

Untersuchungen zur Definition einer optimalen Nachbehandlung von Straßenbeton unter Verwendung von hüttensandhaltigen Zementen

FA 8.203

Forschungsstelle: Bauhaus-Universität Weimar, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde (Prof. Dr.-Ing. H.-M. Ludwig)

Bearbeiter: Ludwig, H.-M. / Müller, M.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Dezember 2012

1 Aufgabenstellung

Eine der wichtigsten Dauerhaftigkeitseigenschaften einer Fahrbahndecke aus Beton ist der hohe Frost-Tausalz-Widerstand. Üblicherweise wird deshalb beim Bau von Betonstraßen Portlandzement eingesetzt, da mit diesem Bindemittel eine Betondecke mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand zielsicher hergestellt werden kann. Im Zuge der fortschreitenden Umstellung der Zementproduktion auf Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen werden zukünftig auch solche Bindemittel im Betonstraßenbau häufiger Anwendung finden. Daraus kann jedoch, z. B. bei höheren Hüttensandgehalten, eine Beeinträchtigung des Frost-Tausalz-Widerstands bzw. eine höhere Nachbehandlungsempfindlichkeit des Fahrbahndeckenbetons resultieren [LUDWIG 1993]. Die Waschbetonbauweise bietet hier aufgrund ihrer spezifischen Fertigungsweise die Möglichkeit, noch gezielter als vorher durch eine optimierte Nachbehandlung den Frost-Tausalz-Widerstand von Betonfahrbahndecken zu erhöhen.

Die Nachbehandlung von Fahrbahndeckenbeton mit Waschbetonoberfläche erfolgt in mehreren Schritten. Unmittelbar nach dem Betoneinbau wird ein Kombinationsmittel bestehend aus Oberflächenverzögerer und Nachbehandlungsmittel aufgesprüht (Erste Nachbehandlung). Wenn nach ca. 8 bis 24 Stunden der Fahrbahndeckenbeton ausreichend erhärtet ist, um eine Befahrbarkeit und eine ausreichende Einbindung der groben Gesteinskörnung zu gewährleisten, wird der noch verzögerte Oberflächenmörtel ausgebürstet. Anschließend erfolgt durch das Aufsprühen eines flüssigen Nachbehandlungsmittels auf Paraffinbasis eine zweite Nachbehandlung.

Die erste Nachbehandlung bis zum Ausbürsten des Oberflächenmörtels beeinflusst den Frost-Tausalz-Widerstand einer Waschbetonoberfläche kaum [SKARABIS 2010]. Im frühen Betonalter kann die Wasserverdunstung an der Oberfläche noch durch das Nachliefern von Flüssigkeit aus dem unterliegenden Beton ausgeglichen werden [STARK 2010]. Eine starke Austrocknung der Betonoberfläche tritt also noch nicht auf. Zur Vermeidung einer plastischen Schwindrissbildung sowie für die Gewährleistung der Wirksamkeit der Oberflächenverzögerer ist ein ausreichender Verdunstungsschutz in den ersten Stunden trotzdem unerlässlich.

Der zweiten Nachbehandlung kommt im Hinblick auf den Frost-Tausalz-Widerstand eine größere Bedeutung zu. Bei verschiedenen Nachbehandlungsmethoden nach dem Ausbürsten des Oberflächenmörtels können sehr unterschiedliche Abwitterungstiefen im CDF-Test auftreten.

So wurde in [SKARABIS 2010] aufgezeigt, dass bei einer ständigen Nassnachbehandlung mit einem aufgelegten Jutetuch eine deutliche Steigerung des Frost-Tausalz-Widerstands einer nachbehandlungsempfindlichen Waschbetonoberfläche erzielt werden kann.

Eine wasserzuführende Nachbehandlung erfolgt in der Praxis fast ausschließlich durch Besprengen, z. B. mit einem Tankfahrzeug. Für eine optimale und praxisrelevante Nachbehandlung wäre es deshalb sinnvoll, wenn in Abhängigkeit vom verwendeten Zement und der Witterung festgelegt werden könnte, in welchen Intervallen und über welchen Zeitraum eine entsprechende Nassnachbehandlung erfolgen muss. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde daher untersucht, ob und unter welchen Randbedingungen durch eine zyklische, praxisnahe Nassnachbehandlung der Frost-Tausalz-Widerstand von Waschbeton erhöht werden kann, insbesondere bei Verwendung hüttensandhaltiger Zemente.

2 Untersuchungsmethodik

Unter Verwendung von drei Zementen mit unterschiedlichem Hüttensandgehalt (CEM I, CEM II/B S und CEM III/A) wurden Waschbetonrezepturen nach TL Beton-StB 07 erstellt. Die Herstellungsbedingungen und die erste Nachbehandlung wurden für die Waschbetonproben möglichst konstant gehalten. Die Probekörper lagerten im Labor bei 20 °C und 65 % r. F. und wurden bis zum 21. Tag auf verschiedene Art und Weise nachbehandelt (Zweite Nachbehandlung). Folgende Nachbehandlungsmethoden für die 2. Nachbehandlung wurden untersucht:

Tabelle 1: Nachbehandlungsmethoden

Nr.	Beschreibung	Bezeichnung
1	Keine Nachbehandlung	Ohne NB
2	Aufsprühen eines Nachbehandlungsmittels (Typ VM, 150 g/m ²)	NBM
3	Nassnachbehandlung im 12 Stunden-Intervall für 1, 3, 5, 7 Tage, je 22,5 g auf 225 cm ²	1d H ₂ O, 3d H ₂ O, 5d H ₂ O, 7d H ₂ O.
4	Einmalige Nassnachbehandlung (15 g auf 225 cm ² , nach 2 h Oberfläche nur noch mattheucht)	H ₂ O (15g)
5	Abdecken mit Folie für 24 h	Folie 24h
6	Einmalige Nassnachbehandlung (15 g auf 225 cm ²), 24 h nach dem Ausbürsten	H ₂ O (15g) nach 24h
7	Aufsprühen eines Nachbehandlungsmittels (Typ VM) und anschließende zyklische Nassnachbehandlung für 3 Tage (je 22,5 g auf 225 cm ²)	NBM + 3d H ₂ O
8	Einmalige Nassnachbehandlung (15 g auf 225 cm ²), anschließender Auftrag eines NBM (Typ VM) auf die mattheuchte Oberfläche	H ₂ O (15g) + NBM
9	Aufbringen einer wasserspeichernden Nachbehandlung (Methylcellulosegel – HMEC) und Auftrag eines flüssigen Nachbehandlungsmittels (Typ VM)	HMEC + NBM

Die Wassermenge bei der zyklischen Nassnachbehandlung (Variante 3) wurde so bemessen, dass ca. acht Stunden nach Wasserauftrag kein Wasserfilm auf der Betonoberfläche mehr sichtbar war. Damit sollte berücksichtigt werden, dass bei einer Nassnachbehandlung mit Tankwagen zwischenzeitlich eine oberflächliche Austrocknung der Betondecke auftreten kann.

Die Varianten 1 bis 3 wurden zusätzlich auch bei einer 10 °C-Lagerung untersucht. Weiterhin wurden im Frühjahr und Sommer Probekörper ausgelagert, wobei die Nachbehandlungsvarianten 2, 3 (hier 3d H₂O) und 4 angewendet wurden. Während der Lagerung wurde die Wasserverdunstung der Probekörper erfasst. Anschließend erfolgten die Bestimmung der Carbonatisierungstiefe und des Frost-Tausalz-Widerstands. Im Rahmen des Kurzberichts werden nur die Ergebnisse der Frost-Tausalz-Prüfungen aufgeführt.

2.1 Ausgangsstoffe, Rezepturen und Herstellung der Betone

Die ausgewählten Zemente basierten auf demselben Klinker und unterschieden sich lediglich in ihrem Hüttensandgehalt. Aufgrund der bei allen drei Zementen relativ geringen Anfangsfestigkeiten war von einer erhöhten Nachbehandlungsempfindlichkeit auszugehen. Die verwendeten Zemente und relevante Kennwerte sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Die Frischbetontemperatur bei der Herstellung der Proben für eine Lagerung im Normklima betrug 20 °C. Die Probekörper für die 10 °C-Lagerung sowie für die Auslagerungsversuche im Frühjahr wurden mit einer Frischbetontemperatur von 15 °C hergestellt. Die Frischbetontemperatur für die sommerlichen Auslagerungsversuche betrug 25 °C.

Nach 15 Stunden im Normklima wurden die Probekörper entschalt und anschließend der Oberflächenmörtel mit einer Stahlbürste abgebürstet.

Der Ausbürstzeitpunkt von 15 Stunden wurde gewählt, da zu diesem Zeitpunkt alle Probekörper eine ausreichende Aus-

schalfestigkeit aufwiesen und der Oberflächenmörtel noch ohne Mühe auszubürsten war. Bei den Proben bei 10 °C sowie bei Auslagerung im Frühjahr verschob sich der Ausbürstzeitpunkt auf 18 Stunden, bei der sommerlichen Auslagerung auf 12 Stunden nach der Herstellung.

Nach dem Ausbürsten wurden die Seitenflächen und die Unterseite der Betonprobekörper abgeklebt, um die Verdunstung über diese Flächen zu verhindern. Anschließend begann die 2. Nachbehandlung. Für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands wurden die Probekörper im Alter von 21 bis 22 Tagen horizontal mittels Sägeschnitt in Probekörpermitte geteilt. Zur Charakterisierung des Frost-Tausalz-Widerstands der Betone, unabhängig von der Nachbehandlung, wurde zusätzlich eine CDF-Prüfung an teflongeschalteten Betonprobekörpern vorgenommen (Bild 1).

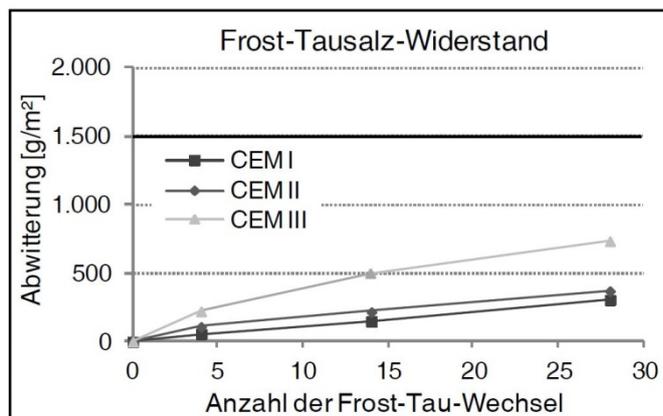


Bild 1: Frost-Tausalz-Widerstand

Die Betone auf CEM I- und CEM II-Basis weisen vergleichbare, geringe Abwitterungen nach 28 Tagen auf. Die Abwitterungen des CEM III-Betons liegen im Vergleich doppelt so hoch. Die Abwitterungsmengen nach 28 Tagen liegen bei allen Betonen deutlich unterhalb des Prüfkriteriums von 1 500 g/m².

Tabelle 2: Eigenschaften der verwendeten Zemente

Eigenschaften		CEM I 42,5 N	CEM II/B-S 32,5 R	CEM III/A 42,5 N
Mahlfeinheit nach BLAINE	[cm²/g]	2 790	3 160	3 980
Wasseranspruch	[%]	25,4	26,8	29,4
Erstarrungsbeginn	[min]	195	150	175
2 Tage-Druckfestigkeit	[N/mm²]	23,6	24,1	21,9
7 Tage-Druckfestigkeit	[N/mm²]	41,2	40,1	38,7
28 Tage-Druckfestigkeit	[N/mm²]	51,3	47,1	57,2
Na ₂ O-Äquivalent	[M.-%]	0,58	0,68	0,74
Hüttensandgehalt	[M.-%]	0	29	42

2.2 Frost-Tausalz-Widerstand

2.2.1 Normklima

Die Auswirkungen der verschiedenen Nachbehandlungsmethoden bei 20 °C-Lagerung auf den Frost-Tausalz-Widerstand sind in Bild 2 dargestellt.

Von der Nassnachbehandlung im 12 Stunden-Intervall wird hier nur die 3 Tage-Variante aufgeführt. Als Referenz sind ebenfalls die Ergebnisse der Prüfung der geschalteten Fläche dargestellt.

Der Verzicht auf eine Nachbehandlung (1) verursachte hohe Abwitterungen, wobei kein Einfluss der Zementart auf den Schädigungsgrad erkennbar war. Durch das Aufbringen eines Nachbehandlungsmittels (2) konnte der Frost-Tausalz-Widerstand leicht verbessert werden. Dabei ließ mit steigendem Hüttensandgehalt der positive Effekt des Nachbehandlungsmittels jedoch nach.

Durch die zyklische Nassnachbehandlung (3) konnte der Frost-Tausalz-Widerstand des Waschbetons sehr deutlich gesteigert werden. Diese Wirkung wurde sogar schon mit einem einmaligen Wasserauftrag (4) erreicht. Bei den nassnachbehandelten Proben zeigte sich auch deutlich die Abhängigkeit des Frost-Tausalz-Widerstands von der Zementart, analog zu den Ergebnissen der Referenzproben.

Durch das Abdecken der Waschbetonprobe mit einer Folie für 24 Stunden (5) sowie auch durch einen nachträglichen Wasserauftrag 24 Stunden nach dem Ausbürsten (6) wurde ebenfalls eine Steigerung des Frost-Tausalz-Widerstands erzielt, die für den CEM I- und den CEM II-Beton annähernd die Größenordnung der zyklischen Nassnachbehandlung erreichte.

Eine zusätzliche dreitägige Nassnachbehandlung nach dem NBM-Auftrag (7) erwies sich als wenig effektiv. So konnte zwar für die CEM I- und CEM II-Rezeptur der Frost-Tausalz-Widerstand durch die zusätzliche Nassnachbehandlung etwas erhöht werden. Im Vergleich zur dreitägigen Nassnachbehandlung ohne vorherigen Nachbehandlungsmittelauftrag war der Frost-Tausalz-Widerstand jedoch deutlich geringer.

Mit dem Vorsättigen der Oberfläche vor dem Auftrag eines Nachbehandlungsmittels (8) konnte keine signifikante Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstands im Vergleich zum reinen NBM-Auftrag erreicht werden. Bei der CEM III-Rezeptur trat sogar eine extreme Verschlechterung auf.

Die geringsten Abwitterungen wurden bei Nachbehandlung mit einem Methylcellulosegel und anschließendem Nachbehandlungsmittelauftrag (9) erreicht. Auch mit dem CEM III-Beton wurde hier ein sehr guter Frost-Tausalz-Widerstand erzielt.

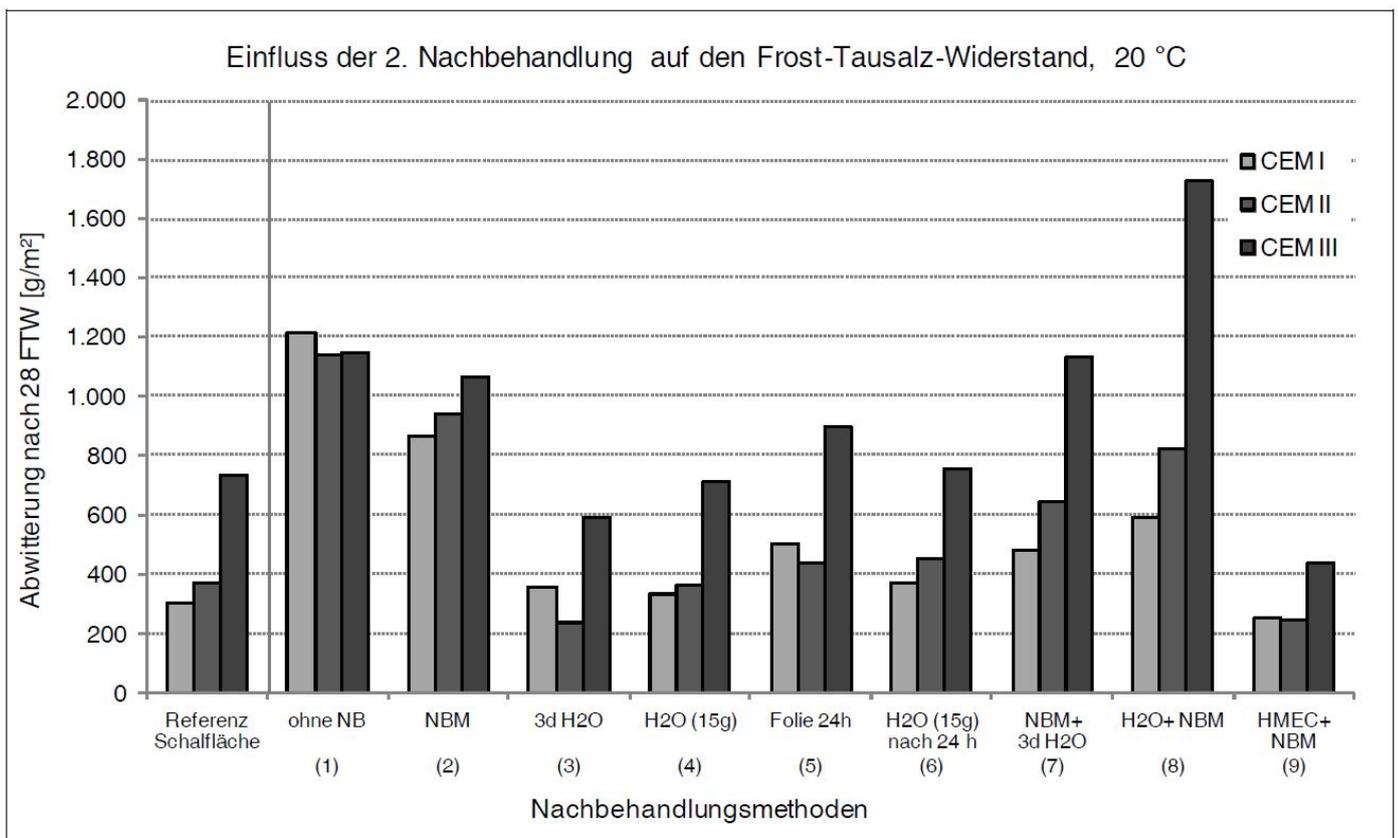


Bild 2: Einfluss der 2. Nachbehandlung auf den Frost-Tausalz-Widerstand bei Lagerung im Normklima 20/65

Der Einfluss der Nachbehandlungsdauer bei der zyklischen Nassnachbehandlung im 12 Stunden-Intervall bei 20 °C-Lagerung ist in Bild 3 dargestellt.

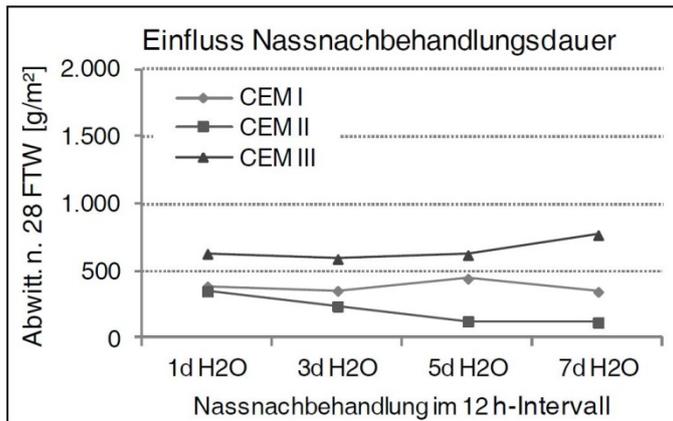


Bild 3: Einfluss der Nassnachbehandlungsdauer bei Lagerung im Normklima

Alle Betone wiesen unabhängig von der Nachbehandlungsdauer einen guten Frost-Tausalz-Widerstand auf, wobei bei dem CEM III-Beton erwartungsgemäß höhere Abwitterungen auftraten. Innerhalb des betrachteten Zeitraums hatte die Dauer der Nassnachbehandlung praktisch keinen Einfluss auf den Frost-Tausalz-Widerstand. Einzig für den Beton auf CEM II-Basis war eine statistisch signifikante Verbesserung mit fortschreitender Nachbehandlungsdauer erkennbar.

2.2.2 10 °C-Lagerung

Die Untersuchungen zum Einfluss der 2. Nachbehandlung auf den Frost-Tausalz-Widerstand bei 10 °C-Lagerung erfolgten nur mit der CEM II-Rezeptur. Als Nachbehandlungsmethoden wurden die Applikation eines Nachbehandlungsmittels sowie die zyklische Nassnachbehandlung im 12 Stunden-Intervall für 1 bis 7 Tage angewendet. Als Referenz wurde ebenfalls eine Probekörperserie ohne 2. Nachbehandlung untersucht. Mit den Untersuchungen bei 10 °C sollte vor allem ermittelt werden, ob wegen der langsameren Gefügeentwicklung eine längere Nassnachbehandlungsdauer notwendig wird, als bei Lagerung im Normklima.

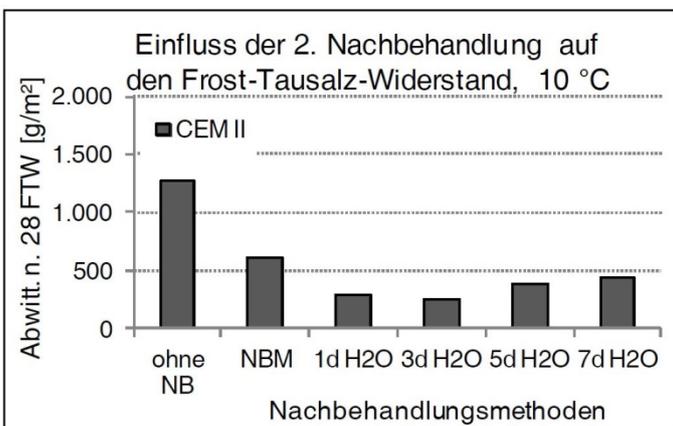


Bild 4: Einfluss der 2. Nachbehandlung auf den Frost-Tausalz-Widerstand bei 10 °C-Lagerung

Bei der 10 °C-Lagerung traten ohne 2. Nachbehandlung hohe Abwitterungen auf, analog zu den Versuchen bei 20 °C-Lagerung. Jedoch konnte hier durch die Applikation des Nachbehandlungsmittels eine erheblich größere Steigerung des Frost-Tausalz-Widerstands erreicht werden.

Mit der zyklischen Nassnachbehandlung wurde auch hier der größte Frost-Tausalz-Widerstand erreicht. Bei steigender Nassnachbehandlungsdauer (5/7 Tage) nahm der Frost-Tausalz-Widerstand ab. Dieses Verhalten kann nicht erklärt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass auch bei geringen Temperaturen eine verhältnismäßig kurze Nassnachbehandlungsdauer nach dem Ausbürsten für eine deutliche Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstands ausreicht.

Die höhere Wirksamkeit des Nachbehandlungsmittels im Vergleich zur 20 °C-Lagerung kann dadurch erklärt werden, dass aufgrund der langsameren Gefügeentwicklung über einen längeren Zeitraum hinweg ein vergleichsweise hoher kapillarer Wassertransport aus dem Probekörperinneren an die Waschbetonoberfläche erfolgte. In Verbindung mit einer schnelleren Verfilmung des Nachbehandlungsmittelfilms aufgrund der hohen Verdunstungsrate im Klimaschrank konnte die Austrocknung der Randzone verzögert werden.

2.2.3 Auslagerung im Frühjahr

Die Auslagerungsversuche im Frühjahr erfolgten ebenfalls mit der CEM II-Rezeptur. Als Nachbehandlungsmethoden wurden die Applikation eines Nachbehandlungsmittels, der einmalige Wasserauftrag (15 g) sowie die zyklische Nassnachbehandlung im 12 Stunden-Intervall für drei Tage angewendet. Die Ergebnisse der Frost-Tausalz-Prüfungen sind in Bild 5 dargestellt.

Bei den im Frühjahr ausgelagerten Proben war kein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Nachbehandlungsmethoden feststellbar. Mit einer Abwitterungsmenge von ca. 500 g/m² wurde ein guter Frost-Tausalz-Widerstand für die drei verschiedenen Nachbehandlungsmethoden erreicht.

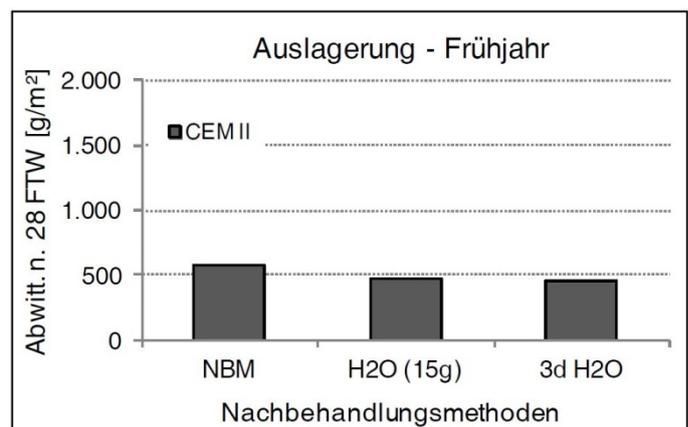


Bild 5: Einfluss der 2. Nachbehandlung bei Auslagerung der Probekörper im Frühjahr

2.2.4 Auslagerung im Sommer

Die Auslagerungsversuche im Sommer erfolgten ebenfalls mit der CEM II-Rezeptur. Als Nachbehandlungsmethoden wurden die Applikation eines Nachbehandlungsmittels, der einmalige Wasserauftrag (15 g) sowie die zyklische Nassnachbehandlung im 12 Stunden-Intervall für drei Tage angewendet. Die Ergebnisse der Frost-Tausalz-Prüfungen sind in Bild 6 dargestellt.

An den im Sommer ausgelagerten Probekörpern war eine deutliche Abhängigkeit des Frost-Tausalz-Widerstands von der verwendeten Nachbehandlungsmethode feststellbar.

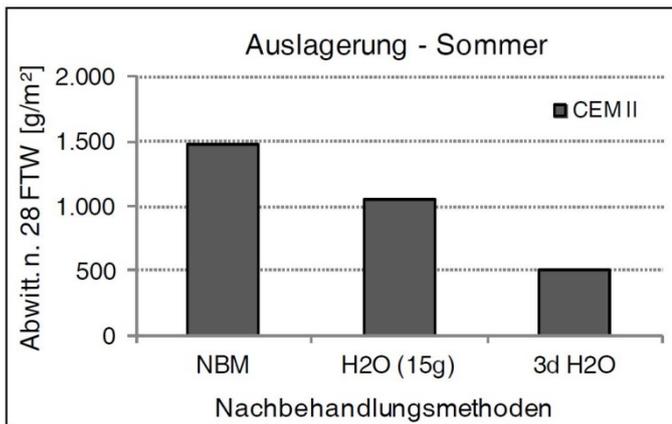


Bild 6: Einfluss der 2. Nachbehandlung bei Auslagerung der Probekörper im Sommer

Die Ergebnisse zeigen, dass in Bezug auf den Frost-Tausalz-Widerstand die Auslagerung im Sommer sich als die pessimale Lagerungsart erwies.

Der Beton mit Nachbehandlungsmittelauftrag wies einen sehr geringen Frost-Tausalz-Widerstand auf (1 472 g/m²). Mit der einmaligen Nassnachbehandlung (15 g) wurde eine deutliche Steigerung des Frost-Tausalz-Widerstandes erreicht, wobei die Abwitterungen mit 1 047 g/m² noch verhältnismäßig hoch sind. Mit der dreitägigen zyklischen Nassnachbehandlung wurde der Frost-Tausalz-Widerstand nochmal deutlich gesteigert (512 g/m²).

Die verringerte Wirksamkeit der einmaligen Nassnachbehandlung im Vergleich zu anderen Lagerungsbedingungen ist darauf zurückzuführen, dass der aufgetragene Wasserfilm durch die intensive Sonneneinstrahlung schon nach ca. einer halben Stunde vollständig verdunstet war. Somit konnte kaum Wasser vom Probekörper aufgenommen werden und die Austrocknung der Randzone wurde nur um kurze Zeit verzögert.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Wirksamkeit der Nachbehandlung mit flüssigen Nachbehandlungsmitteln auf den Frost-Tausalz-Widerstand

Die Applikation eines Nachbehandlungsmittels auf die ausgebürstete Waschbetonoberfläche ist die in der Baupraxis gebräuchliche Nachbehandlungsmethode. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurde durch den Nachbehandlungsmittelauftrag nur eine geringfügige Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstands im Vergleich zum nicht nachbehandelten Beton erreicht, wenn die Lagerung im Normklima 20/65

erfolgte. Bei der Lagerung im Klimaschrank bei 10 °C bzw. bei Auslagerung im Frühjahr wurde hingegen auch mit dem Nachbehandlungsmittelauftrag ein vergleichsweise guter Frost-Tausalz-Widerstand erzielt. Bezüglich der Auslagerung im Frühjahr ist allerdings anzumerken, dass hier zu Beginn der Auslagerung bei einer konstanten Luftfeuchte von > 80 % sehr günstige Nachbehandlungsbedingungen für den Beton vorlagen. Bei der Lagerung unter sommerlichen Witterungsbedingungen traten trotz Nachbehandlungsmittelauftrag verhältnismäßig hohe Abwitterungen auf.

Dieses Verhalten steht weitestgehend im Einklang mit Untersuchungsergebnissen in [STARK 2010] an mörteltexturierten Fahrbahndeckenbetonen. Hier erwies sich die Verwendung von Nachbehandlungsmitteln ebenfalls als wenig effektiv, um den Frost-Tausalz-Widerstand zu steigern, ausgenommen bei Proben, die unter herbstlichen Witterungsbedingungen ausgelagert wurden.

In [STARK 2010] wurden auch ausgelagerte Waschbetonprobekörper auf ihren Frost-Tausalz-Widerstand hin untersucht. Hier konnte durch die Ausführung einer 2. Nachbehandlung mit flüssigem NBM eine deutliche Erhöhung des Frost-Tausalz-Widerstands erreicht werden (von ca. 1000 g/m² ohne NB auf ca. 500 g/m² mit NBM). Die Versuche fanden unter herbstlichen Witterungsbedingungen statt und die Auftragsmenge Nachbehandlungsmittel lag im Mittel ca. 30 % über der vom Hersteller angegebenen Mindestaufsprühmenge.

In [SKARABIS 2010] wurde mit dem Auftrag eines Nachbehandlungsmittels bei einer nachbehandlungsempfindlichen Rezeptur eine deutliche Steigerung des Frost-Tausalz-Widerstands auch bei Lagerung im Normklima 20/65 erreicht.

Der positive Einfluss der Nachbehandlungsmittel unter herbstlichen Bedingungen wurde in [STARK 2010] auf die geringere potenzielle Verdunstung zurückgeführt, wodurch der Beginn der Austrocknung der Randzone deutlich verzögert wurde.

Bei der Auslagerung ist weiterhin zu beachten, dass über den Auslagerungszeitraum nicht gleichbleibende klimatische Bedingungen vorherrschen wie bei Laborlagerung. Insbesondere die Unterschiede zwischen Tag und Nacht haben einen erheblichen Einfluss auf das Verdunstungsverhalten der Probekörper. Bei den Auslagerungsversuchen im Rahmen dieses Projekts wurde festgestellt, dass nachts (tiefere Temperaturen, höhere Luftfeuchtigkeit) praktisch kein Wasser aus den Probekörpern verdunstete. Sie tagsüber ausgebildete Trocknungsgradienten können so durch Wassernachlieferung aus dem Probekörperinneren teilweise oder unter günstigen Bedingungen ggf. sogar komplett wieder ausgeglichen werden.

Die deutliche Steigerung des Frost-Tausalz-Widerstands bei 10 °C-Lagerung im Klimaschrank ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass aufgrund der langsameren Gefügeentwicklung über einen längeren Zeitraum hinweg Wasser aus dem Probekörperinneren zur Betonoberfläche transportiert wurde. In Verbindung mit einer höheren Sperrwirkung des Nachbehandlungsmittelfilms durch die hohe Verdunstungsrate im Klimaschrank konnte so eine Austrocknung der Randzone verzögert werden.

Analog der Erkenntnisse in [STARK 2010] für Betondecken mit Mörteltextur kann auch für Waschbeton geschlussfolgert wer-

den, dass durch die Anwendung von Nachbehandlungsmitteln (hier 2. Nachbehandlung) vor allem eine höhere Anwendungssicherheit erreicht wird. Eine deutliche Erhöhung des Frost-Tausalz-Widerstands im Vergleich zu nicht nachbehandelten Betonen wird jedoch nur unter bestimmten klimatischen Bedingungen erreicht. Unter hochsommerlichen klimatischen Bedingungen bei der Betonherstellung reicht eine 2. Nachbehandlung mit Nachbehandlungsmittel gegebenenfalls nicht immer aus, um einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand zu erzielen.

3.2 Wirksamkeit der Nassnachbehandlung auf den Frost-Tausalz-Widerstand

Die Nassnachbehandlung erwies sich als sehr effektive Methode der Nachbehandlung. Unter allen Lagerungsbedingungen konnte ein hoher Frost-Tausalz-Widerstand erreicht werden. Erstaunlicherweise erwies sich die Dauer der Nassnachbehandlung als nicht relevant für das Erreichen eines hohen Frost-Tausalz-Widerstands. Selbst mit einem einmaligen Wasserauftrag von umgerechnet 667 g Wasser pro m² wurde eine deutliche Steigerung des Frost-Tausalz-Widerstands im Vergleich zur Nachbehandlung mit einem Nachbehandlungsmittel erreicht. Der Frost-Tausalz-Widerstand der einmalig mit Wasser nachbehandelten Proben lag annähernd in der Größenordnung der Proben mit mehrtägiger Bewässerung.

Einzigste Ausnahme war hier die Auslagerung bei sommerlichen Witterungsbedingungen. Durch die hohen Temperaturen sowie die intensive Sonneneinstrahlung zum Zeitpunkt des einmaligen Wasserauftrags verdunstete hier das aufgebrauchte Wasser innerhalb sehr kurzer Zeit. Etwa eine halbe Stunde nach Wasserauftrag war die Probe oberflächlich trocken.

Eine mögliche Erklärung für die Effektivität der Nassnachbehandlung ergibt sich aus den Besonderheiten der Waschbetonbauweise, insbesondere aus dem Austrocknungsverhalten des Oberflächenmörtels vor dem Ausbürsten. Dazu erfolgten umfangreiche Untersuchungen in [LUDWIG 2012]. Die dort gewonnenen Erkenntnisse werden im Folgenden näher beschrieben.

Im Zuge der Herstellung einer Fahrbahndecke mit Waschbetontextur wird auf den frisch eingebauten und geglätteten Beton ein Kombinationsmittel (Oberflächenverzögerer + Nachbehandlungsmittel) aufgesprüht. Die Gefügeentwicklung des Oberflächenmörtels wird dadurch verzögert, währenddessen der darunterliegende Fahrbahndeckenbeton ungestört erhärten kann.

Innerhalb des Zeitraums bis zum Ausbürsten verliert der Oberflächenmörtel erhebliche Mengen an Feuchtigkeit. Dies geschieht zum einen durch Verdunstung, zum anderen durch Selbst austrocknung [LUDWIG 2012].

Die Kombinationsmittel bieten keinen 100 %igen Verdunstungsschutz wie z. B. das Abdecken mit Folie. Im Vergleich zu mörteltexturierten Oberflächen, auf die ein Nachbehandlungsmittel aufgesprüht wird, muss hier berücksichtigt werden, dass aufgrund der verlangsamten Gefügeentwicklung der Oberflächenmörtel anfälliger für Verdunstung ist.

Weiterhin kann aufgrund der verzögerten Gefügeentwicklung kein Wasser aus dem darunterliegenden Beton nachgesaugt werden. Vielmehr saugt der darunterliegende Beton zusätzlich

das freie Wasser aus dem Oberflächenmörtel ab. Die Ursache dafür ist, dass durch die Porenverfeinerung des ungestört erhärtenden Betons dieser einen deutlich höheren kapillaren Unterdruck aufbaut. Dem kann der verzögerte Oberflächenmörtel nur einen geringen Widerstand entgegensetzen. Im Vergleich zum nicht verzögerten Beton trocknet der Oberflächenmörtel deutlich stärker aus.

Aus diesem Verhalten ergeben sich zwei für die Waschbetonbauweise spezifische Effekte. Zum einen treten beim Waschbeton deutlich unterschiedliche Verdunstungsraten vor und nach dem Ausbürsten des Oberflächenmörtels auf. Zum anderen wird die Hydratation des Oberflächenmörtels dauerhaft beeinträchtigt.

Die Unterschiede im Verdunstungsverhalten werden in Bild 7 ersichtlich. Hier ist für die CEM II-Rezeptur für ausgewählte Nachbehandlungsmethoden der Verlauf der Masseänderung vom Zeitpunkt der Probekörperherstellung bis zum Zeitpunkt 15 Stunden nach dem Ausbürsten dargestellt. Als 0-Bezugswert wurde hier die Probekörpermasse zum Zeitpunkt des Ausbürstens festgelegt. Der Kurvenverlauf wurde zum Zeitpunkt des Ausbürstens um die Masseänderung durch Ausbürsten und Abkleben der Probekörper korrigiert.

Nach einem anfänglich linearen Verlauf setzt vor dem Ausbürsten des Oberflächenmörtels ein leichtes Abflachen der Verdunstungskurve ein. Nach dem Ausbürsten des Oberflächenmörtels ist bei der Probe ohne 2. Nachbehandlung ein deutlicher Anstieg der Verdunstungsrate festzustellen. Bei dem Auftrag von Nachbehandlungsmittel tritt anfänglich ein hoher Masseverlust auf, bis mit fortschreitender Verfilmung des Nachbehandlungsmittels die weitere Verdunstung deutlich reduziert wird. Nur durch die Nassnachbehandlung (hier mit 15 g Wasser auf 225 cm²) kann in den ersten zwölf Stunden nach dem Ausbürsten die verschärfte Austrocknung sichtbar gemindert werden.

Der starke Anstieg der Verdunstung ist nicht nur auf die Entfernung des bestehenden Nachbehandlungsmittelfilms (1. Nachbehandlung) zurückzuführen, sondern maßgeblich auch auf die oben beschriebene Austrocknung des Oberflächenmörtels.

Zum Zeitpunkt des Ausbürstens befindet sich die Verdunstungsfront unterhalb der verzögerten Mörtelschicht. Wasser, welches aus dem darunterliegenden Beton verdunstet, muss durch den Oberflächenmörtel diffundieren. Durch das Ausbürsten des Oberflächenmörtels wird diese diffusionsbremsende Schicht beseitigt und die Verdunstungsfront befindet sich direkt an der Betonoberfläche, wodurch eine erhebliche Steigerung der Wasserverdunstung eintritt.

Es ist jedoch zu vermuten, dass zusätzlich zum Verdunstungsschutz auch die nachträgliche Wasserzufuhr den Frost-Tausalz-Widerstand positiv beeinflusste. Dies konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen anhand der Probekörper aufgezeigt werden, welche 24 Stunden nach dem Ausbürsten mit Wasser nachbehandelt wurden. In den 24 Stunden zwischen Ausbürsten und dem Wasserauftrag erfolgte kein Verdunstungsschutz. Trotzdem wurde der Frost-Tausalz-Widerstand durch den späten Wasserauftrag deutlich verbessert. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten liegt in der gestörten Hydratation des Oberflächenmörtels.

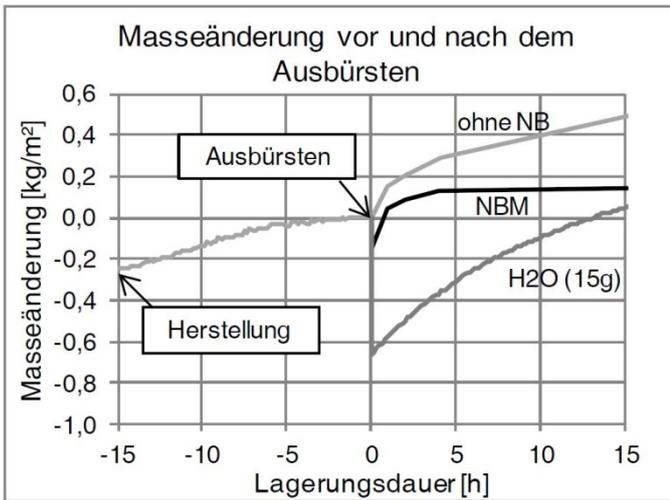


Bild 7: Verdunstung vor und nach dem Ausbürsten

Wie vorhergehend beschrieben, wird dem Oberflächenmörtel im Zeitraum bis zum Ausbürsten viel Wasser entzogen, sodass auch nach Abklingen der Verzögerungswirkung die weitere Hydratation des Oberflächenmörtels erheblich gestört wird. Aufgrund dessen weist dieser Mörtel ein grobes Gefüge sowie eine geringe Festigkeit auf. Es ist davon auszugehen, dass nach dem Ausbürsten immer eine dünne Schicht des Oberflächenmörtels auf der Betonoberfläche verbleibt (Bild 8). Diese Schicht kann einem Frost-Tausalz-Angriff im Vergleich zum ungestörten Beton vermutlich nur einen geringen Widerstand entgegensetzen.

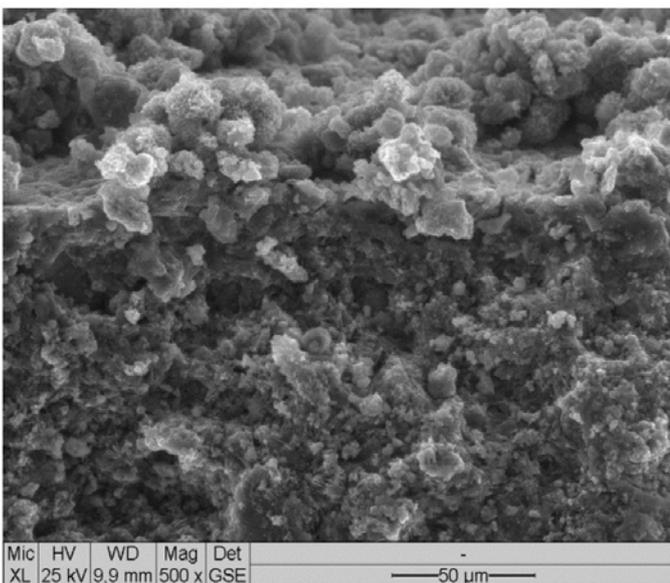


Bild 8: Unvollständig hydratisierte Mörtelschicht auf ungestörtem Beton nach starkem Ausbürsten [LUDWIG 2012]

Eine Wasserzufuhr ermöglicht es dem Mörtel ggf. jedoch weiter zu hydratisieren und verbessert somit den Frost-Tausalz-Widerstand. Mit diesem Mechanismus könnte die hohe Wirksamkeit der Nassnachbehandlung bei Waschbeton zumindest teilweise erklärt werden.

In Bild 9 ist an einem Anschliff der Übergangsbereich zwischen verzögertem Oberflächenmörtel und ungestörtem Beton darge-

stellt. Sehr deutlich ist hier die erhöhte Porosität des Oberflächenmörtels zu erkennen.

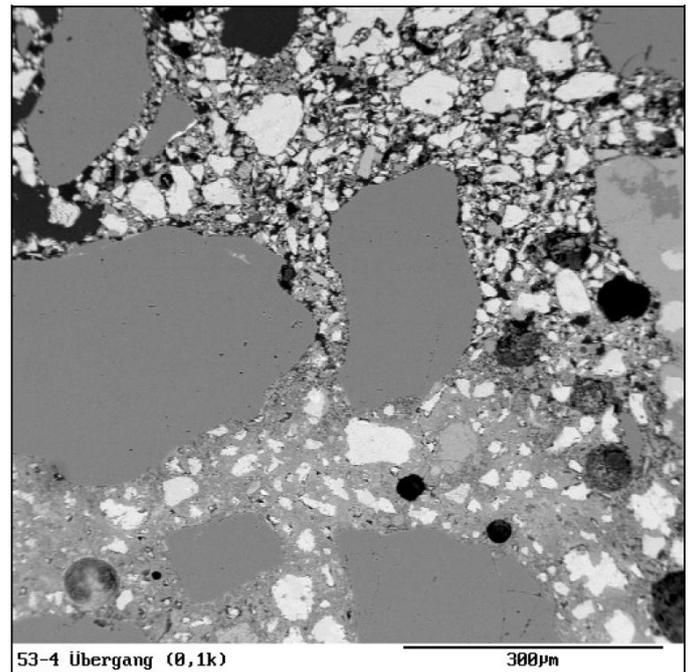


Bild 9: REM-Aufnahme des Übergangs zwischen verzögertem Oberflächenmörtel und nicht verzögertem Beton

3.3 Nachbehandlungsmittelauftrag mit anschließender Nassnachbehandlung

Die Anwendung eines Nachbehandlungsmittels in Verbindung mit einer dreitägigen Nassnachbehandlung verursachte höhere Abwitterungen, als die dreitägige Nassnachbehandlung ohne vorherigen NBM-Auftrag. Eine Ursache dafür war, dass durch die hydrophoben Eigenschaften des Nachbehandlungsmittelfilms beim anschließenden Wasserauftrag kein vollflächiger Wasserfilm gebildet wurde, sondern immer nur ein Teil der Waschbetonoberfläche von Wasser bedeckt war. An den CDF-geprüften Probekörpern war erkennbar, dass in dem nicht mit Wasser bedeckten Bereich deutlich höhere Abwitterungen auftraten.

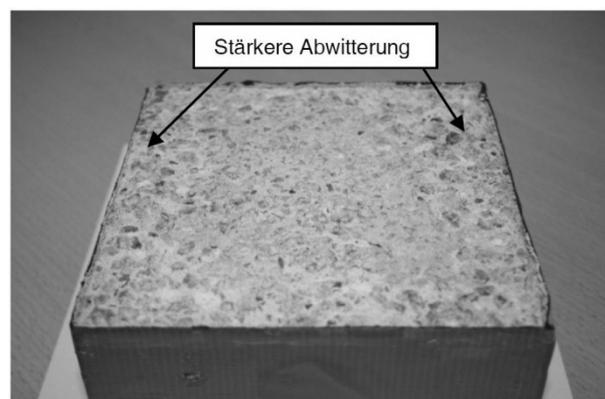


Bild 10: Probekörper (NBM + 3d H₂O) nach der CDF-Prüfung

3.4 Nassnachbehandlung + Nachbehandlungsmittelauftrag

Die deutliche Steigerung des Frost-Tausalz-Widerstands nach einmaliger Nassnachbehandlung (15 g bzw. 667 g/m²) wurde vermindert, wenn im Anschluss ein Nachbehandlungsmittel auf die mattfleuchte Waschbetonoberfläche aufgesprüht wurde. Bei der CEM III-Rezeptur trat sogar eine extreme Verschlechterung des Frost-Tausalz-Widerstands auf. Die zugrunde liegenden Ursachen für diesen Effekt sind unklar.

3.5 Nachbehandlung mit Methylcellulosegel

Die Nachbehandlung mit einem Methylcellulosegel und anschließendem Nachbehandlungsmittelauftrag erwies sich als die effektivste Methode, um einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand, insbesondere auch beim CEM III-Beton zu erreichen. Die positive Wirkung beruht vermutlich hauptsächlich auf dem guten Verdunstungsschutz innerhalb der ersten zwei Tage nach dem Auftrag. Darüber hinaus können ggf. weitere Eigenschaften der Methylcellulose (z. B. Filmbildung auf der Oberfläche) einen positiven Einfluss aufweisen. Andererseits kann durch die Methylcellulose unter Umständen auch eine Verschlechterung der Griffigkeit verursacht werden.

3.6 Weitere zu berücksichtigende Aspekte der Nassnachbehandlung

Mit der zyklischen Nassnachbehandlung des ausgebürsteten Betons wurde eine deutliche Steigerung des Frost-Tausalz-Widerstands erreicht. Neben dem Frost-Tausalz-Widerstand werden jedoch auch andere Eigenschaften des Fahrbahndeckenbetons von der Art der Nachbehandlung beeinflusst, z. B. das hygrische Verformungsverhalten (Quellen und Schwinden). Die Auswirkungen einer zyklischen Nassnachbehandlung auf das Schwindverhalten wurden hier jedoch nicht untersucht.

Weiterhin verursachte das zyklische Befeuchten und Austrocknen weiße Ausblühungen an der Waschbetonoberfläche, bei denen es sich um Calcit handelte.

Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass die Nassnachbehandlung schonend, möglichst mit vorgewärmten Wasser erfolgen sollte. Das "Abschrecken" einer warmen Betondecke mit großen Mengen kalten Wassers kann zur Ausbildung von Spannungsrissen führen.

Die zyklische Nassnachbehandlung in der beschriebenen Form widerspricht den derzeit gültigen Regelungen für die Nachbehandlung von Fahrbahndecken aus Beton. Entsprechend den ZTV Beton-StB 07 muss beim Waschbeton nach dem Ausbürsten des Oberflächenmörtels ein Nachbehandlungsmittel vom Typ VM aufgesprüht werden.

4 Zusammenfassung

Im Zuge der ökologisch bedingten, fortschreitenden Umstellung der Zementproduktion auf Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen werden zukünftig auch häufiger hüttensandhaltige Zemente im Betonstraßenbau Anwendung finden. Daraus kann jedoch, insbesondere bei hohen Hüttensandgehalten, eine Beeinträchtigung des Frost-Tausalz-Widerstands bzw. eine erhöhte Nachbehandlungsempfindlichkeit resultieren.

Bei der Waschbetonbauweise erfolgt die Nachbehandlung in mehreren Schritten. Eine erste Nachbehandlung gewährleistet den Verdunstungsschutz des Betons bis zum Zeitpunkt des Ausbürstens des verzögerten Oberflächenmörtels. Daran schließt sich die zweite Nachbehandlung an, in der Regel durch Aufsprühen eines flüssigen Nachbehandlungsmittels.

Der zweite Nachbehandlungsschritt ist entscheidend für den Frost-Tausalz-Widerstand der Betondecke. Eine ausschließliche zweite Nachbehandlung mit einem Nachbehandlungsmittel ist jedoch gegebenenfalls nicht immer ausreichend, um auch bei nachbehandlungsempfindlichen Zementen einen guten Frost-Tausalz-Widerstand des Fahrbahndeckenbetons zu gewährleisten. Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde daher untersucht, inwiefern durch eine Optimierung der zweiten Nachbehandlung der Frost-Tausalz-Widerstand von Waschbetonoberflächen erhöht werden kann, insbesondere bei Verwendung hüttensandhaltiger Zemente.

Anhand von Untersuchungen mit dem CDF-Verfahren unter Variation der zweiten Nachbehandlung konnte aufgezeigt werden, dass durch eine zyklische Nassnachbehandlung der Frost-Tausalz-Widerstand im Vergleich zur Nachbehandlung mit einem flüssigen Nachbehandlungsmittel auf Paraffinbasis deutlich gesteigert werden kann. Im Praxisfall sollte das Bewässern hauptsächlich tagsüber erfolgen, wenn die stärkste Verdunstung auftritt. Eine nächtliche Bewässerung kann vermutlich entfallen.

Eine zwischenzeitliche, kurze Austrocknung der Betonoberfläche wirkte sich in den durchgeführten Untersuchungen nicht negativ auf den Frost-Tausalz-Widerstand aus. Auch das einmalige Bewässern des Betons erhöhte den Frost-Tausalz-Widerstand schon signifikant. Dies deutet darauf hin, dass neben dem Verdunstungsschutz auch eine zusätzliche Wasserzufuhr einen Einfluss auf den Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen kann. Die Ursache liegt vermutlich darin, dass dünne, nicht vollständig ausgebürstete Oberflächenmörtelschichten des Waschbetons durch die nachträgliche Wasserzufuhr zur Hydratation angeregt werden.

Durch das Bewässern einer Betondecke, auf die vorher ein Nachbehandlungsmittel aufgesprüht wurde, konnte der Frost-Tausalz-Widerstand nur geringfügig verbessert werden, da das Wasser auf dem Wachsfilm abperlte und somit die Betonoberfläche nicht vollflächig bedeckte.

Der höchste Frost-Tausalz-Widerstand wurde bei Nachbehandlung mit einem Methylcellulosegel und anschließendem Nachbehandlungsmittelauftrag erreicht. Auch bei dem Beton mit CEM III/A wurde hier ein hervorragender Frost-Tausalz-Widerstand erreicht. Die baupraktische Umsetzbarkeit dieser Methode ist jedoch schwierig, da das Befahren einer mit Methylcellulosegel nachbehandelten Waschbetonoberfläche für einige Stunden vermieden werden müsste.

5 Literatur

[LUDWIG 1993] Ludwig, H.-M.; Stark, J.: Umwandlung von Hydratphasen bei tiefen Temperaturen. Zement-Kalk-Gips, 46. Jg., S. 90-94, 1993.

- [LUDWIG 2012] Ludwig, H.-M.; Ehrhardt, D.: Prüfung der Kombinationsmittel zur Herstellung von Waschbetonoberflächen im Rahmen der TL NBM-StB. Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben FE-Nr.: 08.196/2008/LGB des BMVBS, 2012, unveröffentlicht.
- [SKARABIS 2010] Skarabis, J.; Gehlen, C.: Nachbehandlung von Waschbetonoberflächen. Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben FE-Nr.: 08.194/2008/LGB des BMVBS, 2010.
- [STARK 2010] Stark, J.; Ehrhardt, D.: CEM II/B-S Zementssysteme im Betonstraßenbau. Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben FE-Nr.: 08.183/2005/LGB des BMVBS, 2010.