkeitsentwicklung von Fahrbahndeckenbeton in einem Untersuchungsprogramm ermittelt [3].

Dazu wurden acht Fahrbahndeckenzemente unterschiedlicher Zementart und Festigkeitsklasse (4 CEM I und 4 CEM II/CEM III) ausgewählt. An den damit hergestellten acht Betonen, die typischen Straßenbetonen entsprachen, wurde die Druckfestigkeit im Alter von 28, 60, 120, 180 und 360 Tagen bestimmt. Die Betone mit CEM II/CEM III-Zement wiesen nach 28 bzw. 60 Tagen im Mittel eine etwas höhere Festigkeit auf als die Betone mit CEM I-Zement (Abbildung 8). Ursachen sind u. a. die Absenkung des Alkaligehalts der CEM I-Zemente und die feinere Aufmahlung der CEM II/CEM III-Zemente zur Verringerung der Nachbehandlungsempfindlichkeit. Um die unterschiedliche Festigkeitsentwicklung zu berücksichtigen, wurden die Zeitbeiwerte angepasst und mit dem ARS 27/2012 eingeführt.

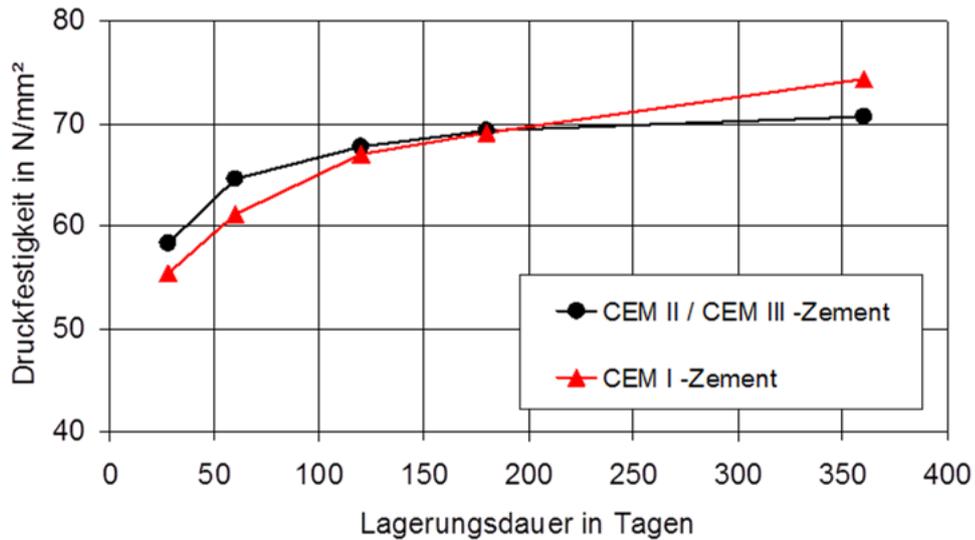


Abb.8: Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Betonalters und der Zementart (Mittelwerte der 4 Betone mit CEM I-Zement bzw. der 4 Betone mit CEM II / CEM III-Zement) [3]

3.1.3 Neue klinkereffiziente Zemente CEM II/C-M (S-LL)

In einer Literaturstudie [14] wurden Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie Dauerhaftigkeitskennwerte von Betonen mit CEM II/B-LL- und CEM II/C-M (S-LL)-Zementen dargestellt und mit in Deutschland üblichen Bewertungskriterien bzw. Referenzbetonen mit CEM I oder CEM III/A verglichen. Die Anwendungsmöglichkeiten von CEM II/B-LL- und CEM II/C-M (S-LL)-Zementen wurden anhand dieser Datenlage abgeschätzt. Abbildung 9 zeigt die Festigkeitsentwicklung der Betone, dargestellt als Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeit nach 2 Tagen (f_{cm2}) und 28 Tagen (f_{cm28}), in Abhängigkeit der Druckfestigkeit nach 2 Tagen (f_{cm2}).

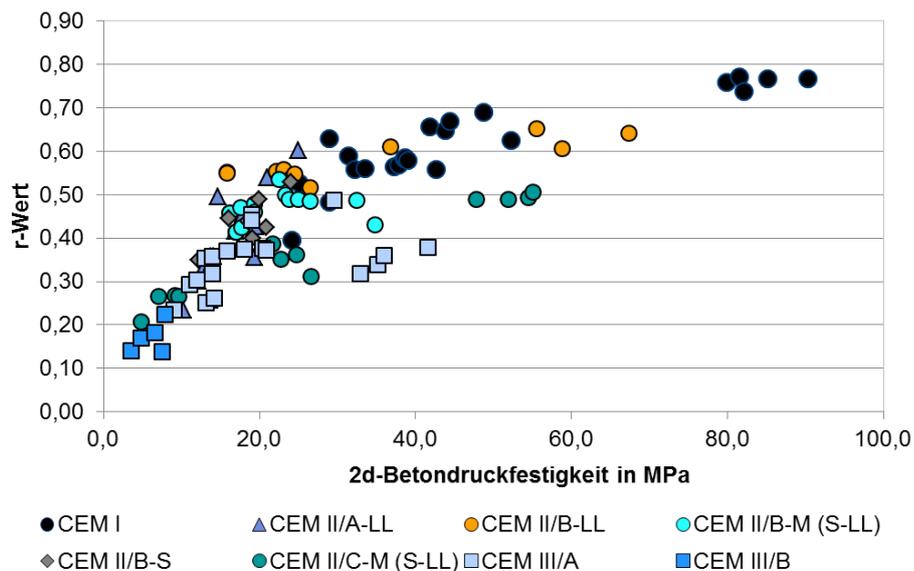


Abb. 9: Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeit nach 2 Tagen (f_{cm2}) und 28 Tagen (f_{cm28}) (= r-Wert) in Abhängigkeit der Druckfestigkeit nach 2 Tagen - Daten aus [14]

Betone mit Portlandzement CEM I sowie kalksteinhaltigen Zementen CEM II/A-LL und CEM II/B-LL weisen relativ hohe Frühfestigkeiten auf und liegen im oberen Wertebereich. CEM II/C-M (S-LL) sind hier mit CEM III/A-Zementen vergleichbar, die mit einem Klinkerfaktor von etwa 0,5 regional typische Zemente zur Herstellung von Transportbeton sind.

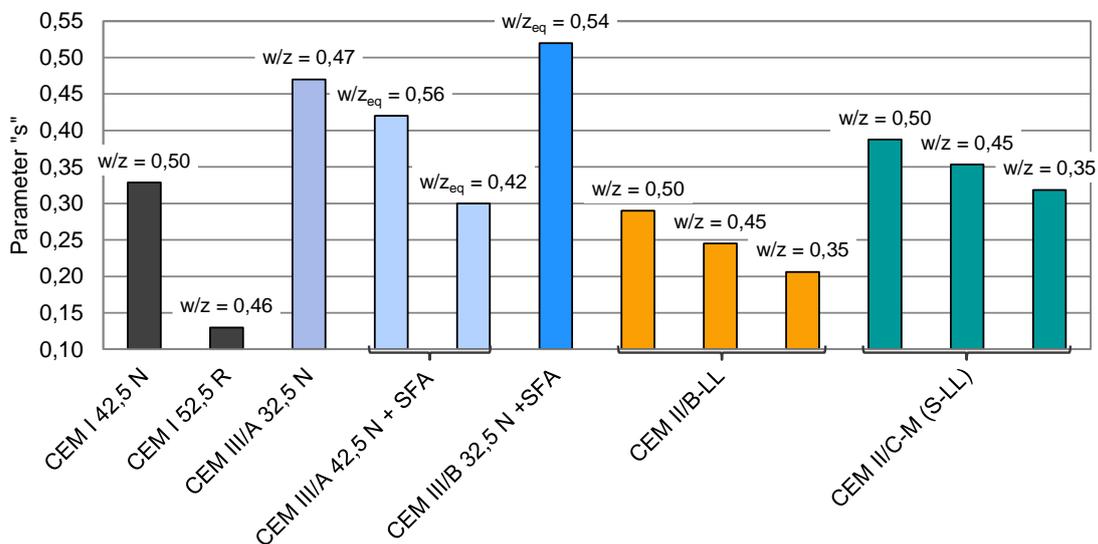


Abb. 10: Parameter s zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung mittels Modellfunktion in Abhängigkeit der Zementart und des Wasserzementwerts, Daten aus [15, 16] (SFA = Steinkohlenflugasche)

Anhand einer Auswertung von Daten aus [15, 16] wurde die Anwendbarkeit der Modellfunktion zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung gemäß DIN EN 1992-1-1 (vgl. Abschnitt 2.1) für Betone mit klinker-effizienten Zementen ohne und mit Flugasche als Betonzusatzstoff im Vergleich zu Betonen nur mit Portlandzement überprüft. Hierzu wurde der Funktionsparameter s durch nichtlineare Regression der Versuchsergebnisse bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Geschwindigkeit der Festigkeitsentwicklung neben der Zementart auch maßgebend durch den Wasserzementwert beeinflusst wird, vgl. Abbildung 10. Mit sinkendem Wasserzementwert wurden bei gleicher Zementart abnehmende Werte für den Funktionsparameter s bestimmt, d. h. die relative Festigkeitsentwicklung läuft mit sinkendem Wasserzementwert schneller ab.

3.2 Nachbehandlung

Zum Einfluss der verschiedenen (z. T. latent-hydraulischen bzw. puzzolanischen) Zementhauptbestandteile bzw. Betonzusatzstoffe auf den Nachbehandlungsbedarf gibt [1] folgende Hinweise:

- Die latent-hydraulische Reaktion des Hüttensands führt dazu, dass die Anfangserhärtung des Zements mit zunehmendem Hüttensandgehalt langsamer abläuft. Da der Hüttensand jedoch in höherem Hydratationsalter immer noch einen deutlichen Reaktionsfortschritt zeigt, weisen die hüttensandreichen Zemente bei entsprechend sorgfältiger Nachbehandlung eine höhere Nacherhärtung nach 28 Tagen auf als z. B. Portlandzemente.
- Ein ausreichend hoch bemessener Mindestzementgehalt, ein ausreichend geringer w/z-Wert, ein genügend hoher Alkalipuffer sowie eine sorgfältige Nachbehandlung verringern die Carbonatisierungsgeschwindigkeit auf ein technisch tolerierbares Maß [2, 18]. Bei Bauwerksuntersuchungen wurde beobachtet, dass bei den in Deutschland vorherrschenden Feuchtebedingungen kein signifikanter Unterschied in der Carbonisierungstiefe von Betonen mit Portlandzementen oder Hochfenzementen vorliegt [17].
- Neben der physikalischen Wirkung können die puzzolanischen Eigenschaften von Steinkohlenflugaschen eine zusätzliche Gefügeverdichtung im erhärtenden Beton herbeiführen. Da puzzolanische Reaktionen verhältnismäßig langsam im Vergleich zu den hydraulischen Reaktionen der Zement-

klinkerphasen ablaufen, tritt dieser Einfluss von Steinkohlenflugaschen erst mit zunehmender Hydratationszeit in den Vordergrund. Die Nutzung der puzzolanischen Reaktion erfordert jedoch eine besonders sorgfältige Nachbehandlung.

- Die Nachbehandlungsempfindlichkeit von Beton nimmt bei Verwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen oder bei Einsatz von Betonzusatzstoffen zu.

Die zuvor genannten Punkte werden bei der Festlegung der Mindestdauer der Nachbehandlung indirekt über die Festigkeitsentwicklung berücksichtigt. Die relativ hohen Frühfestigkeiten von Betonen mit Portlandzement CEM I sowie kalksteinhaltigen Zementen CEM II/A-LL und CEM II/B-LL führen zu einer vergleichsweise geringen Mindestdauer der Nachbehandlung. Bei Betonen mit CEM III/A-Zementen ist aufgrund der etwas langsameren Festigkeitsentwicklung ggf. eine längere Nachbehandlung erforderlich. Für Betone mit neuen klinkereffizienten CEM II/C-M (S-LL)-Zementen sind vergleichbare Mindestnachbehandlungsdauern zu erwarten als für CEM III/A, wenn die bekannten Kriterien der Festigkeitsentwicklung zugrunde gelegt werden. Die Mindestdauer der Nachbehandlung befindet sich für diese Zemente somit im baupraktisch üblichen Bereich. Die weitere Reduktion des Klinkergehalts z. B. bei CEM VI-Zementen könnte je nach Kombination der Hauptbestandteile zu einer langsameren Festigkeitsentwicklung als bei den aktuell überwiegend verwendeten Zementen führen, was eine längere Mindestdauer der Nachbehandlung zur Folge hätte. Hierbei ist zusätzlich zu beachten, dass die Festigkeitsentwicklung neben der Zementart durch weitere betontechnologische Parameter wie beispielsweise den Wasserzementwert und die Art und Dosierung von Zusatzmitteln maßgebend beeinflusst werden kann. Um in Zukunft eine breite baupraktische Anwendung neuer klinkereffizienter Zemente zu ermöglichen, sollte eine entsprechende Optimierung von Betonzusammensetzungen und Bauabläufen unter Berücksichtigung aller maßgebenden Parameter erfolgen.

4 Literatur

- [1] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Dekarbonisierung von Zement und Beton - Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2020
- [2] CEM II- und CEM III/A-Zemente im Betonbau - Nachhaltige Lösungen für das Bauen mit Beton (2008) - zu beziehen über www.beton.org
- [3] Müller, Christoph; Eickschen, Eberhard; Überprüfung des Zeitbeiwerts für Fahrbahndeckenbetone Breitenbücher, Rolf; Köster, Caroline: In: Griffig: Aktuelles über Verkehrsflächen aus Beton (2013) 1, S. 2-7
- [4] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.): Zement-Taschenbuch 2008, 51. Ausgabe, Düsseldorf: Verlag Bau+Technik (2008), ISBN 978-3-7640-0499-6
- [5] Zement-Merkblatt Betontechnik B8 - 4.2014 - Nachbehandlung und Schutz jungen Betons - InformationsZentrum Beton GmbH, Toulouser Alle 71, Düsseldorf (Hrsg.)
- [6] fib (Hrsg.): fib Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Sohn, 2013
- [7] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontagwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010; Ausgabedatum: 2011-01
- [8] Vollpracht, A.; Soutsos, M.; Kanavaris, F.: Strength development of GGBS and fly ash concretes and applicability of fib model code's maturity function - A critical review. Construction and Building Materials 162 (2018), pp. 830-846
- [9] Klemczak, B.; Batog, M.; Pilch, M.: Assessment of concrete strength development models with regard to concretes with low clinker cements. Archives of Civil and Mechanical Engineering 16 (2016), pp. 235-247

- [10] Soutsos, M.; Vollpracht, A.; Kanavaris, F.: Applicability of fib model code's maturity function for estimating the strength development of GGBS concretes. *Construction and Building Materials* 264 (2020), 120157
- [11] Tydlit, V.; Matas, T.; Cerny, R.: Effect of w/c and temperature on the early-stage hydration heat development in Portland-limestone cement. *Construction and Building Materials* 50 (2014), pp. 140-147
- [12] Powers, T.C.; Brownard, T.L.: Studies of the physical properties of hardened portland cement paste: Part 2: Studies of water fixation In: American Concrete Institute: *Journal* 18 (1946) 3, S. 249-336
- [13] Locher, Friedrich W.; Wischers, Gerd: Aufbau und Eigenschaften des Zementsteins In: *Zement-Taschenbuch 1974/75 / Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.). - Wiesbaden: Bauverl., 1974, S. 45-60*
- [14] Müller, C.; Palm, S.; Hermerschmidt, W.: Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit CEM II/B-LL und CEM II/C-M (S-LL) - Zementen. *Zeitschrift beton* 10/2019, S.362-371
- [15] Palm, S.; Müller, C.; Proske, T.; Rezvani, M.; Graubner, C. A.: Concrete application of clinker-efficient cements. *Advances in Cement Research, Volume 31 Issue 5, 2019, pp. 225-234*
- [16] Hermerschmidt, W.: Modelle zur Beschreibung der thermomechanischen Materialeigenschaften jungen Betons. *Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2016*
- [17] Neisecke, J.: Karbonatisierung von Stahlbeton - wirklich ein Problem? In: *Beton-Informationen* 31 (1991) 3-4, S. 27-31
- [18] Walz, K.: Carbonatisierung des Betons: Einflüsse und Auswirkungen auf den Korrosionsschutz der Bewehrung In: *beton* (1972) 7, S. 296-299

5 Autoren

Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller

VDZ Technology gGmbH
Toulouser Allee 71
40476 Düsseldorf

Dr.-Ing. Wibke Hermerschmidt

VDZ Technology gGmbH
Toulouser Allee 71
40476 Düsseldorf

Einfluss der Nachbehandlung auf die Eigenschaften der Betonrandzone

Frank Fingerloos und Enrico Schwabach

Zusammenfassung

Eine zielgerichtete und ausreichend lange Nachbehandlungsdauer von Betonbauteilen ist erforderlich, um eine geplante Dauerhaftigkeit (in Bezug auf Karbonatisierung, Chloridmigration, Frost-Tauwechsel, chemische und mechanische Angriffe) und Gebrauchstauglichkeit (Erscheinungsbild der Oberfläche) in der wenige Zentimeter dicken Betonrandzone zu erreichen. Dabei geht es insbesondere darum, das Austrocknen und das Fröhschwinden derart zu begrenzen, dass eine ausreichend dichte porenarme Betonrandzone entsteht und der Zement ausreichend hydratisieren kann. Der Beitrag gibt Hinweise zu geeigneten Nachbehandlungs- und Schutzmaßnahmen, um die wesentlichen Nachbehandlungsziele zu erreichen.

1 Normative Grundlagen

Eine angemessene Dauerhaftigkeit des Tragwerks gilt für Hoch- und Ingenieurbauwerke aus Beton als sichergestellt, wenn neben den Anforderungen aus Bemessung und Konstruktion gemäß Eurocode 2 [1, 2], den Anforderungen an die Betoneigenschaften nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 [3, 4] auch die Anforderungen an die Bauausführung gemäß DIN EN 13670 und DIN 1045-3 [5, 6] erfüllt sind. Zum Normenkonzept gehört auch, dass geplante (übliche) Instandhaltungsmaßnahmen während der gesamten Nutzungsdauer des Bauwerks bzw. Bauteils durch den Eigentümer/Nutzer durchzuführen sind.

Junger Beton muss direkt nach dem Verdichten bzw. dem Nachverdichten und dem Abschluss der Oberflächenbearbeitung innerhalb der ersten Tage nachbehandelt werden. Durch die unmittelbare Nachbehandlung soll nicht nur eine ausreichende mechanische Festigkeit und eine hohe Dauerhaftigkeit (Dichtheit) der Betonrandzone sichergestellt, sondern auch das Fröhschwinden gering gehalten werden. Unter Umständen ist vor der eigentlichen Nachbehandlung noch eine sog. Zwischennachbehandlung durchzuführen, z. B. bei zu glättenden Oberflächen oder vor dem Aufbringen eines Besenstrichs, um ein mögliches Fröhschwinden zu minimieren.

Die Nachbehandlung und der Schutz des Betons müssen weitestgehend ununterbrochen bis zu einer ausreichenden Erhärtung des Betons erfolgen. Oft wirkt sich die Nachbehandlung jedoch störend auf den Bauablauf aus (siehe z. B. Abbildung 1). Auf der Baustelle wird man daher i. Allg. anstreben, die Nachbehandlungsdauer so kurz wie möglich zu halten, aber dennoch vorschriftsmäßig durchzuführen.



Abb. 1: Betonnachbehandlung mit Folien



Abb. 2: Nachbehandlung von Stützen

2 Zwischennachbehandlung und Nachbehandlung

Grundsätzlich ist zwischen der regulären Betonnachbehandlung und einer etwaigen Zwischennachbehandlung zu unterscheiden. In bestimmten Fällen ist eine Zwischennachbehandlung ein erforderlicher Teil der Nachbehandlung. Darüber hinaus können in Verbindung mit den an das Betonbauwerk gestellten Anforderungen sowohl im Hochbau als auch im Ingenieurbau noch weitere technische Nachbehandlungsziele hinzukommen.

Nachbehandlungsdauer und Ausschalfristen sind zu unterscheiden (vgl. auch DBV [7]). Ist die Ausschalfrist – z. B. bei Betonwänden oder Stützen (siehe Bild 2) – kürzer als die erforderliche Nachbehandlungsdauer, ist nach dem Ausschalen die Nachbehandlung in geeigneter Weise fortzuführen.

Zusätzlich zur eigentlichen Nachbehandlung und ggf. Zwischennachbehandlung muss der junge Beton nach DIN 1045-3 [6] auch geschützt werden vor:

- schädlichen Witterungsbedingungen, wie z. B. Regen, Wind, Frost bzw. extremen Temperaturen sowie Temperaturschwankungen,
- schädlichen Erschütterungen, Stößen oder Beschädigungen und
- ggf. schädigendem Kontakt mit betonangreifenden Stoffen (z. B. Chloride oder Säuren).

3 Mögliche Nachbehandlungs- und Schutzmaßnahmen

In Tabelle 1 (aus DBV [8]) sind mögliche Nachbehandlungs- und Schutzmaßnahmen aufgeführt. Sie können sowohl allein als auch in Kombination zur Anwendung kommen. Es können auch andere alternative Nachbehandlungsmaßnahmen angewendet werden, sofern dadurch ein übermäßiges Verdunsten von Wasser über die Betonoberfläche in den ersten Tagen verhindert wird.

Die in Tabelle 1 aufgeführten Nachbehandlungsmaßnahmen können grundsätzlich in wasserhaltende und wasserzuführende Maßnahmen unterschieden werden (DAfStb [9]). Ergänzend können ggf. wärmesteuernde Maßnahmen erforderlich sein, z. B. wenn bei massigen Bauteilen Risse aus Eigenspannungen vermieden werden sollen.

Der maximale Einflussbereich der Nachbehandlung im Betonbauteil ist auf die Dicke der Betonrandzone begrenzt, d. h. auf ca. 20 mm bis 25 mm (DBV [8]). Wärmesteuernden Maßnahmen beeinflussen dagegen größere Querschnittsbereiche.

Bei fachgerechter Ausführung sind die Maßnahmen zur Nachbehandlung (Tabelle 1, Spalte 2, Zeilen 1 bis 5) in ihrer Wirksamkeit grundsätzlich als gleichwertig einzustufen (Ausnahmen: Zwischennachbehandlung und wärmesteuernde Maßnahmen). Einschränkungen kann es jedoch seitens des Bauablaufs (störend) oder vor allem hinsichtlich der empfohlenen Umgebungsbedingungen (Einsatzgrenzen, vor allem im Winter) geben. In jedem Fall können die einzelnen Maßnahmen aber nur dann überhaupt wirksam sein, wenn die Nachbehandlung frühzeitig beginnt und ihre Ausführung mit Sorgfalt vorgenommen wird (DBV [10]).

4 Auswahl geeigneter Nachbehandlungs- und Schutzmaßnahmen

Die Maßnahmen zum Schutz und zur Nachbehandlung des jungen Betons sollten vor dem Beginn der Betonierarbeiten geplant werden, um einen effizienten Bauablauf und eine zielsichere Erreichung der gewünschten Festbetoneigenschaften (Ziele der Nachbehandlung) sicherstellen zu können.

Die Durchführung der Maßnahmen muss grundsätzlich auch bei längeren Arbeitspausen sowie an Feiertagen und Wochenenden sichergestellt sein. Die Einsatzgrenzen der aufgeführten Maßnahmen sind zu beachten (siehe Tabelle 2). Insbesondere bei Winterbetonagen ist zu prüfen, ob die gewählten Maßnahmen und Festlegungen in Abhängigkeit von der Bauteilsituation sowie der Exposition zielsicher umgesetzt werden können. Bei sommerlichen Wetterbedingungen empfiehlt sich i. Allg. eine Nachbehandlung der freien Betonoberfläche durch Abdecken mit dampfdichten hellen/milchigen Folien (Baufolien), die an den Stößen und Bauteilkanten gegen Durchzug gesichert sind oder grundsätzlich auch der Einsatz von flüssigen Nachbehandlungsmitteln (NBM).

Wasserzuführende Nachbehandlungsmaßnahmen (siehe Tabelle 1) sind aufwendiger und können ggf. bei längeren Arbeitspausen nicht sichergestellt werden. Im Vergleich zur Folienabdeckung oder zu NBM verringern diese aber auch die Oberflächentemperatur, wenn die Wassertemperatur wesentlich geringer ist als die Oberflächentemperatur des Betons. Auf diese Weise wird nicht nur die Verdunstung von Wasser verhindert und ausreichend Wasser für die ablaufenden Hydratationsprozesse bereitgestellt, sondern die Betonoberfläche wird auch gekühlt. Allerdings sollte eine zu schroffe Abkühlung des Betons, z. B. infolge eines direkten Besprühens des Betons mit starkem bzw. kaltem Wasserstrahl, vermieden werden, damit der Temperaturgradient zwischen der Betonoberfläche und dem Betonkern möglichst gering bleibt. Wenn der Temperaturunterschied zwischen Wasser und Betonoberfläche zu groß ist, können Zugspannungen auftreten, die zu Oberflächenrissen (auch Schalenrissen) führen können. Diese Risse aus Eigenspannungen sind zu vermeiden (DAfStb [9]).

Stahlschalungen sollten bei vertikalen Bauteilen und hohen sommerlichen Temperaturen vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt werden (z. B. durch Abhängen mit Wärmedämm- bzw. Isoliermatten), um das unerwünschte Aufheizen des Betons zu vermindern.

Tab. 1: Mögliche Maßnahmen zur Nachbehandlung und zum Schutz des jungen Betons (aus DBV [8])

S	1		2	3	4
Z	Maßnahme		zur Nachbehandlung	zum Schutz	Art
1a	Belassen in der Schalung	Verwendung von Schalhaut auf Basis von Holzwerkstoffen oder Kunststoff	X	X	wasserhaltend
1b		Verwendung von Stahlschalung	X	X ¹⁾	
2	Abdecken freier/ungeschalter Betonflächen (z. B. mit dampfdichten hellen/milchigen Folien, die an den Kanten und Stößen gegen Durchzug gesichert sind)		X	X ²⁾	
3	Aufbringen eines flüssigen Nachbehandlungsmittels mit wirksamer Eignung in Bezug auf Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion (gilt auch für Zwischennachbehandlungsmittel)		X	(X) ³⁾	
4	Auflegen von wasserspeichernden Abdeckungen (z. B. vlieskaschierte Matten) bei ausreichendem Verdunstungsschutz (z. B. mit Wasserzuführung durch Berieselung oder zusätzliche Folienabdeckung)		X	X	wasserzuführend
5	Aufrechterhalten eines sichtbaren Wasserfilms auf der Betonoberfläche (z. B. durch Besprühen/Benebeln, ggf. Fluten mit nicht zu kaltem Wasser)		X	X ⁴⁾	
6	Abhängen der Schalung mit Wärmedämm-/Isoliermatten		(X) ⁵⁾	X	wärmesteuernd
7	Wärmedämmende/isolierende Abdeckung nach dem Ausschalen oder bei ungeschalten Oberflächen		(X) ⁶⁾	X	
8	Beheizung (im Winter)		-	X ⁷⁾	
9	Beschattung (im Sommer)		(X) ⁵⁾	X	
<p>¹⁾ Schutz vor hohen oder niedrigen Temperaturen nur, wenn die Stahlschalung zusätzlich, z. B. durch Abhängen mit Wärmedämmmatten geschützt wird, siehe auch Zeile 6.</p> <p>²⁾ Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung/Reduzierung der Aufheizung. Es sind keine transparenten/klaaren oder schwarzen Folien zu verwenden. Eine Luftschicht wirkt unterstützend.</p> <p>³⁾ Nur, wenn ein Nachbehandlungsmittel mit hohem Hellbezugswert (Kurzzeichen W) verwendet wird (Reduzierung der Aufheizung).</p> <p>⁴⁾ Schutz vor hohen Temperaturen der Betonoberfläche bei gleichzeitigem Verdunstungsschutz (nicht bei stark aufgeheizten Oberflächen!)</p> <p>⁵⁾ Sofern die Oberflächentemperatur begrenzt werden soll (im Sommer).</p> <p>⁶⁾ Nur, wenn die Abdeckung auch vor Feuchtigkeitsabgabe schützt.</p> <p>⁷⁾ Eventuell ungünstig für die Nachbehandlung (Austrocknung).</p>					

Tabelle 2 enthält Hinweise zu geeigneten Nachbehandlungs- und Schutzmaßnahmen sowie zu zweckmäßigen Vorkehrungen in Abhängigkeit von der zu erwartenden Umgebungstemperatur (Luft) für frühlingshafte und sommerliche Temperaturen.

Tab. 2: Geeignete Maßnahmen zur Nachbehandlung und zum Schutz des jungen Betons in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur (Auszug aus DBV [8])

S	1	2	3
Z	Umgebungs- temperatur	mögliche Maßnahmen und Festlegungen	zweckmäßige Vorkehrungen
1	+5 °C bis ca. +25 °C	<ul style="list-style-type: none"> - Belassen in der Schalung - Abdecken freier Betonoberflächen, z. B. mit dampfdichten hellen/milchigen Folien oder - Benetzen freier Betonoberflächen mit Wasser (ggf. Fluten) oder - Aufsprühen von flüssigen Nachbehandlungsmitteln (NBM) 	<ul style="list-style-type: none"> - bei saugender Schalung Vornässen - geeignetes Abdeckmaterial bereitstellen - geeignetes Nachbehandlungsmittel und Sprühgeräte vorhalten - Temperaturmessung vorsehen (z. B. Messfühler für Beton- und/oder Lufttemperatur)
2	über ca. +25 °C	<p>zusätzlich/abweichend zu Zeile 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Abdecken freier Betonoberflächen, z. B. mit feuchtzehaltenden vlieskaschierten Matten - freie Betonoberflächen bzw. Stahlschalung vor direkter Sonneneinstrahlung schützen, z. B. durch Beschattung - i. Allg. maximale Einbautemperatur des Frischbetons von +30 °C nach [6], bzw. - maximale Einbautemperatur des Frischbetons von +25 °C an der Einbaustelle im Tunnelbau nach ZTV-ING, Teil 3 [11] - ggf. Einsatz von Verzögerern 	<p>zusätzlich/abweichend zu Zeile 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vorhalten von vlieskaschierten Matten, ggf. in Verbindung mit Berieselungsanlage - Liefermöglichkeit für gekühlten Frischbeton prüfen - Temperaturmessung vorsehen (für Beton- und/oder Lufttemperatur) - Sommerrezeptur verwenden - geeignete tageszeitliche Terminierung der Betonage (z. B. in den Abendstunden)
3	unter +5 °C	Siehe DBV [8]	Siehe DBV [8]

5 Aufgaben und Ziele der Nachbehandlung

5.1 Hauptaufgaben

Hauptaufgabe der Nachbehandlung ist es, eine frühe Verdunstung von Wasser über die Betonoberfläche zu vermeiden bzw. möglichst gering zu halten. Nur, wenn dem Beton in der Betonrandzone eine ausreichende Menge an Wasser für die ablaufenden Hydratationsprozesse zur Verfügung steht, kann dieser die gewünschten Festigkeits- und die Dauerhaftigkeitseigenschaften erreichen.

Eine weitere wesentliche Aufgabe der Nachbehandlung ist die Vermeidung von größeren Temperaturdifferenzen im Betonquerschnitt, um einer möglichen Schalenrissbildung infolge von Eigenspannungen oder Biegezug entgegenzuwirken.

Prinzipiell bestimmen die Nachbehandlungsziele die Art und die Dauer der jeweiligen Nachbehandlungsmaßnahme(n). Die Nachbehandlung des Betons kann folgende Nachbehandlungsziele verfolgen:

1. Erreichen einer ausreichenden mechanischen Festigkeit und einer bestimmten Dauerhaftigkeit (Dichtheit) in der Betonrandzone;
2. Verringerung des Risspotenzials infolge von Frühschwinden (plastisches Schwinden);
3. Verringerung des Risspotenzials infolge von Temperaturspannungen (verkürzende Dehnungen) infolge:
 - der Entwicklung und Abfließen der Hydratationswärme des Betons bzw.
 - der vorherrschenden Witterungs-/Umgebungsbedingungen, insbesondere bei nicht geschalteten Betonflächen;
4. Erreichen von Anforderungen an das Aussehen von Sichtbetonflächen.

Maßnahmen zur Verringerung des Risspotenzials infolge von behinderten Dehnungen aus Temperaturänderungen und daraus resultierenden Spannungen (Nachbehandlungsziel 3) oder Nachbehandlung von Sichtbetonflächen (Nachbehandlungsziel 4) werden in den Ausführungsnormen DIN EN 13670 und DIN 1045-3 [5, 6] nicht explizit behandelt.

5.2 Nachbehandlungsziel 1 – Sicherstellung einer ausreichenden Festigkeit und Dauerhaftigkeit

Geeignete Nachbehandlungsmaßnahmen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur enthält Tabelle 2.

Wie lange nachbehandelt werden muss, ergibt sich aus den Vorgaben von DIN 1045-3 [6], Abschnitt 8.5 oder aus einem projektbezogenen Nachbehandlungskonzept. Vereinfacht ist die Nachbehandlungsdauer von den folgenden wesentlichen Einflussfaktoren abhängig:

- Umweltbedingungen während der Nutzungsdauer des Betonbauteils (beschrieben durch Expositionsklassen nach DIN 1045-2 [4]),
- Entwicklung der Betoneigenschaften (Festigkeit) in der Randzone,
- Oberflächentemperatur des Betons bzw. Frischbetontemperatur.

Sobald die Betonrandzone eine bestimmte Festigkeit erreicht hat, kann die Nachbehandlung beendet werden. In 1045-3 [6] ist festgelegt, dass die Nachbehandlung beendet werden kann, wenn die oberflächennahe Festigkeit des Betons mindestens 50 % der charakteristischen Druckfestigkeit f_{ck} des verwendeten Betons erreicht hat. Ausgenommen hiervon sind Bauteiloberflächen

- die in die Expositionsklasse X0 oder XC1 eingestuft sind (Nachbehandlung mindestens ein halber Tag),
- die in die Expositionsklasse XM eingestuft sind (mindestens 70 % der charakteristischen Druckfestigkeit des verwendeten Betons),
- im Regelungsbereich der ZTV-ING [11] (unabhängig von den relevanten Expositionsklassen mindestens 70 % der charakteristischen Druckfestigkeit des verwendeten Betons).

Ein genauer Nachweis der Festigkeitsentwicklung, z. B. durch Nachweis am Bauteil oder mit Reifeformeln usw., ist auch möglich. Dazu enthält DBV [8] entsprechende Hinweise. Im Baustellenalltag wird zur Bestimmung der Nachbehandlungsdauer i. d. R. jedoch weder die Festigkeit noch die Reife des Betons in seiner Randzone bestimmt. Stattdessen darf vereinfacht - ohne genauen Nachweis der Druckfestigkeit - Tabelle 5.NA aus DIN 1045-3 [6] angewendet werden (vgl. hier Tabelle 3). Dazu wird neben der Festigkeitsentwicklung des Betons die Oberflächentemperatur des Bauteils oder (ersatzweise) die Lufttemperatur herangezogen.

Als Maß für die Festigkeitsentwicklung des Betons wird im Regelfall das Verhältnis der mittleren Druckfestigkeiten nach 2 Tagen und 28 Tagen ($r = f_{cm2}/f_{cm28}$) herangezogen, das bei der Eignungsprüfung der Betonsorte ermittelt wurde. Dieser r -Wert bzw. die daraus resultierende Bezeichnung der Festigkeitsentwicklung (schnell, mittel, langsam, vgl. Tabelle 3) kann auch dem Lieferschein des Transportbetonherstellers entnommen werden.

Die Oberflächentemperatur des Betons ist während der Dauer der Nachbehandlung in geeigneter Weise in der Randzone zu messen. Nach DBV [8] ist bei der Ermittlung der Nachbehandlungsdauer nach Tabelle 3 von der minimalen Temperatur im Zeitintervall auszugehen. Ersatzweise darf auch die Lufttemperatur anstelle der Oberflächentemperatur des Betons herangezogen werden. Aus Gründen der Sicherheit ist auch hier von der minimalen Lufttemperatur auszugehen (DAfStb [9]).

Bei Ansatz der Lufttemperatur anstelle der Oberflächentemperatur ist zu beachten, dass daraus - insbesondere in der kälteren Jahreszeit bis in den Frühsommer hinein - sehr lange Mindestnachbehandlungsdauern

resultieren können, die weder technisch erforderlich noch wirtschaftlich sind. Dieser Effekt kann noch dadurch verstärkt werden, dass bei Lufttemperaturen unter +5 °C die Nachbehandlungsdauer nicht angerechnet werden darf, obwohl die Oberflächentemperatur des Betons i. Allg. größer ist (DBV [8]).

In DBV [8] wird auch ausführlich auf weitere Möglichkeiten zur Ermittlung bzw. zur Überprüfung der erforderlichen Nachbehandlungsdauer eingegangen, z. B. in Abhängigkeit von der Frischbetontemperatur (nur in den Expositionsclassen XC2, XC3, XC4 und XF1) oder auf Basis einer Kombination von Frischbetontemperatur und der Oberflächentemperatur unmittelbar nach dem Ausschalen (nur für relativ kurze Nachbehandlungsdauern).

An dieser Stelle sei noch besonders auf die Empfehlung in DBV [8] bezüglich der Expositionsklasse XF4 (vgl. Fußnote ²⁾ in Tabelle 3), hingewiesen. Dort wird für langsam erhärtende Betone ($r < 0,3$) empfohlen, bei Bauteilen, bei denen die entsprechenden XF4-Umwelteinwirkungen auch tatsächlich auftreten können, die Nachbehandlungsdauer bis zum Erreichen von 70 % der charakteristischen Druckfestigkeit zu verlängern. Entscheidend für eine ausreichende spätere Frost-Tausalz-Widerstandsfähigkeit derartiger Betone ist jedoch die Möglichkeit einer mindestens einmaligen Austrocknung nach Abschluss der Nachbehandlung vor der ersten Frostbelastung (DBV [8]).

Tab. 3: Mindestdauer der Nachbehandlung von Beton gemäß DIN 1045-3 [6] in Abhängigkeit von der Oberflächen- oder Lufttemperatur des Betons und der Expositionsklasse nach DIN 1045-2 [4]

S	1	2	3	4	5
Z	Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen¹⁾				
	Expositionsklasse	X0, XC1	XC2-XC4, XD, XS, XF1-XF3, XF4²⁾, XA, XM³⁾		
	Oberflächen- oder Lufttemperatur θ [°C]	0,5	Festigkeitsentwicklung des Betons $r = f_{cm2}/f_{cm28}$ ⁴⁾		
			schnell	mittel	langsam ²⁾
			$r \geq 0,50$	$r \geq 0,30$	$r \geq 0,15$
1	$\theta \geq +25$		1	2	2
2	$+25 > \theta \geq +15$		1	2	4
3	$+15 > \theta \geq +10$	2	4	7	
4	$+10 > \theta \geq +5$ ⁵⁾	3	6	10	

¹⁾ Bei mehr als 5 h Verarbeitbarkeitszeit ist die Nachbehandlungsdauer angemessen zu verlängern.

²⁾ Bei langsam erhärtendem Beton in XF4 wird eine Verdopplung der Werte von Spalte 5 empfohlen DBV [8].

³⁾ In den Expositionsclassen XM1 bis XM3 sind die Werte in Spalte 3 bis 5 zu verdoppeln.

⁴⁾ Bei von 28 Tagen abweichendem Nachweialter ist das Verhältnis $r = f_{cm2}/f_{cm56}$ oder $r = f_{cm2}/f_{cm91}$ anzusetzen. Zwischenwerte für die Nachbehandlungsdauer dürfen für abweichende r -Werte linear interpoliert werden. Sehr langsam erhärtende Betone ($r < 0,15$) – wie in [5] enthalten – stehen in Deutschland nicht zur Verfügung.

⁵⁾ Bei Temperaturen unter +5 °C ist die Nachbehandlungsdauer um die Zeit zu verlängern, während der die Oberflächentemperatur des Betons unter +5 °C lag.

Besonders wichtig ist der rechtzeitige – i. d. R. unverzügliche – Beginn der Nachbehandlungsmaßnahmen zur Vermeidung des zu schnellen Austrocknens der Betonrandzone.

Beispiel: Freibewitterte Industrieböden (DBV [12]), Lager- und Verkehrsflächen oder Brückenkappen (DBV [13]) gehören zu den am stärksten exponierten Betonoberflächen in den Expositionsclassen XF4 (erhebliche Frost-Tauwechsel mit Tausalzeinwirkung) und teilweise XM (mechanische Beanspruchung). Vielfach wird als rutschhemmende Oberflächentexturierung ein Besenstrich ausgeführt. Als zweckmäßige Nachbehandlung haben sich dabei flüssige Nachbehandlungsmittel durchgesetzt. Wenn diese – insbesondere bei sommerlichen Temperaturen – nicht sofort oder nicht in ausreichender Menge aufgetragen werden, führt dies zu

unzureichender Hydratation des Zements mit relevantem Festigkeitsverlust und Gefügestörungen in der Betonrandzone. Wegen des dann zu geringen Frost-Tausalzwidestandes oder wegen der mechanischen Nutzung können übermäßige Abwitterungen und Abplatzungen auftreten (vgl. Abbildung 3).



Abb. 3: Abwitterungen und Abplatzungen infolge Frost-Tausalzangriff bei „vertrockneter“ Betonrandzone



Abb. 4: Oberflächenrisse (netzartig) wegen zu schneller Austrocknung bzw. infolge von Fröhschwinden, (Besenstrich abgefahren)

5.3 Nachbehandlungsziel 2 – Verringerung des Risspotenzials infolge von Fröhschwinden

Soll die Rissbildung an der freien Betonoberfläche infolge von Fröhschwinden, d. h. in den ersten Stunden nach dem Einbau des Betons, minimiert werden, ist sicherzustellen, dass vor einer Oberflächenbearbeitung kein übermäßiges Verdunsten von Wasser bzw. kein zu starkes Austrocknen des jungen Betons an der Oberfläche erfolgt. Diese oberflächennahen Risse mit wenigen Millimetern Tiefe bilden sich i. d. R. netzartig als sog. Krakeleerisse aus. Abbildung 4 zeigt beispielhaft gerichtete netzartige Risse, die offensichtlich nach dem Aufbringen eines Besenstrichs entstanden sind.

Ist eine Rissbildung durch äußere klimatische Bedingungen oder aufgrund der Betonzusammensetzung zu erwarten, sollte zusätzlich zu den für Nachbehandlungsziel 1 genannten Nachbehandlungsmaßnahmen eine Zwischennachbehandlung in Betracht gezogen werden (z. B. auch vor Aufbringen eines Besenstrichs).

Als eine geeignete Maßnahme kann im allgemeinen Betonbau z. B. ein Zwischennachbehandlungsmittel (ZNBM) auf die frische, i. d. R. mattfeuchte, Betonoberfläche aufgetragen werden. Ggf. kann eine Zwischennachbehandlung auch durch Abdeckung mit dünnen Folien oder durch Wasserdampf (bei sommerlichen Temperaturen) erfolgen. Eine Zwischennachbehandlung ersetzt nicht die sich anschließende eigentliche Nachbehandlung der Betonoberfläche.

In Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen (i. W. Umgebungstemperatur, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchte, Wind) kann ein übermäßiges Verdunsten von Wasser an der Oberfläche ggf. auch durch betontechnische Maßnahmen, d. h. eine begrenzte Neigung zur Wasserabsonderung (begrenzt Bluten), erreicht werden. Dieser betontechnischen Maßnahme sind jedoch, insbesondere bei geringer Luftfeuchte bzw. relativ hoher Windgeschwindigkeit, physikalische Grenzen gesetzt, sodass eine zielsichere Prognose ohne Weiteres nicht möglich ist. Eine Möglichkeit zur Überprüfung und Steuerung von frühen Nachbehandlungsmaßnahmen bietet z. B. die Durchführung eines Bluteimertests (siehe dazu DBV [14]).

Beim Einsatz verzögernder Betonzusatzmittel – eine lange Offenzeit des Betons kann auch durch Fließmittel gegeben sein – bedarf es besonderer Überlegungen der Zwischennachbehandlung von Betonoberflächen, um eine zu starke Austrocknung des Frischbetons vor der abschließenden Oberflächenbearbeitung zu verhindern.

5.4 Nachbehandlungsziel 3 – Verringerung des Risspotenzials infolge von Temperaturspannungen

Ein größeres Risspotenzial entsteht dann, wenn sich der Beton nach der anfänglichen Erwärmung wieder abkühlt bzw. verkürzt. Bei einer behinderten Verkürzung entstehen Zwangsspannungen. Hinsichtlich deren Größe spielen die Wärmeentwicklung bei der Hydratation bzw. das Betonvolumen sowie der Wärmeabfluss über die Bauteiloberfläche an die Umgebung eine wesentliche Rolle.

Maßgebende Einflussgrößen zur Verringerung des Potenzials einer (frühen) Rissbildung des Betons sind insbesondere die Höchsttemperatur des Betons, die Temperaturdifferenz zwischen Bauteilkern und Bauteilrandzone (Temperaturgradient) sowie der Wärmeabfluss über die freie Betonoberfläche.

Die Höchsttemperatur des Betons kann durch beton- und ausführungstechnische Maßnahmen begrenzt werden. Detaillierte Hinweise dazu sind in DBV [8] sowie in DBV [15] aufgeführt.

Der Temperaturgradient zwischen Bauteilkern und Bauteilrandzone sollte insbesondere bei dickeren Bauteilen möglichst gering gehalten werden, um die Eigenspannungen des Betons in den ersten Tagen zu begrenzen. Damit wird die Gefahr von Schalenrissen (Abbildung 5) sowie einer verstärkten Mikrorissbildung in der Betonrandzone verringert. Als Steuergröße hat sich die Einhaltung eines maximalen Temperaturgradienten zwischen Bauteilkern- und Oberflächentemperatur (in der Bauteilrandzone) von ca. 15 K bewährt (DBV [15]).

Geeignete Maßnahmen zur Begrenzung der Oberflächentemperatur bzw. zur Verringerung des Risspotenzials bei nicht geschalteten Flächen (z. B. Betonplatten) im Sommer können u. a. sein:

- Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung (z. B. durch Beschattung),
- Aufbringen von flüssigen Nachbehandlungsmitteln mit heller Pigmentierung (Hellbezugswert $W \geq 60\%$),
- Auflegen von feuchtzuhaltenden vlieskaschierten Matten,
- Auflegen von hellen/milchigen Folien mit reflektierender Oberfläche bei zusätzlicher Befeuchtung,
- ggf. Besprühen/Benebeln mit nicht zu kaltem Wasser zur Aktivierung von Verdunstungskälte.

Im Sommer sollte nicht nur die Oberflächentemperatur begrenzt, sondern auch stark schwankende Oberflächentemperaturen vermieden werden. Diese können z. B. bei einer intensiven Sonneneinstrahlung infolge einer plötzlichen Abkühlung der Betonoberfläche durch Schlagregen auftreten. Um eine solche schlagartige Abkühlung der Betonoberfläche zu vermeiden, empfiehlt es sich auch im Sommer (bei der Gefahr von Schlagregen), der Witterung frei ausgesetzte Betonoberflächen temporär z. B. zusätzlich mit Dämmmatten abzudecken (Abbildung 6).

Ausführliche Hinweise zur Steuerung des Wärmeabflusses, insbesondere in Verbindung mit der Umsetzung von Entwurfsgrundsätzen hinsichtlich Rissbildung, können ebenfalls DBV [8] entnommen werden.



Abb. 5: Beispiel Schalenriss bis 5 cm tief



Abb. 6: Betonnachbehandlung mit zusätzlichen Dämmmatten

5.5 Nachbehandlungsziel 4 – Erreichen von Anforderungen an das Aussehen von Sichtbetonflächen

Wenn Sichtbeton, d. h. Betonflächen mit erhöhten Anforderungen an das Aussehen, gefordert werden, steht diese Anforderung in aller Regel im Widerspruch zu den Zielen 1 bis 3 der Nachbehandlung. Bei der Festlegung der Ausschalffrist bzw. der Nachbehandlungsdauer sind – neben der erforderlichen Ausschalffestigkeit – mögliche Oberflächenverfärbungen und die Gefahr einer frühen Rissbildung (vgl. Nachbehandlungsziel 2) zu berücksichtigen.

Ein frühes Abtrocknen der oberflächennahen Zementhaut vermeidet das Auftreten von deutlichen Farbtonunterschieden in der Ansichtsfläche. Je länger an der Betonoberfläche eine chemische Reaktion zwischen Schalhaut, Trennmittel und Zementleim möglich ist, desto größer ist die Gefahr, dass fleckige Dunkelverfärbungen an der Betonoberfläche auftreten. Die Dauer der Nachbehandlung sollte darum bei Sichtbetonflächen i. Allg. so kurz wie möglich sein. In jedem Fall sollte für alle betroffenen Bauteile einer Ansichtsfläche eine gleichartige und gleichmäßige Nachbehandlung sichergestellt sein (DBV [16]).

Das Aufbringen von flüssigen Mitteln oder Folien zum Zweck der Nachbehandlung des Betons führt i. d. R. zu Farb- und Texturunterschieden sowie eventuell zu Abdrücken an der Oberfläche (DBV [12]).

Weitere Hinweise zur Nachbehandlung von Sichtbetonflächen können DBV [8] entnommen werden.

6 Hinweise zur Anwendung von NBM und ZNBM

Grundsätzlich ist zwischen Nachbehandlungsmitteln allgemein (NBM) und Zwischennachbehandlungsmitteln (ZNBM) speziell zu unterscheiden. Gemäß DIN 1045-3 [6] dürfen NBM i. d. R.

- in Arbeitsfugen,
- bei Oberflächen die beschichtet werden sollen und
- bei Oberflächen mit Anforderungen an das Aussehen

nicht verwendet werden, es sei denn, sie haben nachweislich keine nachteilige Wirkung.

Hinsichtlich der Wirksamkeit und der Eignung der NBM bzw. ZNBM ist generell zu beachten, für welche Umgebungstemperaturen diese konzipiert sind. Die Anwendungstemperaturen handelsüblicher NBM liegen in einem Bereich von mind. +5 °C bis +25 °C, teilweise auch bis +30 °C oder ggf. darüber. Deshalb sind in jedem Einzelfall (bauteil- bzw. baustellenbezogen) die technischen Merkblätter bzw. Sicherheitsdatenblätter der Hersteller zu beachten bzw. sind entsprechende Informationen beim Hersteller zu erfragen.

NBM dürfen nicht auf Oberflächen mit stehendem Wasser (z. B. infolge von Bluten des Betons) aufgebracht werden. Das bedeutet, dass NBM erst dann appliziert werden dürfen, wenn kein sichtbarer Wasserfilm mehr vorhanden und die Betonoberfläche mattfeucht geworden ist. Eine visuelle Prüfung auf mattfeuchter Oberfläche bzw. übermäßiges Bluten nach Abschluss der Oberflächenbearbeitung ist baupraktisch ausreichend.

Wird z. B. unter hochsommerlichen Umgebungsbedingungen die maximale Anwendungstemperatur des NBM überschritten (siehe vor), sind – nach abgeschlossener Filmbildung – ggf. zusätzliche Nachbehandlungsmaßnahmen (z. B. Benetzen mit Wasser oder Auflegen von dampfdichten Folien) auszuführen. Gleiches kann z. B. auch erforderlich sein, wenn sich das NBM – vor abgeschlossener Filmbildung – etwa mit Regenwasser vermischt, dadurch verdünnt wird, und damit ggf. keinen lückenlosen Verdunstungsschutz gewährleistet.

In TL NBM-StB 09 [17] werden bestimmte Anforderungen hinsichtlich der Zusammensetzung, der Sperrwirkung, der Anwendungssicherheit und der Stabilität von NBM für Betonfahrbahndecken (Gruppe V), aber auch für Anwendungen im Allgemeinen Betonbau (Gruppe B) geregelt. Es erfolgt in [17] eine Unterscheidung des NBM-Typs nach dem Auftragszeitpunkt. Ein NBM vom Typ H darf demnach früher aufgebracht werden als ein Typ M oder Typ E, vgl. Tabelle 4, ZNBM werden in [17] aber nicht geregelt.

Tab. 4. Nachbehandlungsmittel Gruppe B nach TL NBM-StB 09 [17]

S	1	2	3	4	5
Z	Anwendungsbereich	Zeitpunkt des Aufbringens des NBM			erforderlicher Sperrkoeffizient
		H	M	E	
		sofort	mattfeucht	nach Entschalen	
1	Allgemeiner Betonbau (Beton für nicht befahrene Bauteile ohne Griffigkeitsanforderungen)	BH	BM	BE	85 % ¹⁾
¹⁾ bei Typ BE besteht keine Anforderung an den Sperrkoeffizienten (nur Angabe des Wertes erforderlich)					

Grundsätzlich ist der Einsatz bzw. die Eignung eines ZNBM zu prüfen, siehe auch Ziel 2. Es sollte dann auf den Einsatz von ZNBM verzichtet werden, wenn aufgrund des verwendeten Betons und der Umgebungsbedingungen während des Betonierens ein Austrocknen des Betons in der Randzone bis zum nächsten Arbeitsschritt nicht zu erwarten ist. Der Einsatz eines ZNBM ersetzt nicht die grundsätzlich erforderliche Nachbehandlung der Betonoberfläche. Wenn die Wirksamkeit des ZNBM verloren gegangen ist, sind weitere Maßnahmen zur Nachbehandlung erforderlich.

Weitere Informationen zu NBM und ZNBM können DBV [8] entnommen werden.

7 Literatur

- [1] Eurocode 2: DIN EN 1992-1-1:2011-01: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit DIN EN 1992-1-1/A1:2015-03: A1-Änderung.
- [2] Eurocode 2: DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04: Nationaler Anhang und DIN EN 1992-1-1/NA/A1:2015-12: A1-Änderung.
- [3] DIN EN 206-1:2001-07: Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität mit DIN EN 206-1/A1-Änderung:2004-10 und DIN EN 206-1/A2-Änderung:2005-09.
- [4] DIN 1045-2:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.
- [5] DIN EN 13670:2011-03: Ausführung von Tragwerken aus Beton.
- [6] DIN 1045-3:2012-03: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung – Anwendungsregeln zu DIN EN 13670 mit DIN 1045-3 Berichtigung 1:2013-07.
- [7] DBV-Merkblatt (2013) Betonschalungen und Ausschulfristen. Hrsg.: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.
- [8] DBV-Merkblatt (2019) Nachbehandlung von Beton. Hrsg.: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.
- [9] DAfStb-Heft 526 (2011): Erläuterungen zu den Normen DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN 1045-3, DIN 1045-4 und DIN EN 12620. Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V., Berlin: Beuth-Verlag, 2. überarbeitete Auflage.

- [10] DBV-Heft 16 (2017) Typische Schäden im Stahlbetonbau - Vermeidung von Mängeln als Aufgabe der Bauleitung. Hrsg.: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.
- [11] ZTV-ING (2017) Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 1 bis Teil 10: Massivbau.
- [12] DBV-Merkblatt (2017) Industrieböden aus Beton. Hrsg.: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.
- [13] DBV-Merkblatt (2011) Brückenkappen aus Beton. Hrsg.: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.
- [14] DBV-Merkblatt (2014) Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton. Hrsg.: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.
- [15] DBV-Merkblatt (2016) Begrenzung der Rissbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau. Hrsg.: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.
- [16] DBV-Merkblatt (2015) Sichtbeton. Hrsg.: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.
- [17] TL NBM-StB 09 (2009) Technische Lieferbedingungen für flüssige Beton-Nachbehandlungsmittel: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV).

8 Autoren

Prof. Dr.-Ing. Frank Fingerloos

Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.
Kurfürstenstraße 129
10785 Berlin

Dr.-Ing. Enrico Schwabach

Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.
Kurfürstenstraße 129
10785 Berlin

Nachbehandlung – Grundlagen, Regelwerk, Randbedingungen

Thomas Richter

Zusammenfassung

Unter Nachbehandlung werden alle Maßnahmen verstanden, die den Beton bis zum Erreichen seiner eigenen Widerstandsfähigkeit gegenüber schädigenden Einflüssen schützen. Die Nachbehandlung sorgt für eine hohe Qualität der Betonrandzone, um die angestrebte Dauerhaftigkeit der Betonbauteile sicherzustellen. Dazu muss die Betonrandzone ein dichtes Gefüge aufweisen, ihre planmäßige Festigkeit erreichen und ein möglichst geringes Risspotenzial an der Betonoberfläche aufweisen.

1 Allgemeines

Die Bemessung der Betonbauwerke erfolgt heute im Wesentlichen über die Festbetoneigenschaften des Betons, insbesondere die Druckfestigkeit. Druckfestigkeit allein garantiert keine Dauerhaftigkeit. Die aktuelle Normengeneration im Betonbau verbindet deshalb Anforderungen an die Bemessung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit mit Anforderungen an die Dauerhaftigkeit. Eine besondere Rolle spielt dabei die Erzielung einer dichten Betonrandzone durch eine fachgerechte Nachbehandlung. Je geringer die Porosität und Permeabilität der Betonrandzone, je dichter also der Zementstein, desto höher ist auch der Widerstand gegen äußere Einflüsse. Deshalb ist eine früh einsetzende, ununterbrochene und ausreichend lange Nachbehandlung des Betons unerlässlich, damit er gerade im oberflächennahen Bereich die aufgrund seiner Zusammensetzung gewünschten Eigenschaften auch tatsächlich erreicht.

2 Zweck der Nachbehandlung

Bis zur ausreichenden Erhärtung ist der frisch verarbeitete und junge Beton zu schützen gegen

- vorzeitiges Austrocknen
- extreme Temperaturen bzw. Temperaturänderungen
- mechanische Beanspruchungen und schädliche Erschütterungen
- chemische Angriffe
- Einflüsse aus Niederschlägen

Der Schutz gegen vorzeitiges Austrocknen ist erforderlich, damit u. a. die Festigkeitsentwicklung und Hydratation des Betons nicht infolge Wasserentzug gestört wird. Die Folgen zu frühen Wasserverlusts sind

- geringe Oberflächenfestigkeit
- Neigung zum Absanden
- größeres Wasseraufnahmevermögen
- verminderte Witterungsbeständigkeit
- geringere Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe
- Entstehung von Frühschwindrissen
- erhöhte Gefahr späterer Schwindrissbildung

Trocknet der Beton aus, so verringert sich sein Volumen, er schwindet. Wird diese Verformung behindert, so entstehen Gefüge- und Eigenspannungen, die zu Rissen führen können. Schwindrisse beginnen an der Oberfläche und können sich nach innen fortsetzen. Es muss dafür gesorgt werden, dass der Beton nur langsam austrocknet. Das Austrocknen sollte erst dann beginnen, wenn der Beton eine Zugfestigkeit erreicht hat, bei der er die Schwindspannungen ohne Rissbildung aufnehmen kann.

Sogenannte Fröhschwindrisse entstehen in erster Linie infolge einer Volumenminderung des grünen und jungen Betons an freiliegenden Oberflächen durch Austrocknen. Solange der Beton noch verformbar ist, können auftretende Fröhschwindrisse durch Nachverdichten oder Bearbeiten der Oberfläche (z. B. Abscheiben) wieder geschlossen werden.

Wesentlichen Einfluss auf die Austrocknung des Betons haben

- Beton- und Lufttemperatur und ihr Unterschied
- relative Luftfeuchte und
- Windgeschwindigkeit

Ist die Betonoberfläche wärmer als die umgebende Luft, so beschleunigt sich die Austrocknung. Darauf ist besonders bei nicht geschalteten Oberflächen zu achten. Dies kann bei sommerlichen Verhältnissen der Fall sein (z. B. kühle morgendliche Lufttemperaturen), aber auch im Winter (Lieferung von Warmbeton). Der Einfluss der Windgeschwindigkeit kann insbesondere bei flächigen und exponierten Bauteilen erheblich sein. Extreme Temperatureinflüsse (z. B. starke Sonneneinstrahlung, schroffe Abkühlung durch Regen oder Nachbehandlung mit Wasserstrahl bei warmen Betonoberflächen) und die durch Hydratation entstehende Wärme führen zu Temperaturunterschieden zwischen Randzone und Kern der Bauteile. Die Folge sind Spannungen, da sich die unterschiedlichen temperaturbedingten Verformungen im Bauteil gegenseitig behindern. Gegen diese äußeren Einwirkungen ist deshalb ein Witterungsschutz erforderlich. Die Temperaturunterschiede zwischen Betonoberfläche und Kern infolge abfließender Hydratationswärme sind deshalb zu begrenzen (i. d. R. $< 20\text{ K}$, bei massigen Bauteilen unter Umständen $< 12\text{ K}$) [11].

Die Temperatur übt auch einen Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung aus. Diese wird bei niedrigen Temperaturen verzögert und verläuft bei Temperaturen unter $+ 5\text{ °C}$ sehr langsam. Um Schäden durch Gefrieren von frischem und jungem Beton zu vermeiden, ist der Beton bei solchen Temperaturen wärmedämmend abzudecken, nötigenfalls ist Wärme zuzuführen ohne dabei den Beton auszutrocknen. Hat ein gegen Fremdwasser geschützter Beton eine Druckfestigkeit von 5 N/mm^2 erreicht oder seine Temperatur vorher wenigstens 3 Tage 10 °C nicht unterschritten, so gilt er als „gefrierbeständig“, d. h. widerstandsfähig gegen einmaliges Durchfrieren.

Mechanische Beanspruchungen wie heftige Schwingungen und starke Erschütterungen während des Erstarrens und in der ersten Zeit des Erhärtens, z. B. durch Arbeiten an benachbarten Bauteilen oder Bauwerken mit fließendem Verkehr, können ein Bauwerk schädigen, wenn hierdurch das Betongefüge und der Verbund zwischen Bewehrung und Beton gelockert wird. Ebenfalls können Rissbildungen initiiert werden. Hinweise zu notwendigen Maßnahmen und Erfahrungen finden sich in [1, 2].

Bleibende Schäden am frischen oder jungen Beton durch Regentropfen und abfließendes Regenwasser können durch eine vollflächige Folien- oder Mattenabdeckung bzw. durch Schutz vor Überströmen der Oberfläche verhindert werden.

3 Nachbehandlung - historisch

Die ersten Bestimmungen für „Eisenbetonbauten“ 1904 [3] enthielten bereits den Hinweis, dass „Eisenbetonkonstruktionen ... gegen Einwirkungen geschützt werden, welche auf die Erlangung einer ausreichenden Tragfähigkeit von nachteiligem Einfluß sein könnten.“ Die 1932 veröffentlichten Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton [4] besaßen dann einen Abschnitt „Verarbeitung und Nachbehandlung von Beton“, in dem eine 8- bis 14-tägige Feuchthaltung des Betons gefordert wurde. Zur Begründung der Nachbehandlung wurden das Erzielen einer normativen Druckfestigkeit, das Verhindern des Schwindens im jungen Alter und der Schutz vor schädlichen Einflüssen bei der Erhärtung genannt.

1983 veröffentlichte der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton die Richtlinie zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton als ergänzende Regelungen zur damals geltenden DIN 1045 aus dem Jahr 1978 [5]. Hintergrund waren Abwitterungen, Bewehrungskorrosion verbunden mit dadurch bedingten Rissbildungen und Abplatzungen der Betondeckung. Neben verschärfenden Regelungen zu Betondeckung und Betonzusammensetzung bei Außenbauteilen findet sich auch der Hinweis „Auf das Erfordernis einer gründlichen und ausreichend langen Nachbehandlung des Betons wird ausdrücklich verwiesen.“ Ergänzend dazu wurde 1984 eine Richtlinie zur Nachbehandlung von Beton veröffentlicht, mit detaillierteren Anforderungen an Art, Ausführung und Dauer der Nachbehandlung [6].

4 Normative Grundlagen

Die aktuellen, normativen Festlegungen zur Nachbehandlung von Beton finden sich in DIN EN 13670 [7, Abschn. 4.5] in Verbindung mit den deutschen Anwendungsregeln DIN 1045-3 [8]. Erläuterungen und Merkblätter untersetzen die Normen und geben praktische Anwendungshinweise [9, 10, 11].

Die Leistungen zur Nachbehandlung und zum Schutz des jungen Betons gegen kühle und warme Witterung sind nach VOB C, DIN 18331 [12, Abschn. 4.1.6] Nebenleistungen. Nur Vorsorge- und Schutzmaßnahmen für das Betonieren unter 5 °C sind nach [12, Abschn. 4.2.10] besondere Leistungen. Die Formulierungen im genannten Abschnitt der VOB zum Betonieren bei hohen Temperaturen sind zu hinterfragen: Vorsorge- und Schutzmaßnahmen werden als besondere Leistungen beschrieben, wenn vor dem Betonieren „über einen Zeitraum von 48 h anhaltende Lufttemperaturen von durchschnittlich über 30 °C“ herrschen. Dieser Fall tritt in der Praxis in Deutschland nicht ein – trotzdem sind bei sommerlichen Temperaturen erhöhte Aufwendungen für die Nachbehandlung erforderlich ebenso wie bei winterlichen Temperaturen.

Grundsätzlich kann davon abweichend die Nachbehandlung auch als eigene Position im Leistungsverzeichnis erfasst werden, um eine hohe Qualität der Nachbehandlung zu sichern.

Bei der Kalkulation von Betonarbeiten ist zu beachten, dass die Nachbehandlung nicht in den Arbeitszeit-Richtwerten Hochbau enthalten ist, die Arbeitszeit also zusätzlich zu kalkulieren ist [13]. Dies stellt einen Widerspruch dazu dar, dass die Nachbehandlung nach VOB eine Nebenleistung der Betonarbeiten ist. Der Aufwand für die Nachbehandlung kann z. T. erheblich sein, außerdem können sich Schwierigkeiten bei der Einordnung der Nachbehandlung in den Bauablauf ergeben.

Verschärfte Anforderungen an die Nachbehandlung zur Erreichung einer höheren Dauerhaftigkeit der Bauteile stellen ZTV-ING (Ingenieurbauwerke), ZTV-W (Wasserbauwerke), DIN 11622 (landwirtschaftliche Behälter und Fahrsilos) und DVGW W 300-4 (Trinkwasserbehälter) [13-16].

Bisher in den Regelwerken nicht enthalten sind Maßnahmen zur „inneren Nachbehandlung“ von Beton, um das autogene Schwinden, z. B. bei hochfestem Beton, zu vermindern. Verwendet werden können dazu wassersättigte leichte Gesteinskörnungen oder wasserabsorbierende Polymere [21].

5 Arten der Nachbehandlung

Die im Folgenden genannten Schutzmaßnahmen zur Nachbehandlung des Betons dürfen nur bei regnerischem, feuchtem Wetter mit mindestens 85 % relativer Luftfeuchte während der ersten Tage der Erhärtung unterbleiben. Bei hoher Luftfeuchte, d. h. geringen Dampfdruckunterschieden zwischen Feuchtigkeit in der Umgebungsluft und Feuchtigkeit in der Betonoberfläche findet praktisch fast keine Verdunstung mehr statt. Da die Luftfeuchte über den Tag variiert, darf hierfür vereinfacht das Tagesmittel angesetzt werden. Eine Mittelwertbildung der Luftfeuchte über längere Zeiträume ist unzulässig [9]. Da das Wetter in unserer Klimazone relativ unbeständig ist, sollte die Anwendung der 85 %-Regelung sorgfältig geprüft werden und ist eine Ausnahme. Einzelne Regelwerke, z. B. WU-Richtlinie des DAfStb oder ZTV-ING, setzen die 85 %-Regelung außer Kraft und fordern die Nachbehandlung durch die nachfolgend genannten Maßnahmen unter Zuführung von Wasser bzw. zur Vermeidung der Verdunstung von Wasser:

- Abdecken mit Folien
- Auflegen wasserspeichernder Abdeckungen
- Aufbringen flüssiger Nachbehandlungsmittel; auch spezielle Grundierungen von Beschichtungen können geeignet sein
- kontinuierliches Besprühen mit Wasser bzw. Unterwasserlagerung
- Belassen in der Schalung oder
- eine Kombination der genannten Verfahren.

Die Verfahrensauswahl hängt von den nachzubehandelnden Bauteilen, den Umgebungsbedingungen und den technischen sowie örtlichen Randbedingungen ab. Die gebräuchlichste Maßnahme gegen vorzeitiges Austrocknen ist ein sorgfältiges Abdecken mit dampfdichter Kunststoff-Folie, die aus Gründen der Dampfdichtheit, Reißfestigkeit und evtl. Wiederverwendbarkeit mindestens 0,2 mm dick sein sollte. Die Folien müssen auf den noch mattfeuchten Beton (dunkle Oberflächenfärbung) überlappend aufgelegt und an den Stößen gegen Abheben befestigt werden (z. B. Beschweren, Abkleben). Ein Unterströmen der Folie (Zugluft) mindert die Wirksamkeit der Abdeckung und muss verhindert werden. Da Folien zwar die Verdunstung aber nicht die Auskühlung der Betonoberfläche verhindern, ist bei niedrigen Außentemperaturen unter 0 °C im Regelfall als zusätzliche Schutzmaßnahme eine Wärmedämmung vorzusehen, Abbildung 1.



Abb. 1: Beispiel Nachbehandlung einer Bodenplatte bei niedrigen Temperaturen - Folie mit zusätzlicher Wärmedämmmatte

Ein weiteres gebräuchliches Verfahren ist das Besprühen der Oberfläche mit Wasser. Die Betonoberfläche muss ständig feucht bleiben, da wechselseitiges Befeuchten und Austrocknen zu Schwindrissbildungen führen kann und die Hydratation des Betons unterbunden wird. Ein direktes Bespritzen des Betons mit starkem Wasserstrahl ist insbesondere bei deutlichem Temperaturunterschied zur Betonoberfläche zu vermeiden, da

es zu einer schroffen Abkühlung der Oberfläche mit Temperaturspannungen zum Betonkern kommt. Als Hilfsmittel sind perforierte Schläuche oder Düsen, wie sie zum Rasensprengen benutzt werden, geeignet. Besonders geeignet sind Düsen, die zu einer Vernebelung des Wassers führen. Horizontale Flächen können auch unter Wasser gesetzt werden, Abbildung 2. Bei Frost sollte eine nasse Nachbehandlung unterbleiben.

Bei Belassen in der Schalung sind saugende Holzschalungen feucht zu halten und Stahlschalungen gegen Aufheizung durch Sonneneinstrahlung bzw. bei niedrigen Temperaturen vor zu schneller und starker Abkühlung zu schützen. Beim Entschalen sollte der Temperaturunterschied zwischen Betonoberfläche und Luft nicht zu groß sein, um Rissbildungen im Beton zu vermeiden.



Abb. 2: Beispiel Bewässern einer Bodenplatte

Vor schädigenden Temperatureinflüssen kann Beton bei starker Sonneneinstrahlung und hoher Temperatur durch Sonnenschutz bzw. feuchte Abdeckung geschützt werden. Auf den Einsatz dunkler Folien sollte verzichtet werden. [8] begrenzt die normative Bauteiltemperatur für Bauteile in nasser bzw. wechselnd nasser Umgebung auf 70 °C, was speziell für massige Bauteile von Bedeutung sein kann.

Wenn junger Beton gegen schädigenden Kontakt mit angreifenden Stoffen geschützt werden muss, ist dies in den bautechnischen Unterlagen anzugeben.

Beim Umschließen von Betonoberflächen mit wasserspeichernden Materialien wie Jutegewebe, Fasermatten, Sandschichten ist die Abdeckung ständig feucht zu halten und ggf. durch eine Folie vor zu schneller Feuchtigkeitsabgabe zu schützen.

Zum Einsatz von flüssigen Nachbehandlungsmitteln (auch Curingmittel genannt) wird auf den Beitrag von Blask [18] in diesem Symposium verwiesen.

6 Beginn und Dauer der Nachbehandlung

Nach Abschluss des Verdichtens und der Oberflächenbearbeitung des Betons ist unverzüglich nachzubehandeln. Erfolgt eine Oberflächenbearbeitung (z. B. Abscheiben, Glätten) mit zeitlichem Abstand zur Verdichtung, ist eine zwischenzeitliche Nachbehandlung durchzuführen. Der Beginn der Nachbehandlung sollte so früh wie möglich erfolgen und ist mitentscheidend für den Erfolg der Nachbehandlung. Beim Beginn der Nachbehandlung darf die Oberfläche noch nicht ausgetrocknet sein. Erhardt [19] zeigte, dass die Austrocknung des nicht nachbehandelten Betons in drei Phasen verläuft. In der ersten Phase kann der Wasserverlust an der Oberfläche weitestgehend aus tieferen Betonschichten ausgeglichen werden. In der zweiten Phase nimmt der Wassergehalt an der Oberfläche stärker ab, Wasser aus den tieferen Schichten des Betons kann nicht

mehr nachgeliefert werden, der Trocknungshorizont verlagert sich ins Betoninnere. Optisch ist dies an der Aufhellung der nicht geschalteten Betonoberfläche von dunkelgrau nach hellgrau zu erkennen, die Nachbehandlung muss spätestens beginnen.

Bei exponierten flächigen Betonbauteilen kann zur Vermeidung von Fröhschwindrissen eine Messung des Kapillar(unter)drucks im Frischbeton erfolgen. Der Kapillardruck lässt Aussagen über den optimalen Zeitpunkt des Nachbehandlungsbeginns bis hin zu einer gesteuerten und optimierten Nachbehandlung zu [20].

Die Mindestdauer der Nachbehandlung richtet sich nach der Expositions-klasse, der Oberflächentemperatur (ersatzweise evtl. der Lufttemperatur) und der Festigkeitsentwicklung des Betons. Die Festigkeitsentwicklung r hängt wiederum von der Betonzusammensetzung ab. Sie wird definiert durch das Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeit nach 2 Tagen (f_{cm2}) und 28 Tagen (f_{cm28}), ermittelt an im Labor hergestellten Probekörpern bei der Erstprüfung oder an einem vergleichbaren Beton. Die Festigkeitsentwicklung kann bei Beton nach Eigenschaften dem Sortenverzeichnis oder dem Lieferschein des Transportbetons entnommen werden. Wird bei besonderen Anwendungen die Druckfestigkeit zu einem späteren Zeitpunkt als nach 28 Tagen bestimmt, ist zur Ermittlung von r statt f_{cm28} die mittlere Druckfestigkeit zum späteren Zeitpunkt anzusetzen, z. B. nach 56 Tagen (f_{cm56}).

Bei Umweltbedingungen, die den Expositions-klassen außer X0, XC1 und XM entsprechen, muss der Beton bis zum Erreichen von 50 % seiner charakteristischen Druckfestigkeit nachbehandelt werden. Diese Forderung ist in Tabelle 1 in Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung und Oberflächentemperatur des Betons in eine Mindestdauer der Nachbehandlung umgesetzt. Wenn die Mindestnachbehandlungsdauer nach Tabelle 1 verkürzt werden soll, ist ein spezieller Nachweis der tatsächlichen Festigkeitsentwicklung im Bauteil, z. B. durch eine Berechnung der Reife auf Grundlage von Temperaturmessungen im Bauteil oder durch zerstörungsfreie Festigkeitsprüfungen, erforderlich. Zur Vereinfachung kann anstelle der Werte nach Tafel alternativ für die Expositions-klassen XC2, XC3, XC4, und XF1 (also z. B. übliche Hochbauteile) die Ermittlung der Nachbehandlungsdauer über die Frischbetontemperatur zum Einbauzeitpunkt und den r -Wert erfolgen, Tabelle 2. Bei Verwendung von Stahlschalungen darf Tafel 2 nur angewendet werden, wenn ein übermäßiges Auskühlen des Betons im Anfangsstadium der Erhärtung ausgeschlossen wird. Wird anstelle der Oberflächentemperatur die Lufttemperatur zur Festlegung der Nachbehandlungszeit gewählt, ist die Lufttemperatur recht einfach zu messen, führt aber zu Nachbehandlungszeiten auf der sehr sicheren Seite, weil die Wärmeentwicklung des Betonbauteils durch Hydratation nicht berücksichtigt wird.

Tab. 1: Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen nach DIN 13670 / DIN 10345-3 [7, 8] für alle Expositions-klassen außer X0, XC1 und XM

Oberflächen- temperatur ϑ [°C] ²⁾	Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen			
	Festigkeitsentwicklung des Betons r ¹⁾			
	schnell $r \geq 0,50$	mittel $r \geq 0,30$	langsam $r \geq 0,15$	sehr langsam $r < 0,15$ ³⁾
$\vartheta \geq 25$	1	2	2	3
$25 > \vartheta \geq 15$	1	2	4	5
$15 > \vartheta \geq 10$	2	4	7	10
$10 > \vartheta \geq 5$	3	6	10	15

¹⁾ Zwischenwerte dürfen ermittelt werden

²⁾ Anstelle der Oberflächentemperatur darf die morgendliche Lufttemperatur angesetzt werden

³⁾ Betone mit sehr langsamer Festigkeitsentwicklung sind in Deutschland nicht üblich

Tab. 2: Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen nach DIN 13670 / DIN 1045-3 [7, 8] für die Expositionsklassen XC2, XC3, XC4 und XF1 – Vereinfachtes Alternativverfahren in Abhängigkeit von der Frischbetontemperatur

Frischbetontemperatur ϑ_{fb} zum Einbaupunkt [°C]	Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen		
	Festigkeitsentwicklung des Betons r ¹⁾		
	schnell $r \geq 0,50$	mittel $r \geq 0,30$	langsam $r \geq 0,15$
$\vartheta \geq 15$	1	2	4
$15 > \vartheta \geq 10$	2	4	7
$10 > \vartheta \geq 5$	4	8	14

¹⁾ Zwischenwerte dürfen ermittelt werden

Weiterhin gilt für die Ermittlung der Mindestnachbehandlungsdauer

- für Beton mit einer Verarbeitbarkeitszeit > 5 h: angemessene Verlängerung, mindestens um die Verzögerungszeit
- bei Temperatur der Betonoberfläche < 5 °C: Verlängerung um die Zeitspanne mit Temperaturen unter 5 °C
- für die Expositionsklasse XM: Erreichen von 70 % der charakteristischen Betondruckfestigkeit; ohne speziellen Nachweis sind die Werte nach Tafel zu verdoppeln
- für die Expositionsklassen X0 und XC1: 12 h; bei Fertigteilen darf diese Zeit unterschritten werden, wenn der Beton eine Reife aufweist, die sich unter Annahme einer konstanten Oberflächentemperatur von 20 °C und einer Nachbehandlungsdauer von 12 h ergibt.

Bei Bauteilen mit besonders hoher Oberflächenbeanspruchung kann es sinnvoll sein, eine gegenüber Tafel 1 angemessen verlängerte Nachbehandlungsdauer zu vereinbaren.

7 Nachbehandlung von Sichtbeton

Zusätzlich zu den normativen Anforderungen an die Nachbehandlung muss berücksichtigt werden, ob und welche Auswirkungen auf das Erscheinungsbild der Betonoberfläche resultieren. Bei üblichen Innenbauteilen ergeben sich meist keine Probleme, da die Mindestnachbehandlungszeiten von 12 h durch Belassen in der Schalung und Abdecken nicht geschalter Flächen erreicht werden.

Bei jungen Sichtbetonflächen ist jeder Kontakt mit flüssigem Wasser (auch Niederschlagswasser) zu verhindern. Damit kommt primär ein Verdunstungsschutz als Nachbehandlung in Frage, üblicherweise durch Einpacken oder Einhausen mit Kunststoff-Folie. Da Kondensat oder weiches Niederschlagswasser zu unerwünschten Ausblühungen führen können, sollte die Folie nicht direkt auf der Betonfläche aufliegen, sondern ist mit einigen Zentimetern Abstand zur Betonoberfläche anzubringen. Bei Hilfskonstruktionen aus Holz zur Befestigung der Folien ist eine farbliche Beeinflussung der Betonoberfläche möglich. Kontaktpunkte zur Betonoberfläche sollten deshalb aus Kunststoff oder Schaumstoff bestehen. Ein eingeschränkter, geringer Luftaustausch mit der Umgebung ist zur Vermeidung von Kondensatbildung sinnvoll, Zugluft muss aber unterbunden werden.

Die Mindestnachbehandlungszeiten (und notwendigen Ausschalfristen) sollten bei Sichtbeton nicht wesentlich überschritten werden, die Reife der Bauteile beim Entschalen ähnlich sein. Insbesondere im Winter können Dunkelverfärbungen oft deutlich oder ganz verringert werden, wenn Sichtbetonflächen möglichst frühzeitig ausgeschalt werden und so eine rasche Abtrocknung (nicht Austrocknung) der Sichtbetonflächen erfolgt. Bei Deckenunterseiten mit längeren Ausschalfristen (z. B. zur Vermeidung von Verformungen) kann die Schalung abschnittsweise entfernt werden und jeweils sofort unterstützt werden. Stützenköpfe können mit nicht farbverändernden Materialien abgedeckt werden (z. B. mehrlagiges Maurervlies, Folie). Bei sehr hohen Anforderungen an die Sichtbetonqualität können die Stützen zusätzlich nach wenigen Tagen immer wieder geringfügig versetzt werden [22].

8 Überwachung der Nachbehandlung

Unabhängig von der Überwachungsklasse sind zu überprüfen und z. B. im Betoniertagebuch zu dokumentieren

- Lufttemperatur (Minimum / Maximum) und Witterungsverhältnisse während des Betonierens einzelner Abschnitte
- evtl. Frischbetontemperatur, wenn die Nachbehandlungsdauer nach Tabelle 2 ermittelt wird
- Bauabschnitt und Bauteil
- Art und Dauer der Nachbehandlung

Beim Einbau von Beton der Überwachungsklassen 2 und 3 sind zusätzlich mit Bezug zur Nachbehandlung zu überprüfen

- Frischbetontemperatur bei Lufttemperaturen unter + 5 °C und über + 30 °C
- Zeitpunkt und Dauer der einzelnen Betoniervorgänge

Entsprechende Formblätter für Betonier- bzw. Nachbehandlungstagebücher sowie Arbeitsanweisungen finden sich z. B. in [10, 11] oder werden von den anerkannten Überwachungsstellen zur Verfügung gestellt.

9 Literatur

- [1] Mähner, D.; Basler, F.; Hesselink, J. (2019) Einfluss von Erschütterungen auf jungen Beton. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 114, Heft 3, S. 176-184
- [2] Ralbovsky, M.; Vorwagner, A.; Kleiser, M.; Kozakow, T. Geier, R (2020) Verkehrsschwingungen bei Betonierarbeiten auf bestehenden Straßenbrücken. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 115, Heft 3, S. 179-187
- [3] Verband Deutscher Architekten- und Ingenieur-Vereine; Deutscher Beton-Verein (3-1904) Vorläufige Leitsätze für die Vorbereitung, Ausführung und Prüfung von Eisenbetonbauten
- [4] Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton (1932)
- [5] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (3-1983) Richtlinie zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton. Ergänzende Bestimmungen zu DIN 1045 (Ausgabe 12.78)
- [6] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2-1984) Richtlinie zur Nachbehandlung von Beton
- [7] DIN EN 13670 (3-2011) Ausführung von Tragwerken aus Beton
- [8] DIN 1045-3 (3-2012) Tagwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung, Anwendungsregeln zu DIN EN 13670
- [9] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2011) Erläuterungen zu den Normen DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN 1045-3 und DIN 4226. Schriftenreihe Heft 526, Beuth Verlag, Berlin
- [10] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein (3-2019) Merkblatt Bauausführung: Nachbehandlung von Beton
- [11] Verein Deutscher Zementwerke (4-2014) Zement-Merkblatt B 8: Nachbehandlung und Schutz des jungen Betons
- [12] DIN 18331 (9-2019) VOB Teil C, Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen, Betonarbeiten
- [13] Zentralverband des Deutschen Baugewerbes (2006) Arbeitszeit-Richtwerte Hochbau, B Beton- und Stahlbetonarbeiten. Zeittechnik-Verlag, Neu-Isenburg
- [14] Bundesanstalt für Straßenwesen (4-2019) Zusätzliche Technische Vertragsbestimmungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING

- [15] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2012) Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton- und Stahlbeton (Leistungsbereich 215) und A1-Änderung (2019)
- [16] DIN 11622 (9-2015) Gärfuttersilos, Güllebehälter, Behälter in Biogasanlagen, Fahrsilos. Teil 2: Gärfuttersilos, Güllebehälter und Behälter in Biogasanlagen aus Beton und Teil 5: Fahrsilos
- [17] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs (10-2014) DVGW W 300-4: Technische Regel Trinkwasserbehälter. Teil 4: Werkstoffe, Auskleidungs- und Beschichtungssysteme – Grundsätze und Qualitätssicherung auf der Baustelle
- [18] Blask, O., (2021) Wirkungsweise chemischer Nachbehandlungsmittel. Tagungsband 17. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Karlsruher Institut für Technologie
- [19] Erhardt, D. (2016) Zum Einfluss der Nachbehandlung auf die Gefügeausbildung und den Frost-Tausalz-Widerstand der Betonrandzone. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar
- [20] Wagner, C. (2017) Werkzeug zur Optimierung der Nachbehandlung von Betonbauteilen. Rundschreiben des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins 252, S. 17-20
- [21] Mechtcherine, V.; Dudziak, L.; Brüdern, A.-E.; Hempel, S.; Schröfl, C. (2011) Superabsorbierende Polymere (SAP): Innovative multifunktionale Betonzusatzmittel. Beton, Vol. 61, S. 68-72
- [22] Peck, M.; Bosold, D.; Bose, T. (2016) Technik des Sichtbetons. Verlag Bau + Technik, Erkrath

10 Autor

Dr.-Ing. Thomas Richter

InformationsZentrum Beton GmbH
Kochstr. 6-7
10969 Berlin

Wirkungsweise chemischer Nachbehandlungsmittel

Oliver Blask

Zusammenfassung

Die Nachbehandlung von Beton mit flüssigen (chemischen) Nachbehandlungsmitteln stellt in vielen Fällen eine Alternative zu klassischen Nachbehandlungsarten, wie das Abdecken mit Folie oder das Auflegen von wasserspeichernden Abdeckungen, dar. Hierzu kommen Nachbehandlungsmittel unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung zum Einsatz, die alle nach dem Auftragen einen Film bilden, der die Wasserabgabe des Betons reduziert. Je nach Anwendungsgebiet werden unterschiedliche Nachbehandlungsmittel eingesetzt; im Betonstraßenbau sind Nachbehandlungsmittel auf der Basis von Paraffinwachsemulsionen am verbreitetsten, wogegen bei Estrichen und Industrieböden häufiger Polymerdispersionen eingesetzt werden. Bei allen Nachbehandlungsmitteln ist die richtige Applikation entscheidend für eine wirksame Nachbehandlung, insbesondere der optimale Auftragszeitpunkt spielt dabei eine entscheidende Rolle. Dieser Artikel erläutert die verschiedenen Arten von Nachbehandlungsmitteln, ihre Wirkungsweise sowie Einflüsse auf diese.

1 Einleitung – Ziele chemischer Nachbehandlungsmittel

Die Nachbehandlung von Beton ist notwendig, um eine vollständige Hydratation des Zements zu gewährleisten. Dies trifft in besonderem Maße auf horizontale Betonflächen wie z. B. Betonfahrbahndecken oder Industrieböden aus Beton zu. Ihnen fehlt zum einen im Vergleich zu Bauteilen im Hochbau der anfängliche Verdunstungsschutz durch die Schalung, zum anderen ist gerade die Oberfläche, an der die Verdunstung stattfindet, später häufig den stärksten Beanspruchungen ausgesetzt. Neben der Nachbehandlung durch das Abdecken mit dampfdichten Folien, dem Auflegen von wasserspeichernden Abdeckungen und dem Aufrechterhalten eines sichtbaren Wasserfilms kommen bereits seit den 50er Jahren chemische Nachbehandlungsmittel zum Einsatz.

Der Zweck chemischer Nachbehandlungsmittel, wie auch der übrigen Nachbehandlungsmethoden, ist dafür zu sorgen, dass ausreichend Wasser für eine vollständige Hydratation zur Verfügung steht. Dies geschieht, indem ein Verdunstungsschutz erzielt und der vorzeitige Wasserverlust reduziert wird. Einige neue Methoden der Nachbehandlung [1] erzielen durch wasserspeichernde Materialien eine innere Nachbehandlung des Betons. Sie werden hauptsächlich zur inneren Nachbehandlung ultrahochfester Betone eingesetzt. Die Wirksamkeit dieser Methoden auf die Oberflächenqualität von Normalbeton hängt davon ab, wie schnell Wasser aus den Depots an die Oberfläche transportiert wird, an der die Verdunstung stattfindet. In diesem Artikel behandeln wir ausschließlich die externen Methoden der chemischen Nachbehandlung.

2 Welche Arten chemischer Nachbehandlungsmittel gibt es?

Bei den zurzeit kommerziell angebotenen chemischen Nachbehandlungsmitteln handelt es sich um flüssig applizierte Nachbehandlungsmittel, die nach dem Verdunsten der flüssigen Phase bei gleichmäßiger Applikation einen Film bilden, der die Verdunstung von Wasser vermindert. Wegen der flüssigen Applikation spricht man im Allgemeinen einfach von flüssigen Nachbehandlungsmitteln. Bei der Lieferform unterscheidet man lösemittelhaltige und wässrige Mittel, wobei die lösemittelhaltigen Produkte wegen ihrer schädlichen Einflüsse auf Mensch und Umwelt auf dem deutschen Markt nur noch eine geringe Bedeutung besitzen. Einige Nachbehandlungsmittel enthalten zusätzlich Pigmente, die das Sonnenlicht reflektieren und so ein

Aufheizen des Betons reduzieren. Diese pigmentierten Nachbehandlungsmittel sind nicht zu verwechseln mit eingefärbten Nachbehandlungsmitteln, die es dem Verarbeiter lediglich erleichtern zu erkennen, wo bereits Nachbehandlungsmittel appliziert wurde. Eine erste Einteilung flüssiger Nachbehandlungsmittel kann auf Basis ihrer chemischen Zusammensetzung getroffen werden.

2.1 Zusammensetzung flüssiger Nachbehandlungsmittel

2.1.1 Kunstharze (Epoxidharz)

Kunstharze zählen üblicherweise zu Beschichtungsstoffen, werden jedoch in Ausnahmefällen auch zur Nachbehandlung eingesetzt. Hierbei ist zu beachten, dass die Kunstharze eine Trennlage bilden, was bei einem weiteren Belag zu berücksichtigen ist.

2.1.2 Polymerdispersionen

Im Bereich der Estriche und Industrieböden aus Beton werden häufig Polymerdispersionen auf Basis unterschiedlicher Polymere und Copolymere eingesetzt. Zu den verbreitetsten Polymerdispersionen zählen zurzeit:

- Acrylat Dispersionen
- Styrol-Acrylat-Copolymerisat Dispersionen
- Vinylacetat-Ethylen-Copolymerisat Dispersionen
- Styrol-Butadien-Copolymerisat Dispersionen

Zu den Vorteilen dieser Polymerdispersionen zählt ihre höhere Verträglichkeit mit weiteren Belägen. Da auch Polymerdispersionen eine Trennlage bilden, empfehlen die Hersteller in der Regel sie einzuscheiben, bevor eine weitere Schicht aufgebracht wird, falls sie als Zwischennachbehandlung eingesetzt werden. In Vergleich zu den im Folgenden aufgeführten Paraffinwachsemlulsionen erzielen die Polymerdispersionen einen geringeren Verdunstungsschutz. Die Herstellerangaben schwanken für verschiedene Produkte zwischen Sperrkoeffizienten (nach [2]) von 20 % bis 60 % bei üblichen Auftragsmengen von 100 bis 300 g/m², während Paraffinwachsemlulsionen bei gleichen Auftragsmengen üblicherweise Werte von 85 % und darüber erreichen.

2.1.3 Paraffinwachse

Insbesondere im Bereich des Betonstraßenbaus werden flüssige Nachbehandlungsmittel auf Paraffinbasis eingesetzt. Bei diesen Nachbehandlungsmitteln wird Paraffinwachs fein im Dispersionsmittel Wasser dispergiert. Hierzu wird das geschmolzene Wachs bei hohen Scherraten in hochtourigen Mischern dispergiert und anschließend abgekühlt. Emulgatoren reduzieren die Oberflächenenergie der Partikel und sorgen dafür, dass die dispergierten Partikel nicht koagulieren. Bei den Paraffinwachsen handelt es sich dabei meist um niedrig schmelzende Wachse mit Schmelzpunkten zwischen 40 und 60 °C. Die Partikelgröße der Wachsemlulsionen wird bei der Herstellung durch die verwendeten Emulgatoren sowie die Prozessparameter gesteuert und liegt typischerweise unter 1 µm. Bei den Wachsemlulsionen unterscheidet man zwischen den anionisch und den kationisch stabilisierten Emulsionen. Diese beiden Typen unterscheiden sich aufgrund der verwendeten Emulgatoren in der Eignung für verschiedene Anwendungsbereiche.

Neben Wachsen können die Wachsemlulsionen zusätzlich Pigmente enthalten. Als Pigment wird bei diesen Wachsemlulsionen aufgrund seines hohen Brechungsindex häufig Titandioxid eingesetzt.

Zu den Vorteilen von Wachsemlulsionen zählt ihre sehr hohe Reduktion der Wasserdampfdiffusion, die Sperrkoeffizienten (geprüft nach TL NBM-StB 09) von nahezu 100 % ermöglicht.

2.2 Einteilungen nach Regelwerken

Für flüssige Nachbehandlungsmittel für Beton gibt es verschiedene nationale und internationale Normen bzw. Regelwerke, jedoch zurzeit keine harmonisierte europäische Norm und damit kein CE-Zeichen.

In Deutschland ist das zurzeit wichtigste Regelwerk die TL NBM-StB 09 der Forschungsgemeinschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV). Weltweit von größerer Bedeutung sind die ASTM C309-19 [3] und ASTM C1315-19 [4] der American Society for Testing and Materials.

2.2.1 Anforderungen an flüssige Nachbehandlungsmittel nach TL NBM-StB 09

Die TL NBM-StB 09 regelt die Anforderungen an flüssige Nachbehandlungsmittel besonders für den Betonstraßenbau. Die TL NBM-StB kann jedoch auch zur Beurteilung von flüssigen Nachbehandlungsmitteln für andere Anwendungsgebiete herangezogen werden. Die TL NBM-StB 09 unterscheidet grundsätzlich drei Anwendungsbereiche für befahrene und nicht befahrene Betonbauteile:

- Beton für Verkehrsflächen (Straßenbeton mit Griffigkeitsanforderungen an die Oberfläche)
- Beton für Verkehrsflächen (Straßenbeton ohne Griffigkeitsanforderungen an die Oberfläche)
- Allgemeiner Betonbau (Beton für nicht befahrene Bauteile ohne Griffigkeitsanforderungen)

Daneben unterscheidet die TL NBM-StB 09 die Nachbehandlungsmittel nach dem Zeitpunkt des Aufbringens zwischen sofort, mattfeucht und nach dem Entschalen. Die Einteilung der Nachbehandlungsmittel nach TL NBM-StB 09 ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Einteilung der Nachbehandlungsmittel nach TL NBM-StB 09

Anwendungsbereich		Zeitpunkt des Aufbringens		
		sofort H	mattfeucht M	nach Entschalen E
Beton für Verkehrsflächen (Straßenbeton mit Griffigkeitsanforderung an die Oberfläche)	V	VH	VM	-
Beton für Verkehrsflächen (Straßenbeton ohne Griffigkeitsanforderung an die Oberfläche)	A	AH	-	-
Allgemeiner Betonbau (Beton für nicht befahrene Bauteile ohne Griffigkeitsanforderungen)	B	BH	BM	BE

Neben den in Tabelle 1 genannten Mitteln enthält die TL NBM-StB 09 noch Nachbehandlungsmittel mit besonderen Eigenschaften wie erhöhter Hellbezugswert (W) und kurzfristige Verkehrsfreigabe (K). Diese Nachbehandlungsmittel haben zusätzlich weitere Anforderungen zu erfüllen.

Die Anforderungen an flüssige Nachbehandlungsmittel unterscheiden sich in allgemeine Anforderungen, die für alle flüssigen Nachbehandlungsmittel im flüssigen Zustand gelten, wie Versprühbarkeit, Flammpunkt, Lagerstabilität und Zusammensetzung sowie typenspezifische Anforderungen, die an den Nachbehandlungsfilm gestellt werden, wie Sperrwirkung, Griffigkeit, Trocknungszeit, Verwitterungsverhalten und Hellbezugswert. Die typenspezifischen Anforderungen sind in Tabelle 2 wiedergegeben.

Tab. 2: Typenspezifische Eigenschaften des Nachbehandlungsfilms nach TL NBM-StB 09

Eigenschaft	Kennwert	Prüfverfahren	Anforderung
Sperrwirkung	Sperrkoeffizient [%]	TL NBM-StB 09 4.2.4	Typ VH, BH: ≥ 85 %
			Typ AH: ≥ 75 %
			Typ VM, BM: ≥ 85 %
			Typ BE: keine Anforderung
Griffigkeit	SRT-Wert	TL NBM-StB 09 4.2.5 TP Griff-StB	Typ VH, VM: ≥ 50 Skalenteile
			Typ VH-K, VM-K: ≥ 60 Skalenteile
Trocknungszeit	Zeit [h]	TL NBM-StB 09 4.2.6	≤ 5 h
Verwitterungsverhalten	SRT-Wert nach Bewitterung	TL NBM-StB 09 4.2.7 TP Griff-StB	Typ VH, VM: Nach Bewitterung muss ein SRT-Wert ≥ 60 Skalenteile erreicht sein.
Hellbezugswert	Hellbezugswert W [%]		Typ VH-W, VM-W: W ≥ 60 %

Wichtigste Eigenschaft ist der Sperrkoeffizient S_n . Er gibt an, um wie viel Prozent die Wasserabgabe der behandelten Proben in Vergleich zu den unbehandelten Proben verringert ist. Da man zur Prüfung des Nachbehandlungsfilms eine Betonoberfläche benötigt und das Ergebnis sowohl von der Verdunstungsrate als auch von der Betonzusammensetzung abhängt, wird die Prüfung an einem definierten Prüfbeton in einer Klimakammer mit 30 ± 2 °C und 40 % r. F. sowie gleichmäßiger Verdunstungsrate durchgeführt.

Zur Prüfung wird abhängig vom zu prüfenden Nachbehandlungsmittel die Betonoberfläche einer Bearbeitung unterzogen (z. B. Besenstrich bzw. Glätten) und zu einem definierten Zeitpunkt das Nachbehandlungsmittel auf einen Teil der Prüfkörper aufgebracht. Die übrigen Prüfkörper werden nicht behandelt. Nach der vorgegebenen Zeit (24 h bei den Typen H und M bzw. 7 Tage bei Typ E) wird der Masseverlust infolge Verdunstung des Anmachwassers bestimmt. Der Masseverlust durch Verdunstung des Wasseranteils des reinen Nachbehandlungsmittels muss getrennt ermittelt werden und wird vom Masseverlust der behandelten Prüfkörper abgezogen. Mit den so ermittelten Daten kann der Sperrkoeffizient (Gleichung 1) berechnet werden:

$$S_n = \frac{W_u - W_b}{W_u} \cdot 100 \% \quad (1)$$

mit: S_n = Sperrkoeffizient im Alter n
 W_u = Wasserabgabe der unbehandelten Prüfkörper
 W_b = Wasserabgabe der behandelten Prüfkörper

Die Griffigkeit ist ein Maß für die Rauigkeit der Betonoberfläche. Der SRT-Wert wird nach 28 Tagen mit dem Pendelgerät nach [5] ermittelt, je höher der SRT-Wert, desto höher ist die Griffigkeit der Betonoberfläche.

Die Trocknungszeit stellt den Zeitraum zwischen dem Auftrag des Nachbehandlungsmittels und dem Zeitpunkt dar, an dem es bei 20 °C und 65 % r. F. soweit abgetrocknet ist, dass es nicht mehr klebt.

Das Verwitterungsverhalten wird ermittelt, indem die behandelten Prüfkörper nach einer Vorlagerung von 28 Tagen einer künstlichen Bewitterung nach DIN EN ISO 4892-2 [6] (Verfahren A, Beanspruchungszyklus 2) unterzogen werden. Danach wird die Griffigkeit mit dem Pendelgerät [5] ermittelt.

Der Hellbezugswert findet Anwendung bei pigmentierten Nachbehandlungsmitteln und wird nach 24 h als Weißwert gegen den Weißstandard WS DIN 5033 bestimmt.

2.2.2 Anforderungen an flüssige Nachbehandlungsmittel nach ASTM C309-19 und C1315-19

Die ASTM regelt die Anforderungen an flüssige filmbildende Nachbehandlungsmittel für Beton. Sie findet außer auf dem amerikanischen Kontinent häufig in Asien Anwendung.

Die ASTM C309-19 unterscheidet drei Typen flüssiger Nachbehandlungsmittel anhand ihres Erscheinungsbilds und der chemischen Zusammensetzung der filmbildenden Stoffe. Weiter definiert sie Anforderungen an die Verarbeitbarkeit, die Zusammensetzung, die Lagerstabilität, den Wasserverlust, den Reflexionsgrad und die Trocknungszeit.

Tab. 3: Einteilung der Nachbehandlungsmittel nach ASTM C309-19

Type/Class nach ASTM C309-19	Eigenschaft / Anforderung
Type 1	Klar oder durchscheinend ohne Farbstoff
Type 1-D	Klar oder durchscheinend mit flüchtigem Farbstoff
Type 2	Weiß pigmentiert
Zuordnung der gelösten / dispergierten Feststoffe zu Klassen	
Class A	keine Anforderungen
Class B	Kunstharze nach ASTM D883

Flüssige Nachbehandlungsmittel mit besonderen Eigenschaften sind zusätzlich geregelt durch ASTM C1315-19. Sie erweitert ASTM C309-19 durch zusätzliche Anforderungen und erhöht einige Anforderungen.

Tab. 4: Zusätzliche Anforderungen von ASTM C1315-19 an flüssige Nachbehandlungsmittel mit besonderen Eigenschaften

Anforderung	Testmethode	ASTM C309-19	ASTM C1315-19
Feststoffgehalt	ASTM D2369 [7]	keine Anforderung	≥ 25 M.-%
Wasserverlust	ASTM C156 [8]	0,55 kg/m ²	0,40 kg/m ²
Reflexionsgrad	ASTM E1347 [9]	60 %	65 %
UV Beständigkeit	ASTM C1315 9.7.6	keine Anforderung	Class A: keine Gelbverfärbung Class B: geringe Gelbverfärbung Class C: keine Anforderung
Alkalibeständigkeit	ASTM C1315 9.7.7	keine	Keine Auflösungen, Verfärbungen
Verbund	ASTM C1315 9.8	keine	> 0,50 MPa

3 Wirkungsweise flüssiger Nachbehandlungsmittel

Wässrige flüssige Nachbehandlungsmittel sind Emulsionen oder Dispersionen von Paraffinwachsen oder Polymeren in Wasser. Aufgrund der Lichtbrechung der Partikel erscheinen sie im flüssigen Zustand meist milchig-weiß. Nach dem richtigen Auftragen auf die Betonoberfläche bilden die Nachbehandlungsmittel einen geschlossenen Film, der die Wasserabgabe des Betons reduziert. Die Filmbildung verläuft vermutlich ähnlich zur Filmbildung von Latex in mehreren Schritten [10, 11, 12].

3.1 Bildung des Nachbehandlungsfilms

Die Filmbildung ist der kritische Aspekt der flüssigen Nachbehandlungsmittel; ist die Filmbildung gestört, kommt es zu einem inhomogenen Nachbehandlungsfilm mit einer geringeren Sperrwirkung. In einem einfachen Modell (vgl. Abbildung 1) läuft die Filmbildung in drei Schritten ab. In Phase 1 besteht das Nachbehandlungsmittel noch aus einer homogenen Emulsion aus diskreten Partikeln mit einem Feststoffgehalt zwischen 5 und 50 Vol.-%. Durch die Verdunstung des freien Wassers in Schritt 1 kommt es zu einer Erhöhung der Konzentration der Wachspartikel. Dies führt zu Phase 2 mit einer dichten Packung der Wachspartikel mit Wasser in den Zwischenräumen. Durch die Verdunstung des Wassers in den Zwischenräumen in Schritt 2 kommt es zu einer Deformation der Wachspartikel und zu einer weiteren Zunahme der Packungsdichte. In Phase 3 liegen die Partikel in einer dichten Matrix mit Grenzen zwischen den Partikeln vor. In Schritt 3 kommt es durch Diffusion einzelner Polymerketten durch die Partikelgrenzen zu einem Verschmelzen der Partikel und zur Bildung eines homogenen Films in Phase 4.

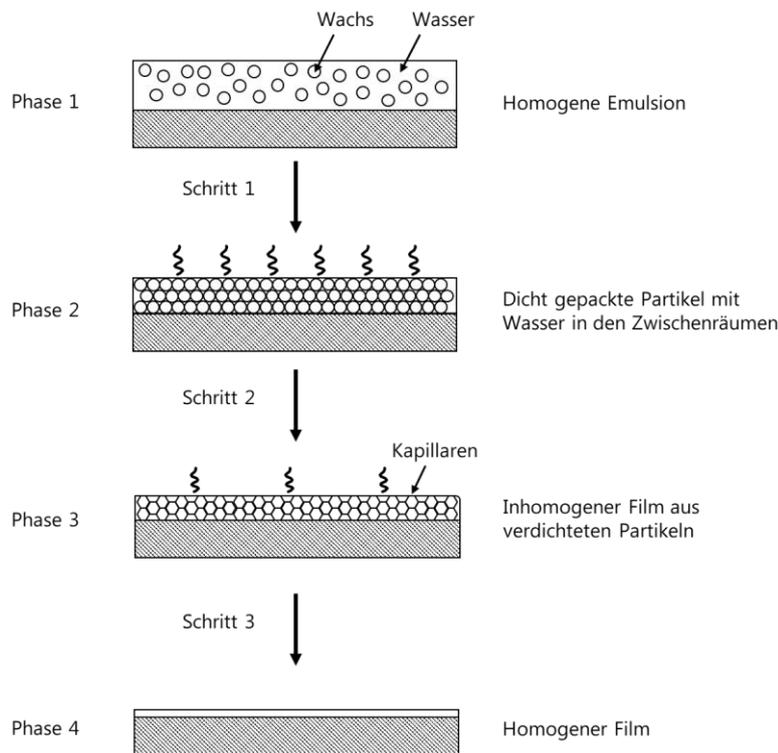


Abb. 1: Schematische Darstellung der vier Phasen der Filmbildung

Die Mechanismen der Verdichtung in Schritt 2 beruhen nach Brown und Sheetz [13, 14] auf Kontraktionskräften, die durch Verdunstung des Kapillarwassers in den Zwischenräumen entstehen (vgl. Abbildung 2).

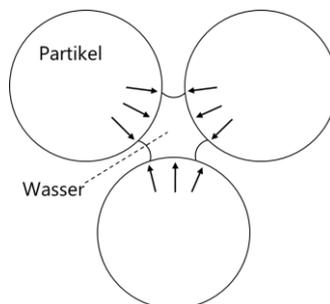


Abb. 2: Anziehungskräfte aufgrund der Kapillarkräfte des verdunstenden Wassers in den Zwischenräumen nach [13]

3.2 Einflüsse auf die Wirksamkeit des Nachbehandlungsfilms

Die Effektivität flüssiger Nachbehandlungsmittel hängt zum einen von der Zusammensetzung des Nachbehandlungsmittels und zum anderen von der korrekten Anwendung ab. Dabei spielen verschiedene Faktoren eine Rolle.

3.2.1 Zusammensetzung des Nachbehandlungsmittels

Bei der Zusammensetzung des Nachbehandlungsmittels ist zunächst der Feststoffgehalt bzw. die Auftragsmenge und die Art des verwendeten Wachses bzw. Polymers zu nennen. Bei Wachsemlulsionen haben sich im deutschen Markt Feststoffgehalte zwischen etwa 10 und 25 M.-% etabliert, die bei Auftragsmengen um 150 g/m^2 wirksame Nachbehandlungsfilme ergeben. Bei Polymerdispersionen liegen die üblichen Feststoffgehalte oft deutlich höher, was an dem anfangs erwähnten geringeren Verdunstungsschutz der Polymerdispersionen liegt. Bei der Anwendung als Zwischennachbehandlung kommen niedrige Feststoffgehalte zum Einsatz, was durch einen notwendigen Kompromiss zwischen Verdunstungsschutz und Verbund bedingt ist. Bei den Wachsemlulsionen bilden weichere Wachse wirksamere Nachbehandlungsfilme. Dies lässt sich leicht mit dem Modell der Filmbildung erklären, so erfolgt die Verdichtung des Nachbehandlungsfilms in Schritt 3 (vgl. Abbildung 1) umso leichter, je weicher die Partikel sind.

Neben der Zusammensetzung spielt auch die Herstellung und die Stabilisierung der fertigen Emulsionen eine Rolle. Bei der Herstellung von Wachsemlulsionen stabilisieren Emulgatoren die dispergierten Partikel und sorgen dafür, dass sie nicht koagulieren (vgl. Abschnitt 2.1.3). Dabei muss ein Kompromiss zwischen der Wirksamkeit und der Lagerstabilität des Nachbehandlungsmittels eingegangen werden. Denn mit mehr Emulgator verbessert sich die Lagerstabilität der Wachsemlulsion, andererseits stören die Emulgatoren die Filmbildung der Nachbehandlungsmittel. Enthält eine Emulsion zu viel oder den falschen Emulgator, koaguliert (bricht) sie nicht sofort bei Kontakt mit der alkalischen Betonoberfläche. Bei rauen Oberflächen, wie sie beispielsweise durch den Besenstrich bei Betonfahrbahnen entstehen, bildet sich kein durchgängiger Film (siehe Abbildung 3) und der Beton verliert weiter Feuchtigkeit [15]. Moderne Rotor-Stator- oder Hochdruck-Homogenisatoren sind jedoch in der Lage feinverteilte Emulsionen zu erzeugen, die mit wenig Emulgator feinverteilte Emulsionen mit enger Partikelgrößenverteilung erzeugen.

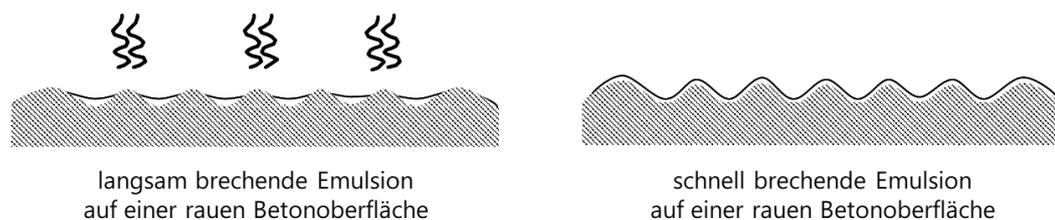


Abb. 3: Schematische Darstellung des Verhaltens verschiedener Emulsionen nach dem Auftragen auf eine raue Betonoberfläche.

3.2.2 Applikation des Nachbehandlungsmittels

Neben der Zusammensetzung spielt für die Wirksamkeit von flüssigen Nachbehandlungsmitteln ihre richtige Applikation eine entscheidende Rolle. Zur Applikation von flüssigen Nachbehandlungsmitteln existieren verschiedene Verfahren, die je nach Anwendungsgebiet variieren [18].

Die im Betonstraßenbau wohl am weitesten verbreitete Methode der Applikation ist das Aufsprühen des Nachbehandlungsmittels durch einen Sprühbalken an der Nachlaufbühne eines Gleitschalungsfertigers. Die Nachlaufbühne folgt dabei mit so viel Verzögerung, dass der Auftrag auf die mattfeuchte Oberfläche erfolgt.

Bei sonstigen großen horizontalen Flächen kann das Nachbehandlungsgerät mit motorbetriebenen Sprühgeräten aufgetragen werden. Bei kleineren oder vertikalen Betonoberflächen wird häufig ein Drucksprühgerät benutzt. Eine Applikation mit Rolle oder Pinsel ist zwar möglich, in der Praxis jedoch weniger üblich. Um einen größtmöglichen Verdunstungsschutz zu erreichen, sind bei allen Applikationsverfahren folgende Punkte wichtig:

Die volle Wirkung des Nachbehandlungsmittels kann nur bei einem vollständig geschlossenen Film erreicht werden. Hierzu sollte das Nachbehandlungsmittel als feiner Nebel gleichmäßig deckend auf die Oberfläche aufgesprüht werden. Da der frische Nachbehandlungsfilm oft weiß erscheint, sind Fehlstellen, z. B. durch verstopfte Düsen, beim frischen Film noch zu erkennen.

Grundsätzlich sollten Nachbehandlungsmittel zwar möglichst früh aufgetragen werden, um die Verdunstung des Wassers möglichst früh zu vermeiden. Wie neuere Forschungsergebnisse [16] jedoch zeigen, hat bei der Prüfung von Nachbehandlungsmitteln der Auftragszeitpunkt auf die Prüfoberfläche einen entscheidenden Einfluss auf den ermittelten Sperrkoeffizienten und es gibt einen optimalen Auftragszeitpunkt. Der Grund hierfür liegt in dem Einfluss der feuchten Betonoberfläche auf die Filmbildung. Erfolgt der Auftrag früh auf eine noch sehr feuchte Betonoberfläche, dauert die Filmbildung sehr lange und das Nachbehandlungsmittel kann nicht optimal verfilmen. Erfolgt der Auftrag dagegen zu spät, bildet sich zwar ein dichter Nachbehandlungsfilm, es ist zu dieser Zeit jedoch schon viel Wasser verdunstet. Der optimale Zeitpunkt für den Auftrag ist die sogenannte mattfeuchte Oberfläche. Dieser Zeitpunkt ist schwer zu quantifizieren, da das Erscheinungsbild der Oberfläche oft sehr subjektiv wahrgenommen wird. In einem Forschungsprojekt der TU München [17] wurde zumindest für das Labor ein Verfahren entwickelt, mit dem sich die mattfeuchte Oberfläche mit Hilfe eines Indikatorpapiers abschätzen lässt.

4 Schlussfolgerung

Flüssige Nachbehandlungsmittel können in vielen Fällen Nachbehandlungsmethoden wie das Abdecken mit Folie oder das Auflegen wasserspeichernder Matten ersetzen. Um einen größtmöglichen Verdunstungsschutz zu erzielen, ist jedoch eine fachgerechte Applikation des Nachbehandlungsmittels erforderlich. Hierbei kommt dem Auftragszeitpunkt eine besondere Bedeutung zu.

5 Literatur

- [1] Mechtcherine, V. et al. (2014) Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: results of a RILEM round-robin test, *Materials and Structures*, Vol. 47, 541-562
- [2] TL NBM-StB 09 „Technische Lieferbedingungen für flüssige Beton-Nachbehandlungsmittel“, Ausgabe 2009, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln
- [3] ASTM C309-19 „Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete“, 2019, ASTM International
- [4] ASTM C1315-19 „Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds Having Special Properties for Curing and Sealing Concrete1“, 2019, ASTM International
- [5] TP Griff-StB „Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau: Seitenkraftmessverfahren (SKM)“, Ausgabe 2007, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln
- [6] DIN EN ISO 4892-2:2013-06, Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten - Teil 2: Xenonbogenlampen (ISO 4892-2:2013); Deutsche Fassung EN ISO 4892-2:2013
- [7] ASTM D2369-20 „Standard Test Method for Volatile Content of Coatings“, 2020, ASTM International

- [8] ASTM C156-17 „Standard Test Method for Water Loss [from a Mortar Specimen] Through Liquid Membrane-Forming Curing Compounds for Concrete“, 2017, ASTM International
- [9] ASTM E1347-20 „Standard Test Method for Color and Color-Difference Measurement by Tristimulus Colorimetry“, 2020, ASTM International
- [10] Boczar, E. M., Dionne, B. C., Fu, Z., Kirk, A. B., Lesko, P.M., Koller, A. D. (1993) *Macromolecules*, Vol. 26, 5772-5781
- [11] Wang, Y. Winnik, M. A. (1992) Polymer Diffusion across Interfaces in Latex Films, *J. Phys. Chem.*, Vol. 97, 2507-2515
- [12] Keddie, J. L., Meredith P., Jones R. A. L., Donald A. M. (1995) Kinetics of Film Formation in Acrylic Latices Studied with Multiple-Angle-of-Incidence Ellipsometry and Environmental SEM, *Macromolecules*, Vol. 28, 2673-2682
- [13] Brown, G. L. (1956) Formation of Films from Polymer Dispersions, *Journal of Polymer Science*, Vol. 12, 423-434
- [14] Sheetz, D. P. (1965) Formation of Films by Drying of Latex, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 9, 3759-3773
- [15] D. Honert, O. Blask, H. Knauber (2003) Nachbehandlung von Beton zur Verringerung des Wasserverlustes und zur Reduzierung von Ausblühungen, Tagungsbericht der 15. internationalen Baustofftagung – Ibausil, Weimar, 2/1281- 2/1290
- [16] A. Frentzel-Schirmacher, J. Stark (2006) Prüfung von Nachbehandlungsmitteln für den Betonstraßenbau, In *Zeitschrift Straße und Autobahn*, 2006, Nr. 5, S 301-310
- [17] P. Schießl, J. Huber (2006) „Nachweisverfahren zur Beurteilung der Wirksamkeit von Nachbehandlungsmitteln (NBM)“, Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 08.166/2001/LGB des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Band 938; 2006; *Wirtschaftsverlag N. W. Verlag für neue Wissenschafts-Verlag*, Bremerhaven
- [18] Informationsschrift *Beton-Nachbehandlungsmittel*, Ausgabe März 2018, Deutsche Bauchemie e. V., Frankfurt am Main

6 Autor

Dr. rer. nat. Oliver Blask

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe

Nachbehandlung im Wasserbau

Frank Spörel und Hilmar Müller

Zusammenfassung

Die Nachbehandlung im Wasserbau gemäß ZTV-W LB 215 weicht von den Regelungen nach DIN 1045-3 ab, da für diese Bauwerke deutlich längere Nutzungsdauern von mindestens 100 Jahren angestrebt werden. Im Beitrag werden einige Praxisbeispiele dargestellt sowie Erkenntnisse eines Forschungsvorhabens zur Nachbehandlung massiger Betonbauteile zusammengefasst, in dessen Rahmen verschiedene Nachbehandlungsarten und Nachbehandlungsdauern an massigen Betonbauteilen untersucht worden sind.

1 Einleitung

Die Dauerhaftigkeit eines Betonbauwerks wird wesentlich von den Eigenschaften der Betonrandzone beeinflusst. Eine besondere Bedeutung hinsichtlich der Entwicklung der Eigenschaften des oberflächennahen Bereiches kommt dabei der Nachbehandlung der Betonoberfläche zu. Bei unzureichender Nachbehandlung trocknet der Beton frühzeitig aus, das entstehende Porengefüge sowie nahezu alle dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften können nachteilig beeinflusst werden. Dies gilt in ganz besonderem Maße für langsam erhärtende Betone, wie sie im Verkehrswasserbau zumeist eingesetzt werden.

In der aktuellen Normung der DIN 1045-3:2012-03 [1] werden Regelungen zur Nachbehandlung festgelegt. Für die Nachbehandlungsdauer ist die Festigkeitsentwicklung der Betone entscheidend. Betone für massige Bauteile im Verkehrswasserbau unterscheiden sich durch die Bindemittel und die Betonzusammensetzung von Betonen für den Hochbau, den Straßenbau oder für Fertigteile. Aufgrund der langsameren Festigkeitsentwicklung und dem geringen Klinkeranteil im Bindemittel muss grundsätzlich von einer höheren Nachbehandlungsempfindlichkeit ausgegangen werden. Weiterhin ist die angestrebte Nutzungsdauer von 100 Jahren deutlich höher als in DIN 1045 angesetzt. Die aktuellen Regelungen für den Verkehrswasserbau der ZTV-W LB 215 und 219 [2, 3] stellen daher höhere Anforderungen an die Nachbehandlung als die Regelungen der DIN 1045-3.

Bei Wasserbauwerken waren das Belassen in der Schalung oder das Feuchthalten der Oberfläche lange Zeit gängige Methoden der Nachbehandlung vertikaler Flächen. Der Einsatz von Nachbehandlungsmitteln an vertikalen Flächen wurde in der Vergangenheit im Hinblick auf die baupraktisch nicht immer zielsichere Applikation kritisch gesehen, das grundsätzliche Potential jedoch an Wasserbaubetonen als Alternative zu den traditionellen Nachbehandlungsmaßnahmen untersucht [4]. Weitere Untersuchungen an Wasserbaubetonen beschäftigten sich auch mit dem Einfluss wasserabführender Schalungsbahnen auf die Dauerhaftigkeit [5]. Aktuellere Untersuchungen an massigen Betonbauteilen haben sich mit Fragestellungen zum Einfluss von Bindemittel sowie verschiedenen Nachbehandlungsmethoden an LP-Betonen beschäftigt [6].

Der Beitrag behandelt aktuelle Nachbehandlungsbeispiele aus der Praxis und fasst Erkenntnisse eines in der jüngeren Vergangenheit durchgeführten Forschungsprojektes zusammen.

2 Nachbehandlungsbeispiele im Verkehrswasserbau

2.1 Primäre Nachbehandlung

2.1.1 Vertikale, geschalte Betonoberflächen

Im Verkehrswasserbau wird unterschieden nach primärer und sekundärer, also auf die primäre Nachbehandlung folgender, Nachbehandlung. Da die Art und Dauer der primären Nachbehandlung in der ZTV-W LB 215 (Tabelle 1) bzw. 219 als Belassen in der Schalung in Abhängigkeit der Festigkeitsentwicklung des Betons (im Verkehrswasserbau meist $0,15 \leq r < 0,50$) gefordert wird, ergeben sich hier keine Alternativen.

Tab. 1: Mindestdauer der Nachbehandlung von Beton nach ZTV-W LB 215

Festigkeitsentwicklung des Betons ^{c)} $r = f_{cm,2}/f_{cm,x}$ ($x = 28, 56, 91$) ^{d)}			
$r \geq 0,50$ (schnell)	$r \geq 0,30$ (mittel)	$r \geq 0,15$ (langsam)	$r < 0,15$ (sehr langsam)
Mindestdauer der Gesamtnachbehandlung in Tagen ^{a), b), e)}			
4	10	14	21
Davon Mindestdauer des Belassens in der Schalung bei geschalteten Betonoberflächen ^{b)}			
2	5	7	10
<p>a) Bei mehr als 5 h Verarbeitbarkeitszeit ist die Nachbehandlungsdauer angemessen zu verlängern.</p> <p>b) Bei Temperaturen unter 5 °C ist die Nachbehandlungsdauer um die Zeit zu verlängern, während der die Temperatur unter 5 °C lag.</p> <p>c) Die Festigkeitsentwicklung des Betons wird durch das Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeiten $f_{cm,2}/f_{cm,x}$ ($x = 28, 56, 91$) beschrieben, das bei der Eignungsprüfung ermittelt wurde.</p> <p>d) Zwischenwerte für die Nachbehandlungsdauer dürfen eingeschaltet werden.</p> <p>e) Für Betonoberflächen, die einem Verschleiß entsprechend den Expositionsclassen XM2 und XM3 ausgesetzt sind, ist die Mindestdauer der Gesamtnachbehandlung zu verdoppeln. Der Maximalwert der Mindestdauer beträgt 30 Tage.</p>			

Es wird aber regelmäßig über den passenden Ausschaltungszeitpunkt diskutiert. Da durch die lange Schalzeit der Schalungssatz gebunden ist und nicht zur Vorbereitung des nächsten Betonierabschnittes genutzt werden kann, müssen im Verkehrswasserbau regelmäßig mehrere Schalungssätze vorgehalten werden. Solange die Fixierung der Schalhaut auf der Betonoberfläche sichergestellt ist, kann allerdings vorzeitig mit dem Abbau der Traggerüste begonnen werden. Es darf dabei aber zu keinem Zeitpunkt zu einem Ablösen der Schalhaut vom Beton kommen, um eine mögliche Kaminwirkung zwischen Betonoberfläche und Schalhaut zu vermeiden. Als baupraktisch nachteilig hat sich hierbei erwiesen, dass nach den langen Schalzeiten die Schalung trotz Trennmittelverwendung oft an der Betonoberfläche festhängt und nur schwer zu lösen und auszubauen ist. Erfahrungen und Messungen haben aber gezeigt, dass bei zu frühzeitigem Ausschalen an der Betonoberfläche Temperatursprünge entstehen, die sich ungünstig auf die Rissentwicklung auswirken können. Deshalb ist an den Zeiten für die primäre Nachbehandlung unbedingt festzuhalten.

Besonders im Winter, wenn kalte Tage zusätzlich in der primären Nachbehandlung zu berücksichtigen sind, können kreative Lösungsansätze die Schaldauer aber in Grenzen halten. Beispielsweise wurden die Rahmenelemente der verwendeten Systemschalung mit Dämmplatten isoliert, um den Beton vor den kalten Außentemperaturen zu schützen und für eine ausreichende Wärmehaltung im Betonierabschnitt zu sorgen. Unterlegt mit repräsentativen Temperaturmessungen kann die Anzahl der zusätzlichen Schaltage durch Frost dadurch reduziert werden.



Abb. 1: Isolierte Systemschalung

2.1.2 Horizontale, nicht geschalte Betonoberflächen

Bei der Nachbehandlung horizontaler, nicht geschalter Betonoberflächen sind die Anforderungen an die spätere Nutzung und Eigenschaften maßgeblich für die Wahl der Nachbehandlung. Bei Schleusenplanen muss beispielsweise eine ausreichende Griffigkeit (Rutsicherheit) hergestellt werden. Da die Nachbehandlung unmittelbar nach der Betonage beginnen muss, kommen hier nur Nachbehandlungsverfahren in Frage, die eine kurze Unterbrechung der Nachbehandlung erlauben, um beispielsweise einen Besenstrich zum richtigen Zeitpunkt ausführen zu können. Die Unterbrechung ist möglichst kurz zu halten und die Nachbehandlung unmittelbar fortzusetzen.

Bei Schleusensohlen werden meist keine weitergehenden Anforderungen an die Oberfläche gestellt. Durch die Größe der Flächen und die langsame Festigkeitsentwicklung ist das Auflegen von Folien meist schwierig. Durch die meist vorhandene Blutneigung der Sohlrezepturen ist der Einsatz von flüssigen Nachbehandlungsmitteln in der ersten Zeit nicht zielführend. Hier kommt oft eine Flutung der Fläche zur Anwendung



Abb. 2: Mit Bauschutzmatten abgedeckte Schleusenplanie



Abb. 3: Geflutete Schleusensole Unterhaupt

2.2 Sekundäre Nachbehandlung

2.2.1 Vertikale, geschalte Betonoberflächen

Nach dem Ausschalen haben sich die Verwendung von Nachbehandlungsmitteln oder das Abhängen mit Folie als bevorzugte Nachbehandlungsvarianten gezeigt.

Da nach dem Ausschalen meist kein Gerüst mehr vor der Betonoberfläche steht, muss für die Nachbehandlung wieder eine Zugänglichkeit geschaffen werden. An der Schleusenammerwand in Abbildung 4 kann man erkennen, dass der Nachbehandlungsfilm im obersten Bereich nicht flächig aufgetragen wurde. Die hellen Stellen ohne Nachbehandlungsfilm lassen vermuten, dass hier das verwendete Gerüst oder die Hebebühne zu klein waren.



Abb. 4: Unzureichender Auftrag von Nachbehandlungsmittel an einer Schleusenammerwand

Beim Abhängen der großen Flächen mit Folie stellt die Größe der Flächen meist eine große Herausforderung dar. Die Folie muss so fixiert werden, dass sie auch bei Wind ihre Schutzwirkung nicht verliert. Die Bahnen müssen einander überlappen. Zusätzlich wird auf die Folie häufig noch eine Stützkonstruktion aus Holzlatten aufgebracht, um die Folien sicher zu fixieren.



Abb. 5: Mit Folie abgehangene Schleusenammerwand

Bei Nachbehandlungszeiten im Winter kann es auch sinnvoll sein, den Beton mit isolierenden Nachbehandlungen vor einer frühzeitigen Durchfrostung zu schützen. Bei einer Baumaßnahme wurde deshalb als sekundäre Nachbehandlungsmaßnahme beispielsweise eine mit Polystyrol belegte Schalhaut aufgelegt.



Abb. 6: Isolierte Schalhaut als wärmehaltende Nachbehandlung im Winter

Bei vertikalen Arbeitsfugen ist die sekundäre Nachbehandlung des Betondeckungs- und Bewehrungsbereiches am aufwändigsten. Hier sind kleingliedrige Varianten gefordert. Nachbehandlungsmittel dürfen nicht aufgetragen werden, weil sie den späteren Verbund beeinträchtigen können.



Abb. 7: Nachbehandlung Arbeitsfugen in Stützen

2.2.2 Horizontale, nicht geschalte Betonoberflächen

Die sekundäre Nachbehandlung bei horizontalen Arbeitsfugen wird meist mittels Folienuflage realisiert. Die Folien werden mit Holzlatten beschwert und gesichert. Die Bahnen müssen überlappend aufgebracht werden, damit auch die Stoßbereiche gegen Austrocknung geschützt werden.

Werden die Bereiche der Nachbehandlung schon als Laufflächen und zur Lagerung von Material benötigt, werden anstelle von reinen Folien auch Bauschutzfolien verwendet. Diese besitzen neben der eigentlichen Sperrschicht noch eine Auffütterung zur Isolierung und Dämpfung von Stoßbeanspruchungen auf die junge Betonoberfläche.



Abb. 8: Wehrsohle mit aufgelegten Bauschutzfolien

2.3 Nachbehandlung von Innenräumen

Eine Besonderheit betrifft die Nachbehandlung von Innenräumen. In der Vergangenheit wurden Innenräume wie Kontrollgänge in Schleusenwandern oft mit Nachbehandlungsmitteln nachbehandelt. Aus Umweltgedanken wurden hier zeitweise biologisch abbaubare Mittel gefordert und auch verwendet. Diese Nachbehandlungsmittel dienen Schimmelpilzen als Lebensgrundlage, weshalb die Innenräume nicht ohne besondere Schutzmaßnahmen begangen bzw. durch aufwändige Reinigungsmaßnahmen wieder uneingeschränkt nutzbar gemacht werden mussten.



Abb. 9: Schimmelpilzbefall in einer Kaverne

Dies führte zum Verbot von Nachbehandlungsmitteln in Innenräumen nach ZTV-W LB 215. In der Regel reicht es aus, die Öffnungen zu den Innenräumen zur sekundären Nachbehandlung mit Folien dicht abzusperren. Die hohe Luftfeuchtigkeit im neuen Bauteil reicht dann zumeist als Nachbehandlung aus. Im Hochsommer kann bei Bedarf noch durch eine Wasserzufuhr von außen eine dauerhaft hohe Luftfeuchtigkeit sichergestellt werden. Wichtig dabei ist, dass es nicht zu Zugluftbildung kommt und deshalb die Öffnungen dicht verschlossen sein müssen. In Abbildung 10 ist die Folie z. B. nicht ausreichend fixiert.



Abb. 10: Abgegangener Längslauf einer Schleuse

3 Erkenntnisse aus einem Forschungsvorhaben

3.1 Allgemeines

Neben den dauerhaftigkeitsrelevanten Anforderungen an Betone für Verkehrswasserbauwerke ist eine weitere Besonderheit, dass in der Regel massige Bauteile vorliegen. Diese bedingen einerseits langsam erhärtende Betone zur Reduzierung der Hydratationswärme und daraus resultierend typische Bindemittel wie Hochofenzemente und Zugabe von Flugasche. Andererseits entstehen durch die Massigkeit der Bauteile, anders als bei schlanken Bauteilen, trotzdem hohe Bauteiltemperaturen, welche die Festigkeitsentwicklung im Bauteil beschleunigen. Da die Nachbehandlungsdauer im Wesentlichen in Abhängigkeit der Festigkeitsentwicklung festgelegt ist (i. d. R. am Laborprüfkörper bei 20 °C), ergibt sich daraus ein vielfältiges Potential, aber auch Risiken hinsichtlich einer Optimierung der Nachbehandlung. Eine bauwerksspezifische Optimierung ist mit zahlreichen Unbekannten bei Planung, Ausschreibung, Baustoffen und Bauausführung versehen, weshalb in der ZTV-W LB 215 auf der sicheren Seite liegende Ansätze festgelegt sind. Im Rahmen eines in der BAW durchgeführten Forschungsvorhabens wurden Untersuchungen an großformatigen Bauteilen durchgeführt, um mittels Monitoring am Bauteil sowie Performanceprüfverfahren an Bohrkernen die ver-

schiedenen durch Baustoffe und Nachbehandlung hervorgerufenen Einflüsse abbilden und bewerten zu können. Eine umfassende Darstellung kann dem Forschungsbericht entnommen werden, welcher im Repository der BAW digital verfügbar ist [6].

3.2 Bauteile und Nachbehandlung

Es wurden insgesamt 7 großformatige Blöcke hergestellt (Abbildung 11). Dabei wurden 3 verschiedene LP-Betone mit einem w/z- bzw. äquivalenten w/z-Wert von 0,50 und einem Zementgehalt von 320 kg/m^3 bzw. $300 \text{ kg/m}^3 + 50 \text{ kg/m}^3$ Flugasche eingesetzt. Als Bindemittel wurden ein CEM III/A, ein CEM II/B-S und ein CEM I mit Flugasche verwendet.

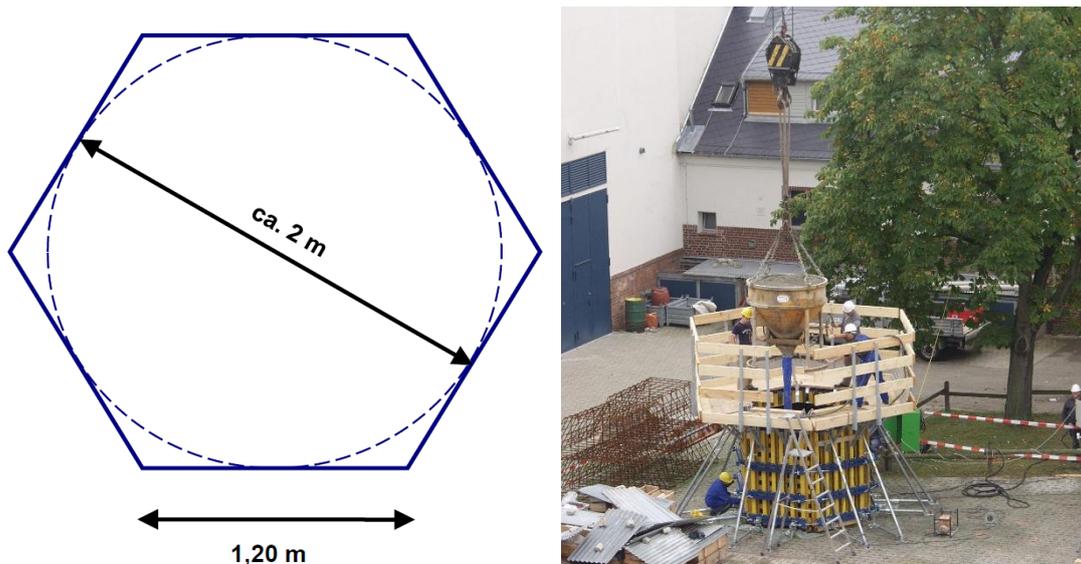


Abb. 11: Abmessungen der Probblöcke und Herstellung mit Betonierkübel

Für alle Betonrezepturen wurden die folgenden Nachbehandlungen ausgewählt:

- 3 d und 7 d Belassung in Holzträgerschalung
- 3 d und 7 d Belassung in Stahlschalung
- 3 d Holzträgerschalung mit wasserabführender Schalungsbahn (1. und 2. Anwendung)
- 3 d Holzträgerschalung mit wasserabführender Schalungsbahn (1. und 2. Anwendung) mit NBM (Paraffinbasis)
- 3 d und 7 d Belassung in Holzträgerschalung mit NBM (Paraffinbasis)
- 3 d und 7 d Belassung in Holzträgerschalung und Abhängen mit feuchter Jute und Folie

An der Serie mit dem Zement CEM II/B-S 32,5 wurden weitere Varianten untersucht:

- 1 d und 14 d Belassung in Holzträgerschalung
- 7 d Belassung in Holzträgerschalung und 7d regelmäßiges anfeuchten
- 7 d Belassung in Holzträgerschalung und alternatives NBM
- 1 d Holzträgerschalung mit wasserabführender Schalungsbahn

3.3 Untersuchungen

Bei ausgewählten Varianten erfolgte ein Monitoring der Betontemperatur und des Elektrolytwiderstandes mittels Multiring-Elektroden und Multitemperatursensoren, welche eine tiefengestaffelte Erfassung von Temperatur und des Austrocknungsverhaltens ermöglichten.

Um den Einfluss der eingesetzten Nachbehandlungsvarianten auf verschiedene dauerhaftigkeitsrelevante Betoneigenschaften zu untersuchen, wurden im Alter zwischen etwa 4 und 5 Jahren aus den einzelnen Betonflächen Bohrkerne entnommen und mit verschiedenen Prüfmethoden untersucht.

Der Schwerpunkt der durchgeführten Prüfungen lag auf der Betrachtung der Betonrandzone. Es wurden die Karbonatisierungstiefe, der Wasseraufnahmekoeffizient, die Gaspermeabilität nach Torrent, die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und bei einem Druck von 150 bar die Porengrößenverteilung mit der Quecksilberdruckporosimetrie und mittels Dünnschliffen, der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand im CIF- bzw. CDF-Test sowie der Chloridmigrationswiderstand untersucht.

3.4 Ergebnisse

3.4.1 Messdaten

Die Oberflächentemperatur betrug nach 3-tägiger Schalddauer noch etwa 38 bis 40 °C und nach 7-tägiger Schalddauer etwa 25 °C. Ein Beispiel für den Temperaturverlauf an der Betonoberfläche zeigt Abbildung 12. Zu erkennen ist die Temperaturentwicklung im Kern und an der Betonoberfläche. Durch Pfeile markiert ist der Ausschalzeitpunkt. Neben den Blöcken sind weiterhin die Lufttemperatur, ein Wandbauteil (Fläche F2) sowie die Messdaten im adiabatischen Kalorimeter und im 8 m³-Block nach ZTV-W LB 215 dargestellt.

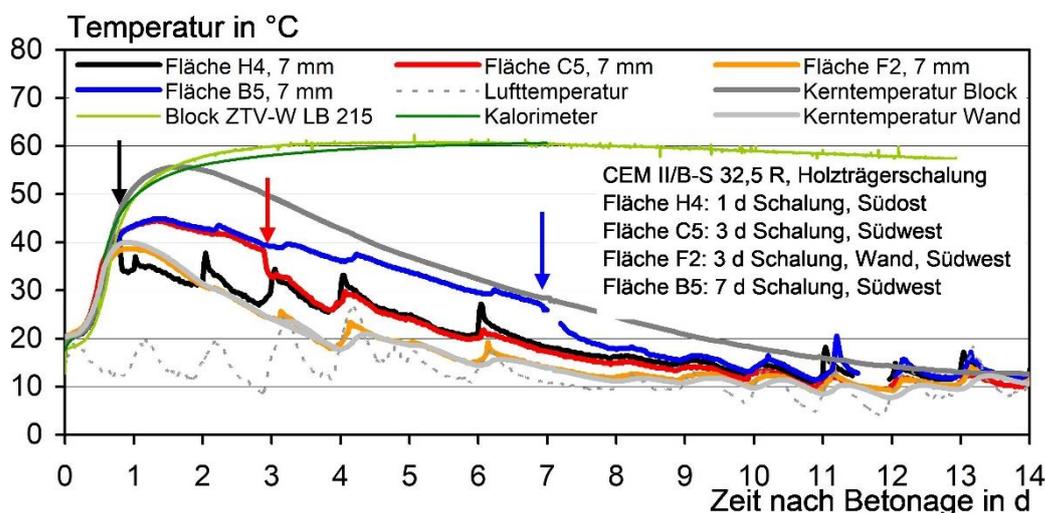


Abb. 12: Temperaturentwicklung in Abhängigkeit der Schalddauer sowie in großformatigem Block und Kalorimeter [6]

In Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen resultiert daraus ein unterschiedliches Potential zur Austrocknung der Randzone. Der Austrocknungsvorgang konnte über die Elektrolytwiderstandsmessungen abgebildet werden. Abbildung 13 zeigt exemplarisch den Gradienten zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Ausschalen bei 7-tägiger Schalddauer des Betons mit CEM III/A. Insbesondere der äußere Bereich war von den Austrocknungsvorgängen, welche durch steigende Elektrolytwiderstände abgebildet werden, betroffen. In den ersten Stunden ist der Gradient noch kaum ausgeprägt und der Elektrolytwiderstand über die gesamte Messtiefe mit nur geringem Anstieg fast gleich. Nach etwa 4 bis 8 Stunden scheint die Verdunstung an der Oberfläche stärker als der Nachtransport aus dem Inneren zu werden, da sich zunehmend ein Gradient einstellt.

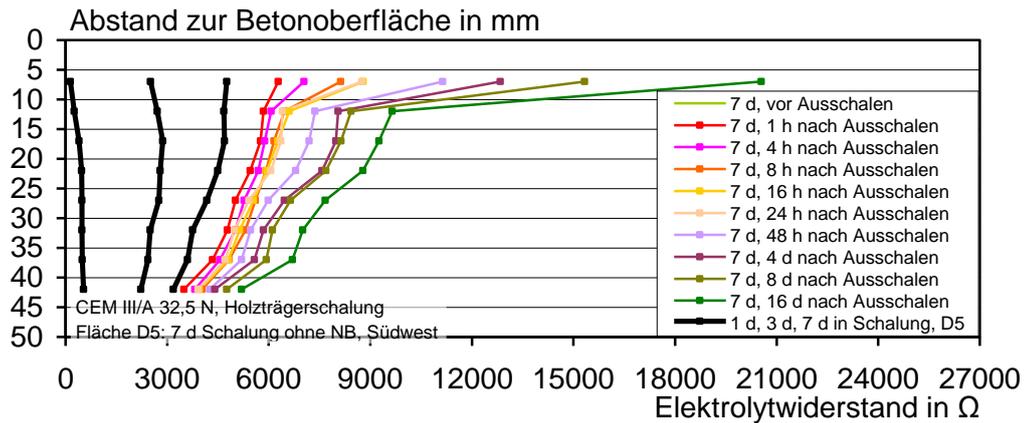


Abb. 13: Gradient des Elektrolytwiderstands bei 7-tägiger Schalldauer (CEM III/A) [6]

Die Monitoring-Daten ermöglichten auch die Ermittlung der Reife des Betons. Für weiterführende Betrachtungen wird auf den Forschungsbericht [6] verwiesen. Je nach Berechnungsansatz und Regelwerksanwendung ergeben sich erhebliche Unterschiede für die erforderliche Nachbehandlungsdauer.

3.4.2 Untersuchungen zu Betoneigenschaften

Im Alter von etwa 4 bis 6 Jahren wurden Festbetonprüfungen an Bohrkernen aus den Bauteilen durchgeführt. Im Wesentlichen zeigten die Untersuchungen, dass sich Einflüsse aus unterschiedlicher Nachbehandlung weitgehend gleichartig auf die bei den einzelnen Prüfungen, also bei Chloridmigration, Karbonatisierung, Luftpermeabilität, Ionentransport, kapillarer Wassertransport sowie frost- bzw. frosttausalzinduzierten maßgebenden Transportmechanismen auswirkten. Der Einfluss der Sekundärmaßnahmen war weitgehend einheitlich bei den hier an Luftporenbeton untersuchten Schalldauern von drei und sieben Tagen nur gering ausgeprägt. Nach dreitägiger Schalldauer als Primärmaßnahme wurde vereinzelt durch die Sekundärmaßnahmen eine Verbesserung der Oberflächeneigenschaften erzielt. Nach siebentägiger Schalldauer als Primärmaßnahme waren die Eigenschaften der Betonrandzone vermutlich bereits soweit optimiert, dass durch die Sekundärmaßnahmen kaum weitere Verbesserungen feststellbar waren. Eine Ausnahme betraf die Sondervariante mit Annässen der Oberfläche nach siebentägiger Schalldauer.

Eine verlängerte Schalldauer von drei auf sieben Tage hat insgesamt einen stärkeren Einfluss gezeigt als die Sekundärmaßnahmen nach dreitägiger Schalldauer. Untersuchungen zum Porengefüge haben den größeren Einfluss der Schalldauer als der von Sekundärmaßnahmen bestätigt.

Die deutlichsten Veränderungen wurden jedoch durch wasserabführende Schalungsbahnen erzielt. Zu berücksichtigen bleibt, dass bei den genannten Untersuchungen nur LP-Betone verwendet worden sind. Der Frostwiderstand wird vorrangig durch die Luftporen beeinflusst. Sollte das Kapillarporensystem durch eine ungünstige Nachbehandlung nachteilig beeinflusst werden, kann dies im Hinblick auf den Frostwiderstand zumindest teilweise durch die künstlichen Luftporen abgefangen werden. Insbesondere für den XF3-Bereich stellt der Luftporenbeton daher eine robustere Betonvariante hinsichtlich der Dauerhaftigkeit als Betone ohne LP dar.

4 Zusammenfassung

Besonders bei langsam erhärtenden Betonen, wie sie im Verkehrswasserbau mit den dort üblichen massigen Bauteilen zumeist eingesetzt werden, kann sich eine unzureichende Nachbehandlung deutlich auswirken. Zudem ist die angestrebte Nutzungsdauer bei Verkehrswasserbauwerken mit mindestens 100 Jahren deutlich höher als die in DIN 1045 mit 50 Jahren angesetzte Nutzungsdauer. Die aktuellen Regelungen für den Verkehrswasserbau der ZTV-W LB 215 und 219 stellen daher höhere Anforderungen an die Nachbehandlung als die Regelungen der DIN 1045-3.

Anhand von typischen Nachbehandlungsbeispielen im Verkehrswasserbau wird die Vielfalt der Bauwerkssituationen dargestellt. Grundsätzlich wird dabei in geschalte und ungeschalte Flächen unterschieden. Bei geschalteten Flächen ist als primäre Nachbehandlungsmaßnahme nur das Belassen in der Schalung mit anschließender sekundärer Nachbehandlung mit verschiedenen Verfahren zulässig. Bei ungeschalteten horizontalen Flächen ist die Nachbehandlung auf die geforderten Oberflächeneigenschaften abzustimmen. Bei allen Nachbehandlungen stellen Frosttage zusätzliche Herausforderungen dar. Bei der Nachbehandlung von Betonoberflächen in Innenräumen dürfen wegen nachteiliger Erfahrungen mit Schimmelpilzbildung keine biologisch abbaubaren Nachbehandlungsmittel verwendet werden

Die Untersuchungen an massigen Bauteilen aus LP-Betonen mit ausgewählten Betonausgangsstoffen und Betonzusammensetzungen im Rahmen eines BAW-Forschungsvorhabens haben gezeigt, dass bei Einhaltung einer Schaltdauer von 7 Tagen durch Sekundärmaßnahmen wie Jute, Folie oder Nachbehandlungsmittel keine nennenswerte Verbesserung dauerhaftigkeitsrelevanter Eigenschaften mehr erreicht werden kann. Einzige Ausnahme stellte eine wasserzuführende Sekundärmaßnahme (Annässen) dar. Bei einem Belassen in der Schalung für drei Tage hatten Sekundärmaßnahmen hingegen zumindest für einige dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften einen günstigen Einfluss. Die Untersuchungen weisen darauf hin, dass die derzeitigen Nachbehandlungsregelungen der ZTV-W LB 215 für LP-Betone für die Expositionsklasse XF3 auf der sicheren Seite liegen.

5 Literatur

- [1] DIN 1045-3:2012-03: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 3: Bauausführung - Anwendungsregeln zu DIN EN 13670
- [2] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.) (2012): ZTV-W LB 215: Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau) + A1-Änderung 2019.
- [3] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.) (2017): ZTV-W LB 219: Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau).
- [4] Hallauer, O. (1996): Einfluss der Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit langsam erhärtender Betone. In: Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen. In: 4. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen, Esslingen. Freiburg/Brsg.: Aedificatio Verlag 1996. S.1597-1616
- [5] Hohmann, W.; Lehmann, K. (1994): Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Betonrandzone bei Wasserbauwerken am Beispiel der 1. Ersatzschleuse Wanne-Eikel. In: Betoninformationen 34, Nr. 2, S. 19-25
- [6] Bundesanstalt für Wasserbau (2012): Untersuchung des Einflusses von Schalung und Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit geschalteter Betonflächen massiger Betonbauteile. FuE-Abschlussbericht B3951.03.04.710141 Online verfügbar unter https://henry.baw.de/bitstream/handle/20.500.11970/105129/09208_A39510310141-FuE-Bericht%20Unterschrift.pdf?sequence=1&isAllowed=y, zuletzt geprüft am 07.01.2021.

6 Autoren

Dr.-Ing. Frank Spörel

Abteilung Bautechnik - Referat Baustoffe
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Dipl.-Ing. Hilmar Müller

Abteilung Bautechnik - Referat Baustoffe
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17
76187 Karlsruhe

Nachbehandlung im Verkehrswegebau

Martin Langer

Zusammenfassung

Die Oberfläche von Fahrbahndecken aus Beton ist der am stärksten beanspruchte Bauteilbereich. Er unterliegt bereits unmittelbar nach dem Einbau großen Witterungseinflüssen und ist deshalb sorgfältig zu schützen und nachzubehandeln. Die zweckmäßige Wahl der Maßnahmen und deren richtige Anwendung ist für eine qualitativ hochwertige Betonverkehrsfläche unabdingbar.

1 Allgemeines

Straßen und Verkehrsflächen müssen hohen Belastungen durch Verkehr und Umwelteinflüssen standhalten. Eine lange Nutzungsdauer mit geringem Unterhaltungsaufwand rückt durch das stetig steigende Verkehrsaufkommen zunehmend in den Vordergrund. Betondecken weisen eine hohe Tragfähigkeit auf und sind verformungsstabil bei jeder Belastung und Temperatur. Oberflächen mit Waschbetontextur zeigen sich dauerhaft lärmindernd und griffig und bieten durch eine gute und gleichbleibende Ebenheit einen hohen Fahrkomfort. Vor allem aber können bei sachgerechter Planung und Ausführung Lebensdauern von 30 Jahren und mehr ohne größere Erhaltungsmaßnahmen erreicht werden. Die Ausführung der Betondecke und die Sicherstellung deren Qualität ist allerdings mit der Fertigstellung der Oberfläche nicht zu Ende. Im Gegensatz zu geschalteten Betonbauwerken sind frisch hergestellte Betondecken vor Witterungseinflüssen vergleichsweise ungeschützt. Die Nachbehandlung der Betondecke ist deshalb für die Dauerhaftigkeit von besonderer Bedeutung.

2 Ziele und Arten der Schutzmaßnahmen und der Nachbehandlung

Schutzmaßnahmen dienen dem Schutz des Betons vor äußeren Einflüssen [1]. Nachbehandlungen sollen sicherstellen, dass dem Beton das zum Erstarren und Erhärten erforderliche Wasser nicht entzogen wird. Hierbei können Maßnahmen gleichzeitig als Schutz und zur Nachbehandlung dienen.

2.1 Schutzmaßnahmen

Der Beton ist vor allem in den ersten Stunden gegen schädigende Einflüsse zu schützen. Hierzu zählen vor allem

- der Schutz vor Niederschlag,
- der Schutz vor rascher Abkühlung oder Erwärmung sowie
- der Schutz vor Beschädigung.

Die ZTV Beton-StB weisen auf folgende Schutzmaßnahmen hin [2]

- die Verwendung von Zelten,
- das Anässen der Betondecke sowie
- das Aufbringen wärmedämmender Abdeckungen.

2.2 Nachbehandlung

Zwei wesentliche Schädigungen sollen durch Nachbehandlungsmaßnahmen vermieden werden.

- Fröhschwindrissbildung
- Unzureichender Hydratationsgrad

Ursächlich für die Schwindrissbildung können starker Wind, niedrige Feuchtigkeit sowie Sonneneinstrahlung sein. Auch kann gefrierendes Anmachwasser im Beton den Hydratationsprozess stören und den jungen Beton schädigen.

Die ZTV Beton-StB fordern grundsätzlich eine Nachbehandlung des Betons und geben verschiedene Arten der Nachbehandlung zur Auswahl vor.

- Nassnachbehandlung,
- Aufbringen von Nachbehandlungsmitteln,
- Abdecken mit Folien sowie
- Aufbringen Wasser haltender Folien.

3 Hinweise zur Ausführung

3.1 Schutzmaßnahmen

Der Beton ist vor Niederschlägen zu schützen. Diese einfache und sinnvolle Forderung ist allerdings schwierig umzusetzen. Einen zuverlässigen Schutz bieten nur Zelte. Für den Betoneinbau auf Autobahnen oder Flughäfen ist der Einsatz von Zelten allerdings nicht mehr praktikabel. Konnten bei dem schienengeführten Betoneinbau früherer Jahrzehnte längere Zelte noch ohne größere Schwierigkeiten angehängt werden, ist dies beim heutigen Einbau mit Gleitschalungsfertiger so ohne Weiteres nicht mehr möglich. Da der Beton zwei Stunden nach Fertigstellung der Decke zu schützen ist, führen die heutzutage erreichten Einbauleistungen zu erforderlichen Zeltlängen von über 100 m. Auch ist bei Sonneneinstrahlung der nachteilige Effekt einer zusätzlichen Austrocknung durch Sogwirkung unter dem Zelt zu berücksichtigen.

Da der Betoneinbau heutzutage in der Regel ohne die Verwendung von Zelten erfolgt, ist bei drohenden Witterungsereignissen der Betoneinbau rechtzeitig einzustellen. Ein Betonagestopp bei Niederschlagsbeginn ist hierbei nicht zielführend, dieser hat möglichst schon zuvor zu erfolgen. Die heutigen Wetterdienste sind hierbei eine große Hilfe. Konnten in früheren Zeiten aussagekräftige Regenvorhersagen letztlich nur telefonisch beim Deutschen Wetterdienst erfragt werden, erleichtert heutzutage gratis, hochaufgelöst und in Echtzeit der Blick auf das Regenradar die Entscheidung zwischen Weiterbauen und Einstellen. Das Risiko von Regenfelder ist grundsätzlich geringer geworden.

Sind hohe Außentemperaturen zu erwarten, sind entsprechende Maßnahmen zu treffen. Eine zusätzliche Nassnachbehandlung kann erforderlich werden. Allerdings ist hierbei darauf zu achten, dass die Betondecke in dieser Zeit nicht abtrocknet. Aufgrund der vorhandenen Querneigungen und der hydrophoben Eigenschaften von mit Nachbehandlungsmitteln beaufschlagten Betonflächen rinnt aufgespritztes Wasser mehr oder weniger schnell ab. Der in den ZTV Beton-StB genannte Abstand von zwei bis drei Stunden zwischen den Annässvorgängen kann deshalb nicht immer ausreichend sein.

Grundsätzlich sind bei hohen Temperaturen einige Belange der Bauausführung zu beachten [3]. Kurze Wege zwischen Mischanlage und Einbaustelle sind hilfreich und ein kontinuierlicher unterbrechungsfreier Beton-einbauprozess noch wichtiger als ohnehin. Die Verwendung von pigmentierten Nachbehandlungsmitteln mit erhöhtem Hellbezugswert ist anzuraten. Auch die Verschiebung des Einbauzeitraums in die Nacht mit Beginn am späten Nachmittag kann sinnvoll sein. Demgegenüber steht allerdings die Forderung vieler Bauherren nach einem 24-Stundeneinbau.



Abb. 1: Schützen der Betondecke durch zusätzliche Nassnachbehandlung

3.2 Nachbehandlung

Wünscht der Auftraggeber eine bestimmte Art der Nachbehandlung, so ist diese in der Leistungsbeschreibung anzugeben. Grundsätzlich hängt die zweckmäßige Wahl der Nachbehandlung u. a. von der Art der Oberflächentexturierung und von der Größe des Projekts bzw. der Betonfläche ab.

Zwar ist die Nassnachbehandlung eine qualitativ sehr hochwertige Nachbehandlungsart. Diese setzt jedoch voraus, dass die Decke über die Dauer von mindestens drei Tagen ständig auf der gesamten Oberfläche einschließlich der Seitenflächen ständig feucht gehalten wird. Beim Betoneinbau mit Gleitschalungsfertiger summiert sich hierbei die feucht zu haltende Fläche auf weit über 10.000 m². Das Verfahren kommt deshalb aufgrund des hohen Aufwandes und des großen Wasserverbrauchs selten zum Einsatz. Ein Anwendungsfall ist mit dem Bau des Flughafens München Ende der 80er Jahre bekannt; hierfür wurden selbstfahrende Sprühfahnen mit über 15 m Breite gebaut [4].

Die üblicherweise angewendete Nachbehandlungsart ist das Aufbringen von Nachbehandlungsmitteln. Hierbei wird von der Nachlaufbühne (Arbeitsbühne) mit einem maschinellen Sprühwagen ein flüssiges Nachbehandlungsmittel aufgesprüht. Vor allem auf Flugbetriebsflächen mit den dort vorherrschenden Windverhältnissen ist darauf zu achten, dass das Mittel beim Aufsprühen nicht verweht. Sprühhöhe, Sprühwinkel und Sprühdruck sind an die Verhältnisse anzupassen. Die aufgetragene Menge kann durch Auflegen eines Messblechs auf die Oberfläche einfach ermittelt werden. Bei Betondecken mit Besenstrichtextur ist zusätzlich darauf zu achten, dass beim Auftrag des Nachbehandlungsmittels – beispielsweise durch zu hohen Sprühdruck – die Textur nicht negativ beeinflusst wird.

Auf Betondecken mit Besenstrichtextur kommen in der Regel Nachbehandlungsmittel vom Typ VM-K zum Einsatz. Diese Mittel sind nicht sofort, sondern im mattfeuchten Zustand der Betonoberfläche aufzutragen. Die Beurteilung des richtigen Zeitpunkts ist nicht trivial, einen fest definierten Auftragszeitpunkt gibt es nicht. Im Zweifelsfall kann ein Lackmuspapiertest zu Rate gezogen werden. In jedem Fall ist ein zu später Auftrag auf die bereits abgetrocknete Fläche zu vermeiden. Der richtige Abstand zwischen Betonfertiger und Arbeitsbühne ist entsprechend zu beachten und einzuhalten.

Die flüssigen Nachbehandlungsmittel bestehen in der Regel aus wasserbasierten Wachsemulsionen. Nach dem Aufsprühen wird der Emulsion durch Verdunstung und Hydratation Wasser entzogen. Durch Brechen der Emulsion bildet sich ein weitgehend dampfdichter Wachsfilm.

Um das erforderliche Griffigniveau zu erreichen, bedarf es nach einem gewissen Zeitraum einer Verwitterung des Schutzfilms. Für die Verwitterung ist die Exposition von Umwelteinflüssen förderlich. Da im Gegensatz zu Freilandstrecken diese Einflüsse in Tunnellagen geringer sind, kann hier eine Hochdruckreinigung der Oberfläche für Verkehrsfreigabe erforderlich sein. Das österreichische Regelwerk für Betonstraßen fordert dies grundsätzlich für Tunnelstrecken [5]. Um einen dauerhaften Auftrag von Markierungen gewährleisten zu können, ist eine gute Haftung erforderlich, Diese wird nur erreicht, wenn auf der Betondecke im Bereich der Markierung das Nachbehandlungsmittel vor dem Auftrag der Grundierung vollständig durch Hochdruckwasserstrahlen entfernt wird.



Abb. 2: Aufsprühen eines flüssigen Nachbehandlungsmittels mit einer Arbeitsbühne

Bei Betondecken mit Waschbetonbauweise erfolgt die Nachbehandlung in zwei Phasen. Im ersten Schritt wird für die spätere Texturierung durch Ausbürsten nach dem Betoneinbau von der Arbeitsbühne ein Oberflächenverzögerer aufgesprüht. Die Nachbehandlung erfolgt dabei entweder durch Einsatz eines Kombinationsmittels (Verzögererkomponente und Nachbehandlungskomponente) oder durch Aufbringen einer Folie nach Aufsprühen des Oberflächenverzögerers. Zu Beginn der Anwendung der Waschbetonbauweise 2006 wurde die Variante mit Folie teilweise noch angewandt. Vorteilhaft wurde hier vor allem die schützende Wirkung der Folie vor Regen angesehen [6]. Demgegenüber stehen jedoch Nachteile wie der Entsorgungsaufwand der Folie, die Erhitzung unter der Folie im Sommer sowie verkehrssicherheitstechnische Aspekte durch Abheben der Folie. Hinzu kommt die Erschwernis, dass bei Systemen mit Folienanwendung der Fugenschnitt in der Regel vor dem Ausbürstvorgang erfolgt. Der Fugenschnitt erfolgt durch die Folie hindurch. Anschließend muss der durchschnittene Fugenbereich zusätzlich abgedeckt werden. Letztlich hat sich diese Anwendungsart gegenüber dem Kombinationsmittel nicht durchgesetzt.



Abb. 3: Aufbringen einer Folie und Fugen bei der Herstellung von Betondecken mit Waschbeton



Abb. 4: Entfernen des Oberflächenmörtels durch Ausbürsten

Wird der Waschbeton unter Anwendung eines Kombinationsmittels hergestellt, so wird zunächst dieses nach dem Betoneinbau von der Arbeitsbühne aufgesprüht. Nach ausreichender Erhärtung wird die oberste Mörtelschicht ausgebürstet und das Grobkorngerüst des Waschbetons freigelegt. Das Ausbürsten erfolgt noch vor dem Fugenschnitt. Der Zeitpunkt ist abhängig von den Witterungsverhältnissen und variiert zwischen weniger als sechs Stunden nach dem Betoneinbau im Sommer und mehr als 20 Stunden bei kühler Witterung. Da durch den Ausbürstvorgang auch der Schutzfilm des Nachbehandlungsmittels entfernt wird, muss unmittelbar nach dem Ausbürsten eine zweite Nachbehandlung durchgeführt werden. Dies erfolgt durch Aufspritzen eines herkömmlichen Nachbehandlungsmittels über ein mobiles Sprühgerät (Radlader, Traktor o. ä.). Untersuchungen haben gezeigt, dass die zweite Phase der Nachbehandlung einen großen Einfluss auf den Frost-Tausalz-Widerstand hat [7].

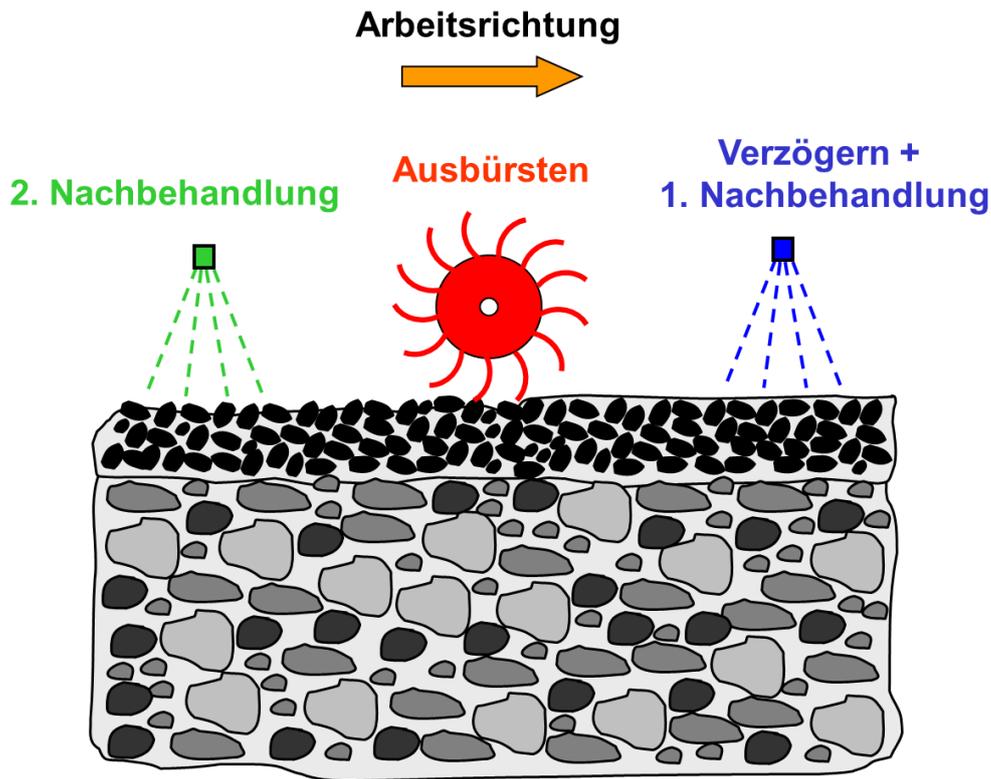


Abb. 5: Arbeitsschritte bei der Herstellung von Betondecken mit Waschbeton mit Kombinationsmittel

Lediglich für den Betondeckenbau mit geringen Flächengrößen bzw. Tagesleistungen kommen Folien und/oder Wasser haltende Abdeckungen zum Einsatz. Dies ist vor allem bei kommunalen Flächen oder in der Betondeckenerhaltung (Plattenersatz o. ä.) der Fall.

4 Ausblick

Seit einigen Jahren befindet sich mit der Grindingoberfläche eine Texturierung in Erprobung, welche künftig als Standardbauweise in das Regelwerk aufgenommen werden soll. Hierbei wird im Festbeton durch einen Schleifvorgang mit einer mit Diamantscheiben besetzten Welle Beton abgetragen. Die Abtragstiefe beträgt einige wenige Millimeter.

Die Untersuchungsergebnisse sind hinsichtlich Griffigkeit, Lärminderung und Ebenheit vielversprechend. Für ein dauerhaft hohes Niveau der Griffigkeit und der Lärminderung ist jedoch gerade bei der Grindingtextur eine hohe Qualität auch in der Betonrandzone erforderlich. Die textur- und eigenschaftsgebenden Stege der Grindingoberfläche bestehen im Gegensatz zur Waschbetonoberfläche nicht nur aus dem Grobkorn des Betons, sondern auch aus der Zementmatrix. Der Schutz des Betons durch eine sorgfältige Nachbehandlung gewinnt bei dieser Oberfläche deshalb umso mehr an Bedeutung.



Abb. 6: Grindingtextur

5 Literatur

- [1] Eger, W.; Ritter, H.-J.; Rodehack, G.; Schwarting, H. (2010): ZTV/TL Beton-StB – Handbuch und Kommentar mit Kompendium Bauliche Erhaltung, Kirschbaumverlag, Bonn
- [2] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton - ZTV Beton-StB 07. FGSV 899, 2007
- [3] Weisner, A. (2012): Betonagen bei hohen Temperaturen – Bauvertrag, Betontechnologie und Bauausführung, 16. Symposium für Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), (Hrsg.) Dehn, F.; Mercedes Kind, V.; Nolting, U. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe
- [4] Eisenmann, J.; Leykauf, G. (2003): Betonfahrbahnen. 2. Auflage. Ernst & Sohn, München.
- [5] RVS 08.17.02 Deckenherstellung (April 2011). Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse-Schiene-Verkehr FSV
- [6] Oesterheld, R.; Peck, M.; Villaret, S. (2018): Straßenbau heute. Verlag Bau + Technik GmbH, Erkrath
- [7] Gehlen, C; Skarabis, J. (2010) Einfluss der Nachbehandlung auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Waschbetondecken. Griffig 2/2010, Gütegemeinschaft Verkehrsflächen aus Beton, Düsseldorf

6 Autor

Dipl.-Ing. Martin Langer
 STRABAG Großprojekte GmbH
 Zentrale Technik
 Leopoldstraße 250c
 80807 München

Nachbehandlung im Ingenieur- und Hochbau

Joachim Budnik und Marcel Löffler

Zusammenfassung

Das Thema Nachbehandlung von Betonbauteilen hat aktuell eine stetig hohe Bedeutung in der Ausführung von Stahlbetonbauwerken im Ingenieur- und auch zunehmend im Hochbau. Das liegt mitunter daran, dass die Bauwerke komplexer werden, die Betone besonderen Expositionen ausgesetzt werden und besondere Beanspruchungen aus der Nutzung erfahren. Als ein Beispiel wird an dieser Stelle über Nachbehandlungsmaßnahmen an einem großen und komplexen Bauwerk im Ingenieur- und Hochbau in Darmstadt, dem europäischen Projekt „FAIR“ berichtet. Dabei erstreckt sich das Thema Nachbehandlung beginnend in einer erweiterten Erstprüfung mit großen Bauteilversuchen bis zur Festlegungen über die Art und Dauer der Maßnahmen und deren Umsetzung in der praktischen Ausführung. Die besonderen Anforderungen bezüglich der Einhaltung eines Temperaturgradienten im Bauteil zur Vermeidung kritischer Eigenspannungen im Bauteilquerschnitt infolge des Abfließens der Hydratationswärme sowie die zeitlichen Vorgaben zum Bauablauf haben diese Schritte der Planung der Nachbehandlungsmaßnahmen in einem Nachbehandlungskonzept erforderlich gemacht. Die begleitenden Qualitätssicherungs-Maßnahmen (QS-Maßnahmen), wie Temperaturmessungen im Bauteil, Bestimmungen von Reifegraden und die Steuerung der Freigaben zur Beendigung der Nachbehandlung werden im Artikel anhand von Beispielen erläutert. Der Prozess der Dokumentation der QS-Maßnahmen speziell für die Nachbehandlung an den einzelnen Betonbauteilen wird dargestellt. Bilder der praktischen Ausführung der Nachbehandlung verdeutlichen die bisher erfolgreiche Umsetzung der geplanten Maßnahmen und die Einhaltung der technologischen Vorgaben im aktuellen Stand der Baumaßnahme.

1 Einführung

Beim Bauvorhaben FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research in Europe GmbH) in Darmstadt wird ein Teilchenringbeschleuniger für Forschungszwecke in einem europäischen Projekt errichtet. Hauptbauwerke sind u. a. ein 1,1 km langer, ringförmiger Tunnel mit drei Kammern in offener Bauweise für die Ionenbeschleunigung und Betriebsgebäude für experimentelle Untersuchungen (vgl. [1]). Die Bauteile werden hauptsächlich aus wasserundurchlässigem Strahlenschutzbeton mit Stärken von bis zu 2 Metern hergestellt. In Teilbereichen sind größere Bauteilabmessungen notwendig. Zur Vermeidung eines Austausches von Porenwasser im Kontaktbereich zum Grundwasser wird eine Frischbetonverbundfolie zur Abdichtung unter der Sohle und an den Außenseiten der Wände eingesetzt. Insgesamt werden ca. 300.000 m³ Beton für den Anlagenbereich Nord beim Projekt FAIR eingebaut. Die Bauzeit beträgt ca. vier Jahre.

Für die Ausführung der massigen Bauteile des Tunnels sind neben den Anforderungen an den auszuführenden Strahlenschutzbeton auch die Vorgaben aus der DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile“ (vgl. [2]) zu erfüllen. Die Konzeption der Betone muss darüber hinaus auch die zusätzlichen Festlegungen im Bauvertrag berücksichtigen, die eine limitierte Temperaturdifferenz zwischen Kernbeton und Bauteilaußenseite von maximal 15 Kelvin im Zeitraum des Abfließens der Hydratationswärme, sowie eine Begrenzung der Rissbreiten in

Abhängigkeit von der Bauteildicke auf $w = 0,30$ mm bzw. $w = 0,40$ mm vorgeben. Damit gewinnt das Thema Nachbehandlung eine besondere Bedeutung für die Ausführung dieses Projektes.

Zur Ermittlung der zu erwartenden Temperaturentwicklung und der Wirksamkeit verschiedener Varianten bei der Nachbehandlung wurden Großversuche an Probelblöcken durchgeführt, deren Ergebnisse die Basis für Festlegungen von Nachbehandlungsmaßnahmen in einem zu erstellenden Nachbehandlungskonzept bildeten. In diesem Konzept werden die notwendigen Maßnahmen der Nachbehandlung in Abhängigkeit zur vorherrschenden Witterung bei der Erstellung der Betonbauteile gesteuert. Qualitätssicherungs-Pläne (QS-Pläne) sichern die Einhaltung der für jedes Bauteil individuell vorgegebenen Nachbehandlungsvariante und die Dauer der Nachbehandlung in der praktischen Ausführung. Die in diesem Zusammenhang stehenden Ausschalfrieten der Tunneldecken werden über die Bestimmung des Reifegrads festgelegt.

Formell ist das Projekt FAIR als ein Hochbauprojekt eingeordnet; die Kombination aus einem Tunnelbauwerk in offener Bauweise als klassisches Ingenieurbauprojekt und einem Betriebsgebäude im Kreuzungsbereich der Strahlentunnel lassen aber die Anwendungsbereiche des Hochbaus und des Ingenieurbaus verschmelzen. Die Größenordnung des Anlagenbereiches Nord beim Projekt FAIR verdeutlicht die Ansicht des gesamten Baufeldes in der Abbildung 1.



Abb. 1: Ansicht des gesamten Baufeldes für den Anlagenbereich Nord beim Projekt FAIR (Foto: D. Fehrenz/GSI/FAIR)

2 Anforderungen an die Planung der Nachbehandlung

2.1 Anforderungen aus der Norm und dem Bauvertrag

Als Betone, die bei den Wänden und Decken des Tunnelbauwerks eingesetzt werden, werden aufgrund der massigen Bauteilabmessungen Betone mit langsamer Festigkeitsentwicklung ($r < 0,30$) und niedriger Hydrationswärmeentwicklung eingesetzt. Die massigen Betonbauteile werden in die Expositionsklasse XC3 ein-

geordnet, so dass gemäß den Festlegungen der DIN 1045-3 eine erforderliche Festigkeit im oberflächennahen Bereich des Bauteils von $0,5 \cdot f_{ck}$ verlangt wird, die erreicht sein muss um die Nachbehandlungsmaßnahmen beenden zu können.

Damit diese Vorgabe durch den Bauausführenden in der Praxis ohne umfangreichen Prüfaufwand umgesetzt werden kann, ist in der DIN 1045-3 Tabelle 5.NA (bzw. Tabelle 6.NA) in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur des Bauteils (oder der Frischbetontemperatur) und der definierten Festigkeitsentwicklung der eingesetzten Betone die Forderung einer Mindestbetondruckfestigkeit in der Betonrandzone in eine Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen umgesetzt worden. Gemäß Tabelle 5.NA darf abweichend zur Oberflächentemperatur die Lufttemperatur angesetzt werden.

Die Mindestdauer der Nachbehandlung liegt danach beispielsweise für Betone mit einer langsamen Festigkeitsentwicklung ($r < 0,30$) bei kühleren Temperaturen (ca. 10-15 °C Lufttemperatur) bei 7 Tagen und bei Temperaturen unter 10 °C sogar bei mindestens 10 Tagen (s. Tabelle 1).

Tab. 1: Mindestnachbehandlungsdauer gemäß DIN 1045-3 Tabelle 5.NA unter Ansatz der Lufttemperatur

Tabelle 5.NA — Mindestdauer der Nachbehandlung von Beton bei den Expositionsklassen nach DIN 1045-2 außer X0, XC1 und XM

Nr.	1	2	3	4	5
Oberflächentemperatur ϑ °C^e	Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen^a				
	Festigkeitsentwicklung des Betons^c				
	$r = f_{cm2}/f_{cm28}^d$				
	Schnell $r \geq 0,50$	mittel $r \geq 0,30$	langsam $r \geq 0,15$	sehr langsam $r < 0,15$	
1	$\vartheta \geq 25$	1	2	↓	3
2	$25 > \vartheta \geq 15$	1	2	↓	5
3	$15 > \vartheta \geq 10$	→	→	7	10
4	$10 > \vartheta \geq 5^b$	3	6	10	15

^a Bei mehr als 5 h Verarbeitbarkeitszeit ist die Nachbehandlungsdauer angemessen zu verlängern.

^b Bei Temperaturen unter 5 °C ist die Nachbehandlungsdauer um die Zeit zu verlängern, während der die Temperatur unter 5 °C lag.

^c Die Festigkeitsentwicklung des Betons wird durch das Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeiten nach 2 Tagen und nach 28 Tagen (ermittelt nach DIN EN 12390-3) beschrieben, das bei der Eignungsprüfung oder auf der Grundlage eines bekannten Verhältnisses von Beton vergleichbarer Zusammensetzung (d. h. gleicher Zement, gleicher w/z-Wert) ermittelt wurde.
Wird bei besonderen Anwendungen die Druckfestigkeit zu einem späteren Zeitpunkt als 28 Tage bestimmt, ist für die Ermittlung der Nachbehandlungsdauer

- der Schätzwert des Festigkeitsverhältnisses aus dem Verhältnis der mittleren Druckfestigkeit nach 2 Tagen (f_{cm2}) zur mittleren Druckfestigkeit zum Zeitpunkt der Bestimmung der Druckfestigkeit zu ermitteln oder
- eine Festigkeitsentwicklungskurve bei 20 °C zwischen 2 Tagen und dem Zeitpunkt der Bestimmung der Druckfestigkeit anzugeben.

^d Zwischenwerte dürfen eingeschaltet werden.

^e Anstelle der Oberflächentemperatur des Betons darf die Lufttemperatur angesetzt werden.

Für Bauwerke im Geltungsbereich der ZTV-ING (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten) sind erhöhte Anforderungen in der Weise gefordert, dass die Dauer der Nachbehandlung bis zum Erreichen einer Festigkeit von $0,7 \cdot f_{ck}$ fortzusetzen ist. Diese Forderung bedeutet eine Verdoppelung der o. g. Mindestdauer der Nachbehandlung, also eine Mindestdauer der Nachbehandlung von 14 bzw. 20 Tagen gemäß der Norm.

Diese Forderungen führen in den Wintermonaten für Bauwerke im Regelwerk der ZTV-ING in der Regel zu sehr langen Nachbehandlungszeiten. Gerade bei „Linien- und Taktbaustellen“ kann dies für die Herstellung der Decken einen schnellen Bauablauf bzw. einen wirtschaftlichen Einsatz der Schalung verhindern.

Die DIN 1045-3 wie auch die ZTV-ING eröffnen allerdings auch den Weg eines genaueren Nachweises für das Erreichen einer anforderungsgemäßen Festigkeit im oberflächennahen Bereich des Betonbauteils. Für den genauen Nachweis der Festigkeit in oberflächennahen Bereichen kommt üblicherweise eine der im Folgenden aufgelisteten Maßnahmen zur Anwendung:

- Prüfung von Erhärtungswürfeln, die unter Bauteilbedingungen und denselben Nachbehandlungsmethoden wie das Bauteil gelagert werden
- Zerstörungsfreie Prüfung mittels Rückprallhammer
- Reifeberechnung auf Grundlage von Temperaturmessungen im Bauteil

Für das laufende Projekt FAIR wurden bereits frühzeitig zu Projektbeginn vorbereitende Maßnahmen ergriffen, damit die reale Festigkeitsentwicklung im Bauteil nachgewiesen werden kann.

Aufgrund der Notwendigkeit der Messung und Aufzeichnung der Hydratationswärme in allen massigen Betonbauteilen (kleinste Bauteilabmessung $d \geq 0,8\text{m}$ gemäß DAfStb-Richtlinie) ist das Verfahren der Reifeberechnung nach DeVree gewählt worden.

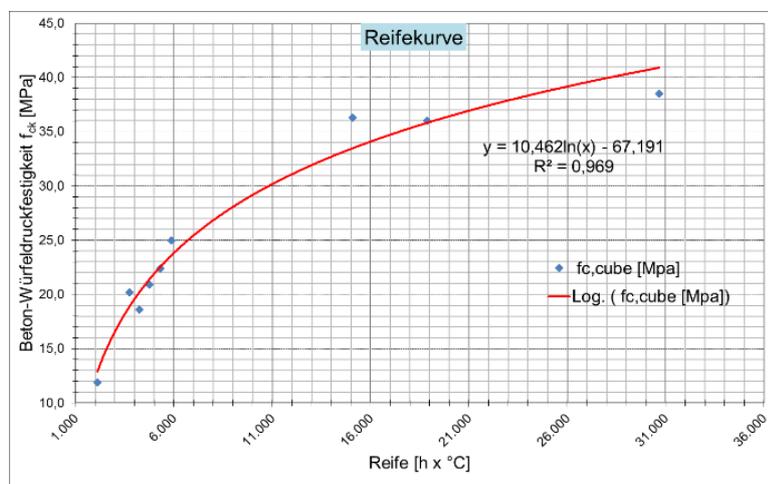


Abb. 2: Exemplarische Reifekurve

Es wurden des Weiteren erweiterte Eignungsprüfungen an großen Probekörpern durchgeführt, bei denen die Temperaturentwicklungen im Bauteil ermittelt wurden. Mit diesen Temperaturkennlinien lassen sich mit Hilfe von Kalibrierkurven (Festigkeitsentwicklung an Würfeln unter Klimabedingungen) dann über entsprechende Reifeberechnungen die aktuell vorhandene Festigkeit im Bauteil bestimmen. Somit kann für jedes Bauteil aus den Temperaturmessungen (diese sind für jedes massive Betonbauteil gefordert) individuell der reale Festigkeitszustand ermittelt werden. Damit lässt sich für jedes Bauteil bei Bedarf die wirklich erforderliche Nachbehandlungsdauer nachweisen, die gerade bei massigen Betonbauteilen in der Regel kürzer ist als die Zeit, die sich aus den konservativ ausgelegten Tabellen in der DIN 1045-3 für Betone mit einer langsamen Festigkeitsentwicklung jeweils ergeben.

2.2 Durchführung der erweiterten Eignungsprüfungen und Ergebnisse

Im Rahmen der erweiterten Erstprüfungen führte die PORR-Baustofftechnologie zusammen mit dem Baustellenteam Betonagen von mehreren großen Probebauteilen im 1:1-Maßstab durch. Das Ziel dieser Betonagen an Blöcken mit Abmessungen von $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ war einerseits die Überprüfung der Temperaturentwicklung (Maximaltemperatur und Temperaturgradient über den Bauteilquerschnitt) und andererseits die Wirksamkeit verschiedener Nachbehandlungsvarianten. Die Wirksamkeit verschiedener Nachbehandlungsvarianten, nur PE-Folie, PE-Folie+1-lagige WD-Matte, PE-Folie+2-lagige WD-Matte und nur Frischbetonverbundfolie (FBVF), wurde anhand der gemessenen Temperaturdifferenzen zwischen Kern und Außenfläche beurteilt.

Für die Bestimmung der maximal zu erwartenden Temperaturentwicklung im Bauteilkern wurden Thermoelemente an definierten Bauteilstellen installiert und die Schalung mit einer 40 cm dicken, spezifizierten Wärmedämmung ausgekleidet, um quasi adiabatische Verhältnisse im Bauteil zu simulieren.

Die Abbildung 3 zeigt drei Probelöcke, bei denen jeweils die oben genannten vier Varianten der Nachbehandlung an einem Block ausgeführt wurden.



Abb. 3: Probelöcke mit jeweils vier Nachbehandlungsvarianten (jede Seitenschalung entspricht einer Variante)

Die Abbildung 4 zeigt die Temperaturentwicklungen, die Anordnung der Messfühler und die aufgetretenen Temperaturdifferenzen zwischen Kern und Außenfläche nach dem Ausschalen und nach der Montage der Nachbehandlungsrahmen. In der Legende im rechten oberen Bildteil der Abbildung 4 ist beim Schaubild für die Anordnung der Messfühler auch dokumentiert, welche Variante der Nachbehandlung an welcher Schalungsseite der großen Blöcke eingesetzt wurde. Insgesamt wurden sieben Messfühler in jedem Block eingebaut, um die Temperaturverteilung über den Bauteilquerschnitt messen zu können. Die drei Blöcke unterscheiden sich untereinander in der Anordnung der Schalungsvarianten und in der Anordnung der Messfühler nicht; es wurden nur drei Betonsortenvarianten (verschiedene Zemente) in einer vergleichbaren Serie geprüft.

Tab. 2: Maximale Temperaturdifferenzen zwischen Bauteilkern/Bauteilaußenseite für Nachbehandlungsvarianten

Max. Kerntemperatur	Max. Delta PE-Folie	Max. Delta PE-Folie + 1lagig Winterbaumatte	Max. Delta PE-Folie + 2lagig Winterbaumatte	Max. Delta FBVS
42,8 °C	11,0 K	9,0 K	5,5 K	15,0 K

Die beiden Varianten mit PE- Folie + WD-Matten begrenzen die maximale Differenz auf ca. 9 Kelvin; die Nachbehandlung ausschließlich mit einer PE-Folie reduziert die Temperaturdifferenz auf ca. 11 Kelvin. Im Bereich der FBVF wird die zulässige Temperaturdifferenz von 15 Kelvin genau eingehalten. Es wurden maximale Kerntemperaturen von ca. 43 °C gemessen bei einer Frischbetontemperatur von 18 °C. Die Ergebnisse der Versuche wurden im Nachbehandlungskonzept berücksichtigt.

In einer „Arbeitsanweisung Nachbehandlung“ (AA) wurden insgesamt fünf Temperaturbereiche (Kategorien) für die Anwendung von Nachbehandlungsvarianten definiert. Dabei sind für die Kategorie 1 (Bereich $T \geq 30 \text{ °C}$) und für die Kategorie 5 (Bereich $T < -3 \text{ °C}$) besondere Maßnahmen im Rahmen des Betonierplans im Einzelfall festzulegen. In den Kategorien 2, 3 und 4 erfolgt dann in Abhängigkeit des vorherrschenden Temperaturbereiches (Lufttemperatur der Umgebung) eine der drei bei den Probelblöcken getesteten Varianten der Nachbehandlung. Die Tabelle 2 gibt einen Überblick über die für die einzelnen Kategorien festgelegten Temperaturbereiche und die dafür vorgesehenen Nachbehandlungsvarianten bzw. die notwendigen besonderen Maßnahmen im Einzelfall.

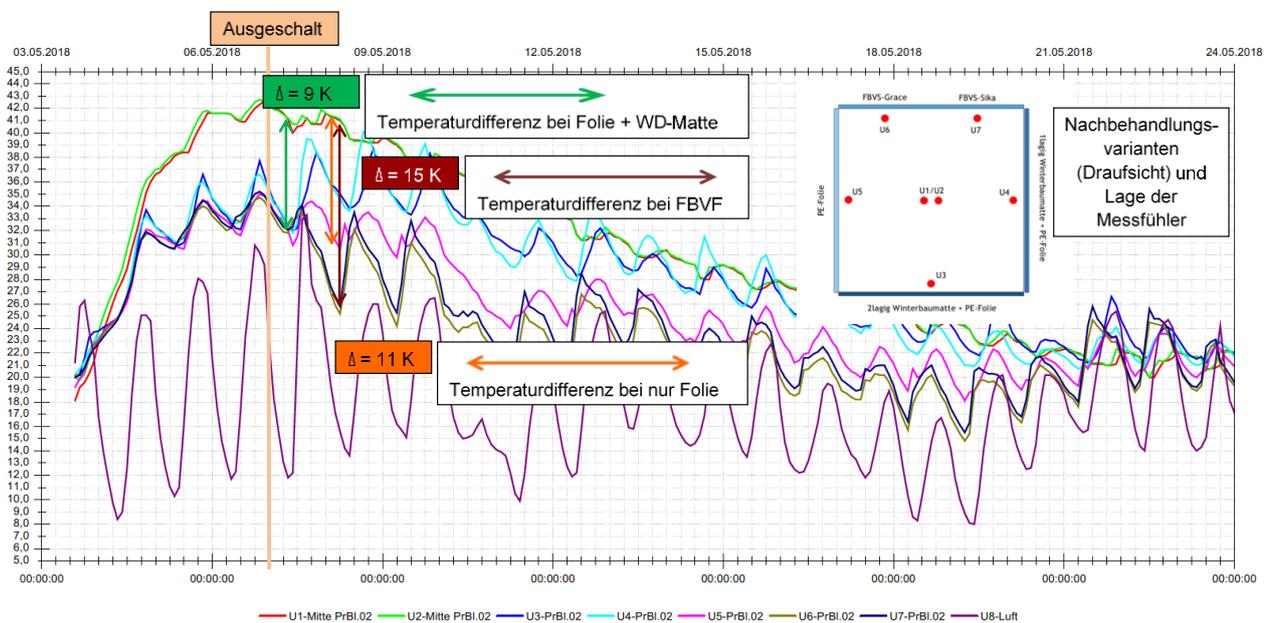


Abb. 4: Temperaturentwicklungen und Temperaturdifferenzen zwischen Kern und Außenfläche

Tab. 3: Kategorien (Temperaturbereiche) für die Festlegung der anzuwendenden Nachbehandlungsvarianten

Kategorie	Temperaturbereich (Luft der Umgebung)	Nachbehandlungsvariante/besondere Maßnahmen
Kategorie 1	$T \geq 30 \text{ °C}$	Besondere Maßnahmen, die im Rahmen des Betonierplans im Einzelfall festzulegen sind. (AA Betonieren bei extremen Temperaturen)
Kategorie 2	$20 \text{ °C} \leq T < 30 \text{ °C}$	Auflegen/Anbringen einer dampfdichten PE-Folie + bei Bedarf mit Wasser benetzen
Kategorie 3	$10 \text{ °C} \leq T < 20 \text{ °C}$	Auflegen/Anbringen einer dampfdichten PE-Folie + einlagige Winterbaumatte
Kategorie 4	$-3 \text{ °C} \leq T < 10 \text{ °C}$	Auflegen/Anbringen einer dampfdichten PE-Folie + zweilagige Winterbaumatte
Kategorie 5	$T < -3 \text{ °C}$	Besondere Maßnahmen, die im Rahmen des Betonierplans im Einzelfall festzulegen sind. (AA Betonieren bei extremen Temperaturen)

2.3 Baupraktische Umsetzung der Vorgaben für die Nachbehandlung

Für die Umsetzung der Nachbehandlungsvarianten wurde bei den Tunnelwänden ein Nachbehandlungsrahmen entwickelt. Dieser besteht aus einer Mattenbewehrung, auf der die Wärmedämmmatte bzw. die Wärmedämmplatten aus PE-Schaum befestigt sind. Als letzte Schicht des Wärmedämmpakets wird noch eine PE-Folie aufgelegt und befestigt. Der so vormontierte Nachbehandlungsrahmen wird auf der Innenseite mit Gitterträgern versehen, über die die Aussteifung des Rahmens erfolgt. Die Befestigung am Bauteil wird über Schalungsanker sichergestellt, die im Bereich der Gitterträger an den vorhandenen Ankerstellen der Schalungselemente eingeschraubt werden.

In den Abbildungen 5 und 6 sind exemplarisch solche Nachbehandlungsrahmen dargestellt, die zur Nachbehandlung zum Einsatz kommen.

Die Erfahrungen im Bauablauf haben jedoch gezeigt, dass die Winterbaumatten aus PE-Schaum beim Einsatz auf horizontalen Bauteilen wie Bodenplatten oder Decken leicht beschädigt werden können und ein mehrfacher Einsatz daher nur begrenzt möglich ist. Von daher werden die Winterbaumatten hier zusätzlich durch eine Bauschutzmatte (Verbundvlies kaschiert mit UV-stabiler PE-Folie) geschützt. Abbildung 7 zeigt die Nachbehandlung auf den Deckenplatten.



Abb. 5: Nachbehandlungsrahmen mit aufgelegten Wärmedämmplatten



Abb. 6: Nachbehandlungsrahmen mittels Schalungsankern in den vorhandenen Ankerstellen befestigt



Abb. 7: Nachbehandlung auf einer Deckenplatte (PE-Folie + Wärmedämmmatte + Bautenschutzmatte)

2.4 Messung der Hydratationswärme bei der Ausführung von Wänden und Decken

Während der Ausführung der Bodenplatten, der Wände und der Decken im Tunnelbereich des Bauwerks wurden in jedem zu betonierenden Bauteil jeweils drei Temperaturmessfühler eingebaut. Die Messstellen befanden sich bei den Wänden jeweils immer in einer horizontalen Reihe; davon ein Messfühler in der Bauteilmitte und jeweils ein Messfühler an der Innenseite und an der Außenseite im Bereich der Betondeckung. Ein vierter Messfühler wurde stets für die Bestimmung der Lufttemperatur eingesetzt. Die Messdaten wurden mit einem Datenlogger der Fa. Testo (Typ: testo 176 T4) aufgezeichnet; die Messintervalle betragen 15 Minuten. Die Datenlogger wurden bei den Wänden immer oben im Bereich der Wandkrone fixiert. Der Messzyklus wurde zeitlich bis zum Annähern der Kerntemperatur an die Umgebungstemperatur (Messdauer im Regelfall 28 Tage) aufrechterhalten.

Die Messdaten konnten während des Messzyklus ausgelesen werden und für die Berechnung des Reifegrades verwendet werden. Über den Reifegrad konnte z. B. die aktuelle Bauteilfestigkeit der Decken bestimmt werden und mit der durch den Statiker vorgegeben Ausschalfestigkeit verglichen werden. Durch diese direkte Festigkeitsanalyse konnten die Standzeiten der Deckenschalungen verkürzt und die Blockintervalle optimiert werden. Des Weiteren wurden die Temperaturmessungen für den Nachweis genutzt, dass die Temperaturdifferenz zwischen Kerntemperatur und der Temperatur an den Außen- und den Innenwandoberflächen die Vorgabe von maximal $\Delta = 15$ Kelvin eingehalten werden. In der Abbildung 8 ist beispielhaft die Temperaturentwicklung und das Abklingen der Hydrationswärmeentwicklung einer Blockwand im Tunnelbereich dokumentiert.

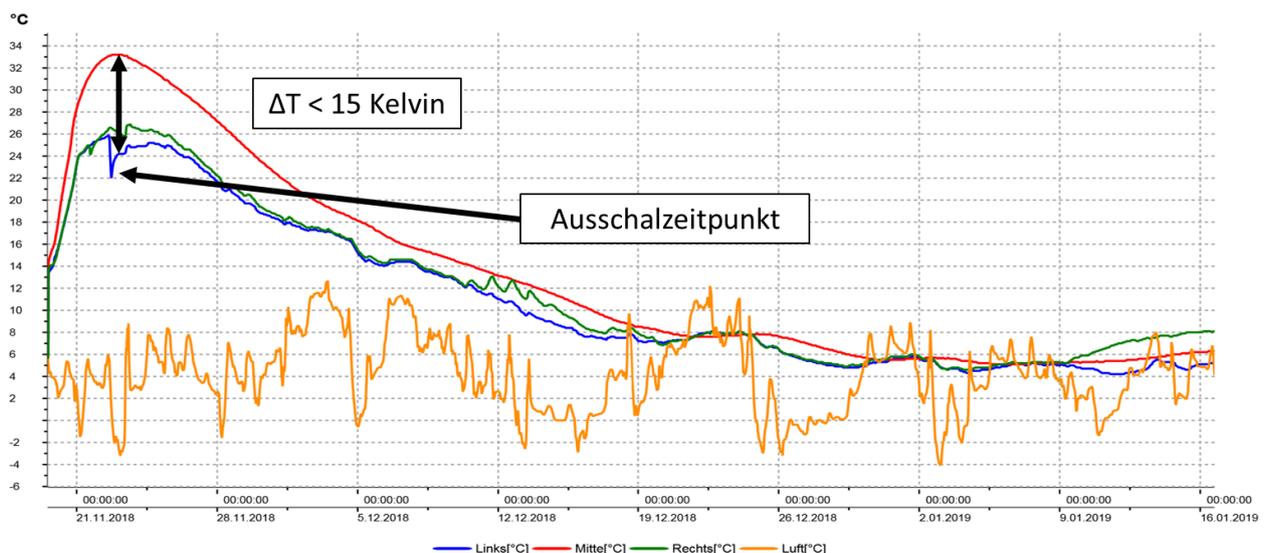


Abb. 8: Temperaturentwicklung in einer Blockwand im Tunnelbereich

2.5 Auswertung der Temperaturmessergebnisse unter dem Aspekt der Nachbehandlung

Im Folgenden werden exemplarisch anhand der vorliegenden Temperaturmessergebnisse die verschiedenen Möglichkeiten der Bestimmung der Nachbehandlungsdauer in den Winter- bzw. Sommermonaten für ausgewählte massive Betonbauteile dargestellt. Die ausgewählten Bodenplatten und Decken sind ca. 2,0 m dick, die ausgewählten Wände 1,5 m.

Am Beispiel der Wand, aus der die Temperaturkurve in Abbildung 8 entstammt, wird detailliert das Vorgehen erläutert. Für alle weiteren Bauteile erfolgt ausschließlich die Darstellung der Ergebnisse in tabellarischer Form.

Die Wand wurde bei kühler Witterung (Lufttemperatur 5,0 °C) am 19.11.2018 betoniert. Die Frischbetontemperatur betrug 14 °C. Das Bauteil wurde bis zum vierten Tag in Schalung belassen, danach erfolgten die wärmesteuernden Maßnahmen inkl. der Maßnahmen der Nachbehandlung gemäß der Abbildungen 5 und 6. Die Temperatur in der Betonrandzone wurde beidseitig an den geschalteten Flächen gegenüberliegend gemessen und im 15-Minuten-Takt aufgezeichnet. Für die Ermittlung der Nachbehandlungsdauer werden die Temperaturen in der Randzone gemittelt. Das Bauteil wird der Expositionsklasse XC3 zugeordnet, so dass die Nachbehandlungsdauer anhand der Oberflächentemperatur, der Lufttemperatur oder der Frischbetontemperatur gemäß DIN 1045-3 ermittelt werden kann. Vereinfachend wird als Oberflächentemperatur die Temperatur in der Randzone angesetzt. Die Oberflächentemperatur lag in den ersten Tagen zwischen 18,9 °C bis 25,5 °C. Daraus ergibt sich bei Ansatz der Betonoberflächentemperatur eine Mindestdauer der Nachbehandlung von 3 Tagen (s. Tabelle 4, rote Eintragung).

Tab. 4: Mindestdauer der Nachbehandlung unter Ansatz der Oberflächen- bzw. Lufttemperatur

Nr.	1	2	3	4	5
		Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen ^a			
		Festigkeitsentwicklung des Betons ^c			
		$r = f_{cm2}/f_{cm28}^d$			
Oberflächentemperatur ϑ °C ^e	Schnell $r \geq 0,50$	mittel $r \geq 0,30$	langsam $r \geq 0,15$	sehr langsam $r < 0,15$	
1	$\vartheta \geq 25$	1	2	2	3
2	$25 > \vartheta \geq 15$	1	2	4	5
3	$15 > \vartheta \geq 10$	2	4	7	10
4	$10 > \vartheta \geq 5^b$	3	6	10	15

Die Lufttemperatur hingegen lag im Tagesmittel kontinuierlich, mit einer Ausnahme, unter 10 °C. An neun Tagen lag sie unterhalb von 5 °C. Daraus ergibt sich bei Ansatz der Lufttemperatur eine Mindestdauer der Nachbehandlung von 9,5 Tagen (s. Tabelle 4, grüne Eintragung). Gemäß Fußnote ^b der Tabelle 5.NA ist bei Temperaturen unter 5 °C die Nachbehandlungsdauer um die Zeit zu verlängern, während der die Temperatur unter 5 °C lag (s. Tabelle 1). Das bedeutet damit eine Nachbehandlungsdauer von 19 Tagen.

Entsprechend Tabelle 6.NA ergibt sich unter Ansatz der Frischbetontemperatur von 11 °C eine Mindestdauer der Nachbehandlung von 7 Tagen (s. Tabelle 5).

Tab. 5: Mindestdauer der Nachbehandlung unter Ansatz der Frischbetontemperatur

Nr.	1	2	3	4
		Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen ^a		
		Festigkeitsentwicklung des Betons ^b		
		$r = f_{cm2}/f_{cm28}^c$		
schnell $r \geq 0,50$		mittel $r \geq 0,30$	langsam $r \geq 0,15$	
1	$\theta_{fb} \geq 15 \text{ °C}$	1	2	4
2	$10 \leq \theta_{fb} < 15 \text{ °C}$	2	4	7
3	$5 \leq \theta_{fb} < 10 \text{ °C}$	4	8	14

Abweichend zu den pauschalen Ansätzen der DIN 1045-3 kann die Dauer der Nachbehandlung durch eine alternative Nachweisführung ermittelt werden. Im vorliegenden Fall wurde zum genauen Nachweis der Betondruckfestigkeit in der Betonrandzone das Reifeverfahren nach DeVree gewählt. Unter Ansatz der Reife- kurve in Abbildung 2 und der Temperaturkurve in Abbildung 8 kann für jeden Messpunkt der Reifegrad bestimmt werden. Mit dem Reifegrad kann ein Rückschluss auf die Betondruckfestigkeit erfolgen. Wenn die Betondruckfestigkeit in der Betonrandzone mindestens 50 % der charakteristischen Festigkeit des verwendeten Betons entspricht, kann die Nachbehandlung beendet werden. Für die Wand ist ein Beton der Druckfestigkeitsklasse C30/37 verwendet worden. Der Nachweis einer ausreichenden Festigkeit mit dem Reife- verfahren kann nach 5 Tagen erbracht werden (s. Abbildung 9).

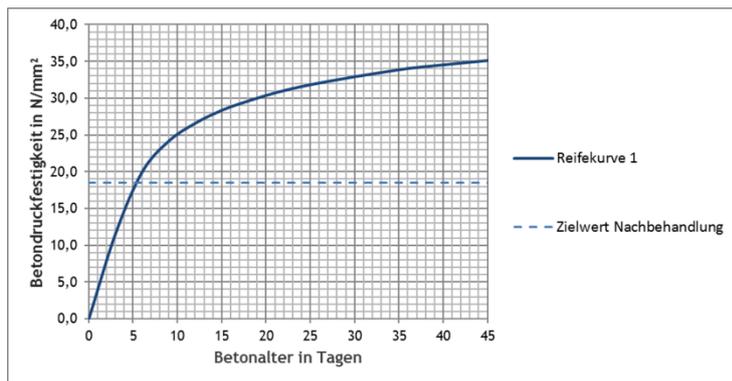


Abb. 9: Reifeberechnung

Entsprechend der jeweiligen Verfahren und der dabei zu berücksichtigenden Parameter ergeben sich unterschiedliche Mindestzeiträume für die Nachbehandlung. Die jeweilig sich ergebenden Mindestnachbehand- lungszeiträume sind in der Tabelle 6 zusammengestellt.

Eine wesentliche Erkenntnis lässt sich aus dem erläuterten Beispiel der Wandherstellung unter winterlichen Bedingungen ableiten. Die Maßnahmen einer Wärmesteuerung durch eine entsprechende Nachbehandlung mit einer PE-Folie + zweilagiger Winterbaumatte (Kategorie 4; vgl. Tabelle 3) sind zielführend, da die Oberflächentemperaturen nicht auf das Temperaturniveau der Luft abfallen. Damit ergibt sich gemäß DIN 1045-3, Tabelle 5.NA mit diesen „hochgehaltenen“ Oberflächentemperaturen für Betone mit langsamer Festigkeitsentwicklung eine Mindestnachbehandlungsdauer von 3 Tagen. Die Reifegradberechnungen (Verfahren DeVree) zeigen allerdings, dass für das Erreichen eines Festigkeitsniveaus von $f_{ci} \geq 0,5 \cdot f_{ck}$ eine Mindestnachbehandlungsdauer von 5 Tagen erforderlich ist. Das bedeutet zugleich, dass die Ableitung einer Mindestnachbehandlungsdauer aus den gemessenen realen Oberflächentemperaturen gemäß der Tabelle 5.NA der DIN 1045-3 nicht konservativ ist, sondern im Gegenteil eine zu kurze Mindestnachbehandlungsdauer ausweist.

Tab. 6: Mindestnachbehandlungsdauer

Minstdauer der Nachbehandlung					
Bauteil		Reifegradverfahren nach DeVree	DIN 1045-3		
			Tabelle 5.NA		Tabelle 6.NA
			Oberflächentemperatur	Lufttemperatur	Frischbetontemperatur
Wand	Wintermonate	5 Tage	3 Tage	19 Tage	7 Tage
Bodenplatte		3 Tage	3 Tage	11 Tage	7 Tage
Decke		4 Tage	4 Tage	24 Tage	7 Tage
Wand	Sommermonate	2 Tage	2 Tage	4 Tage	4 Tage
Bodenplatte		2 Tage	2 Tage	2 Tage	4 Tage
Decke		2 Tage	2 Tage	2 Tage	4 Tage

3 Fazit und Ausblick

Im Rahmen eines komplexen Bauwerks im Ingenieur- und Hochbau in Darmstadt (Projekt FAIR) wurde der Thematik der Nachbehandlung besondere Aufmerksamkeit geschenkt, insbesondere auch deswegen, weil vertragliche Anforderungen bezüglich der Einhaltung eines Temperaturgradienten im Bauteil vorgegeben sind.

Zur zielsicheren Erfüllung dieser Vorgaben wurden in erweiterten Erstprüfungen große Bauteile hergestellt. Die Temperaturentwicklungen im Bauteil (Kern und Randbereich) wurden für den Zeitraum der Hydratationswärmeentwicklung unter teiladiabatischen Bedingungen ermittelt. Darüber hinaus wurden in einer weiteren Serie Großbauteile für verschiedene Nachbehandlungsvarianten deren Einfluss auf die weiteren Temperaturverläufe nach dem Ausschalen untersucht. Auf Basis der Ergebnisse ist ein Nachbehandlungskonzept entwickelt worden, in dem auch eine Festlegung von konkreten Nachbehandlungsmaßnahmen in Abhängigkeit von definierten Temperaturbereichen erfolgte, um die Einhaltung des vorgegebenen Temperaturgradienten von $\Delta \leq 15$ Kelvin sicher zu stellen.

Zur Festlegung der Mindestnachbehandlungsdauer sind Reifegradberechnungen nach dem Verfahren DeVree auf Basis von Temperaturmessungen (waren für jedes Massenbauteil vorgeschrieben) durchgeführt worden. Durch diese Nachweismethode können in der Regel kürzere Nachbehandlungszeiträume realisiert werden als die Zeiten, die sich aus den konservativ ausgelegten Tabellen der DIN 1045-3 für den Fall keiner genaueren Nachweisführung ergeben.

Allerdings zeigte sich, dass in der kalten Jahreszeit bei der Ausführung entsprechend geplanter, wärmesteuernden Maßnahmen eine aus den gemessenen Oberflächentemperaturen abgeleitete Mindestnachbehandlungsdauer gemäß Tabelle 5.NA eine zu kurze Zeitdauer für die Nachbehandlung (nur 3 Tage) ergibt, während die Berechnung des Reifegrades zur Bestimmung einer ausreichenden Festigkeit eine Nachbehandlungsdauer von 5 Tagen zum Ergebnis hat. Für einen solchen Fall ist deshalb mit besonderer Sorgfalt bei der Festlegung der Nachbehandlungsdauer vorzugehen. Bei zeitkritischen Bauteilen kann es sich demnach lohnen über alternative Nachweisverfahren nachzudenken.

4 Literatur

- [1] Aus: www.gsi.de/forschungsbeschleuniger/fair.htm
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Massige Bauteile aus Beton, Ausgabe April 2010, 37. Erg.Lief. / Februar 2011
- [3] Budnik, J., Löffler, M. (2019) Betontechnologische Umsetzung von Strahlenschutzbetonen, Großprojekt FAIR, DBV-Heft 45, Vorträge zum Deutschen Bautechnik-Tag am 7. Und 8. März in Stuttgart, Fassung März 2019, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.

5 Autoren

Dr.-Ing. Joachim Budnik

Leiter Baustofftechnologie
PORR GmbH & Co. KGaA
Baustofftechnologie
Franz-Rennefeld-Weg 4,
D-40472 Düsseldorf

M.Sc. Marcel Löffler

Betontechnologe VDB
PORR GmbH & Co. KGaA
Baustofftechnologie
Franz-Rennefeld-Weg 4,
D-40472 Düsseldorf

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 CO₂-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 CO₂ verpflichtet. Beton, als unser universellster Baustoff, trägt durch seine hohen herstellbedingten CO₂-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 CO₂-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 entschalte 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, Absperrern 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/m²
- C2: Auftragsmenge 700 g/m²
- D. Paraffin Curing (175 g/m²)
- E. Kunststoffdispersion (200 g/m²)

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

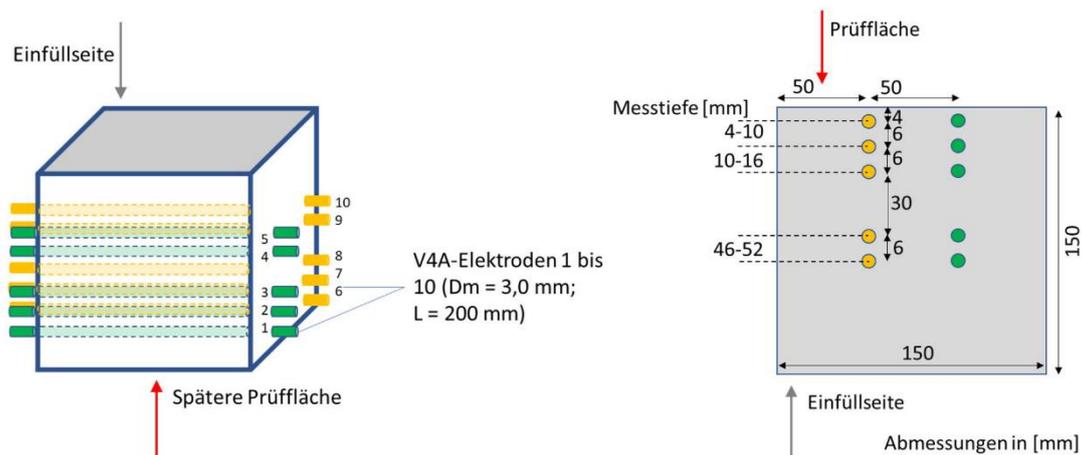


Abb. 1: Skizze zu den Probekörpern mit eingebauten V4A-Elektroden; links: Frontalansicht, rechts: Seitenansicht

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/m² 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 CO₂ 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

Programm des Web-Symposiums

11. März 2021, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

08:50 Uhr	Anmeldung Technischer Check	12:30 Uhr	Nachbehandlung im Wasserbau Dr.-Ing. Frank Spörel Dipl.-Ing. Hilmar Müller Bundesanstalt für Wasserbau
09:00 Uhr	Begrüßung Moderation Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dr. Klaus Felsch Verband Deutscher Betoningenieure e. V. Dipl. Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH	12:55 Uhr	Nachbehandlung im Verkehrswegebau Dipl.-Ing. Martin Langer STRABAG Großprojekte GmbH
09:20 Uhr	Dekarbonisierung: Weniger CO₂ - mehr Nachbehandlung? Dr.-Ing. Christoph Müller Dr.-Ing. Wibke Hermerschmidt VDZ gGmbH	13:20 Uhr	Kaffeepause
09:45 Uhr	Einfluss der Nachbehandlung auf die Eigenschaften der Betonrandzone Prof. Dr.-Ing. Frank Fingerloos Deutscher Beton- und Bautechnikverein E. V. Enrico Schwabach DBV-Bauberatung OST	13:50 Uhr	Nachbehandlung im Ingenieur- und Hochbau Dr.-Ing. Joachim Budnik Dipl.-Ing. Marcel Löffler PORR GmbH & Co. KGaA Tunnelbau
10:10 Uhr	Kaffeepause	14:15 Uhr	Nachbehandlung im Tunnelbau Dipl.-Ing. Andreas Schaab HOCHTIEF Engineering GmbH Consult Materials
10:40 Uhr	Nachbehandlung - Grundlagen, Regelwerk, Randbedingungen Dr.-Ing. Thomas Richter InformationsZentrum Beton GmbH	14:40 Uhr	Zusammenfassung Schlusswort Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dr.-Ing. Klaus Felsch Verband Deutscher Betoningenieure e. V. Dipl. Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH
11:05 Uhr	Wirkungsweise chemischer Nachbehandlungsmittel Dr. Oliver Blask Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	15:00 Uhr	Ende der Veranstaltung
11:30 Uhr	Mittagspause		Jede Vortragszeit beinhaltet eine 5-minütige Fragen- und Diskussionsrunde.

Autorenverzeichnis

17. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Dauerhafter Beton – Richtige Nachbehandlung

Dr. rer. nat. Oliver Blask

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

Dr.-Ing. Joachim Budnik

PORR GmbH & Co. KGaA, Baustofftechnologie, Franz-Rennefeld-Weg 4, 40472 Düsseldorf

Prof. Dr.-Ing. Frank Fingerloos

Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Kurfürstenstraße 129, 10785 Berlin

Prof. Dr.-Ing. Andreas Gerdes

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

Dr.-Ing. Wibke Hermerschmidt

VDZ Technology gGmbH, Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf

Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller

VDZ Technology gGmbH, Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf

Dipl.-Ing. Hilmar Müller

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Abteilung Bautechnik – Referat Baustoffe,
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe

Dipl.-Ing. Martin Langer

STRABAG Großprojekte GmbH, Zentrale Technik, Leopoldstraße 250c, 80807 München

M.Sc. Marcel Löffler

PORR GmbH & Co. KGaA, Baustofftechnologie, Franz-Rennefeld-Weg 4, 40472 Düsseldorf

Dr.-Ing. Thomas Richter

InformationsZentrum Beton GmbH, Kochstr. 6-7, 10969 Berlin

Dipl.-Ing. Andreas Schaab

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

Dr.-Ing. Enrico Schwabach

Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Kurfürstenstraße 129, 10785 Berlin

Dr.-Ing. Frank Spörel

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Abteilung Bautechnik – Referat Baustoffe,
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe

Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Themen vergangener Symposien (2004-2020)



1. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Instandsetzung bedeutsamer Betonbauten der Moderne in Deutschland
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Vogel, M. Haist
ISBN 978-86644-098-2



2. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Sichtbeton – Planen, Herstellen, Beurteilen
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 3-937300-43-0



3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Innovationen in der Betonbautechnik
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 3-86644-008-1



4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Industrieböden aus Beton
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-120-0



5. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betonbauwerke im Untergrund – Infrastruktur für die Zukunft
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-214-6



6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Dauerhafter Beton – Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-341-9



7. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Beherrschung von Rissen in Beton
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-487-4



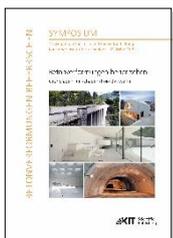
8. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Schutz und Widerstand durch Betonbauwerke bei chemischen Angriff
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-654-0



9. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Nachhaltiger Beton – Werkstoff, Konstruktion und Nutzung
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
ISBN 978-3-86644-820-9



10. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Gestalteter Beton – Konstruieren in Einklang von Form und Funktion
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
ISBN 978-3-73150-179-4



11. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betonverformungen beherrschen – Grundlagen für schadensfreie Bauwerke
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
ISBN 978-3-7315-0343-9



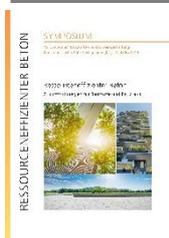
12. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Bauwerkserhaltung – Instandsetzung im Beton- und Stahlbetonbau
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-7315-0474-0



13. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Sicherheit durch Beton – Schutz vor Explosion, Brand und Risikostoffen
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, J. Link
ISBN 978-3-7315-0629-4



14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, J. Link
ISBN 978-3-7315-0767-3



15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Ressourceneffizienter Beton – Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, J. Link; V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-0993-6



16. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Klima, Risse und Co. – Betonbau im herausfordernden Umfeld
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-0994-3

Alle Bände sind kostenfrei als Download bei **KIT Scientific Publishing** (<http://www.ksp.kit.edu>) oder für einen Unkostenbeitrag im Buchhandel erhältlich.

Die sachgerechte Nachbehandlung von Beton weist bekanntermaßen einen entscheidenden Einfluss auf dessen Qualität und Eigenschaften auf. Sowohl für die Festigkeitsentwicklung des jungen Betons als auch für den Widerstand gegen äußere Einflüsse und die damit verbundene Dauerhaftigkeit ist eine ausreichende und sorgfältige Nachbehandlung zwingend erforderlich. Das visuelle Erscheinungsbild moderner Betonstrukturen gewann in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung und damit auch die Anforderungen an deren Oberflächenqualität. Fortschritte in der Entwicklung neuartiger Zemente sowie Veränderungen der klimatischen Bedingungen im Laufe der Zeit bedingen wiederum eine Anpassung der bisherigen Vorgehensweisen. Zielsetzung dieses 17. Symposiums Baustoffe und Bauwerkserhaltung ist es, Ihnen einen Überblick über die Methoden und Ansätze einer geeigneten Nachbehandlung aufzuzeigen, anhand derer den verschiedenen Herausforderungen begegnet werden kann. Das Programm der Veranstaltung beginnt mit einer Einführung in die Notwendigkeit der Nachbehandlung und zeigt die möglichen Folgen im Fall eines unsachgemäßen Umgangs auf. Anschließend erfolgt die Präsentation sowohl jahrelang bewährter als auch neuer, innovativer Nachbehandlungsmethoden und deren jeweiliger Funktionsweisen. Aufbauend auf diesen theoretischen Grundlagen stellen Vertreter des Hoch-, Tief-, Wasser-, und Verkehrswegebbaus die Herausforderungen an die Nachbehandlung der jeweiligen Bereiche des Betonbaus vor und präsentieren anhand spannender Praxisbeispiele bereits realisierte Lösungen.

