

AiF-Forschungsvorhaben Nr.: 15298 N

Bewilligungszeitraum: 01.08.2007 – 31.01.2010

Forschungsthema: **Dauerhaftigkeit von Fahrbahndeckenbeton in Waschbetonbauweise**

1 Einleitung

An die Oberfläche einer Betonfahrbahndecke werden hohe Anforderungen sowohl an eine ausreichende Griffigkeit als auch an eine möglichst geringe Geräuschemission gestellt. Diese Eigenschaften werden maßgeblich von der Art der Oberflächentextur und deren Dauerhaftigkeit bestimmt. Bei der bis 2006 angewendeten Standardbauweise nach den ZTV Beton-StB 01 wurde der Beton mit dem Gleitschalungsfertiger eingebaut, mit einem Längsglätter gebeinet und mit einem nachgeschlepptem Jutetuch eine Längstexturierung in den frischen Oberflächenmörtel eingeprägt. Im Zusammenhang mit den Anforderungen an Griffigkeit und Lärmminderung wurde zunächst mit dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau ARS 14/2006 die Waschbetonbauweise als Standardbauweise für lärmindernde Betonfahrbahndecken eingeführt. Im August 2008 wurde die Waschbetonbauweise auch in das neue Regelwerk (TL und ZTV Beton-StB 07) übernommen. Gleichzeitig wurde die ZTV Beton-StB 01 zurückgezogen.

Bei der Waschbetonherstellung wird in zweischichtiger Bauweise ein dünner Oberbeton mit einem Größtkorn von 8 mm und einem Zementgehalt von mindestens 420 kg/m³ eingebaut. Danach wird ein Verzögerer auf die frisch verdichtete Betondecke gesprüht. Die Gesteinskörnungen werden freigelegt, indem die oberflächennahe Mörtelschicht ausgebürstet wird.

Bis 2006 wurden in Deutschland nur vereinzelte Versuchs- und Erprobungsstrecken gebaut. Die Erfahrungen aus dem Ausland zeigen, dass mit einer Waschbetonoberfläche eine sehr dauerhafte und somit wirtschaftliche Betonoberfläche für den Straßenbau zur Verfügung steht, die langfristig eine ausreichende Griffigkeit und niedrige Lärmemission erwarten lässt. Nicht geklärt war, ob z. B. infolge anderer Gesteinskörnungen und anderer Zemente die bisherigen guten Erfahrungen im Ausland auch auf die deutschen Verhältnisse übertragbar sind. Um hierüber Klarheit zu gewinnen, wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie ein AiF-Forschungsvorhaben durchgeführt.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Vorhaben 15298 N der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

2 Forschungsziel und Lösungsweg

In dem Forschungsvorhaben sollte geklärt werden, ob bei Anwendung der Waschbetonbauweise die Dauerhaftigkeit der Betonbauweise beeinträchtigt werden kann. Erhöhte Zement- und Splittgehalte sowie die freiliegenden Gesteinskörnungen können möglicherweise den Frost-Tausalz-Widerstand verringern und bei Verwendung alkaliempfindlicher Gesteinskör-

nungen das Risiko einer schädigenden AKR erhöhen. Daher sollte untersucht werden, ob durch die Verzögerer-Wirkung in der oberflächennahen Randzone ein poröses Zementstein-gefüge entsteht, in dem die Splittkörner nicht mehr dauerhaft eingebunden sind und der Frost-Tausalz-Widerstand des Waschbetons verringert wird. Außerdem sollte geklärt werden, ob durch die höheren Zement- und Splittgehalte des Waschbetons und die verfahrensbedingt nach dem Ausbürsten des Oberflächenmörtels teilweise freigelegten Splittkörner das Risiko einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion erhöht wird.

Um die Auswirkungen der Waschbetonbauweise auf die Dauerhaftigkeit zu erforschen, wurden die Untersuchungen in drei Abschnitte unterteilt.

In einem ersten Arbeitsschritt wurden die in der Praxis in Deutschland eingesetzten Verzögerer erfasst und zwei Verzögerer mit unterschiedlichem Wirkungsmechanismus für das Versuchsprogramm ausgewählt.

In einem zweiten Arbeitsschritt wurde das Risiko des Eintretens einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion bei Waschbeton mit einer Performance-Prüfung mit dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen beurteilt. Zur Anknüpfung an den bisherigen Erfahrungsbereich wurden auch Betone mit herkömmlicher Mischungszusammensetzung in die Untersuchung einbezogen. Außerdem wurde an Platten mit Waschbetonoberflächen geprüft, ob durch die teilweise freiliegenden Splittkörner die Gefahr einer schädigenden Alkali-Kiesel-säure-Reaktion erhöht wurde und zu Pop-outs vereinzelter Splittkörner führte. Dies könnte insbesondere dann auftreten, wenn bei einem durch die Verzögerer-Wirkung porösen Zementstein bei einer Alkali-Zufuhr von außen die Alkalikonzentration der Porenlösung im oberflächennahen Bereich schnell ansteigt. Um aussagefähige Ergebnisse zu erzielen, wurden mit Kies-Edelsplitt vom Oberrhein und Grauwacke zwei alkaliempfindliche Gesteinskörnungen (Einstufung in E III-S nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) ausgewählt. Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S wurden zunächst nicht geprüft. Diese werden in einem Forschungsvorhaben im Auftrag der BASt getrennt untersucht. Für die Versuche wurden drei Fahrbahndeckenzemente (Tabelle 1, Nr. 1, 3 und 4) ausgewählt: Portlandzement CEM I, Portlandhüttenzement CEM II/B-S und Hochofenzement CEM III/A jeweils der Festigkeitsklasse 42,5 N. Die Fahrbahndeckenzemente erfüllten die Anforderungen der TL Beton-StB 07. Der CEM I - Zement wies mit 0,79 M.-% einen Alkaligehalt an der Obergrenze des nach TL Beton-StB 07 zulässigen Gehalts von 0,80 M.-% auf. Der CEM III/A-Zement erfüllte darüber hinaus die Anforderungen an einen NA-Zement mit niedrigem wirksamem Alkaligehalt. Zusätzlich wurde ein weiterer CEM I-Zement (Tabelle 1, Nr. 2) mit geringem Alkaligehalt von 0,62 M.-% eingesetzt, der die Anforderungen an einen Portlandzement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt ($\leq 0,60$ M.-%) knapp verfehlte.

In einem dritten Arbeitsschritt wurde dem Einfluss des Verzögerers auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Waschbeton nachgegangen. Hierzu wurden Waschbetone mit unterschiedlichen Aufsprühmengen verschiedener Verzögerer beaufschlagt. Nach dem Ausbürsten wurde ein Nachbehandlungsmittel aufgetragen und die Abwitterung von Probekörpern mit unterschiedlichen Prüfflächen (u.a. Waschbetonoberflächen, gegen eine Teflonscheibe geschaltete und geschnittene Prüffläche) bei der Prüfung mit dem CDF-Prüfverfahren ermittelt.

Um Erfahrungen zu sammeln, welchen Frost-Tausalz-Widerstand Waschbetonoberflächen im Vergleich zu den bisher üblichen Prüfflächen (Schalfläche und gesägte Schnittfläche) haben, wurden mit den drei Fahrbahndeckenzementen (CEM I 42,5 N (0,79 M.-%), CEM II/B-S

42,5 N, CEM III/A 42,5 N) Waschbetone unter Verwendung von Grauwackesplitt als Gesteinskörnung 5/8 mm hergestellt. Dabei wurde die Art und Menge des auf den Frischbeton aufgesprühten Verzögerers variiert. Außerdem wurde bei allen drei Waschbetonen in einer zusätzlichen Variante auf die zweite Nachbehandlung nach dem Ausbürsten durch Aufsprühen eines flüssigen Nachbehandlungsmittels (Nachbehandlung nach ZTV Beton-StB 07) verzichtet (Tabelle 2). Diese Variante entspricht somit einer nicht fachgerechten Nachbehandlung. Neben den unterschiedlichen Varianten mit Waschbetontextur (1 bis 8) wurden auch die üblichen Prüfflächen (Schalfläche und gesägte Prüffläche, Varianten 9 und 10) einbezogen.

Tabelle 1 Chemische und physikalische Kennwerte der verwendeten Zemente

Kennwert		CEM I 42,5 N (0,79 M.-%)	CEM I 42,5 N (0,62 M.-%)	CEM II/B-S 42,5 N	CEM III/A 42,5 N
		1	2	3	4
K ₂ O	M.-%	0,81	0,70	0,67	0,75
Na ₂ O	M.-%	0,25	0,16	0,31	0,29
Na ₂ O-Äquiv.	M.-%	0,79 (0,80) ¹⁾	0,62	0,75	0,79
Gesamtalkaligehalt ohne Hüttensand	M.-%	-	-	0,77 (1,00) ¹⁾	0,97 (1,05) ¹⁾
Hüttensandgehalt	M.-%	-	-	30,9	45,0
Erstarrungsbeginn	Min.	135	n.b. ²⁾	175	170
Wasseranspruch	%	28,0	n.b.	28,0	30,0
Spez. Oberfläche nach Blaine	cm ² /g	3510	n.b.	4820	4400
Le Chatelier	mm	2	n.b.	0	0
Druckfestigkeit 2 Tage	N/mm ²	27,8	n.b.	28,4	20,8
7 Tage		59,4		43,0	35,6
28 Tage				60,3	57,4

¹⁾ Klammerwert: Grenzwert für Fahrbahndeckenzemente nach TL Beton-StB 07²⁾ nicht bestimmt**Tabelle 2** Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands mit dem CDF-Prüfverfahren (Betone 1, 3 und 4 nach Tabelle 3)

Variante bzw. Prüffläche		Verzögerer	Aufsprühmenge Verzögerer in g/m ²	Nachbehandlung mit flüssigem Nachbehandlungsmittel nach dem Ausbürsten (175 g/m ²)
1	Prüffläche Waschbetontextur	OVZ1	200	ja
2			300	ja
3			400	ja
4			400	nein (entspricht einer nicht fachgerechten Nachbehandlung)
5	ENT1		250	ja
6			350	ja
7	ENT2		250	ja
8			350	ja
9	Geschalte Teflonscheibe als Prüffläche (Abwitterungskriterium 1500 g/m ²)			
10	Schnittfläche als Prüffläche			

3 Ergebnisse

3.1 Verzögerer

In den Jahren 2007 und 2008 wurden auf Baustellen sechs Oberflächenverzögerer-Systeme (OVZ) von fünf verschiedenen Herstellern eingesetzt. Dabei wurden fast ausnahmslos Kombinationsprodukte mit integriertem Nachbehandlungsmittel verwendet. Das System mit einer auf den Frischbeton aufgelegten Folie als Nachbehandlung ist zwar nach den Regelungen der ZTV Beton-StB 07 möglich, kam jedoch in Deutschland seit Einführung der Waschbetonbauweise als Standardbauweise nur in einem Fall zur Anwendung.

Die von den Herstellern angebotenen Produkte werden als Oberflächenverzögerer oder Oberflächenentaktivierer bezeichnet. Sie unterscheiden sich in ihrer Wirkungsweise auf den Zement. Entsprechend der Produktinformation des Herstellers der Entaktivierer „verzögern Oberflächenverzögerer die Wirkung des Zements, während Entaktivierer die Wirkung des Zements entaktivieren“. Vorteil der Entaktivierer ist nach Hersteller-Angaben, dass der Ausbürstzeitpunkt in einem größeren Zeitfenster gewählt werden kann. Bei den Oberflächenverzögerern muss der Mörtel in Abhängigkeit der jeweiligen Randbedingungen (z. B. Luft- und Frischbetontemperatur) 6 bis 20 Stunden nach dem Aufsprühen ausgebürstet werden. Bei dem Entaktivierer kann nach Hersteller-Angaben auch noch bis zu 72 Stunden nach dem Auftrag ausgebürstet werden.

Die für die Waschbetonherstellung verwendeten Produkte sind keine klassischen Zusatzmittel nach der Normenreihe DIN EN 934 und müssen daher nicht den Anforderungen der Zusatzmittelnorm entsprechen. Die „Waschbetonverzögerer“ gehören somit nicht zur Wirkungsgruppe der Verzögerer (VZ), sie haben auch keine Zulassung des DIBt. Die Mitte 2009 veröffentlichten „Technischen Lieferbedingungen für flüssige Beton-Nachbehandlungsmittel“ (TL NBM-StB 09) nehmen Bezug auf Kombinationsmittel. Sie werden in eine Klasse mit dem Kurzzeichen A eingeordnet: Diese Klasse umfasst Nachbehandlungsmittel, die eine abbinderverzögernde Komponente enthalten können und deren Film zusammen mit dem Oberflächenmörtel zur Herstellung einer Waschbetonoberfläche entfernt wird. Die TL NBM stellt nur Anforderungen an das Nachbehandlungsmittel (z. B. Sperrkoeffizient), auf die Verzögererkomponente (Anforderungen bzw. Prüfung) wird nicht eingegangen. Die TP Beton-StB 10 enthält Angaben hierzu. Danach ist die Wirksamkeit des Verzögerers und dessen Verträglichkeit mit der vorgesehenen Waschbetonzusammensetzung an einer Probeplatte nachzuweisen.

Weitere Untersuchungen zum Wirkungsmechanismus der Kombinationsmittel wurden im Forschungsvorhaben nicht durchgeführt. Der Unterschied in der Wirkungsweise beruht vermutlich darauf, dass die Verzögerer die Festigkeitsentwicklung verzögern, während die Entaktivierer die weitere Hydratation abstoppen.

Für die Herstellung der Waschbetonoberflächen wurden die Verzögerer OVZ1 und die Entaktivierer ENT1 und ENT2 verwendet. Mit dem Entaktivierer ENT2 war nach Herstellerangaben eine höhere Texturtiefe erreichbar.

3.2 Betonuntersuchungen

3.2.1 Druckfestigkeit

Die Betonzusammensetzungen sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Die Druckfestigkeit der Betone mit Fahrbahndeckenzement sind in Abhängigkeit des Betonalters (1, 7, 28 und 56 Tage) in den Bildern 1 und 2 dargestellt. Alle Betone erfüllen die Anforderungen der TL Beton an einen Beton der Bauklasse SV. Zwischen Waschbetonen und Standardbetonen wurden keine nennenswerten Unterschiede festgestellt. Betone mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen (Grauwackesplitt bzw. Kies-Edelsplitt vom Oberrhein) und Betone mit CEM I - und CEM II/B-S-Zement wiesen vergleichbare Druckfestigkeiten auf. Bei den Betonen mit CEM III-Zement wurde im Betonalter von einem Tag die geringste und nach 56 Tagen die höchste Druckfestigkeit ermittelt. Die Betone wiesen mit Ausnahme des Betons mit CEM III-Zement nur ein geringes, über das Betonalter von 28 Tagen hinausgehendes Nacherhöhungspotenzial auf.

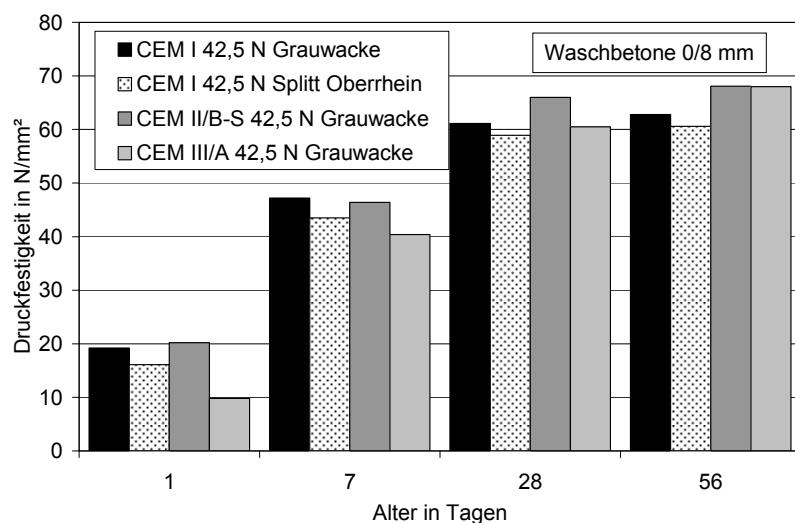


Bild 1 Druckfestigkeit der Waschbetone 1 und 3 bis 5 in Abhängigkeit des Alters, des Zements und des verwendeten Splitts

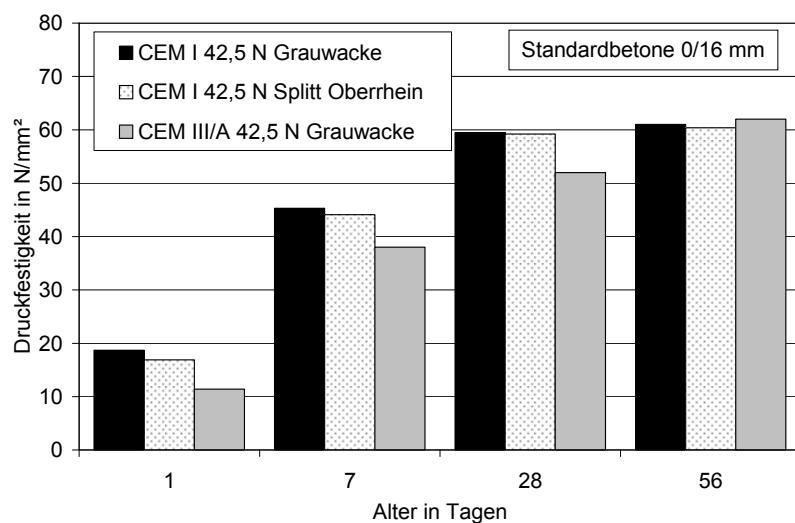


Bild 2 Druckfestigkeit der Standardbetone 7 bis 9 in Abhängigkeit des Alters, des Zements und des verwendeten Splitts

Tabelle 3 Mischungszusammensetzungen

Beton		Zement 42,5 N	z (kg/m ³)	w/z	Gesteins- körnungen	Gesteins- art Splitt	Luftge- halt Vol.-%	LP-Bildner M.-% v. z	
1	Wasch- beton 0/8 mm	CEM I (0,79 M.-%)	430	0,42	30 % Sand 0/2 70 % Splitt 5/8	Grauwacke	5,5	0,077	
2		CEM I (0,62 M.-%)						0,060	
3		CEM II/B-S						0,080	
4		CEM III/A				Kiessplitt Oberrhein		0,140	
5		CEM I (0,79 M.-%)						0,095	
6		CEM I (0,62 M.-%)						0,052	
7	Herköm- mlicher Beton 0/16 mm	CEM I (0,79 M.-%)	350	0,45	30 % Sand 0/2 20 % Kies 2/8 50 % Splitt 8/16	Grauwacke	4,5	0,060	
8		CEM III/A						0,100	
9		CEM I (0,79 M.-%)				Kiessplitt Oberrhein		0,065	

3.2.2 Alkali-Kieselsäure-Reaktion

3.2.2.1 60 °C-Betonversuch mit Alkali-Zufuhr von außen

Die Dehnungen der Balken bei der Lagerung im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung) sind in den Bildern 3 und 4 (Waschbetone mit Grauwacke und Kies-edelsplitt) bzw. 5 und 6 (Standardbetone) dargestellt. Die Dehnungen der Betonbalken nahmen bei allen neun Betonen bis zu einer Lagerungsdauer von max. 250 Tagen stetig zu. Mit zunehmendem Hüttensandgehalt der Zemente verringerten sich die Dehnungen. Ein geringerer Alkaligehalt des CEM I-Zements reduzierte die Dehnungen nicht wesentlich (Bilder 3 und 4). Die Verwendung von Grauwackesplitt anstatt von Kies-Edelsplitt vom Oberrhein führte zu größeren Dehnungen. Die Waschbetone wiesen im Vergleich zu den Standardbetonen eine höhere Dehnung auf.

Bei der Prüfung eines Betons mit dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen besteht nach bisheriger Erfahrung keine Gefahr einer schädigenden AKR, wenn die mittlere Dehnung der Betonbalken nach der Vorlagerung, d. h. im Zeitraum von 20 Wochen zwischen dem 28. und dem 168. Tag $\leq 0,50$ mm/m beträgt. Der Grenzwert für die Performance-Prüfung wurde zunächst anhand von Praxiserfahrungen mit Betonen aus Betonfahrbahndecken festgelegt /7/.

Die Dehnung der Betonbalken betrug nach 168 Tagen zwischen rd. 0,32 und 2,88 mm/m. Die Untersuchungen zeigen, dass eine AKR in den geprüften Betonen bei einer Alkalizufuhr von außen nach Ansatz der bisher verwendeten Beurteilungskriterien mit Ausnahme des Standardbetons mit CEM III und Grauwacke (Beton 8, Bild 5) nicht ausgeschlossen werden kann. Bei diesem Standardbeton steigen die Dehnungen mit zunehmender Lagerungsdauer aber weiter an, so dass der Wert einer Dehnungszunahme von 0,50 mm/m nach rd. 210 Tagen Lagerungsdauer überschritten wird.

Bei der Prüfung mit dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen wurde bei allen Waschbetonen 0/8 mm auch bei Verwendung eines NA-Zements (CEM III/A 42,5 N) die Gefahr des Auftretens einer schädigenden AKR festgestellt. Auch bei dem CEM I-Zement, der fast NA-Eigenschaften aufwies, bestätigte sich dieses Ergebnis.

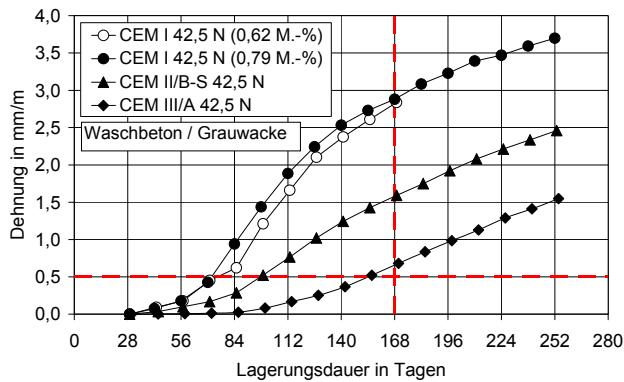


Bild 3 Dehnung der Waschbetone in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer (Grauwacke)

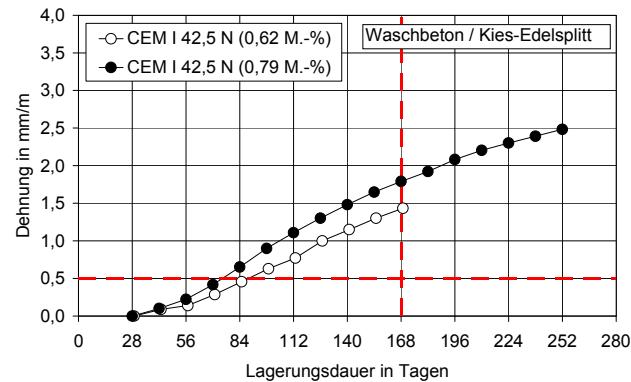


Bild 4 Dehnung der Waschbetone in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer (Kies-Edelsplitt vom Oberrhein)

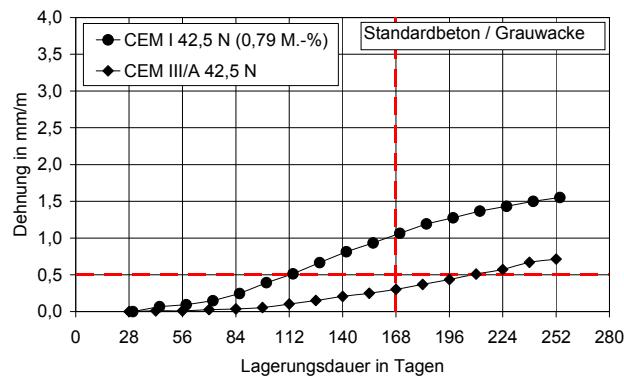


Bild 5 Dehnung der Standardbetone in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer (Grauwacke)

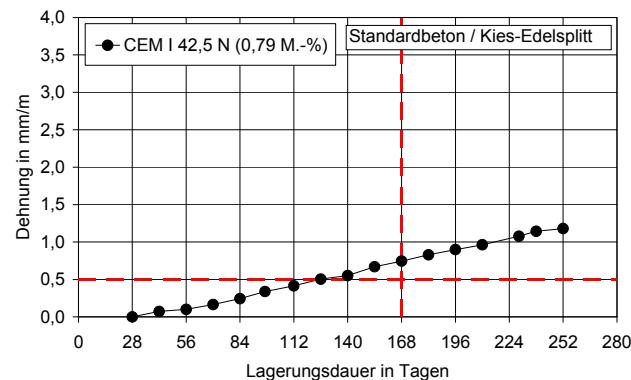


Bild 6 Dehnung der Standardbetone in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer (Kies-Edelsplitt vom Oberrhein)

Bei den Standardbetonen 0/16 mm traf dies ebenfalls mit einer Ausnahme zu. Um sicher eine Schädigung infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktionen zu vermeiden, ist daher im Fall einer Alkalizufuhr von außen der Einsatz ausreichend alkaliunempfindlicher Gesteinskörnungen zwingend erforderlich. Bei der Verwendung alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen ist der Einsatz eines NA-Zements als alleiniges Mittel zur Verhinderung einer schädigenden AKR nicht ausreichend.

Da alkaliempfindliche Gesteinskörnungen für die Herstellung verwendet wurden, wiesen die untersuchten Waschbetone 0/8 mm infolge erhöhter Zement- und Splittgehalte größere Dehnungen auf als die herkömmlichen Betone 0/16 mm. Durch die neue Bauweise wird daher bei Verwendung nicht ausreichend alkaliunempfindlicher Gesteinskörnungen (in diesem Fall Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S) die Gefahr einer schädigenden AKR erhöht. Auch wenn gleichartige Gesteinskörnungen oder Zemente verwendet werden, können die Ergebnisse der Performance-Prüfungen mit Standardbetonen nach der alten ZTV Beton-StB 01 nicht in jedem Fall auf Waschbetone nach den TL Beton-StB 07 übertragen werden. Hierzu sind ggf. neue Untersuchungen zu veranlassen. Diese Schlussfolgerungen treffen in den meisten Fällen nicht zu, wenn die Gesteinskörnung der Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S zugeordnet wird, also als alkaliunempfindlich eingestuft wird. Die genannten Randbedingungen der

Waschbetonbauweise (erhöhte Zement- und Splittgehalte) erhöhen dann die Gefahr einer schädigenden AKR nicht.

3.2.2.2 Pop-outs

Um zu untersuchen, ob möglicherweise bei der Waschbetonbauweise durch die an der Oberfläche freiliegenden Splittkörner das AKR-Risiko steigt, wurden mit den Betonen 1 und 5 mit CEM I (Alkaligehalt 0,79 M.-%) Waschbetonplatten mit unterschiedlichen Splitten (Grauwacke, Kies-Edelsplitt) und Verzögerern (OVZ1 und ENT1) hergestellt und nach den Vorgaben des 60 °C-Betonversuchs mit und ohne Tausalzbeaufschlagung über einen Zeitraum von rd. sechs Monaten gelagert. Nach Abschluss der Lagerung wurde die Haftzugfestigkeit auf der Plattenunter- und -oberseite bestimmt. Nach der sechsmontigen Prüfung wurden folgende Versuchsergebnisse erzielt:

a) Augenscheinliche Beurteilung auf Pop-outs

Anzeichen von Pop-outs wurden - unabhängig vom verwendeten Splitt bzw. Verzögerer zur Herstellung der Waschbetonoberfläche und von einer Tausalz-Beaufschlagung - augenscheinlich nicht festgestellt.

b) Haftzugfestigkeit

Die Haftzugfestigkeiten wurden nicht nennenswert durch die Verzögerer-Art beeinflusst (Bilder 7 und 8). Die Haftzugfestigkeit wurde durch die Tausalzlagerung im Vergleich zur Wasserlagerung wesentlich verringert. Die Haftzugfestigkeit war bei dem Waschbeton mit Grauwackesplitt etwas geringer als bei dem Waschbeton mit Kies-Edelsplitt vom Oberrhein. Ursache hierfür ist die stärkere Schädigung des Betons mit Grauwackesplitt durch die AKR. Entsprechend wurden bei der Lagerung der Betonprismen im 60 °C- Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen bei dem Beton mit Grauwackesplitt höhere Dehnungen festgestellt (siehe 3.2.2.1, Bilder 3 und 4).

Der Bruch bei der Haftzugprüfung erfolgte sowohl bei der Prüfung der Waschbetonoberfläche als auch der geschalten Unterseite in rd. 0,5 bis 1 cm Tiefe im Beton und nicht direkt im oberflächennahen Bereich. Auf der geschalten Rückseite war die Haftzugfestigkeit nur geringfügig höher als auf der Oberseite.

Selbst unter den im Versuchsprogramm gewählten Randbedingungen, die zu einer schädigenden AKR im Beton führten, sind keine Pop-outs festgestellt worden. Pop-outs sind daher auch bei Verwendung von wenig reaktiven Gesteinskörnungen nicht zu erwarten. Die Haftzugfestigkeit auf der geschalten, nicht mit Verzögerer beaufschlagten Rückseite war nur geringfügig höher als auf der Oberseite der Betonplatte, die eine Waschbetontextur aufwies. Eine Schädigung des oberflächennahen Mörtels durch die Verzögerer-Einwirkung ist daher ebenfalls nicht zu befürchten. Die Versuche wurden mit einem CEM I - Zement mit einem Alkaligehalt (0,79 M.-%) an der Obergrenze des nach TL Beton-StB 07 zulässigen Gehalts von 0,80 M.-% durchgeführt. Da der wirksame Alkaligehalt von anforderungsgerechten CEM II- und CEM III-Fahrbahndeckenzementen diesen Wert nicht übersteigt, sollten die Schlussfolgerungen auch für alle Fahrbahndeckenzemente gelten.

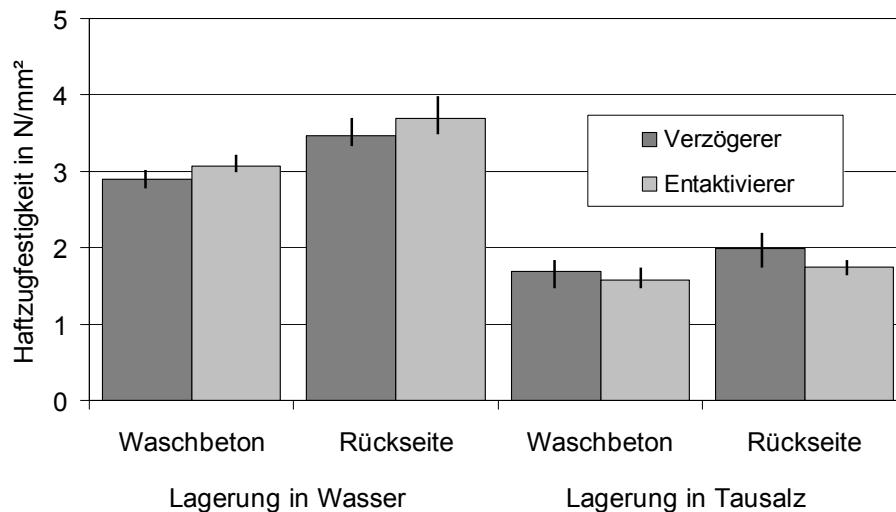


Bild 7 Haftzugfestigkeit (Mittelwert aus drei Versuchen) von Waschbeton mit Grauwackesplitt in Abhängigkeit von der Lagerung (Wechsellagerung mit Lagerung in Wasser bzw. Tausalz), vom Kombinationsmittel (Verzögerer oder Entaktivierer) und von der Prüffläche (Waschbetonoberfläche bzw. geschalte Rückseite) nach 6 Monaten Prüfung mit dem 60 °C-Betonversuch mit Wechsellagerung

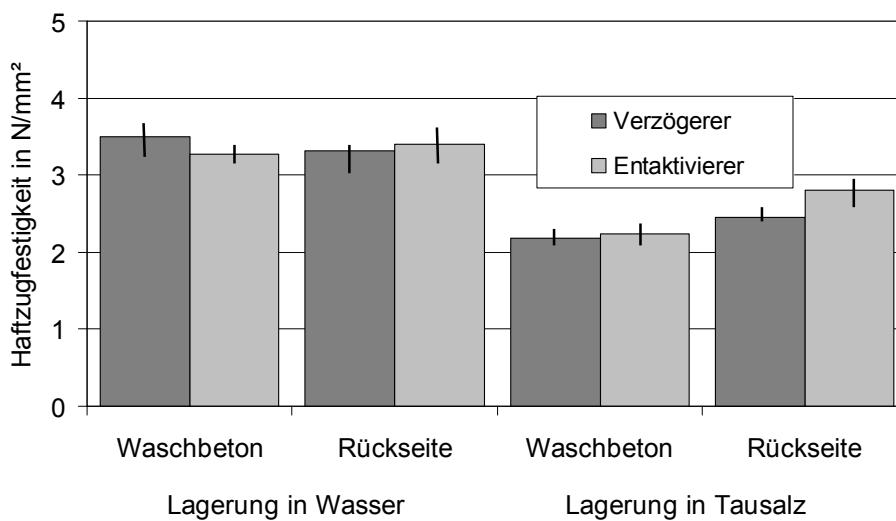


Bild 8 Haftzugfestigkeit (Mittelwert aus drei Versuchen) von Waschbeton mit Kies-Edelsplitt vom Oberrhein in Abhängigkeit von der Lagerung (Wechsellagerung mit Lagerung in Wasser bzw. Tausalz), vom Kombinationsmittel (Verzögerer oder Entaktivierer) und von der Prüffläche (Waschbetonoberfläche bzw. geschalte Rückseite) nach 6 Monaten Prüfung mit dem 60 °C-Betonversuch mit Wechsellagerung

3.3 Frost-Tausalz-Widerstand

3.3.1 LP-Kennwerte

Die LP-Kennwerte am Festbeton sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Der am Festbeton ermittelte Luftgehalt entsprach dem angestrebten Frischbetonluftgehalt und lag mit einer Aus-

nahme im gewünschten Bereich von 5,5 ($\pm 0,5$) Vol.-%. Allein beim Beton mit CEM II/B-S wurde dieser Wert geringfügig unterschritten. Die Anforderungen der Erstprüfung an den Abstandsfaktor ($\leq 0,20$ mm) bzw. Mikro-Luftporengehalt ($\geq 1,8$ Vol.-%) wurden sicher eingehalten. Im Vergleich zum Beton mit CEM I verringerten sich bei den beiden Betonen mit hütten-sandhaltigem Zement bei annähernd gleichem Gesamtluftgehalt der Mikro-Luftporengehalt und der auf den Luftgehalt bezogene Mikro-Luftporengehalt, während der Abstandsfaktor anstieg. Bei gleichem Gesamtluftgehalt enthält der Beton mit Hochofenzement mehr grobe und weniger feine Luftporen, so dass insgesamt eine Vergrößerung des Luftporensystems zu verzeichnen ist.

Tabelle 4 Luftporenkennwerte am Festbeton in Anlehnung an DIN EN 480-11

Zement	Festbeton-Kennwerte			
	Luftgehalt A Vol.-%	Mikro-Luftporen- gehalt A_{300} Vol.-%	Verhältnis A_{300}/A	Abstands- faktor L mm
CEM I 42,5 N	5,3	3,3	0,62	0,14
CEM II/B-S 42,5 N	4,7	2,4	0,51	0,17
CEM III/A 42,5 N	5,1	2,2	0,43	0,18

3.3.2 Charakterisierung der Waschbetontextur

Die Texturtiefe nach dem Ausbürsten des Oberflächenmörtels lag zwischen rd. 0,6 und 1,0 mm, so dass unter Laborbedingungen mit allen drei Produkten anforderungsgerechte Texturtiefen (0,6 bis 1,1 mm nach ZTV Beton-StB 07) erreicht werden konnten (Bild 9). Mit zunehmender Aufsprühmenge erhöhte sich die Texturtiefe geringfügig. Der Entaktivierer ENT2 ergab bei gleicher Aufsprühmenge wie der Entaktivierer ENT1 eine etwas größere Texturtiefe. Es wird ersichtlich, dass eine stark erhöhte Aufsprühmenge nicht zu einer überproportionalen Erhöhung der Texturtiefe führt. Ursache ist vermutlich, dass der Verzögerer auch bei erhöhten Aufsprühmengen nicht tiefer in den Frischbeton eindringen kann.

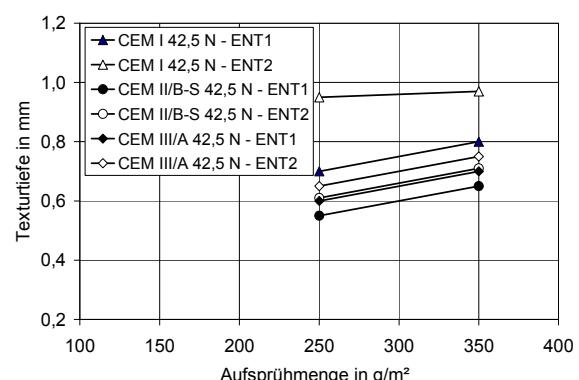
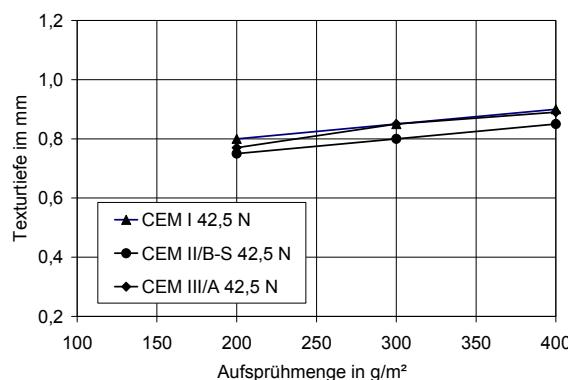


Bild 9 Texturtiefe der Waschbetonoberflächen in Abhängigkeit des Fahrbahndeckenzements und der Aufsprühmenge des Verzögerers OVZ1 (links) bzw. der Entaktivierer ENT1 und ENT2 (rechts)

3.3.3 Frost-Tausalz-Prüfung mit dem CDF-Verfahren

Insgesamt wurden dreißig Frost-Tausalz-Prüfungen (drei Betone mit jeweils 10 Varianten) mit dem bzw. in Anlehnung an das CDF-Prüfverfahren durchgeführt. Bild 10 zeigt zusammenfassend in Abhängigkeit des Zements und der jeweiligen CDF-Prüfvariante die Abwitterungen nach 28 Frost-Tau-Wechseln. Dabei ist zu beachten, dass das Abwitterungskriterium von 1500 g/m^2 nur auf Probekörper anzuwenden ist, deren Prüffläche gegen eine Teflon-scheibe betoniert wurde (Variante 9 nach Tabelle 2). Nach 28 Frost-Tau-Wechseln wurde das Abwitterungskriterium von 1500 g/m^2 bei den CDF-Platten mit geschalter und gesägter Oberfläche und mit einer Ausnahme bei allen Varianten mit Waschbetonoberfläche (Variante 4, Waschbetonoberfläche mit CEM III, nicht fachgerechte, da fehlende zweite Nachbehandlung) deutlich unterschritten. Ein nennenswerter Abfall des dynamischen E-Moduls wurde nicht festgestellt.

Bei allen Varianten war der Anteil abgewitterter Bestandteile beim CEM I-Zement am geringsten, lag beim CEM II/B-S im mittleren Bereich und war beim CEM III-Zement am höchsten. Bei Verwendung des CEM I-Zements zeigte sich nur ein sehr geringer Einfluss einer nicht erfolgten zweiten Nachbehandlung auf das Abwitterungsergebnis. Beim CEM III-Zement erhöhte sich der Anteil der Abwitterung bei nicht erfolgter zweiter Nachbehandlung nach dem Ausbürsten.

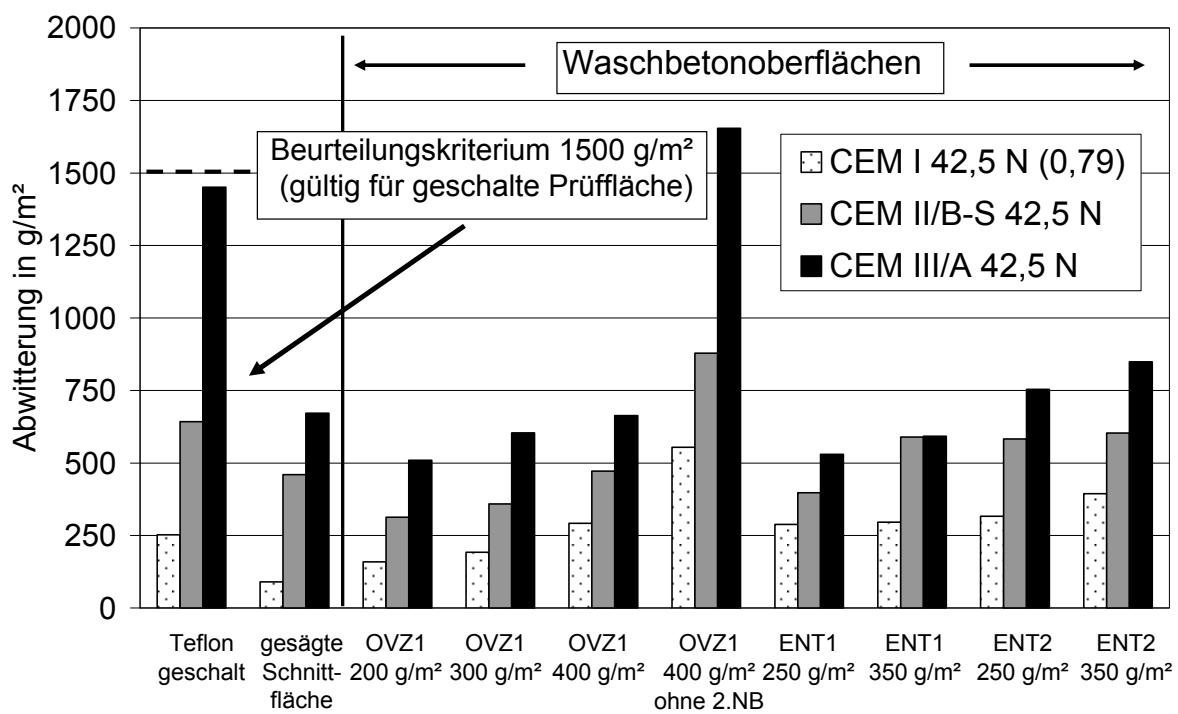


Bild 10 Abwitterung in g/m^2 nach 28 Frost-Tau-Wechseln in Abhängigkeit des Fahrbahndeckenzements und der jeweiligen Variante (Art und Menge des aufgesprühten Verzögerers, Nachbehandlung, Prüffläche)

Um die Verzögerer-Wirkung näher zu charakterisieren, wurden die Abwitterungen in Abhängigkeit der Art und Aufsprühmenge des Verzögerers und des Zements (Bild 11) und der er-

reichten Texturtiefe (Bild 12) dargestellt. Mit zunehmender Menge an aufgesprühtem Verzögerer erhöhte sich in geringem Ausmaß die Texturtiefe (Bild 9) und die nach 28 Frost-Tau-Wechseln bestimmte Abwitterung (Bild 11). Die drei untersuchten Verzögerer-Varianten beeinflussten im Bereich praxisgerechter Texturtiefen die Abwitterungen nur unwesentlich (Bild 12). Eine erhöhte Aufsprühmenge verstärkte damit die Abwitterungen nur geringfügig. Ursache ist vermutlich, dass der Verzögerer-Wirkstoff nur bis zu einer bestimmten Tiefe in den Oberflächenmörtel eindringen kann. Eine wesentliche Erhöhung der Aufsprühmenge dürfte daher in der Praxis nicht zu einer größeren Tiefenwirkung führen. Hierzu müsste eher der Wirkstoffgehalt des Verzögerers im Kombimittel erhöht oder ein stärkerer Wirkstoff verwendet werden. Eine Schädigung der oberflächennahen Betonrandzone durch die Verzögerer-Einwirkung ist daher bei den untersuchten Kombimitteln nicht zu befürchten.

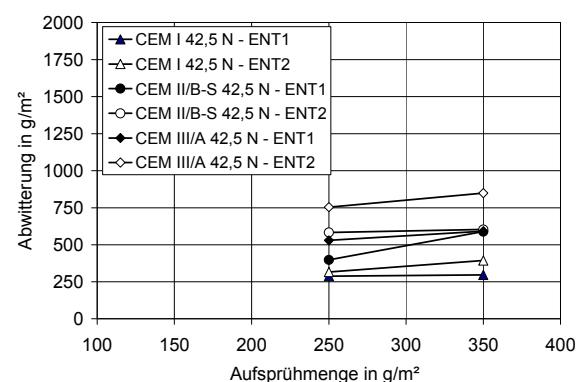
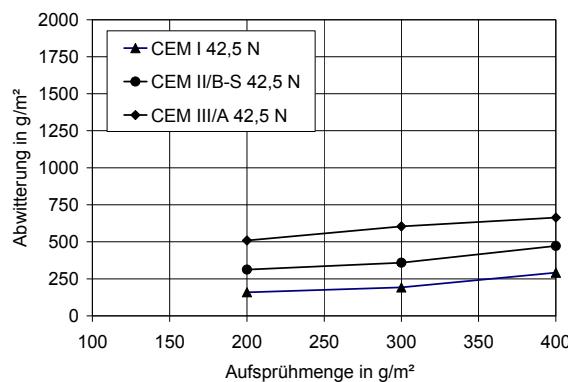


Bild 11 Abwitterung der Waschbetonoberflächen in Abhängigkeit des Fahrbahndeckenzements und der Aufsprühmenge bei Verwendung des Verzögerers OVZ1 (links) bzw. der Entaktivierter ENT1 und ENT2 (rechts)

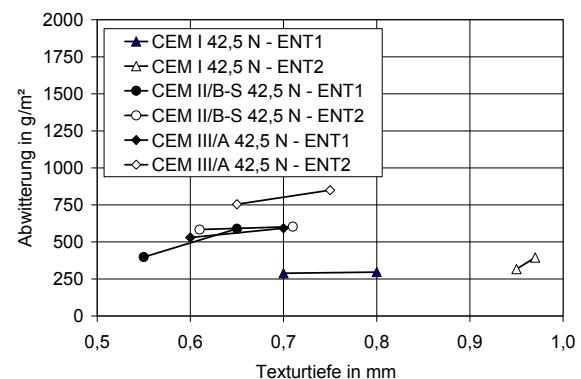
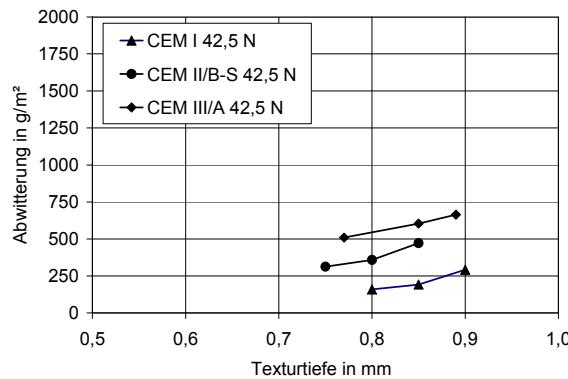


Bild 12 Abwitterung der Waschbetonoberflächen in Abhängigkeit des Fahrbahndeckenzements und der Texturtiefe bei Verwendung des Verzögerers OVZ1 (links) bzw. der Entaktivierter ENT1 und ENT2 (rechts)

Bei einer fachgerechten zweiten Nachbehandlung lagen die ermittelten Abwitterungen der Waschbeton-Oberflächen (Varianten 1 bis 3 und 5 bis 8, Tabelle 2) unabhängig von der verwendeten Zementart deutlich unter dem für Schalflächen empfohlenen Abnahmekriterium von 1500 g/m². Bei der Prüfung von Waschbetonen mit der teflongeschalteten Seitenfläche als Prüffläche läge man daher auf der „sicheren“ Seite. Die Abwitterungen der verschiedenen Waschbetonoberflächen stimmen gut mit dem Ergebnis der Variante 10 „CDF-Platte mit gesägter Oberfläche“ überein. Ursache ist, dass sich bei den Varianten „gesägte Oberfläche“

und ausgebürstete Waschbetontextur die Anteile an Mörtel und Splitt an der Oberfläche in etwa entsprechen.

Für Waschbetonoberflächen liegt noch kein abgesicherter Bewertungshintergrund zur Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstands mit dem CDF-Versuch vor, der Wert von 1500 g/m² gilt nur für geschalte Prüfflächen (Variante 9: Teflonscheibe), wobei der Oberflächenmörtel geprüft wird. Der Mörtelanteil ist beim Waschbeton wesentlich geringer, da der im Mörtel eingebettete Splitt an der Oberfläche freiliegt. Das Prüfergebnis der Waschbetonoberflächen setzt sich daher zusammen aus den Abwitterungen des Mörtels und des Splitts 5/8 mm. Der Gehalt an grober Gesteinskörnung beträgt bei den Waschbetonen rd. 450 l/m³ entsprechend rd. 45 Vol.-%. Unter der Annahme, dass an der ausgebürsteten Oberfläche der Flächenanteil der groben Gesteinskörnung ebenfalls rd. 45 % beträgt, ergibt sich bei den Waschbetonen eine um diesen Anteil reduzierte Mörtelfläche (in die der Splitt eingebettet ist) von rd. 55 %. Eine Umrechnung des Beurteilungskriteriums ist jedoch nicht unmittelbar möglich, da in den Waschbeton-Abwitterungen immer ein Anteil des abgewitterten Splitts 5/8 mm enthalten ist, der allenfalls in geringem Umfang zu den Abwitterungen der Prüfvariante „geschalte Teflonscheibe“ beitragen kann - vorausgesetzt es treten hierbei keine Pop-outs vereinzelter Splittkörner auf.

Die Abwitterungen der Prüfflächen mit Waschbetontextur mit erfolgter fachgerechter zweiter Nachbehandlung nach dem Ausbürsten entsprechend den Vorgaben der ZTV Beton-StB 07 liegen mit max. 850 g/m² soweit von der zulässigen Grenze für geschalte Prüfflächen (Variante Teflonscheibe) von 1500 g/m² entfernt, dass die Betone einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen. Da kein Abfall des dynamischen E-Moduls festgestellt wurde, kann eine innere Gefügeschädigung ebenfalls ausgeschlossen werden.

4 Zusammenfassung und Bewertung

In einem Forschungsvorhaben wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie die Auswirkungen der Waschbetonbauweise auf die Dauerhaftigkeit von Fahrbahndeckenbeton untersucht. Das Forschungsvorhaben wurde aus Haushaltssmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) gefördert.

In dem Forschungsvorhaben wurden die Auswirkungen der Waschbetonbauweise auf den Frost-Tausalz-Widerstand bzw. das Risiko einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion untersucht. Es wurde untersucht, ob durch die Verzögerer die oberflächennahe Randzone beeinflusst und der Frost-Tausalz-Widerstand beeinträchtigt werden kann. Außerdem wurde untersucht, ob durch die höheren Zement- und Splittgehalte des Waschbetons und die verfahrensbedingt nach dem Ausbürsten des Oberflächenmörtels teilweise freigelegten Splittkörner unter Umständen das Risiko einer schädigenden AKR erhöht wird.

Aus den Versuchsergebnissen lässt sich ableiten, dass die Verzögerer-Wirkung keine tiefer gehende Beeinträchtigung der Betonrandzone zur Folge hat. Die Besonderheiten der Waschbeton-Herstelltechnik bewirken daher weder einen mangelnden Frost-Tausalz-Widerstand noch fördert sie die Bildung von Pop-outs.

Die untersuchten Waschbetone 0/8 mm weisen in AKR-Performance-Prüfungen mit Alkali-Zufuhr von außen infolge erhöhter Zement- und Splittgehalte größere Dehnungen auf als die

herkömmlichen Standardbetone 0/16 mm. Dabei wurden mit Grauwacke und Kies-Edelsplitt vom Oberrhein alkaliempfindliche Gesteinskörnungen (Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S) eingesetzt. Wenn nicht ausreichend alkaliunempfindliche Gesteinskörnung verwendet wird, erhöht sich durch die neue Bauweise die Gefahr einer schädigenden AKR. Dies gilt in der Regel nicht für Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S. Mit entsprechenden Performance-Prüfungen kann das Risiko einer schädigenden AKR ermittelt und nicht geeignete Betonzusammensetzungen können in vielen Fällen ausgeschlossen werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Verwendung geeigneter Betonzusammensetzungen und einer sachgerechten Bauausführung die Dauerhaftigkeit der Betonbauweise auch unter den besonderen Bedingungen der Waschbetonbauweise gewährleistet wird.