

Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungs- fortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 93

The logo for 'bast' is written in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are thick and have a slight shadow effect, giving it a three-dimensional appearance. The 'b' and 'a' are particularly prominent.

Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungs- fortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen

von

Frank Weise
Karsten Schrang

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Berlin

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 93

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 29.0265/2010:
Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen

Fachbetreuung

Sabine Huland
Ursula Blume

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-227-8

Bergisch Gladbach, Januar 2016

Kurzfassung – Abstract

Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen

Das Forschungsvorhaben verfolgte das Ziel, die Applikation der Oberflächenhydrophobierung bei Betonfahrbahndecken zu optimieren und deren Einfluss auf die schädigende AKR zu bewerten.

Die Literaturrecherche zum Stand der Technik ergab, dass bisher primär Silane zur Hydrophobierung von Betonen mit erhöhtem AKR-Schädigungspotenzial im Betonstraßenbau mit unterschiedlichem Erfolg Anwendung fanden. National beschränken sich die Erfahrungen auf den praktischen Einsatz von WA65 auf wenige BAB-Abschnitte (A 9 und A 14). Wissenschaftliche Untersuchungen hierzu fehlen.

Vor diesem Hintergrund erfolgten umfangreiche Laboruntersuchungen am Bestands- und Laborbeton zur:

- Optimierung der Applikation des Hydrophobierungsmittels,
- Bewertung der Dauerhaftigkeit der hydrophobierten Betonrandzone,
- Analyse der Auswirkungen der Oberflächenhydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess.

Als Hydrophobierungsmittel kamen die auf dem Wirkstoff Oktyltriethoxysilan basierenden Produkte WA65 und LM7 als Emulsion und GEL30 (Acrylatgel) zum Einsatz. Ihr Verhalten im neu entwickelten Applikationstest war beim Bestandsbeton deutlich schlechter als beim Laborbeton. Hier erwiesen sich WA65 und LM7 als gleichwertig brauchbar, während die geprüfte Modifikation des GEL30 aufgrund seiner geringen Eindringtiefe abzulehnen ist.

Bei den aufbauenden Untersuchungen wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Nachweis der Dauerhaftigkeit der hydrophobierten Betonrandzone im zyklischen Schwingversuch mit aufstehender Prüflösung (exemplarischer Test mit WA65),
- Nachweis der Verminderung des AKR-Schädigungsprozesses durch Applikation von WA65

bzw. LM7 auf Bestands- und Laborbeton mittels Klimawechsellagerung (Beaufschlagung mit NaCl-Lösung).

Mit einem Langzeitmonitoring des Feuchte- und Salzhaushalts in ausgelagerten Ausbausegmenten mit unterschiedlicher Schadensausprägung im Bereich der Querscheinfuge wird langfristig die dortige Gefahr der Hinterläufigkeit der hydrophobierten Betonrandzone untersucht und bewertet.

Assessment and optimisation of hydrophobic treatment for reduction of the ASR damage process in concrete pavements

The project aimed at optimisation the surface hydrophobic impregnation of concrete road pavements and evaluating the effect on damaging ASR.

Literature search identified silane as primarily used hydrophobic impregnation (with varying degrees of success) for concrete with increased ASR-damaging potenzial. In Germany, the experience with silane is limited to a few motorway kilometers (A9 and A14) impregnated with WA65. Scientific investigations dealing with this topic are missing.

In this respect extensive laboratory investigations on laboratory-made and motorway concrete were carried out in order to

- optimise the application of the hydrophobic agents,
- asses the durability of the hydrophobic concrete layer,
- analyse the impact of the surface hydrophobic impregnation on the ASR-damaging process.

The agents are based on octyltriethoxysilane in different forms, as emulsion in the products WA65 and LM7 and incorporated in an acrylic gel GEL30.

Based on a new developed practical testing regime all hydrophobic agents in motorway concrete showed a significant worse application behaviour than in laboratory-made concrete. WA65 and LM7 are equivalent useful for the application on laboratory-made concrete. GEL30 in the present

modification is unsuitable for the application due to its low penetration depth.

The subsequent investigations show the following results:

- Proof of durability of the hydrophobic layer (W65) on a concrete slab with salt solution in top in a cyclic bending test.
- Proof of retardation of ASR in a cyclic climate storage test by application of WA65 or LM7.

The additional constructed outsourcing test-bench with four large-size motorway segments without and with hydrophobic concrete surface pave way as well as integrated monitoring-system allows the analysis of the moisture and salt distribution in the area of the transverse contraction joint.

Inhalt

1	Problem- und Zielstellung	7	4.4	Analyse der Dauerhaftigkeit der hydrophobierten Betonrandzone und der Auswirkungen der Hydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess	52
2	Vorgehensweise	8	4.4.1	Prüfprogramm	52
3	Stand der Technik	8	4.4.2	Schwingbalken mit aufstehender Prüflösung (Prüfszenario A)	53
3.1	Erhaltungsmaßnahmen für AKR-geschädigte Betonstraßen	8	4.4.3	Klimawechselagerung (Prüfszenario B)	59
3.2	Hydrophobierungen	10	4.4.4	60°C-Betonversuch (Prüfszenario C)	85
3.2.1	Historischer Überblick	10	5	Monitoring	92
3.2.2	Begriffsbestimmung und allgemeines Funktionsprinzip	10	5.1	Vorbemerkungen	92
3.2.3	Regelwerke	11	5.2	Beschreibung und Konfektionierung der Auslagerungsproben	92
3.2.4	Arten von Hydrophobierungsmitteln und deren Funktionsweisen	11	5.3	Ergebnisse und Bewertung	96
3.2.5	Wirksamkeit von Hydrophobierungen	15	6	Zusammenfassende Betrachtungen	101
3.2.6	Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungen	17	7	Literatur	103
3.2.7	Auswirkungen der Hydrophobierung auf die AKR	20			
3.2.8	Anforderungen an Hydrophobierungen und marktübliche Hydrophobierungen für Betonfahrbahnen	24			
4	Laboruntersuchungen	26			
4.1	Vorbemerkungen	26			
4.2	Bereitstellung und Charakterisierung der Betone	27			
4.2.1	Ausbaubeton	27			
4.2.2	Laborbeton	34			
4.3	Bewertung und Optimierung der Applikation der Hydrophobierung	38			
4.3.1	Auswahl, Zusammensetzung und Viskosität der Hydrophobierungsmittel	38			
4.3.2	Optimierung des Applikationsregimes	39			
			Anhang		
				Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter:	
				http://bast.opus.hbz-nrw.de abrufbar	

1 Problem- und Zielstellung

In den letzten Jahren sind vermehrt Schäden an Betonfahrbahndecken der Bauklassen SV sowie I bis III nach den ZTV Beton-StB [32] aufgetreten. So werden beispielsweise in einem Bericht der Bundesregierung vom 10.3.2009 [1] allein für die Bundesautobahnen A 9 und A 14 in Sachsen-Anhalt 83 bzw. 32 km Richtungsfahrbahn mit einer Schädigung durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) ausgewiesen.

Die Praxis zeigt, dass der AKR-Schädigungsprozess bei Betonfahrbahndecken bereits oft nach ca. 10 Jahren in Form von Verfärbungen im Bereich der Fugenkreuze und der Quertuge sichtbar wird (Schadenskategorie I). In der Folgezeit verstärkt sich die Verfärbung und es treten Rissbildungen, z. B. im Bereich der Fugenkreuze sowie an den Querscheinfugen auf (Schadenskategorie II). Im weiteren Verlauf der Schädigung schreiten die Rissbildungsprozesse voran und es findet eine Verschotterung des Betons im Bereich der Querscheinfugen statt. Charakteristisch für dieses Schädigungsstadium ist eine sehr ausgeprägte Rissbildung und ggf. Substanzverlust, z. B. Verschotterung der Betonfahrbahndecke (Schadenskategorie III). Dies wiederum führt zu einer starken Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit. Die Erfahrungen in jüngster Vergangenheit zeigen, dass der Schädigungsfortschritt mitunter sehr schnell voranschreitet. So wurde beispielsweise vom Herbst 2012 bis zum Frühjahr 2013 an mehreren Streckenabschnitten ein sprunghafter Übergang von der Schadenskategorie I zu III beobachtet. Offensichtlich sind hier in den vorgeschädigten Beton verstärkt Alkalien in den Wintermonaten über das Streusalz eingetragen worden, die in Kombination mit der Erwärmung der Betonfahrbahndecke im Frühjahr den AKR-Schädigungsprozess stark beschleunigten.

Neben den Autobahnabschnitten mit bereits erkennbarer AKR-Schädigung sind zahlreiche weitere Streckenabschnitte bekannt, die zwar visuell noch keine Schäden zeigen, jedoch aufgrund der Betonzusammensetzung in den nächsten Jahren eine schädigende AKR erwarten lassen. Aufgrund des hohen AKR-Schädigungspotenzials bei den Bundesautobahnen wird zurzeit national ein Wissensdokument für die Schadensdiagnose und Bauliche Erhaltung von AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken erarbeitet (H BEB-AKR) [2]. In diesem

Regelwerk werden in Abhängigkeit von der AKR-Schadenskategorie sechs verschiedene bauliche Erhaltungsmaßnahmen empfohlen. So werden bei den Schadenskategorien I bzw. II dünn- bzw. dickschichtige bituminös gebundene Überbauungen vorgeschlagen, während bei der Schadenskategorie III neben der dickschichtigen Überbauung eine grundhafte Erneuerung der Betonfahrbahndecke vorgesehen wird. Neben der Überbauung mit dünnen Asphaltdeckschichten in Kaltbauweise (DSK) bzw. einer Asphaltdeckschicht gibt es bei der Schadenskategorie I auch Bestrebungen, die Oberfläche der Betonfahrbahndecke zu hydrophobieren. Um die Wirksamkeit der Hydrophobierungsmittel auf den Verlauf des AKR-Schädigungsprozesses bei Betonfahrbahndecken zu testen, wurde für Versuchszwecke das Oberflächenschutzsystem OS-A WA65 bereits 2008 auf der Erprobungsstrecke der BAB A 14 in Sachsen-Anhalt (Streckenkilometer 151,50 in Fahrtrichtung Magdeburg) appliziert. Allerdings lässt der geringe Zeitraum von der Applikation 2008 und dem Beginn dieses Vorhabens 2010 noch keine Aussagen zur Wirksamkeit des ausgewählten Hydrophobierungsmittels auf den Verlauf des AKR-Schädigungsprozesses zu. Der Grundgedanke der Hydrophobierung und bituminösen Überbauung besteht darin, den Feuchte- und Salzzutritt in die Betonfahrbahndecke zu vermindern bzw. zu unterbinden. Es sollen so die für eine AKR notwendigen Reaktionspartner Wasser und Alkalien möglichst drastisch reduziert werden. Es ist allerdings nicht bekannt, in welchem Maße der vor der Applikation bereits im Fahrbahndeckenbeton vorhandene Feuchte- und Salzgehalt den AKR-Schädigungsprozess trotzdem weiter voranschreiten lässt. Es stellt sich auch die Frage, welche Auswirkungen eine Hinterläufigkeit der hydrophobierten Randzone bzw. der Überbauung auf den Verlauf einer schädigenden AKR ausübt. Des Weiteren liegen bisher keine belastbaren Aussagen zur Dauerhaftigkeit derartiger Erhaltungsmaßnahmen vor. Auf der anderen Seite sei angemerkt, dass aus volkswirtschaftlicher Sicht bereits eine zeitliche Verzögerung des AKR-Schädigungsprozesses um 3 bis 5 Jahre durch eine solche temporäre Erhaltungsmaßnahme wie der Hydrophobierung zu einer beachtlichen Kostenersparnis führt.

Vor diesem Hintergrund verfolgt dieses Forschungsvorhaben das Ziel, die Wirksamkeit einer Hydrophobierung auf den Verlauf einer schädigenden AKR in einem Fahrbahndeckenbeton wissenschaftlich zu bewerten.

2 Vorgehensweise

Zur Erreichung dieser Zielstellung erfolgte zunächst eine umfassende Literaturrecherche zum Stand der Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Erhaltungsmaßnahmen von AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken. Das Hauptaugenmerk galt dabei der Oberflächenhydrophobierung. So wurden die Arten, die Wirkmechanismen und die Eigenschaften der Oberflächenhydrophobierungsmittel recherchiert und die AKR-spezifischen Erfahrungen bei ihrem Einsatz analysiert. Dies bildete auch die Grundlage für die gezielte Auswahl der Hydrophobierungsmittel für die sich anschließenden Laboruntersuchungen. So wurden neben der auf der Erprobungsstrecke der BAB A 14 eingesetzten Hydrophobierungscreme WA65 zusätzlich zwei weitere Produkte, die nach dem im Forschungsprojekt erarbeiteten anwendungsspezifischen Anforderungskatalog vom jeweiligen Hersteller optimiert wurden, in das Prüfprogramm einbezogen. Die schrittweise durchgeführten Laboruntersuchungen erfolgten zunächst an Ausbauproben ohne und mit Hydrophobierung eines moderat AKR-vorgeschädigten Streckenabschnitts der BAB A 14. Zur besseren Herausarbeitung der Effekte wurden zusätzlich Laborprüfkörper mit einer repräsentativen Rezeptur für Fahrbahndecken unter Verwendung einer alkaliempfindlichen Gesteinskörnung in die Untersuchungen einbezogen.

Bei den Laboruntersuchungen wurde in einem ersten Schritt das Applikationsregime für die Hydrophobierung des Bestands- und Laborbetons unter Berücksichtigung praxisnaher Randbedingungen optimiert. Das schloss zunächst primär die Untersuchung des Einflusses zweier verschiedenartiger praxisnaher hygrothermischer Vorkonditionierungen auf den Feuchtehaushalt in der Randzone bei beiden Betonarten ein. Basierend darauf wurden die Auswirkungen der sich in der Betonrandzone einstellenden Feuchtegehalte auf das Applikationsverhalten und die Güte der Hydrophobierung analysiert. Als Beurteilungskriterien dienten dabei die visuell erkennbare Reaktionskinetik unmittelbar nach Applikation des Hydrophobierungsmittels, das Ablaufverhalten bei einer leicht geneigten Applikationsoberfläche, die Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels und die Griffigkeitsentwicklung auf der Applikationsoberfläche.

Darauf aufbauend wurde die Dauerhaftigkeit der hydrophobierten Randzone im Kontext des AKR-Schädigungsprozesses in Bestands- und Labor-

betonen untersucht. Die AKR-provozierende Beanspruchung erfolgte dabei vor allem mittels Klima-wechselagerung, da diese die jahreszeitlichen klimatischen Einwirkungen auf die Betonfahrbahndecke simuliert. Zusätzlich wurde die Lagerung gemäß den Bedingungen des 60°C-Betonversuchs am Bestandsbeton und an verschiedenartigen Laborbetonen ohne und mit Hydrophobierung in Anlehnung an [34] durchgeführt. Vertiefend durchgeführte mikroskopische und mikrochemische Untersuchungen dienten der Bewertung des AKR-Schädigungsprozesses und des Alkalieintrags. Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit der hydrophobierten Randzone wurden zusätzlich großformatige Balken aus Laborbeton ohne und mit hydrophobierter Prüf-fläche mittels Schwingversuch mit gleichzeitig aufstehender 5%iger Natriumchloridlösung zyklisch beansprucht. Die vergleichende Ermittlung des Alkalieintrags soll hier Aufschluss über die Dauerhaftigkeit der hydrophobierten Randzone geben.

Basierend auf der Tatsache, dass der AKR-Schädigungsprozess im Bereich der Querscheinfuge beginnt, kommt dem dortigen Monitoring des Feuchte- und Salzhaushalts eine zentrale Bedeutung zu. Aus diesem Grunde wurden auf der BAB A 14 aus dem Bereich der Querscheinfuge vier Segmente ausgebaut, mit TDR-Messtechnik sowie Thermoelementen bestückt und anschließend erneut in eine befahrene Fahrbahndecke auf dem BAM-Gelände eingebaut. Die so mögliche Verfolgung des zeitlichen Verlaufs der örtlichen Feuchte-, Salz- und Temperaturverteilung soll Aufschluss über die Verfügbarkeit der Reaktionspartner für die AKR geben.

3 Stand der Technik

3.1 Erhaltungsmaßnahmen für AKR-geschädigte Betonstraßen

Erhaltungsmaßnahmen an AKR-geschädigten Betonstraßen verfolgen das Ziel, eine weitere Schädigung der Fahrbahn zu verzögern bzw. zu verhindern und folglich die Restnutzungsdauer der Fahrbahn zu verlängern. Welche Erhaltungsmaßnahmen wirtschaftlich und geeignet sind, richtet sich u. a. nach dem Schädigungsgrad. Entsprechend der vorhandenen Schädigung an Betonfahrbahndecken werden, gemäß den Empfehlungen „Hinweise für die Schadensdiagnose und die Bauliche Erhaltung von AKR-geschädigten Fahrbahndecken






Schadenskategorie I	Schadenskategorie II	Schadenskategorie III
		
-		
<ul style="list-style-type: none"> • Verfärbung im Bereich der Querfugen/Fugenkreuze, • keine über Schwindrisse hinausgehende Rissbildung 	<ul style="list-style-type: none"> • ausgeprägte Verfärbung im Bereich der Fugen, • Rissbildungen in Fugenkreuzbereichen, • beginnende bis ausgeprägte Netzrissbildung, • ggf. Längs- und Querrisse an den Querfugen, • ggf. zusätzliche Längsrissbildung in Rüttelgassen, • noch kein Substanzverlust 	<ul style="list-style-type: none"> • sehr ausgeprägte Rissbildungen häufig mit Verfärbungen, • „einbrechende“ Querfugenbereiche, Kantenaus- und -abbrüche im Bereich der Rollspuren • ggf. Substanzverlust, z. B. „Verschotterung“

Tabelle 1: Schadenskategorien basierend auf AKR-Schädigung von Betonfahrbahnen entsprechend den Hinweisen H BEB-AKR [2]

aus Beton“ [2], die aufgetretenen Schäden in drei in der Tabelle 1 dargestellten Schadenskategorien unterteilt.

Liegt nur eine beginnende AKR-Schädigung entsprechend der Schadenskategorie I vor, können verschiedene Oberflächenschutzmaßnahmen, die zum Teil auf der Erprobungsstrecke der BAB A 14 zur Anwendung kamen, eingesetzt werden. Mit diesen Maßnahmen sollen die schadensbegünstigenden Einflüsse reduziert, d. h. das Eindringen von Wasser und Tausalz vermindert werden.

Folgende Oberflächenschutzmaßnahmen werden unterschieden:

- Hydrophobierung (OS-A),
- Imprägnierung (Leinölfirnis),
- Beschichtung, wie
 - dünne Asphaltdeckschichten in Kaltbauweise (DSK),
 - Oberflächenbehandlung mit Reaktionsharz (OB-RH),

- dünne Überbauung, d. h. dünne Asphaltdeckschichten in Heißbauweise auf Versiegelung (DSH-V).

Ein großer Vorteil von Hydrophobierungen und Leinölfirnis im Vergleich zu den anderen genannten oberflächlichen Maßnahmen ist, dass sich an der Oberfläche kein bzw. bei Leinölfirnis nur ein dünner transparenter Film ausbildet und das äußere Erscheinungsbild nicht bzw. kaum verändert wird. Dadurch ist es möglich, den Zustand der Fahrbahndecke, sprich die weitere Rissentwicklung, visuell zu verfolgen.

Bei Betonfahrbahnen, die aufgrund einer fortgeschrittenen AKR-Schädigung in die Schadenskategorie II oder III eingestuft sind, müssen hingegen Erhaltungsmaßnahmen entsprechend Tabelle 2 erfolgen.

Imprägnierungen mit Leinölfirnis, Beschichtungen in Form von „dünnen Asphaltdeckschichten in Kaltbauweise“ und dünne Überbauungen sowie die in Tabelle 2 genannten Erhaltungsmaßnahmen stellen gängige Verfahren im Straßenbau dar. Aller-

Maßnahmen				Schadenskategorie		
				I	II	III
Überbauung	Asphaltdeckschicht ¹ aus Walzasphalt	≥ 4,0 cm		(+)	+	-
	Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht ¹	9-12 cm		(+)	+	+
Erneuerung bei tlw. Ersatz	Whitetopping	≥ 8 cm	mit Abfräsen des Oberbetons	(+)	+	-
	Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht ¹	9-12 cm		(+)	+	+
Erneuerung	Hocheinbau		Beton- oder Asphaltbauweise	(+)	(+)	+2
	Tiefeinbau			(+)	(+)	+3
+ geeignet (+) geeignet, Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung der Restnutzungsdauer und des Restschädigungspotenzials prüfen - ungeeignet ¹ mit bitumenhaltiger Zwischenschicht (SAMI) ² vorherige Entspannung und Einbau einer Ausgleichsschicht ³ Art der Tragschicht/Unterlage beachten						

Tab. 2: Erhaltungsmaßnahmen entsprechend der Schadenscategory (siehe Tabelle 1)

dings kamen sie ursprünglich nicht mit dem Ziel der Vermeidung bzw. Verminderung einer AKR zur Anwendung.

Im Gegensatz dazu liegen bei Oberflächenbehandlungen mit Reaktionsharzen und Hydrophobierungen von Betonfahrbahndecken gegenwärtig nur unzureichende Erfahrungen hinsichtlich der Applikation, der Leistungsfähigkeit und der Dauerhaftigkeit vor. Reaktionsharze sind recht kostenintensiv und führen im Unterschied zu Hydrophobierungen zur Ausbildung einer geschlossenen Sperrschicht, wodurch die Diffusion von Wasserdampf stark behindert wird. Aus diesem Grund stellen Hydrophobierungen die vielversprechendere Variante dar und sollen im Folgenden näher betrachtet werden.

3.2 Hydrophobierungen

3.2.1 Historischer Überblick

Das Hydrophobieren von Baustoffen findet seit mehreren Jahrhunderten Anwendung, um deren Feuchtigkeitsaufnahme in flüssiger Phase zu vermindern. Die Ägypter schützten die Papyrusboote durch Salzlösungen, die Makedonier tränkten hölzerne Brückenpfeiler mit Olivenöl und die Römer setzten dem Frischmörtel Öle und Fette zu.

3.2.2 Begriffsbestimmung und allgemeines Funktionsprinzip

Eine Imprägnierung ist eine Schutzbehandlung poröser Baustoffe, bei der weder das Porensystem innerlich verstopft noch ein oberflächlicher Film ausgebildet wird. Wird durch eine Imprägnierung die Benetzung der Baustoffoberfläche mit Wasser vermindert und die kapillare Saugkraft gegenüber Wasser aufgehoben, handelt es sich um eine hydrophobierende Imprägnierung bzw. kurz Hydrophobierung. Das äußere Erscheinungsbild ändert sich dabei wenig oder gar nicht. Hydrophobierungen finden bei mineralischen Baustoffen, wie Putz, Beton, Naturstein und Ziegel, Anwendung. Ziel einer Hydrophobierung ist es, das Eindringen von Wasser und beton- sowie stahlschädigenden Stoffen, wie Chloriden, Sulfaten und Nitraten, in den Baustoff zu verhindern.

Durch den Auftrag von Hydrophobierungen wird die Oberflächenenergie des mineralischen Baustoffes herabgesetzt. Dies führt dazu, dass Wasser aufgrund seiner recht hohen Oberflächenspannung von der Oberfläche abgestoßen wird [3]. Dabei erhöht sich der Benetzungswinkel des Wassers auf einen Wert von über 90°, wodurch es nicht mehr kapillar vom Baustoff aufgesaugt werden kann. Wie Bild 1 verdeutlicht, wird beim Hydrophobieren nur die unmittelbare Oberfläche des Betons und des von außen zugänglichen kapillaren Porenraums mit

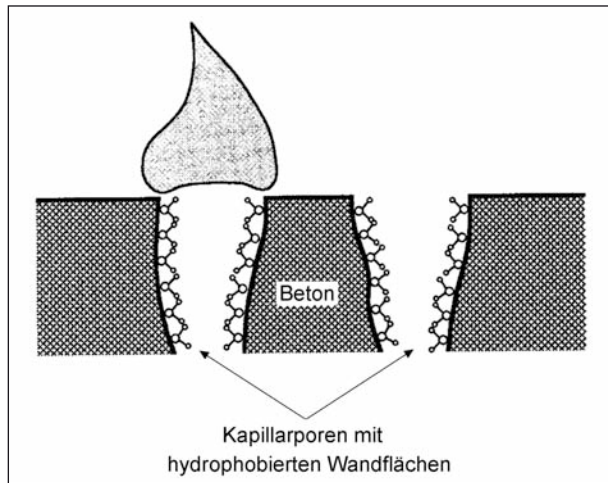


Bild 1: Wirkungsweise einer Hydrophobierung [4]

Wirkstoff belegt. Die Poren und Kapillaren werden dabei lediglich mit Wirkstoff ausgekleidet, sind aber nicht gefüllt. Wie weit das Hydrophobierungsmittel in den Beton eindringt, hängt dabei zum einen von seiner Porosität bzw. Dichte sowie vorhandenen oberflächlichen Rissen und zum anderen vom Feuchtegehalt des Betons ab.

Im Gegensatz zu einer Beschichtung bildet sich beim Hydrophobieren keine durchgehende geschlossene Schicht aus. Das führt dazu, dass das Eindringen von Feuchtigkeit in flüssiger Phase deutlich verringert werden kann, ohne dass die Diffusion von Wasserdampf wesentlich beeinträchtigt wird. Dadurch können Schäden durch Dampfsperwirkung, wie sie bei Beschichtungen auftreten können, bei Hydrophobierungen ausgeschlossen werden.

Laut DIN EN 1504 Teil 2 [5] zählen neben den Hydrophobierungen auch die Imprägnierungen zu Oberflächenschutzsystemen für Beton. Sie dienen der Verringerung der Oberflächenporosität und der Verfestigung der Oberfläche. Die Poren und Kapillaren des Betons werden dabei teilweise oder vollständig mit Wirkstoff gefüllt. Es entsteht ein ungleichmäßiger, dünner Film auf der Betonoberfläche.

3.2.3 Regelwerke

Das Hydrophobieren von Betonen ist gegenwärtig national und europäisch in folgenden Regelwerken geregelt:

- I. DAfStb-Richtlinie: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie, Rili-SIB), Teil 1-4, 2001 [6].

- II. ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 3, Abschnitt 4, 2010 [7].
- III. DIN EN 1504: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Teil 2: Oberflächenschutzsysteme für Beton 2005 [5].
- IV. WTA-Merkblatt 3-17: Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen, Ausgabe: 08/2009/D, Entwurf [8].

Außerdem befindet sich eine nationale Anforderungsnorm für Oberflächenschutzsysteme in Bearbeitung. Dabei handelt es sich um DIN V 18026 mit dem Titel „Oberflächenschutzsysteme für Beton aus Produkten nach DIN EN 1504-2:2005-01“ [9].

3.2.4 Arten von Hydrophobierungsmitteln und deren Funktionsweisen

Niedermolekulare Hydrophobierungsmittel, wie Paraffine, Wachse und wasserfreie Silikate, werden gegenwärtig kaum noch eingesetzt. Anstelle dessen haben reaktive siliziumorganische Verbindungen, d. h. Silane, Siloxane und Silan-Siloxan-Mischungen, immer mehr an Bedeutung gewonnen. Siliziumorganische Verbindungen besitzen einen hydrophoben, d. h. wasserabstoßenden, und einen hydrophilen, sprich wasseranziehenden, Teil. Folglich gehören sie zur Gruppe der so genannten Zwittermoleküle. Bei Applikation solcher Verbindungen auf einer mineralischen Baustoffoberfläche lagert sich die hydrophile Seite des Moleküls, d. h. die Silanolgruppe (Si-OH), an der Oberfläche und den Porenwänden des Baustoffes an. Dies erfolgt über Wasserstoffbrückenbindung oder durch chemische Reaktionen. Der hydrophobe Teil, also die Kohlenwasserstoffseitenketten, stellt hingegen die neue Oberfläche dar. Die einzelnen Moleküle verbinden sich durch Polykondensation auf den mineralischen Porenoberflächen und/oder Verdunsten von Lösemittel unter Bildung eines Polysiloxans, d. h. eines Silikonharzes. Der Aufbau einer solchen Verbindung kann Bild 2 entnommen werden. Sie besitzt eine Hauptkette aus Silizium (Si) und Sauerstoff (O). An dieser Hauptkette hängen in Form von Alkyl ($C_nH(2n+1)$)- und Hydroxid (OH)-Gruppen verschiedene organische Radikale (R).

Der entstandene Film ist extrem dünn. Um eine optimale Wirksamkeit erzielen zu können, ist jedoch keine bestimmte Schichtdicke sondern lediglich

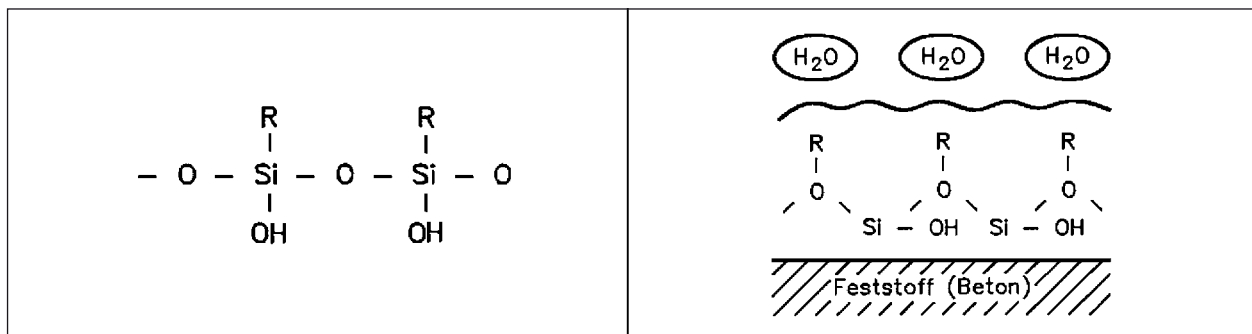


Bild 2: Aufbau einer reaktiven Silikon-Verbindung (links) und deren Funktionsweise auf mineralischen Baustoffoberflächen, wie beispielsweise Beton (rechts) [10]

Silizium-organische Verbindung	Wirkstoff (Beispiele)	Lösungs-/Verdünnungsmittel	Beschaffenheit Untergrund	beständig bis pH-Wert	Einsatzgebiete
Silikonat	Kaliummethylsilikonat	Wasser	feucht, nicht nass, saugfähig	9-10	Kalksandstein
Silikonharz	Methylpolysiloxane	aliphatische Lösungsmittel	trocken, saugfähig	9-10	Sandstein, Kalkstein, Ziegel
	höher alkyliertes Polysiloxan	aliphatische Lösungsmittel	trocken, saugfähig	13-14	Naturstein, Beton, Putz, Ziegel
Silan	anhydrolisiertes Silan	Wasserfreier Alkohol	feucht, nicht nass, saugfähig	13-14	Beton, Putz, Kalksandstein
	Octyltriethoxysilan	Emulsion in Wasser	feucht, nicht nass, saugfähig	13-14	Beton, Putz, Kalksandstein,
Siloxan	Oligomeres Alkylalkoxysiloxan	aliphatische Lösungsmittel	feucht, nicht nass, saugfähig	13-14	Beton, Putz, Naturstein, Ziegel
Silan-Siloxan-Gemisch	Silan und soligomere Alkoxysiloxane	aliphatische Lösungsmittel	feucht, nicht nass, saugfähig	13-14	Beton, Putz, Ziegel, Naturstein, Kalksandstein
		Emulsion in Wasser			
	Methylsiliconharz + Octyltriethoxysilan oder Alkylalkoxysilan und -siloxan	pastöse Emulsion in Wasser			

Tab. 3: Arten, Lösungs- bzw. Verdünnungsmittel und Einsatzbereich siliziumorganischer Verbindungen nach [4] und [www.baustoffchemie.de/hydrophobierungen]

eine vollständige wirksame Auskleidung der Porenwänden erforderlich. Folglich muss eine Mindestmenge auf der Betonoberfläche appliziert werden.

Zur Gruppe der siliziumorganischen Verbindungen gehören die folgenden Stoffe:

- Silikonat,
- Silikonharz,
- Silan (Organosilylester),
- oligomeres Siloxan,
- polymeres Siloxan.

Alle siliziumorganischen Verbindungen werden aus demselben Rohstoff (Chlorsilan) hergestellt. In

allen Fällen kommt es durch chemische Reaktion und/oder Verdunsten des Lösemittels zur Entstehung desselben Endproduktes, und zwar Polysiloxan, d. h. Silikonharz.

Wie Tabelle 3 verdeutlicht, stehen für die Hydrophobierung von Betonoberflächen die Verbindungen der Stoffgruppe der Silane, Siloxane, Silan/Siloxan-Gemische sowie höher alkylierte Polysiloxane zur Verfügung.

Bei den kommerziell erhältlichen Produkten liegt der Schwerpunkt auf der Gruppe der Alkyltriethoxysilane. Das Grundprinzip der zweistufigen Reaktion nach Applikation solcher Verbindungen auf einer zementgebundenen Baustoffoberfläche ist in Bild 3 dargestellt.

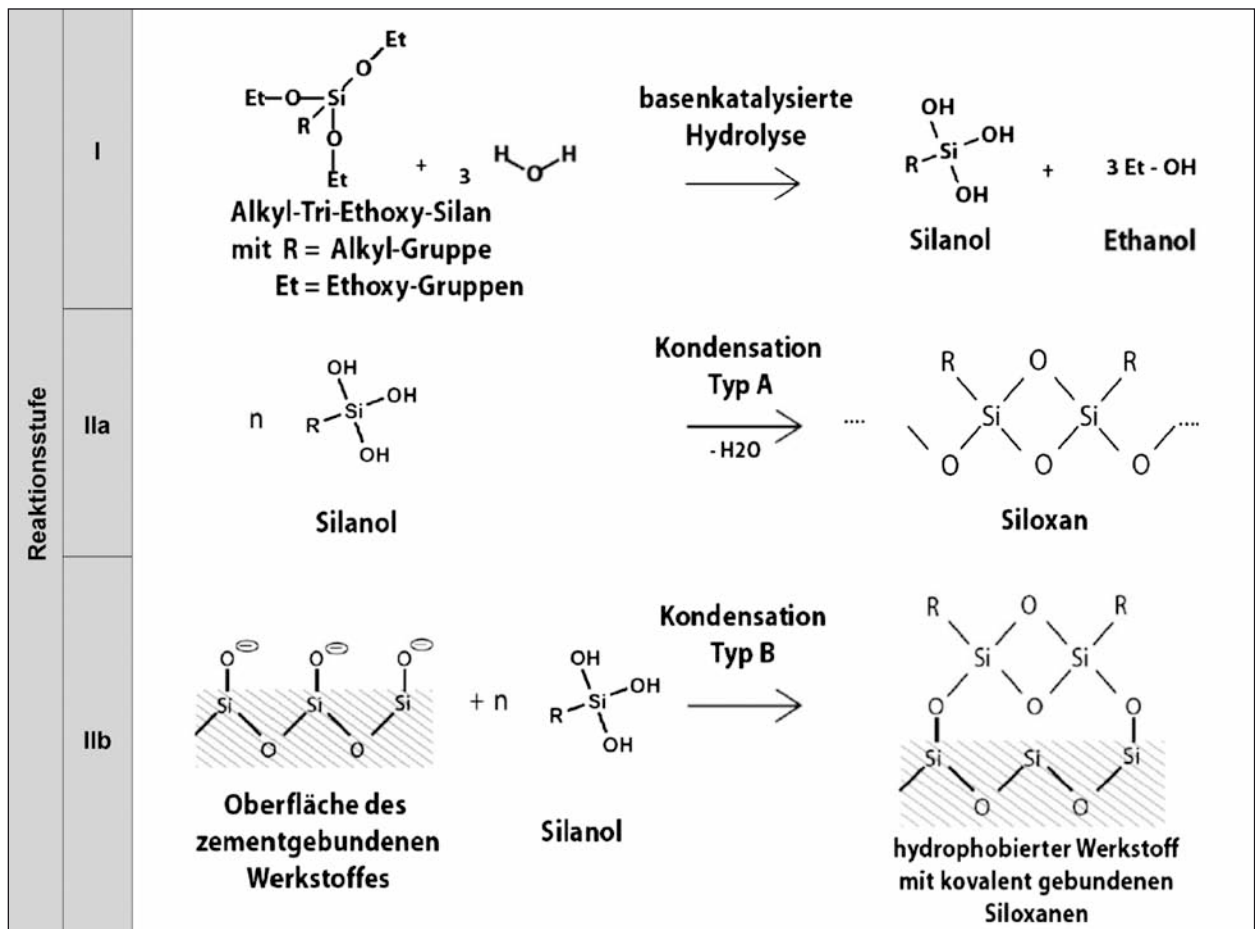


Bild 3: Schema für die Reaktion eines Alkyltriethoxysilans mit Wasser ohne oder unter Einbeziehung einer Festphase: I) Abspaltung von Ethanol und Bildung von Silanol durch Hydrolysereaktion IIa) Kondensationsreaktionen von Silanol unter Wasserabspaltung und Entstehung von Polysiloxan IIb) kovalente Bindung von Polysiloxan (Si-O-Si) auf zementgebundenem Werkstoff [11]

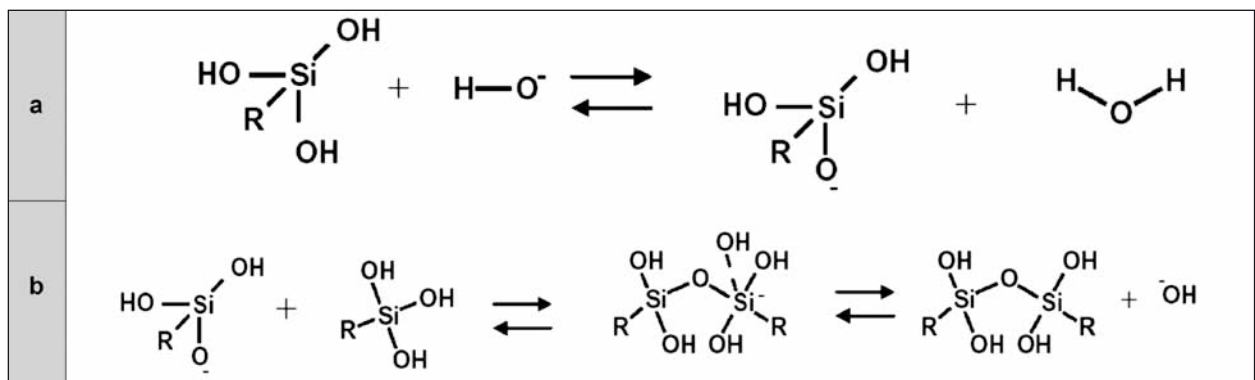


Bild 4: Kondensation von Silanol zu Polysiloxan: a) Deprotonierung von Silanol zu Polysiloxanyl-Anion b) Anbindung des Polysiloxanyl-Anions an zweites Silanol, vorübergehend Bildung eines Si-Atoms mit fünf Substituenten und Entstehung von Polysiloxan [11]

Zusammenfassend kann die Reaktion des Alkyltriethoxysilans wie folgt beschrieben werden:

- Abspaltung der Ethoxy-Gruppe durch basenkatalysierte Hydrolysereaktion der Alkyltriethoxysilane und Entstehung des reaktiven Zwischenproduktes Silanol.
- Kondensation von Silanol zu Polysiloxan in den folgenden Schritten (siehe Bild 4):
 - Deprotonierung der Silanolgruppen und Entstehung eines Polysiloxanyl-Anions,
 - Anbindung, d. h. Kondensation, dieses Anions an ein zweites Silanol oder ein Silan

und kurzzeitige Bildung eines Si-Atoms mit fünf Substituenten,

- Abspaltung von Wasser und Entstehung eines Polysiloxans.
- Sorption oder kovalente Bindung des entstandenen Polysiloxans an der zementgebundenen Baustoffoberfläche.
- Ergebnis: Polymerharzfilm mit nach oben und/oder in die Kapillare ragendem hydrophoben Alkylrest.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Silanverbindungen bestehen in der Reaktionskinetik (Hydrolysegeschwindigkeit/Kondensationsreaktion der Siloxanbildung) und im sterischen Verhalten der jeweiligen Verbindung. Bei identischer Ethoxy-Gruppe wird die Reaktionskinetik des Silans maßgeblich durch die Struktur der Alkylkette bestimmt.

Die Geschwindigkeit der Hydrolysereaktion von Silan zu Silanol nimmt nach [11] unter folgenden Bedingungen zu:

- mit der Konzentration der Hydroxyl-Ionen ($[\text{OH}^-]$ -Ionen), d. h. mit steigendem pH-Wert,
- mit kürzer werdenden Alkylketten und
- mit geringerer Ausgangskonzentration an Silan.

Der sich anschließende sekundäre Umsatz von Silanol zu Siloxan, d. h. die Kondensationsreaktion, wird ebenfalls mit kürzer werdendem Alkylrest beschleunigt.

Zudem gilt, dass

- bei Silanen mit kurzen Alkylketten die Kondensationsreaktion zur Bildung von Siloxan langsamer als der Hydrolyseschritt verläuft,
- bei Silanen mit langen Alkylketten die Kondensationsreaktion schneller als der Hydrolyseschritt verläuft [11].

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei den in der Praxis häufig als Hydrophobierungsmittel eingesetzten Produkten um Alkyltriethoxysilane. Bei diesen Verbindungen stellt Silizium das Zentralatom dar, an dem drei reaktionsfähige Ethoxygruppen und ein Alkyl-Rest gebunden sind. Der Alkyl-Rest, also die organische Kohlenwasserstoffkette, stellt folglich die variable Komponente dar. Die Kennzeichnung „n“ bedeutet dabei, dass die Alkylkette unverzweigt ist, während „iso“ auf eine Verzwei-

gung hinweist. Für die Hydrophobierung von Betonoberflächen findet in kommerziell verfügbaren Produkten hauptsächlich die Silanverbindung Triethoxy-(2,4,4-trimethylpentyl)-silan, das auch als iso-Oktyltriethoxysilan (i-OTS) bezeichnet wird, Verwendung. Wie der Bezeichnung zu entnehmen ist und die Bild 5a zeigt, besitzt die Alkylkette insgesamt acht Kohlenwasserstoffatome, wobei drei Verzweigungen vorliegen.

Ebenfalls kommt die Verbindung n-Oktyltriethoxysilan (n-OTS) zur Hydrophobierung von Betonoberflächen zum Einsatz. Wie beim i-OTS handelt es sich auch in diesem Fall um eine Alkylkette mit acht Kohlenwasserstoffatomen. Allerdings ist diese Alkylkette, wie Bild 5b zeigt, unverzweigt.

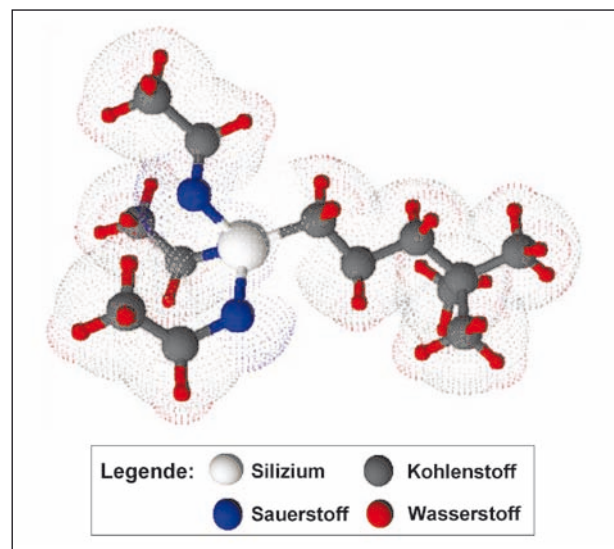


Bild 5a: Chemische Struktur des iso-Oktyltriethoxy-(2,4,4-trimethylpentyl)-silans (i-OTS, mittlere Alkylgruppenlänge)

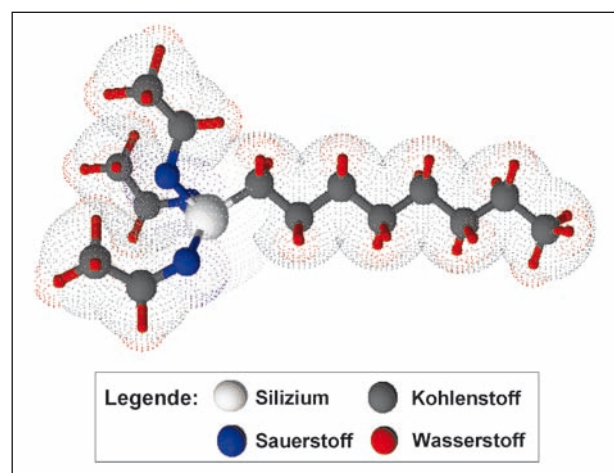


Bild 5b: Chemische Struktur des n-Oktyltriethoxysilans (n-OTS, lange Alkylgruppen)

Für Silane auf Triethoxy-Basis sind außerdem Hydrophobierungssysteme auf Grundlage von n-Pentyl-, n-Butyl-, iso-Butyl- sowie Propyltriethoxysilan geeignet, um Betonoberflächen gegen das Eindringen von Wasser zu schützen. Im Gegensatz zu den o. g. Produkten (i-OTS und n-OTS) besitzen diese Verbindungen kurze Kohlenwasserstoffketten.

Wie bereits beschrieben und in Tabelle 4 verdeutlicht, hat die Länge der Alkylkette der Alkyltriethoxysilane einen großen Einfluss auf die Eigenschaften des jeweiligen Hydrophobierungsmittels. Je länger die Alkylkette desto höher die Alkalibeständigkeit und das Eindringvermögen sowie desto langsamer die Reaktionsgeschwindigkeit und die Griffigkeitsentwicklung.

Ferner beeinflusst die Länge der Alkylkette indirekt die Kontaktzeit zur Betonoberfläche. Je kürzer die Alkylkette umso schwieriger ist es, das Hydrophobierungsmittel in pastöser Form herzustellen. Niedrig viskose Materialien besitzen jedoch eine kürzere Verweildauer auf der Betonoberfläche als Pasten. Folglich dringt bei flüssigen Systemen eine geringere Wirkstoffmenge in den Beton ein als bei Pasten. Daher sind pastöse Materialien zu bevorzugen.

Somit wird ersichtlich, warum der Schwerpunkt bei kommerziell eingesetzten Hydrophobierungen von Herstellerseite auf der Silankomponente Triethoxy-(2,4,4-trimethylpentyl-)silan, dem iso-Oktyltriethoxysilan (kurz i-OTS), liegt. Dieses Molekül stellt einen allgemeinen Kompromiss der Eigenschaften von lang- und kurzkettigen Triethoxy-Silanen dar.

Oligomere Siloxane sind auch unter der Bezeichnung Oligo-Siloxane, Silan-Oligomere und kurz-

kettige Polysiloxane bekannt. Dabei handelt es sich um vorpolymerisierte Silane. Sie zeichnen sich durch eine geringe Flüchtigkeit aus, wodurch sie auch bei ungünstigen Randbedingungen zum stabilen Polysiloxan, d. h. Silikonharz, reagieren. Ihre Eigenschaften sind mit denen der entsprechenden Silane vergleichbar. Sie finden erst seit einigen Jahren Anwendung, gelten jedoch als sehr erfolgsversprechend.

Polymere Siloxane wurden aus den oligomeren Siloxanen entwickelt. Wie der Name sagt, sind polymere Siloxane jedoch im Unterschied zu oligomeren Siloxanen längerkettige Moleküle. Folglich besitzen sie eine geringere Eindringtiefe als oligomere Siloxane. Die Zugabe eines Katalysators ist erforderlich, um eine Klebrigkeit über einen längeren Zeitraum zu verhindern.

3.2.5 Wirksamkeit von Hydrophobierungen

Die Wirksamkeit einer Hydrophobierung hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dazu zählen:

- die Eigenschaften des Hydrophobierungsmittels und des zu hydrophobierenden Untergrundes,
- die Applikationstechnik,
- die Vor- und Nachbehandlung des Untergrundes,
- die klimatischen Bedingungen vor und während der Applikation.

Ein Hydrophobierungsmittel muss gleichbleibende Produkteigenschaften besitzen. Aus diesem Grund darf es keine Schwankungen hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung, des Wirkstoffgehaltes und der Dichte aufweisen. Zur Erreichung hoher

Eigenschaften	n-Oktyl-	iso-Oktyl-	n-Pentyl-	n-Butyl-	iso-Butyl-	Propyl-
	triethoxysilan					
Länge Alkylkette						
Reaktionsgeschwindigkeit						
Eindringvermögen						
Griffigkeitsentwicklung						
Alkalibeständigkeit						

Tab. 4: Einfluss der Alkylkettenlänge auf die Eigenschaften des jeweiligen Alkyltriethoxysilans

Eindringtiefen sind hochviskose Hydrophobierungsmittel zu bevorzugen, da diese aufgrund ihrer Konsistenz und chemischen Zusammensetzung eine hohe Verweildauer auf der Oberfläche aufweisen. Außerdem muss das verwendete Hydrophobierungsmittel an den zu hydrophobierenden Untergrund angepasst sein. So ist bei der Applikation auf zementgebundene Materialien beispielsweise eine hohe Alkalibeständigkeit zwingend erforderlich.

Die Porosität und Porengrößenverteilung des zu hydrophobierenden Untergrundes hat maßgebenden Einfluss auf die kapillare Aufnahme des Hydrophobierungsmittels. Aber auch das Alter des Untergrundes kann die Wirksamkeit einer Hydrophobierung beeinflussen. Junge Betone besitzen eine hohe Alkalität und können durch Abreaktion des Wirkstoffes, d. h. des gebildeten Polysiloxans, die Lebensdauer einer Hydrophobierung negativ beeinflussen [4]. Weiterhin besitzen junge Betone einen sehr hohen Feuchtegehalt. Je höher der Feuchtegehalt des Untergrundes ist, umso stärker wird das Eindringen des Hydrophobierungsmittels behindert. Laut ZTV-Ing Teil 3 wird ein Feuchtegehalt von 2 bis 3 M.-% empfohlen, wobei ein Wert von 4 M.-% nicht überschritten werden sollte. Im Untergrund eingelagerte Salze scheinen die Wirksamkeit einer Hydrophobierung ebenfalls negativ zu beeinflussen. So zeigen Betone, die bereits vor Applikation eines Hydrophobierungsmittels chloridbelastet waren, eine schlechtere Frost-Tausalz-Beständigkeit [10].

Als optimale Technik für den Auftrag eines Hydrophobierungsmittels hat sich das Fluten erwiesen. Dabei wird mittels einer Schlitzdüse oder einer Airless-Pistole eine so große Menge an Hydrophobierungsmittel auf einen vertikalen Untergrund appliziert, dass es auf diesem als flüssiger Film abläuft. Dadurch können gute Eindringtiefen und hohe Wirkstoffaufnahmegrade erzielt werden. Bei Überkopf-Applikationen kann das Hydrophobierungsmittel nur mittels Pinsel oder Spritzpistole aufgebracht werden. Um dennoch eine zufriedenstellende Eindringtiefe und Wirkstoffaufnahmemenge erreichen zu können, sollte dieser Vorgang mehrfach erfolgen.

Der Untergrund ist vor Auftrag eines Hydrophobierungsmittels stets gründlich zu reinigen. So sollen lose Partikel, welche die Eingänge des Kapillargefüges ggf. verschließen, sowie oberflächenaktive Stoffe, wie Detergenzien, Dichtungsmittel und Schalöl, entfernt werden, um so den Eintrag des Hydrophobierungsmittels zu erhöhen.

Hydrophobierungsmittel sollten nicht direkt nach einer Schlechtwetterperiode appliziert werden. Aufgrund des daraus resultierenden hohen Feuchtegehaltes des Untergrundes wären lediglich geringe Eindringtiefen und Wirkstoffaufnahmemengen die Folge. Auch eine schlechte Witterung (z. B.: Regenereignis, extreme Temperaturen) während bzw. kurz nach der Applikation eines Hydrophobierungsmittels kann sich negativ auswirken, da stets eine möglichst lange Kontaktzeit von Baustoffoberfläche und Hydrophobierungsmittel zur vollständigen Reaktion erforderlich ist.

Die Wirksamkeit einer Hydrophobierung wird laut DIN EN 1504 Teil 2 [5] bzw. der nationalen Vornorm DIN V 18026 [9] durch Bestimmung der Eindringtiefe in Anlehnung an DIN EN 14630 [12] und der Wasseraufnahme sowie Alkalibeständigkeit nach DIN EN 13580 [13] ermittelt. Auch die Instandsetzungs-Richtlinie Rili-SIB des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton bezieht sich auf diese Wasseraufnahmepfung. Dabei werden unbehandelte und hydrophobierte Betonwürfel vollständig in entmineralisiertes Wasser sowie Kaliumhydroxidlösung getaucht und deren Massezunahme bestimmt.

Der Teil 3 der ZTV-ING [7], vormals ZTV-SIB 90 [14], beschreibt ein von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) entwickeltes Verfahren zur Überprüfung der Wirksamkeit und Qualität von Hydrophobierungen. Dieses Verfahren basiert auf der Messung des elektrolytischen Widerstandes im oberflächennahen Bereich des behandelten Untergrundes. Spezielle Messgeber werden auf der Oberfläche angebracht und geben unter definierten Bedingungen Elektrolytlösung an diese ab. Durchbricht die Elektrolytlösung die hydrophobierte Schicht, fließt ein Strom, welcher mit dem Messgerät (siehe Bild 6) erfasst wird. Mittels dieses Verfahrens können daher nur Größe und Anzahl der Fehlstellen im Bereich der Messfläche ermittelt werden. Aussagen zur Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels und der Wirkstoffmenge sind nicht möglich.

Bei der Ermittlung der Wirksamkeit von Hydrophobierungen findet häufig auch das als Wassereindringprüfer bekannte Karsten-Röhrchen Anwendung. Dabei handelt es sich um ein Glasrohr, das an einem Ende eine Art Glocke besitzt. Das Karsten-Röhrchen wird mit Plastilin auf dem zu prüfenden Untergrund befestigt und anschließend bis zu einer bestimmten Höhe mit Wasser (10 cm Wassersäule) gefüllt. Durch den daraus resultierenden



Bild 6: Hydrophobiermessgerät HDBMG-02 zur Beurteilung der Wirksamkeit/Qualität von Hydrophobierungen entsprechend ZVT-Ing, Teil 3, Abschnitt 4 [7]

Druck kann eine definierte Bestimmung der eingedrungenen Wassermenge je Zeiteinheit erfolgen. Fehlstellen in der Hydrophobierung können so detektiert werden. Aussagen zur Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels sind auch mit dieser Methode nicht möglich.

In einem Forschungsvorhaben des Institutes für Bauforschung der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (ibac) wurde die Eindringtiefe durch Tauchen der hydrophobierten Betonproben in ein Tuschebad ermittelt. Der hydrophobierte Bereich nahm dabei keine Tusche auf, während sich der restliche Bereich blau verfärbte [15].

3.2.6 Dauerhaftigkeit von Hydrophobierungen

Für heute nur noch selten eingesetzte Polysiloxanhydrophobierungen konnten auf Basis von Bauwerkserhebungen eine Funktionstüchtigkeit von über 10 Jahren nachgewiesen werden. Voraussetzung dafür war, dass der Beton zum Zeitpunkt der Applikation ein Alter von mindestens sechs Monaten aufwies. Bei Applikationen auf jüngeren Betonen wurde hingegen eine deutlich geringere Dauerhaftigkeit ermittelt. Dies kann zum einen auf Defizite in der Alkalibeständigkeit der eingesetzten Hydrophobierungsmittel und zum anderen auf den höheren Feuchtegehalt junger Betone zurückgeführt werden [10].

Ein gemeinsames vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) gefördertes Forschungsvorhaben zwischen dem ibac und der BAM [16] beschäftigte sich mit der Leis-

tungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Hydrophobierungen und Beschichtungen über einen Zeitraum von fünf Jahren. Dabei fanden ein wasser- und ein lösemittelbasierendes 20%iges Silan/Siloxan-Gemisch Anwendung. Ferner wurden reine Systeme, d. h. Produkte mit einem Wirkstoffgehalt von 100 %, in Form eines Silans und eines Silan/Siloxan-Gemisches appliziert. Neben einer Laborbewitterung gemäß ZTV-SIB 90 [14] erfolgte nach 14-tägiger Lagerung im Normklima eine Auslagerung der Prüfkörper an zwei unterschiedlichen Standorten. Duisburg wurde als industrieller Standort mit hohen Luftschadstoffen und Westerland auf Sylt als maritimer Standort mit hohem Feuchte- und Salzgehalt in der Luft gewählt. Abhängig von der Art des Hydrophobierungsmittels und der Saugfähigkeit des Betons wurden unterschiedliche Aufnahmemengen an Wirkstoff gemessen. Es konnte jedoch keine eindeutige Korrelation zwischen den variierenden Aufnahmemengen der Hydrophobierungsmittel und dem Masseverlust nach Frost-Tausalz-Beanspruchung beobachtet werden. Bereits nach einem Jahr Freibewitterung trat eine signifikante Verringerung der Frostausalzbeständigkeit bei drei der vier applizierten Verbindungen auf. Lediglich das reine Silanmaterial wies erst nach vier Jahren einen schlechteren Frost-Tausalz-Widerstand auf. Die Ergebnisse der Wasseraufnahmepfung zeigen, dass bei Hydrophobierungsmitteln mit geringen Wirkstoffgehalten deutliche Schwankungen in Abhängigkeit vom Saugverhalten des Untergrundes auftreten und die doppelte Auftragsmenge erforderlich ist, um gewünscht geringen Wasseraufnahmen zu erzielen. Außerdem wurde bei einem dieser Produkte ein Nachlassen der Wirksamkeit bei der freien und künstlichen Bewitterung beobachtet. Hochkonzentrierte Systeme sind hingegen sehr effektiv. Die Wasseraufnahmen sind sowohl am Anfang als auch nach fünfjähriger Bewitterung gering.

Im Rahmen eines vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung geförderten Forschungsvorhabens am ibac [15] wurden auf zwei Betongütern unterschiedliche marktübliche Hydrophobierungsmittel in zwei verschiedenen Dosierungen hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit untersucht. Diese waren auf Basis von Oktyltriethoxysilan, Alkylalkoxysilan und Silan-/Siloxankonzentrat bzw. Oktylsilan und wiesen unterschiedliche Wirkstoffgehalte auf. Die Versuche erfolgten an Betonprüfkörpern, die zum einen einer Freibewitterung auf dem Gelände des ibac und zum anderen einer künstlichen Beanspru-

chung unterlagen. Die künstliche Beanspruchung erfolgte mit der Versuchsanlage zur Entwicklung naturnaher Umweltsimulationskonzepte (VENUS). Das Ziel der Umweltsimulationsanlage besteht darin, den Prüfkörper durch eine reproduzierbare, komplexe Bewitterung unter natürlichen Bedingungen beschleunigt altern zu lassen. Wie Bild 7 zeigt, können dabei die Parameter Temperatur, Luftfeuchte, Nebel, Wind, Regen und Sonneneinstrahlung variiert und somit vielfältige natürliche Klimazyklen simuliert werden. Ferner kann der Prüfkörper mit den Schadgasen CO₂, SO₂ und NO_x beaufschlagt sowie ein unterschiedliches Außen- und Innenklima eingestellt werden.

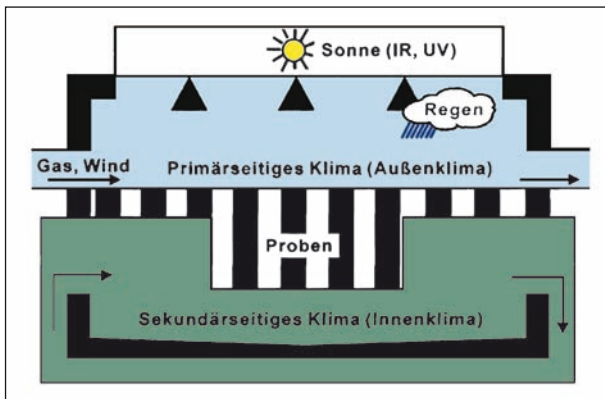


Bild 7: Schematischer Aufbau der Umweltsimulationsanlage VENUS [15]

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein typisch mitteleuropäisches Klima mit wenig extremen Wintern, feuchten Sommern und langen Feuchte- und Regenphasen realisiert. Die verwendeten Klimazyklen sind in den Bildern 8 und 9 dargestellt. Der in Bild 8 aufgezeigte 24-stündige Klimazyklus wurde dreimal wiederholt und soll im Zeitraffer die Jahreszeiten Frühling bis Herbst widerspiegeln.

Der 48-stündige Klimazyklus aus Bild 9 wurde zweimal wiederholt und soll nach einer kurzen Phase mit sommerlichen Temperaturen und Gewitterregensimulation winterliche Perioden simulieren.

Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit der applizierten Stoffe erfolgte mithilfe der ebenfalls am ibac entwickelten Multiring-Elektroden eine kontinuierliche Feuchtemessung. Multiring-Elektroden können direkt in den Beton einbetoniert werden. Diese Sonden sind nach erfolgter Kalibration in der Lage, tiefenabhängig den Elektrolytwiderstand im Beton als Maß für den Feuchtigkeitsgehalt im Porensystem des Betons zu messen. Daraus lassen sich, wie in Bild 10 dargestellt, Widerstandsprofile über die Tiefe erstellen. Parallel zu den Widerstandsmessungen wurde der Temperaturverlauf in den Prüfkörpern und der Simulationsanlage erfasst.

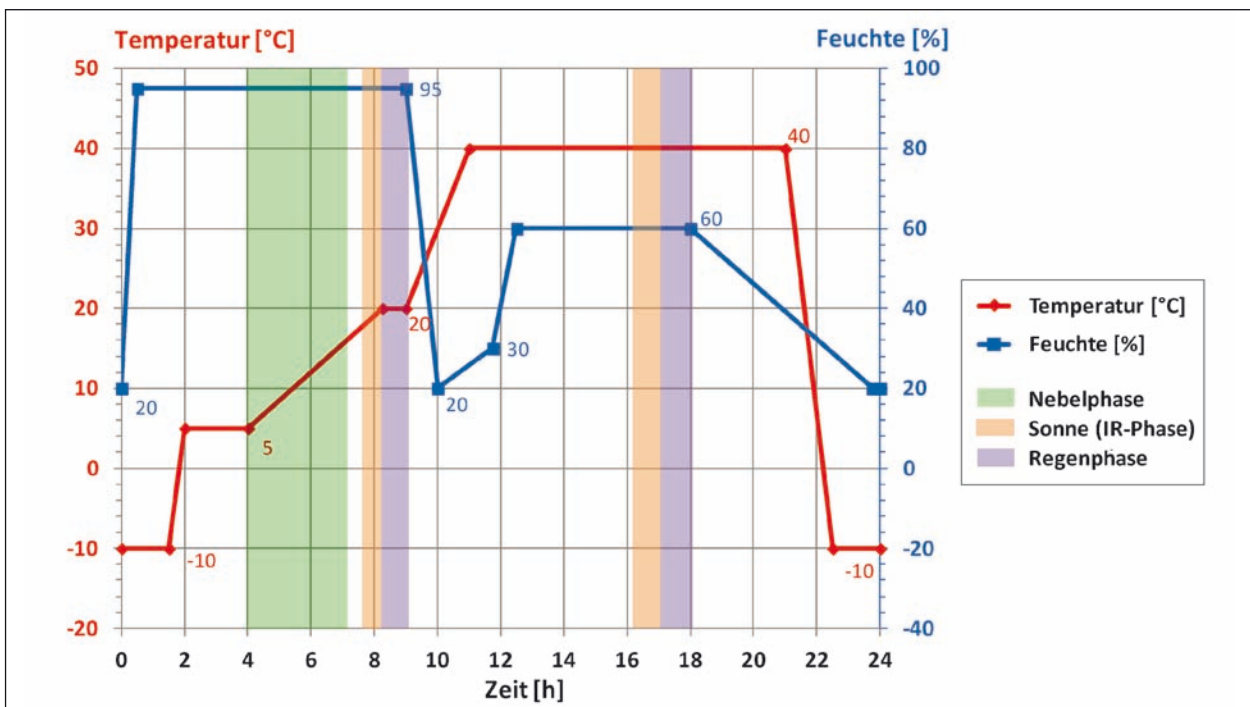


Bild 8: Simulation der Jahreszeiten Frühling bis Herbst mit dem Temperaturzyklus Beton-1 der Umweltsimulationsanlage VENUS in Anlehnung an [15]

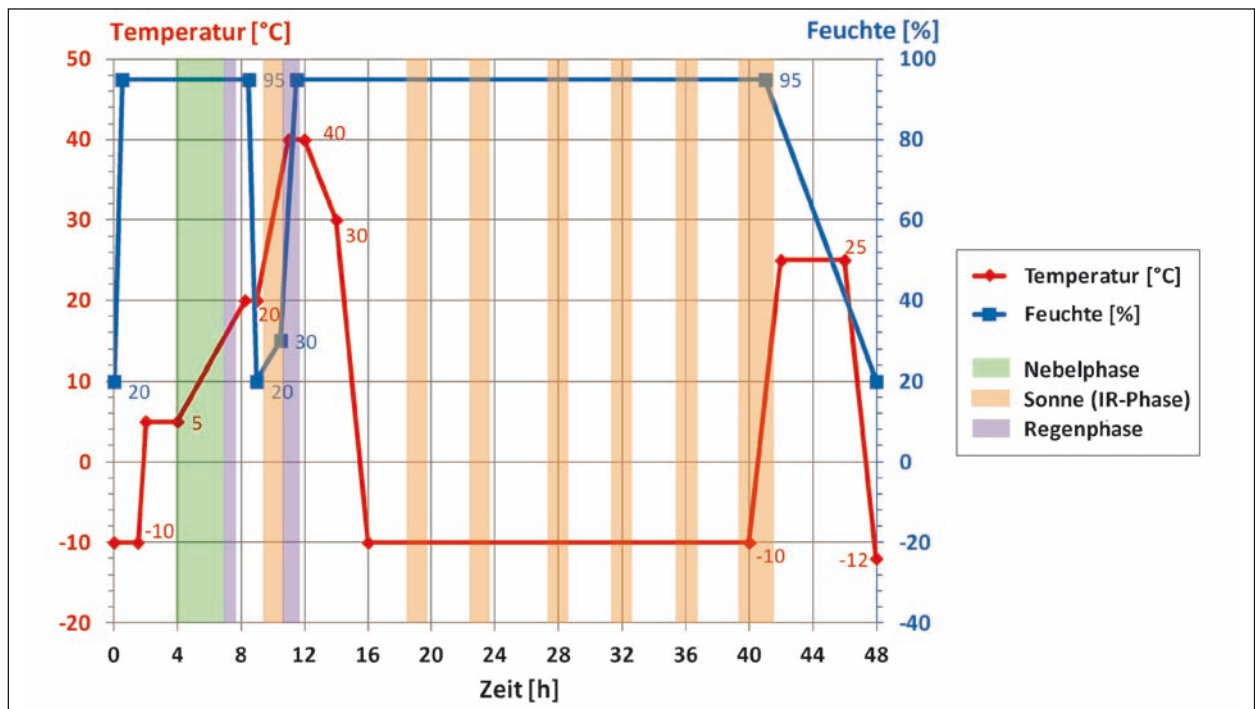


Bild 9: Simulation winterlicher Perioden mit dem Temperaturzyklus Beton-2 der Umweltsimulationsanlage VENUS in Anlehnung an [15]

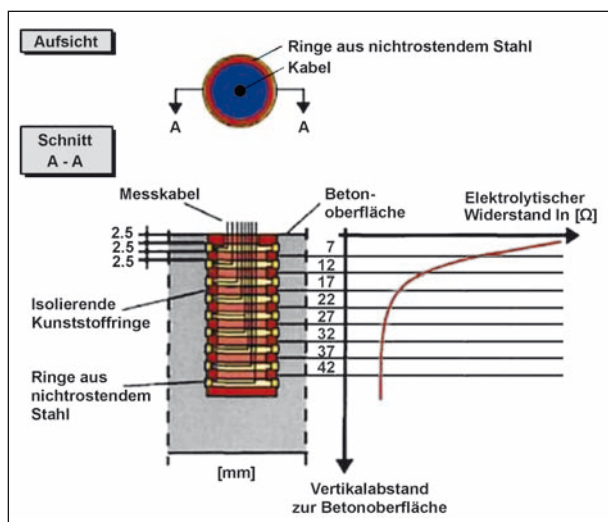


Bild 10: Schematischer Aufbau einer Multiring-Elektrode und ermitteltes Widerstandsprofil [15]

Die mit der Versuchsanlage nach einem reichlichen Jahr gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass eine Applikationsmenge von 100 g/m^2 nicht ausreicht, um eine dauerhafte und effektive Hydrophobierung sicherzustellen. Daher sollten Applikationsmengen von 200 g/m^2 und Wirkstoffgehalte von mindestens 40 % angestrebt werden. Je höher der Wirkstoffgehalt ist, umso dauerhafter verhält sich die applizierte Hydrophobierung. Bei optimalen Kombinationen können diese sogar Druckwasserhöhen von bis zu 105 cm standhalten. Anhand der Feuchtig-

keitsprofile wird deutlich, dass die freibewitterten Prüfkörper höhere Feuchtegehalte als die in der Venus gelagerten Prüfkörper aufwiesen.

Ziel eines Forschungsvorhabens der BAST [17] war es

- die Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit marktüblicher Hydrophobierungsmittel,
- den Einfluss des Feuchtezustandes der Betonrandzone auf die Qualität von Hydrophobierungen und
- die Güte der Feuchtemessung mittels elektrischer Widerstandsmessung

zu untersuchen. Es kamen hierzu 16 Hydrophobierungsmittel zum Einsatz. Dabei handelte es sich um klarflüssige, emulgierte und pastöse Produkte. Nach Applikation dieser Verbindungen auf Betonplatten mit einer Feuchte zwischen 2 M.-% und 5 M.-% lagerten diese für eine Versuchsdauer von vier Jahren auf dem BAST-Gelände im Freien. In den Wintermonaten wurden die Prüfkörper regelmäßig mit Tausalzlösung beaufschlagt. 14 Tage nach Applikation der Hydrophobierungen sowie jeweils im April und September bzw. Oktober erfolgten Messungen des elektrolytischen Widerstandes entsprechend ZTV-ING Teil 3 [7] zur Beurteilung der Hydrophobierungsqualität. Außerdem wurden

stets die entsprechenden Betonfeuchten bestimmt. Dies erfolgte anstelle der laut ZTV-ING Teil 3 [7] geforderten Calciumcarbid-Methode (CM-Gerät) mit einem elektrischen Feuchtemessgerät, um eine zerstörungsfreie Messung zu ermöglichen.

Die Untersuchungen zeigen, dass die heute eingesetzten Hydrophobierungsmittel eine hohe Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit gegen eindringendes Wasser und darin enthaltene Chloride aufweisen. Basierend auf den Ergebnissen kann von einer höheren Dauerhaftigkeit als bei früheren Produkten ausgegangen werden. Pastöse Produkte besitzen eine besonders hohe Wirksamkeit. Aufgrund ihrer erhöhten Viskosität eignen sie sich besonders gut für geneigte und senkrechte Flächen. Durch die einhergehende verlängerte Kontaktzeit kann eine erhöhte Wirkstoffmenge in den Beton eindringen und reagieren. Hohe Qualitäten lassen sich jedoch auch mit klarflüssigen und emulgierten Hydrophobierungsmitteln erzielen. Voraussetzung hierfür ist ein hoher Wirkstoffgehalt und eine Applikation auf waagerechten Flächen, wobei eine Überkopf-Applikation nicht realisierbar ist. Die erwartete Abhängigkeit der Hydrophobierungsqualität von der Betonfeuchte bei Applikation des Hydrophobierungsmittels bestätigte sich. So zeigte sich, dass sich mit zunehmendem Feuchtegehalt der Betonrandzone die Wirksamkeit des Hydrophobierungsmittels vermindert.

Es wird empfohlen, Hydrophobierungen nur bei Betonfeuchten von maximal 3 M.-% zu applizieren und die Messung des elektrolytischen Widerstands entsprechend ZTV-ING Teil 3 [7] lediglich bei

Betonfeuchten zwischen 1,5 M.-% und 3 M.-% durchzuführen.

3.2.7 Auswirkungen der Hydrophobierung auf die AKR

Wie bereits beschrieben, verfolgt die Applikation von Hydrophobierungen auf den Beton das Ziel, den Eintrag von Wasser in den Beton zu verringern bzw. zu vermeiden, während Wasserdampf in den Beton gelangen und auch entweichen kann. Wie Bild 11 zeigt, kann durch Hydrophobierungen nicht nur das weitere Eindringen von Wasser verhindert bzw. unterbunden werden, sondern in den Trocknungsphasen auch bereits vorhandene Feuchte aus dem Beton beschleunigt entweichen. Verringert sich die Betonfeuchte, steht weniger Wasser als Reaktionspartner für den Ablauf einer schädigenden AKR zur Verfügung. Bei Betonfahrbahndecken, die mit Tausalzen beaufschlagt werden, kann außerdem das Eindringen von Tausalzen ver- bzw. behindert werden. Demzufolge steht ein weiterer notwendiger Reaktionspartner für die AKR in geringerer Menge zur Verfügung.

BÉRUBÉ et al. [19] führte eine Laborstudie durch, um die Effektivität verschiedener Oberflächenbehandlungen hinsichtlich der Verringerung/Vermeidung einer AKR zu erforschen. Um eine AKR zu provozieren, kam ein Beton mit einem hoch reaktiven, d. h. alkaliempfindlichem Kalkstein und einem alkalihaltigen Zement zur Anwendung. Die folgenden fünf Wirkstoffe wurden auf die Betonoberflächen appliziert:

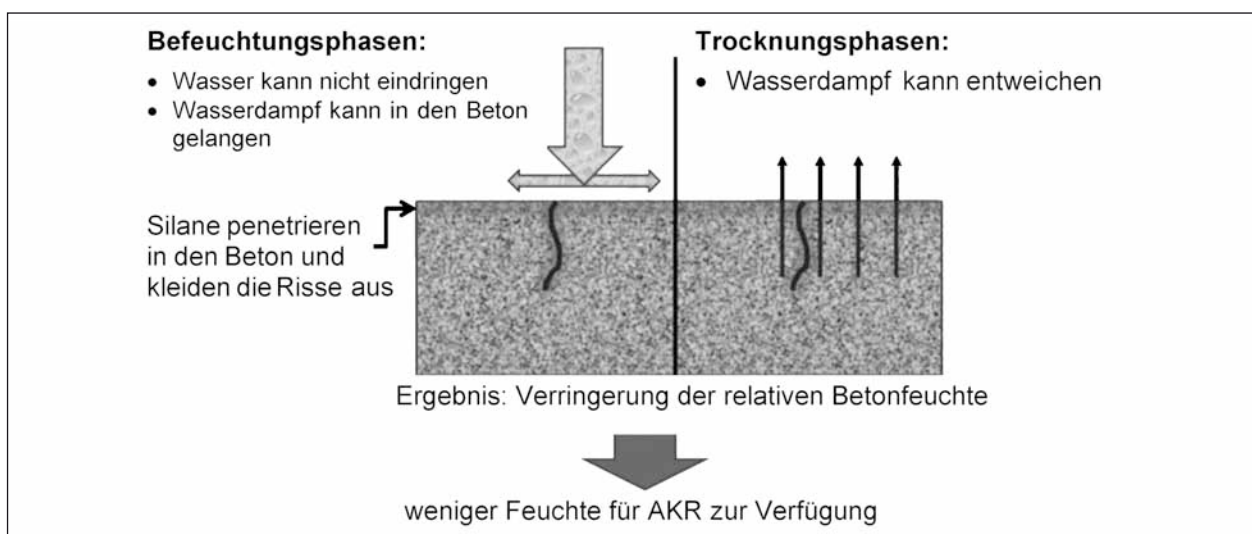


Bild 11: Mechanismus von Hydrophobierungen am Beispiel von Silan auf den Feuchtzustand im Beton und folglich den Ablauf einer AKR [18]

- Silan,
- Oligosiloxan,
- Polysiloxan,
- Epoxidharz,
- Leinölfirnis.

Anschließend wurden die behandelten Prüfkörper mindestens ein Jahr fünf verschiedenen, in Tabelle 5 dargestellten Beanspruchungszyklen, unterzogen. Diese setzten sich aus Feucht- und Trocknungsphasen, Frost-Tau-Lagerungen sowie Leitungs- bzw. Salzwasserbeaufschlagungen zusammen. Der Belastungszyklus C5 stellte hierbei die härteste Belastung dar.

Die geringste Netzrissbildung konnte bei Applikation von Silan und Siloxan beobachtet werden. Auch Leinölfirnis verringerte die Entstehung von Netzrissen, jedoch weniger effektiv. Bei den mit Epoxidharz beschichteten Prüfkörpern konnte eine Netzrissbildung nicht vermieden werden. Die Silan/Siloxan-Prüfkörper wiesen nach zwei Jahren eine Verringerung der Masse um 1 M.-% auf. Im Gegensatz dazu nahm die Masse bei den mit Epoxidharz und Leinölfirnis behandelten Prüfkörpern zu. Durch Applikation von Silan und Siloxan konnten die Dehnungen gestoppt bzw. sogar ein leichtes Schwinden initiiert werden.

Zur Validierung der Laborergebnisse [19] applizierte BÉRUBÉ et al. im Jahre 1991 dieselben Hydrophobierungsmittel (Silan, Oligosiloxan und Polysiloxan) sowie ein weiteres Produkt auf Silanbasis auf unterschiedlich stark AKR-geschädigte Abschnitte von Betonschutzwänden in Montmorency (Kanada) und Sainte-Foy (Quebec, Kanada) [20]. Die im

Jahre 1970 errichteten Betonschutzwände in Montmorency wiesen zum Zeitpunkt der Applikation eine starke Netzrissbildung infolge AKR auf. Im Gegensatz dazu zeigten die Abschnitte in Sainte-Foy aus dem Jahre 1982 nur eine moderate Schädigung (siehe Bild 12). Alle Abschnitte waren einer natürlichen Bewitterung, d. h. Feucht-, Trocken- und Frost-Tau-Phase sowie in den Wintermonaten einer Tausalzbeaufschlagung ausgesetzt. Über einen Zeitraum von insgesamt 10 Jahren wurden die äußere Beschaffenheit, der Feuchtegehalt mittels Feuchteausgleichsverfahren und die Dehnung periodisch ermittelt. Bereits einen Monat nach Applikation konnte beim Beton mit dem bereits im Labor getesteten Silan unabhängig vom ursprünglichen Schädigungsgrad eine deutlich verringerte Netzrissbildung beobachtet werden. Ferner machte dieser Beton einen trockenen Eindruck, während die Betone mit Oligo- und Polysiloxan noch feucht erschienen. Der Beton, der mit dem anderen Silan



Bild 12: Silanbehandelte (links) und unbehandelte (rechts) Oberfläche von Betonschutzwänden in Sainte-Foy (Quebec, Kanada) [20]

Zyklus	Feuchtlagerung bei 38 °C und > 95 % rel. LF ¹	Trocknung bei 38 °C und 30 % rel. LF	Immersion bei 38 °C in		Frost-Tau-Zyklen ⁴
			Leitungswasser	Salzwasser	
C1	14 d	-	-	-	-
C2	-	-	-	14 d ²	-
C3	10 d	4 d	30 min	-	-
C4	7 d	4 d	30 min	-	3 d
C5	7 d	4 d	-	30 min ³	3 d

¹ Lagerung der Zylinder über Wasser in versiegelten Plastikeimern
² Eintauchen in 6%iger NaCl-Lösung
³ Eintauchen in 3%iger NaCl-Lösung
⁴ Ein Zyklus pro Tag: 16 Stunden Frosten, 8 Stunden Tauen bei +23 °C bis -18 °C

Tab. 5: Beschreibung der Zyklen für die Beanspruchung von Betonzylindern

behandelt wurde, zeigte ein vergleichbares Erscheinungsbild wie der unbehandelte Beton. Auch nach 10 Jahren wies der Beton mit dem im Labor eingesetzten Silan die geringste Rissbildung auf. Die Siloxane zeigten auch eine gute Wirkung, während beim zusätzlich getesteten Silan kein Unterschied zum unbehandelten Beton festgestellt werden konnte. Die stark unterschiedliche Wirkung der untersuchten Silane kann BÉRUBÉ et al. [20] nicht erklären. Er empfiehlt jedoch, ein Hydrophobierungsmittel nicht nur anhand seiner Zusammensetzung, sondern auch auf Basis seines Adsorptions- und Verdunstungsverhaltens auszuwählen.

Beim mit Silan behandelten Beton wurden zusätzlich zu den Dehnungen die inneren Betonfeuchten ermittelt. Prinzipiell verringerten sich die Betonfeuchten bei den mit Silan behandelten Betonen deutlich. Von 1994 bis 1997 nahm ihr Feuchtegehalt im Mittel um 12 bis 13 M.-% ab. Eine oberflächliche Behandlung mit dem im Labor getesteten Silan zeigte an beiden Standorten den größten positiven Effekt auf die ermittelten Dehnungen. Sowohl beim stark als auch moderat geschädigten Beton konnten die Dehnungen gestoppt und sogar ein geringer Schwund beobachtet werden. Die applizierten Oligo- und Polysiloxane konnten beim moderat geschädigten Beton in Sainte-Foy eine Kontraktion des Betons bewirken, während beide Wirkstoffe beim stark vorgeschädigten Beton in Montmorency die Dehnungen zwar verringerten, dies erfolgte jedoch nicht in vergleichbarer Intensität zum Silan.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Verkehrsministeriums von Texas wurden seit 2006 an der University of Texas verschiedene Beschichtungen und Hydrophobierungen mit dem Ziel der Verminderung einer AKR und/oder sekundären Ettringitbildung auf Betonkonstruktionen getestet (siehe Bild 13). WEHRLE [21] beschreibt zwei Auslagerungsstandorte in Austin (Texas, USA) und Houston (Texas, USA). Dabei wurden Betonblöcke 710 mm x 380 mm x 380 mm getestet, die entsprechend ASTM C 1293 [22] aus einem alkalihaltigen Zement (1,25 M.-% Na₂O-Äquivalent) und einem hochreaktiven Sand in Kombination mit einem unreaktiven Kalkstein bzw. einem unreaktiven Sand in Kombination mit einem moderat reaktiven siliziumhaltigen Flussskies hergestellt wurden.

Die verschiedenen Oberflächenschutzbehandlungen erfolgten erst, nachdem die Betonblöcke eine Dehnung von 0,1 % besaßen. Zu diesem Zeitpunkt

wiesen sie bereits eine deutliche, aber nicht ernsthafte, AKR-typische Netzrissbildung auf. Neben verschiedenen Beschichtungen wurden die folgenden Hydrophobierungsmittel auf die Betonoberfläche aufgetragen:

- 40%iges wasserbasierendes Silan,
- 40%iges lösemittelbasierendes Silan,
- 80%ige wasserbasierende Silan-Creme und Silikonharzanstrich,
- 100%iges lösemittelbasierendes Silan.

Die beste Wirkung, d. h. die stärkste Dehnungsabnahme, konnte durch Auftrag des 40%igen lösemittelbasierenden Silans und der 80%igen wasserbasierenden Silan-Creme mit Silikonharzanstrich beobachtet werden. Der positive Effekt der Hydrophobierungen zeigte sich trotz generell höherer Dehnungen in Houston (Texas). Gründe dafür könnten in der stärker variierenden Luftfeuchte an diesem Standort liegen. Erste Ergebnisse zeigen, dass eine kontinuierlich wiederholte Applikation eines wasserbasierenden Silans die Wirkung einer Hydrophobierung nicht verbessert. Im Gegensatz zu den Hydrophobierungsmitteln konnte bei den getesteten Beschichtungen, wie beispielsweise einer Epoxidharzbeschichtung, keine Dehnungsabnahme gemessen werden. Eine verringerte Betonfeuchte vor Applikation führt zu einer verminderten Dehnung infolge AKR.

GIANNINI et al. [18] führte mit Unterstützung der amerikanischen Bundesstraßenverwaltung und dem Verkehrsministerium von Texas Untersuchungen an bestehenden, AKR-geschädigten Betonkonstruktionen durch. Mit der Applikation von Hydrophobierungen verfolgte er das Ziel, den Ablauf einer schädigenden AKR zu schwächen. Im Bundesstaat



Bild 13: Auslagerungsstandort in Austin Texas von Betonblöcken 710 mm x 380 mm x 380 mm mit verschiedenen Betonzusammensetzungen und Oberflächenschutzbehandlungen

Massachusetts wurden drei verschiedene Silane auf Betonschutzwände aufgebracht. Dabei handelte es sich um ein 20%iges wasserbasierendes Silan und ein 20- sowie 40%iges Isopropyl-alkoholbasierendes Silan. Bei diesen drei Silanen konnte im Laufe einer zweijährigen Versuchsdauer eine Verringerung der Dehnungen und relativen Betonfeuchten beobachtet werden, wobei die Isopropyl-alkoholbasierenden Typen die beste Wirkung zeigten. Bei einem weiteren Versuchsfeld im Bundesstaat Texas konnte hingegen durch den Auftrag eines 40%igen alkoholbasierenden Silanes und eines Silan/Siloxan-Gemischs auf Betonstützen keine verringerten Dehnungswerte gemessen werden. Prinzipiell gestalteten sich die Feuchtemessungen schwierig. Aufbauend auf den Feldversuchen legte GIANNINI et al. auf dem Gelände der University of Texas ein Versuchsfeld an, um die Effektivität verschiedener AKR-reduzierender Methoden kontrollierter untersuchen zu können. Dabei kamen auf unbewehrten Betonplatten, bewehrten Brückenfahrbahnen und Stützen (siehe Bild 14) neben Hydrophobierungen auch wasserdichte Membranen und Asphaltsschichten zum Einsatz. Es wurden hierbei zwei verschiedene Betone mit einem alkalihaltigen Zement bei Variation der Gesteinskörnung (zum einen ein hochreaktiver Sand und zum anderen ein moderat bis hoch reaktiver Kies) verbaut. Als Hy-

drophobierung wurden wasserbasierte Silane mit einem Wirkstoffgehalt von 40 % und alternativ ein 100%iges Isopropyl-alkoholbasiertes Silan auf die Betone appliziert, nachdem diese Dehnungen und Rissbildungen zeigten. Beim Beton mit dem reaktiven Sand konnte beim 40%igen Silan nur ein minimaler und beim 100%igen nur ein leicht positiver Effekt auf die Dehnungen beobachtet werden. Hingegen verringerten sich die Dehnungen beim Beton mit dem hochreaktiven Kies durch Applikation beider Silane signifikant. Wasserdichte Membranen und Asphaltsschichten eigneten sich hingegen nicht, um eine AKR abzuschwächen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Silane sich etwas besser als Siloxane eignen, um eine AKR zu verringern. Höherkonzentrierte und/oder lösemittel- bzw. alkoholbasierende Silane zeigen dabei die beste Wirkung. Um ein optimales Verhalten zu erzielen, sollte neben der chemischen Zusammensetzung auch auf das Adsorptions- und Verdunstungsverhalten des jeweiligen Silans geachtet werden. Leinölfirnis kann die Dehnungen infolge AKR ebenfalls reduzieren, jedoch in geringerer Intensität als Silane und Siloxane. Beschichtungen, wie beispielsweise Reaktionsharze, und Asphaltsschichten sollten nicht gewählt werden, da solche Applikationen eine AKR nicht verringern.



Bild 14: Versuchsfeld in Austin (Texas) zur Überprüfung der Wirksamkeit von Hydrophobierungen an unbewehrten Betonplatten (unten links), bewehrten Brückenfahrbahnen (oben links) und Stützen (rechts)

3.2.8 Anforderungen an Hydrophobierungen und marktübliche Hydrophobierungen für Betonfahrbahnen

Laut dem Merkblatt für die Erhaltung von Betonstraßen M BEB aus dem Jahre 1985 [23] sollte in der Vergangenheit durch Applikation von lösemittelhaltigem Leinöl, Epoxidharz, Polyurethanharz oder Alkyl-Alkoxy-Silan die Frost-Tausalz-Beständigkeit von Betonfahrbahndecken verbessert werden. Dies bezog sich besonders auf den im Spätherbst hergestellten Beton oder Beton mit mangelhaftem Luftporensystem. Ziel dieser Applikationen war es, die Abwitterung infolge einer Frost-Tausalz-Belastung zu verringern, ohne die Griffigkeit der Fahrbahndecke signifikant zu reduzieren. Die Durchführung solcher Oberflächenbehandlungen sollte nur bei trockenem Wetter bzw. nach Regen oder Taubildung erst dann erfolgen, wenn die Betonoberfläche sichtbar trocken ist. Die Temperatur der Betonoberfläche sollte einen Wert von 5 °C nicht unterschreiten. Das M-BEB [23] wies darauf hin, dass die positive Wirkung der genannten Oberflächenbehandlungen zeitlich begrenzt ist und vom Abrieb infolge des herrschenden Verkehrs abhängt.

Im aktuellen Merkblatt für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen aus Beton M BEB von 2009 [24] wird beschrieben, dass oberflächliche Behandlungen von Betonfahrbahndecken aktuell kaum noch Anwendung finden. Als Grund für diese Entwicklung wird angeführt, dass in der Forschung durch den Auftrag von Hydrophobierungsmitteln keine langzeitige Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes beobachtet werden konnte. Vielmehr stellte man bei zu früher Applikation, d. h. bei Unterschreitung des geforderten Mindestalters von 14 Tagen, eine Zunahme der Abwitterungen fest.

In den letzten Jahren sind Hydrophobierungen für Betonfahrbahndecken erneut in den Fokus gerückt. Gründe dafür sind, wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, in der Notwendigkeit von Erhaltungsmaßnahmen aufgrund einer zunehmenden Schädigung von Betonfahrbahndecken infolge AKR zu sehen. Mit dem Ziel, die an der Schädigung beteiligte AKR zu unterdrücken, sollen oberflächliche Behandlungen der Fahrbahndecke erfolgen. Dadurch soll das weitere Eindringen von Wasser und Tausalzen behindert und der weitere Ablauf einer schädigenden AKR möglichst unterbunden bzw. stark vermindert werden.

Anforderungen an Hydrophobierungen für Betonfahrbahnen

Hydrophobierungen, die auf Fahrbahndecken aus Beton appliziert werden sollen, müssen aufgrund der Alkalität des Betons eine hohe Alkalibeständigkeit aufweisen. Die Prüfung soll gemäß DIN EN 13580 [13] erfolgen.

Zudem muss das applizierte Hydrophobierungsmittel aufgrund der vorherrschenden klimatischen Gegebenheiten eine ausreichende Frostbeständigkeit besitzen. DIN EN 13581 [25] regelt die entsprechende Prüfung. Dabei wird der Masseverlust nach einer Frost-Tausalz-Wechselbeanspruchung ermittelt.

Um eine optimale Verkehrssicherheit auch nach Applikation von Hydrophobierungen zu gewährleisten, muss nach Auftrag des jeweiligen Mittels eine ausreichende Griffigkeit der Betonfahrbahn vorliegen. Laut dem Merkblatt M BGriff [26] wird unter Griffigkeit die Wirkung von Textur und stofflicher Beschaffenheit einer Fahrbahnoberfläche auf den Reibungswiderstand zwischen Fahrzeugreifen und Fahrbahn unter festgelegten Randbedingungen verstanden. Die Griffigkeit kann mittels schnellfahrender und stationärer Messverfahren ermittelt werden. Das stationäre Messsystem setzt sich aus dem Skid-Resistance-Tester (SRT-Pendel) und dem Ausflussmesser nach Moore (AM) zusammen. Der in DIN EN 13036-4 [27] beschriebene Pendeltest liefert den SRT-Wert, der ein Maß für die Mikrorauheit der Betonoberfläche darstellt. Der laut DIN EN 13036-3 [28] ermittelte AM-Wert ist hingegen ein Indiz für das Drainagevermögen und ist ein Maß für die Makrorauheit einer Fahrbahnoberfläche. Die Anforderungen an den SRT- und AM-Wert sind laut dem Merkblatt M BGriff [26] in Tabelle 6 dargestellt. Diese Grenzwerte haben jedoch nur empfehlenden Charakter.

Entsprechend den technischen Gegebenheiten bei der großflächigen Hydrophobierung von Fahrbahndecken auf Autobahnen ist es für eine sinnvolle Ap-

Bedeutung	Messverfahren	
	SRT-Wert	AM [s]
Zielwert	65	30
Warnwert	55	30
Schwellenwert	50	120

Tab. 6: Einordnung der Griffigkeit basierend auf SRT- und AM-Wert entsprechend M BGriff [26]

plikation erforderlich, dass die Hydrophobierungsmittel nicht in dünnflüssiger, sondern in Form dispergierter Systeme (Emulsionen) als höher viskose Pasten oder Cremes, zur Verfügung stehen und aufgebracht werden können. Hierdurch soll nach Applikation des Hydrophobierungsmittels ein Verlaufen auf der Oberfläche unterdrückt und durch einen möglichst langen Kontakt auf der Betonoberfläche eine tiefe Penetration in den Beton ermöglicht werden. Diese Pasten sollen dabei aus Gründen des Arbeitsschutzes frei von organischen Lösungsmitteln sein. Zusammenfassend gelten folgende Anforderungen an Hydrophobierungen, wenn diese auf Betonfahrbahndecken Anwendung finden sollen:

- Alkalibeständigkeit,
- Frostbeständigkeit,
- geringe und nur kurzzeitige Beeinträchtigung der Griffbarkeit,
- hohe Eindringtiefe und
- Lösemittelfreiheit sowie
- chemische Verträglichkeit mit Fugenprofilen.

Marktübliche Hydrophobierungen für Betonfahrbahnen

Für die Hydrophobierung von Betonoberflächen hat sich die Applikation von Silanen, Siloxanen und alternativ eine Kombination dieser beiden Materialien als geeignet erwiesen. Die kommerziell verfügbaren Produkte basieren in der Regel auf Alkyltriethoxysilan. Die BAST hat Oberflächenschutzsysteme OS-A, d. h. Hydrophobierungen, bei denen es sich um nach ZTV-ING, Teil 3, Abschnitt 4 [7] zertifizierte Stoffe bzw. Stoffsysteme handelt, für die Anwendung an Bauwerken und Bauteilen der Bundesverkehrswege in einer Liste zusammengefasst (Tabelle 7). Wie bereits in Kapitel 3.2.4 erwähnt, wird anhand der in Tabelle 7 aufgelisteten Wirkstoffe deutlich, dass meist Produkte auf Basis von iso-Oktyltriethoxysilan (i-OTS) als Oberflächenschutzsysteme für Bauwerke und Bauteile im Verkehrswegebau Anwendung finden. Alternativ kommen auch Systeme mit den Wirkstoffen n-Oktyltriethoxysilan (n-OTS) oder Siloxan zum Einsatz.

Im Kontext der AKR auf Betonfahrbahndecken liegen national erste Erfahrungen mit „Baysilone WA“ und „Baysilone WA65“ vor, wobei das zuletzt aufgeführte Produkt nicht in der von der BAST-

Produkt	Wirkstoff		Bemerkungen
	Art	Gehalt	
SILICO-TEC OS-A Emulsion P	n. a.	n. a.	
SILICO-TEC OS-A Emulsion	n. a.	n. a.	
SILICO-TEC OS-A Creme	Alkoxysilan n-Oktyltriethoxysilan + Siloxan	65 % n. a.	
Disboxan Impr.-Creme	iso-Oktyltriethoxysilan	> 50 %	
Protectosil WS 405	n. a.	20 %	
Protectosil WS 700P	Alkoxysilan + Siloxan?	70 %	
Protectosil CIT	n. a.	n. a.	
Protectosil BHN	Isobutyltriethoxysilan	n. a.	Reinsilan
Juralith Hydrophobierung H	n. a.	n. a.	lösemittelhaltig
SAKRET-Hydrophobierung H	n. a.	n. a.	lösemittelhaltig
Emcephob WM	Polysiloxan	20-25 %	
Baysilone WA	n. a.	n. a.	
Baysilone WA plus	wahrscheinlich n-Oktyltriethoxysilan	n. a.	
Baysilone 3803	n. a.	n. a.	

Legende: n. a. nicht ausgewiesen

Tab. 7: Zusammenstellung zertifizierter Stoffe und Stoffsysteme nach ZTV-ING, Teil 3, Abschnitt 4 (SIB) – Oberflächenschutzsysteme (OS-A) – für die Anwendung an Bauwerken und Bauteilen der Bundesverkehrswege, Stand 01.09.2011 [www.bast.de]

Produkt	Wirkstoff		Bemerkungen
	Art	Gehalt	
NORTECH Impägnierung	Alkoxysilan + Siloxan	n. a.	rein
Koratect C1	iso-Oktyltriethoxysilan	55-70 %	
Koratect SL	iso-Oktyltriethoxysilan	n. a.	Reinsilan
O2A Pagel	iso-Oktyltriethoxysilan mit Siloxan	80 % ?	
Funcosil IC	iso-Oktyltriethoxysilan mit amino-funktionellem Polydimethylsiloxan	> 50 % Anteil n. a.	
Rubberstein B1701	Alkoxysilan + Siloxan	n. a.	Reinsilan
Rubberstein C	iso-Oktyltriethoxysilan	n. a.	
Sakret SH	iso-Oktyltriethoxysilan mit Polydimethylsiloxan	< 75 % < 20 %	
MBC-HM 306	n. a.	n. a.	vom Markt
Sikagard 706 Thixo	iso-Oktyltriethoxysilan	50-75 %	
Sikagard 740 W	Alkoxysilan + Siloxan	n. a.	
StoCryl HP 100	n. a.	n. a.	lösemittelhaltig
StoCryl HC 100	iso-Oktyltriethoxysilan	n. a.	
StoCryl HG 100	n. a.	n. a.	lösemittelhaltig
AQUAPROTECT	Alkoxysilan + Siloxan	80 %	
AQUAPROTECT L	iso-Oktyltriethoxysilan	n. a.	Reinsilan

Legende: n. a. nicht ausgewiesen

Tab. 7: Fortsetzung

veröffentlichten Liste erfasst ist. Bei beiden Baysilone-Produkten handelt es sich um hoch viskose Hydrophobierungsemulsionen. Sie beinhalten als Wirkstoffkomponente das n-Oktyltriethoxysilan (n-OTS) und stellen somit Vertreter der langsam reagierenden Silane dar. Neben dem Silan enthalten beide Produkte einen geringen Anteil an Siloxan (≤ 5 M.-%). Der einzige Unterschied dieser beiden Produkte besteht im Anteil an Silan. Während „Baysilone WA65“ dem Namen entsprechend einen Silan-Anteil von ca. 65 M.-% besitzt, weist „Baysilone WA“ mit ca. 60 M.-% einen etwas geringeren Wirkstoffgehalt auf. Mit „Baysilone WA“ liegen Erfahrungen auf der Bundesautobahn A 9 über einen Zeitraum von 2004 bis 2013 vor. Es konnte eine optimale Eindringtiefe in die Betonfahrbahndecke, eine frühzeitige Griffigkeit und eine gute Wirksamkeit beobachtet werden. „Baysilone WA65“ fand im Jahr 2008 auf der BAB A 14 Anwendung. Auch in diesem Fall konnte eine gute Wirksamkeit bestätigt werden.

4 Laboruntersuchungen

4.1 Vorbemerkungen

Aufgrund der uneinheitlichen internationalen Bewertung des Einflusses einer Hydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess und dem Fehlen grundlegender wissenschaftlicher Untersuchungen auf nationaler Ebene wurden im Rahmen dieses Projektes umfangreiche Laboruntersuchungen durchgeführt. Diese reichten von der Optimierung der Applikation des Hydrophobierungsmittels über die Bewertung der Dauerhaftigkeit der hydrophobierten Betonrandzone bis zur Analyse der Auswirkungen der Oberflächenhydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess. Dabei galt es, neben den bisher bei AKR-geschädigten Abschnitten im bundesdeutschen Autobahnnetz eingesetzten Hydrophobierungsmitteln WA und WA65 auch alternative Produkte in das Untersuchungsprogramm einzubeziehen. Weiterhin sollten vergleichend Bestands- und Laborbetone Gegenstand der Untersuchungen sein.

4.2 Bereitstellung und Charakterisierung der Betone

4.2.1 Ausbaubeton

Entnahme und Konfektionierung

Die Basis für die Auswahl des Streckenabschnittes zur Gewinnung des Bestandsbetons für die Laboruntersuchungen bildeten die „Empfehlungen für die Schadensdiagnose und die Bauliche Erhaltung von AKR geschädigten Fahrbahndecken aus Beton“ [48]. Diese sehen vor, dass eine Hydrophobierung als Erhaltungsmaßnahme nur bei Betonfahrbahndecken mit einer geringen AKR-Schädigung (Schadenskategorie I) vorzusehen ist. Vor diesem Hintergrund wurden im Rahmen dieses Projektes zwei Betonfahrbahnplatten auf dem BAB-Abschnitt der A 14 mit der Schadenskategorie 0-I aus dem ersten Fahrstreifen entnommen. Der Entnahmebereich befindet sich bei Autobahnkilometer 122,0 in Fahrtrichtung Halle/Saale. Die Fahrbahndecke mit Besenstrichtexturierung wurde hier einschichtig mit einer Dicke von 30 cm auf einer Schottertragschicht ausgebildet. Die Herstellung erfolgte zweilagig im November 2000. Die Entnahme der Platten mit den Nummern 1954 und 1955 erfolgte am 17.09.2010 in Zusammenarbeit mit dem Landesbaubetrieb Sachsen-Anhalt. Zu diesem Zeitpunkt war im Bereich der Querscheifuge eine leichte Dunkelfärbung erkennbar. Einen optischen Eindruck vom Zustand der Fahrbahndecke vor der Entnahme vermittelt Bild 15.

Das Bild 16 zeigt den Schnittplan für die Plattentnahme. Es ist erkennbar, dass aus der Betonfahrbahnplatte Nr. 1954 zwei großformatige Plattenaus-

schnitte und aus der Betonfahrbahnplatte Nr. 1955 zahlreiche kleinformatige Segmente herausge-

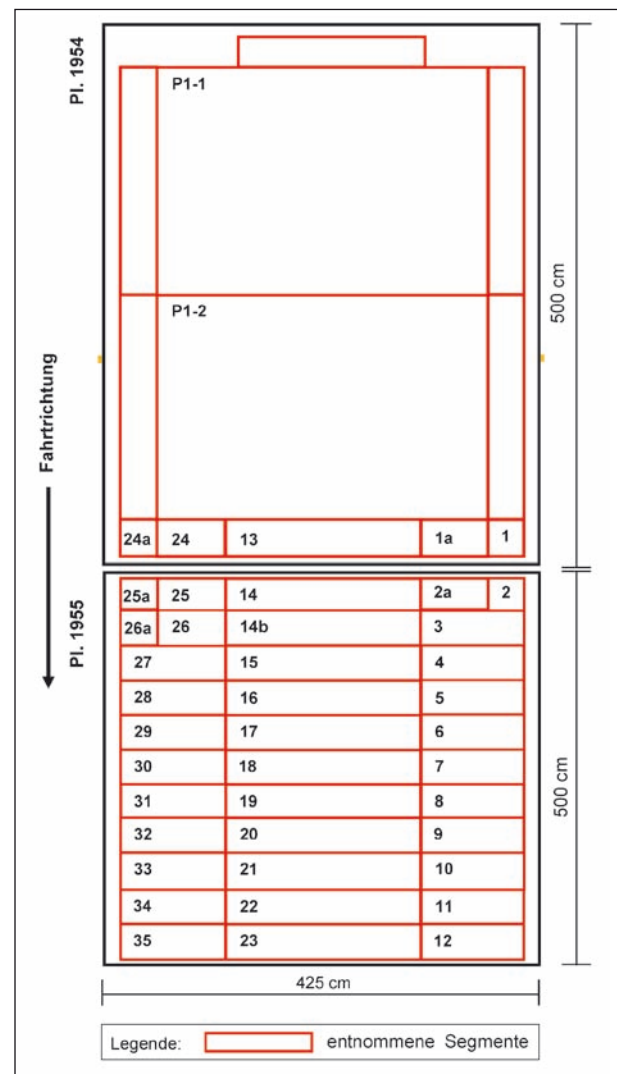


Bild 16: Schnittplan für die Plattentnahme



Bild 15: Zustand der Betonfahrbahndecke auf der BAB A 14 bei Autobahnkilometer 122,0 in Fahrtrichtung Halle/Saale vor der Plattentnahme



a. Einbringen der Lastaufnahmeösen in Betonfahrbahndecke



b. Aufnahme großformatiger Plattenausschnitte



c. Bezeichnung und Aufnahme kleinformatiger Fahrbahnsegmente



d. Übersichtsbild nach erfolgreicher Plattenentnahme



e. Erkennbarkeit Horizontalriss in Längsfuge zwischen 1. Fahrstreifen und Standstreifen in Höhe der Anker



f. Ansicht der Querschnittsfuge mit durchtrennten Stabdübeln

Bild 17: Fotodokumentation von der Plattenentnahme

schnitten wurden. Ein optischer Eindruck von der Plattenentnahme vor Ort ist Bild 17 zu entnehmen.

Aus den an die BAM gelieferten großformatigen Plattenausschnitten und kleinformatigen Plattensegmenten wurden für die jeweilige Laborprüfung die Prüfkörper gewonnen. Einen Eindruck vom Prüfkörperzuschnitt vermittelt das Bild 18.

Nach der sich anschließenden Hochdruckwasserstrahlreinigung der für die Laborprüfungen zugeschnittenen Prüfkörper wurde festgestellt, dass die Fahrbahnoberfläche bei der vor der Entnahme das Schnittmuster mittels Markierungsspray aufgetragen wurde, noch mit Farbresten benetzt war (siehe Bild 19). Da dies zwangsläufig zu einer Verfälschung der Ergebnisse der Laboruntersuchungen



Bild 18: Fotodokumentation vom Probenzuschnitt

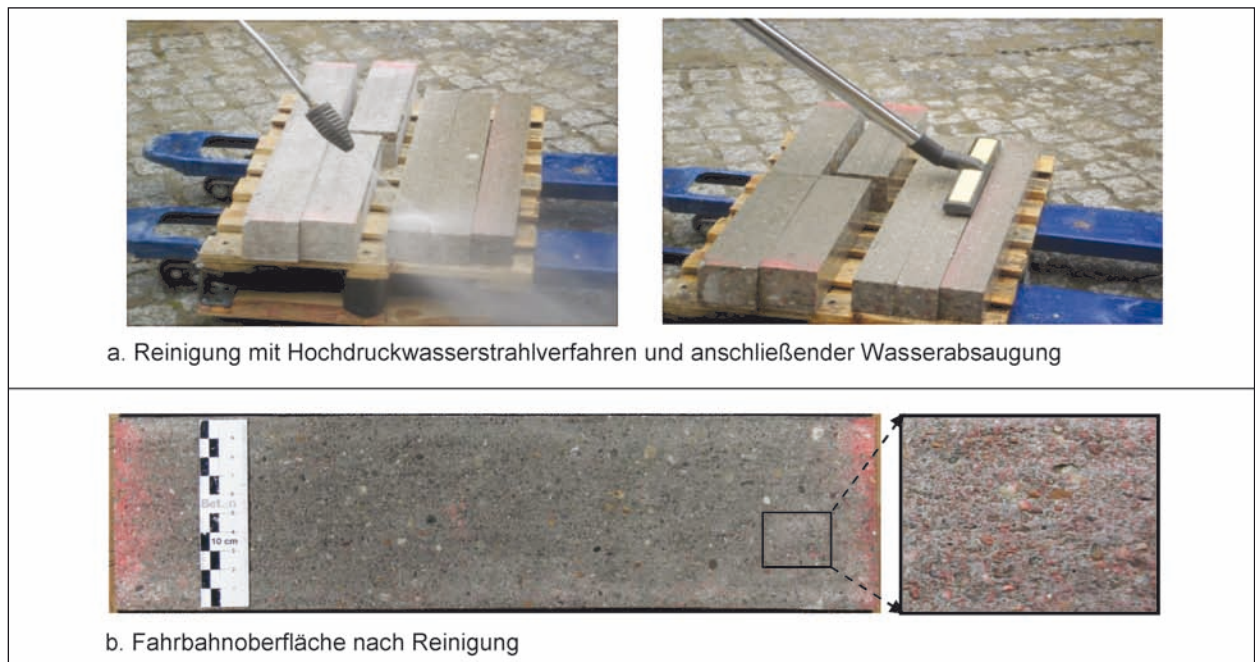


Bild 19: Reinigung der Fahrbahnoberfläche der Prüfkörper und äußeres Erscheinungsbild der gereinigten Prüffläche

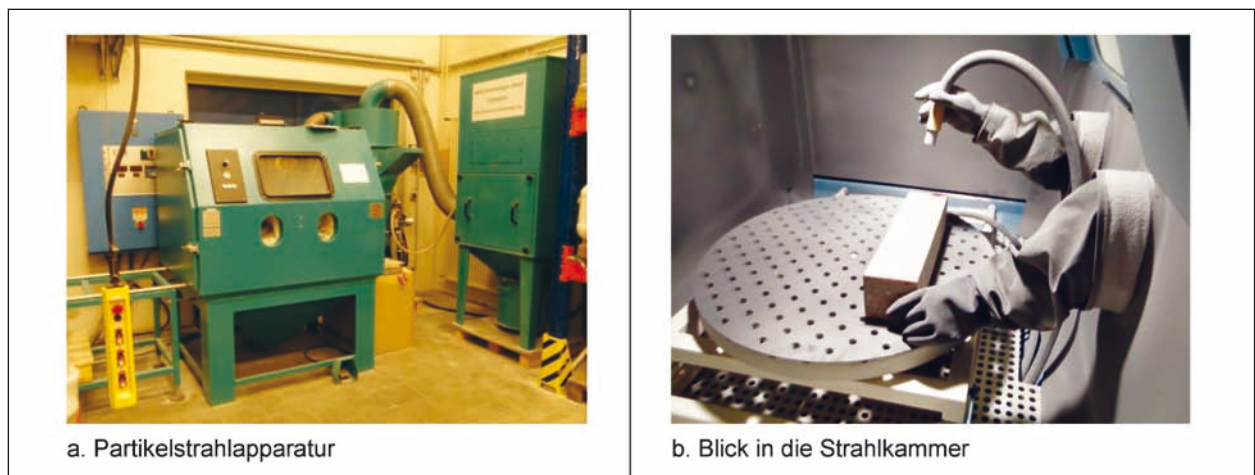


Bild 20: Entfernung der Farbreste auf der Fahrbahnoberfläche mittels Partikelstrahler

zum Applikationsverhalten des Hydrophobierungsmittels und seiner Auswirkungen auf den AKR-Schädigungsprozess führt, wurde die Fahrbahnoberfläche partikelgestrahlt. Dabei kam eine Edel-

korundkörnig mit einem Korndurchmesser von 0,60 bis 0,85 mm (F24) zum Einsatz. Einen Eindruck vom Partikelstrahlen der Prüffläche gibt das Bild 20.

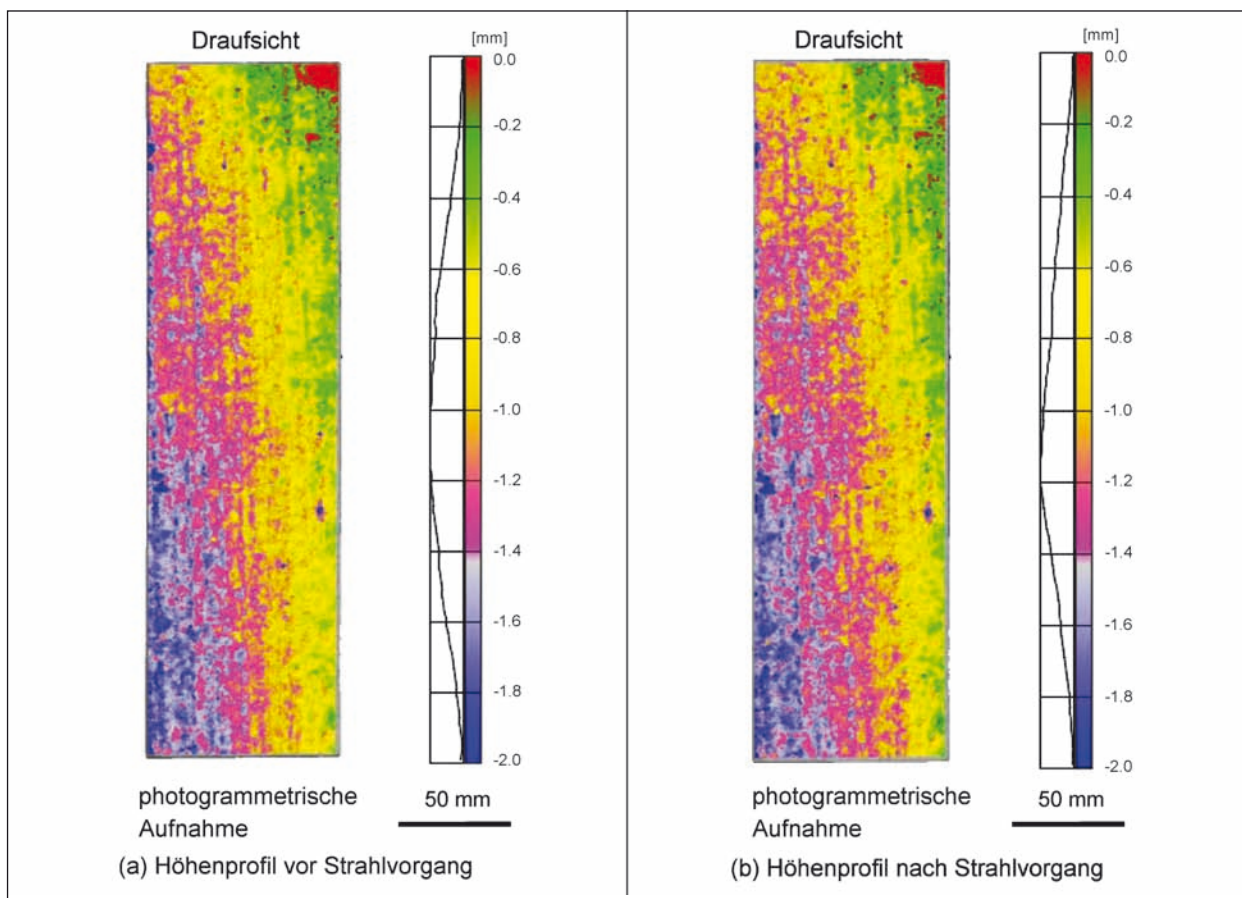


Bild 21: Photogrammetrische Ermittlung der Textur der Fahrbahnoberfläche des Prüfkörpers 23-2 vor (a) und nach dem Partikelstrahlen (b)

Allerdings muss bei der Analyse der Griffigkeit bei den Laboruntersuchungen berücksichtigt werden, dass sich die Mikrorauigkeit der Fahrbahnoberfläche durch das Partikelstrahlen stark erhöht. Einen optischen Eindruck von der Veränderung der Oberflächentextur durch das Partikelstrahlen gibt das Bild 21 exemplarisch für den Prüfkörper 23-2. Dabei wird deutlich, dass sich durch das Partikelstrahlen die mittlere Tiefe der Textur der Fahrbahnober- bzw. Prüffläche des Prüfkörpers von 1,05 mm auf 1,18 mm erhöht und sich nur sehr geringfügig verändert. Der SRT-Wert erfuhr jedoch gleichzeitig eine Erhöhung von 60 auf 77.

Allgemeine Charakterisierung

Zur allgemeinen Charakterisierung des Bestandsbetons wurden einerseits ausgewählte Materialkennwerte bestimmt sowie andererseits erste petrografische Untersuchungen durchgeführt. Einen zusammenfassenden Überblick über die ermittelten Materialkennwerte gibt die Tabelle 8. So wurde für den Bestandsbeton nach TP Beton-StB [29]

eine Druckfestigkeit von 75,8 N/mm² ermittelt. Dies hat eine Einordnung in die Festigkeitsklasse C70/85 zur Folge. Damit wird die geforderte Festigkeitsklasse C30/37 für Fahrdeckenbetone der Bauklasse SV deutlich überschritten. Die Ursache hierfür bildet mit hoher Wahrscheinlichkeit die Nachhydratation des Fahrbahndeckenbetons. Die hohen Druckfestigkeitswerte korrespondieren mit den geringen Porositätskennwerten. Diese wiederum erklären die nach Heft 422 des DAfStb [30] ermittelten niedrigen Wasseraufnahmekoeffizienten.

Das Gefüge des Bestandsbetons kann als gleichmäßig beschrieben werden. Augenscheinlich sind keine signifikanten Gefügestörungen in Form von trennenden Betonlagen, Rissbildungen, Fremdeinschlüssen oder ausgeprägter Lunkerbildung erkennbar. Anzumerken ist lediglich, dass im Übergangsbereich zwischen Ober- und Unterbeton (Tiefe: 10 bis 15 cm) fertigungsbedingt vermehrt Verdichtungsporen auftreten (siehe Bild 22). Es ist aber auch deutlich sichtbar, dass der Beton „frisch in frisch“ eingebaut wurde.

Kennwert		Mittelwert	Standardabweichung
Druckfestigkeit [N/mm ²]		75,8	5,2
Rohdichte [kg/m ³]	Oberbeton	2.240	6
	Unterbeton	2.250	12
offene Porosität [Vol.-%]	Oberbeton	12,37	0,35
	Unterbeton	11,1	0,66
Gesamtporosität [Vol.-%]	Oberbeton	13,4	0,25
	Unterbeton	13,2	0,25
Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m ² h ^{-0,5}]	Oberbeton	0,35	0,05
	Unterbeton	0,27	0,06

Tab. 8: Ausgewählte charakteristische Kennwerte des Bestandsbetons

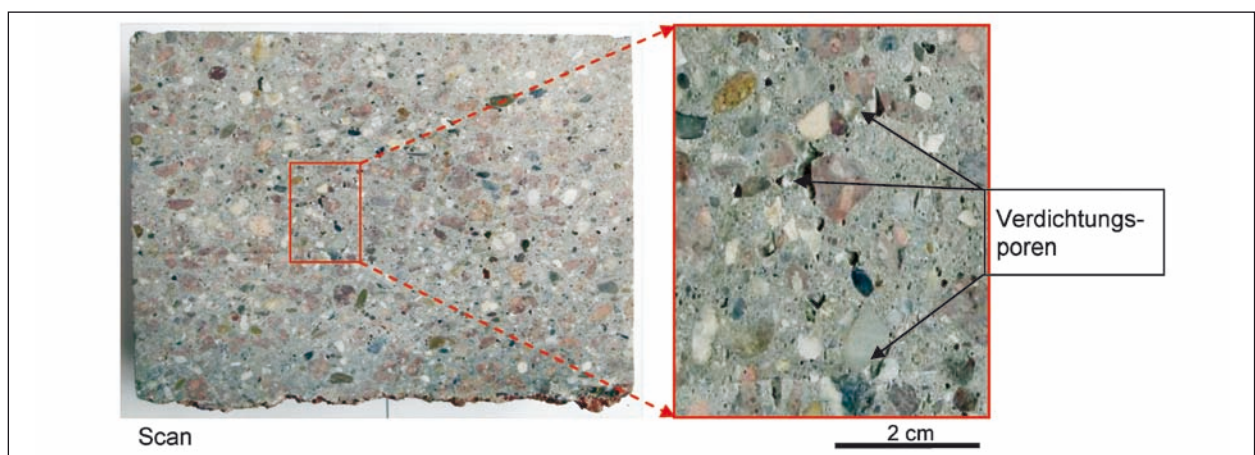


Bild 22: Vertikalschnitt durch Betonfahrbahndecke der A 14 (links) mit Detailausschnitt

Die Verdichtung des Betons ist als standardmäßig gut zu bewerten und korrespondiert mit den ermittelten Festbetonrohddichten. Die Sieblinie der verwendeten Gesteinskörnung ist stetig. Visuell erfassbare Gefügearteigenschaften innerhalb des Betons, wie Reaktionssäume um einzelne Körnungen, sekundäre Porenfüllungen sowie Reaktionsprodukte bzw. Verfärbungen der Bindemittelmatrix, die an einzelne Gesteinskörner gebunden sind, liegen nicht vor.

Die im Bestandsbeton verwendete Gesteinskörnung mit einem maximalen Größtkorn von 25 mm besteht aus petrografischer Sicht aus zwei Bestandteilen. Die Gesteinskörnung mit einer Korngröße bis ca. 14 mm setzt sich aus einer deutlich quarzitischer betonten Sand- und Kiesfraktion zusammen. Im größeren Kornbandbereich des Betons wird diese durch eine rötlich gefärbte gebrochene Festgesteinskörnung ersetzt. Bei dieser gebrochenen Gesteinskörnung handelt es sich um einen Quarzporphyr-Splitt, dessen Sieblinienbereich zwischen ca. 10 und 25 mm liegt.

Das Bild 23 zeigt exemplarisch die typische Gefügearausprägung des Bestandsbetons in der Übersicht.

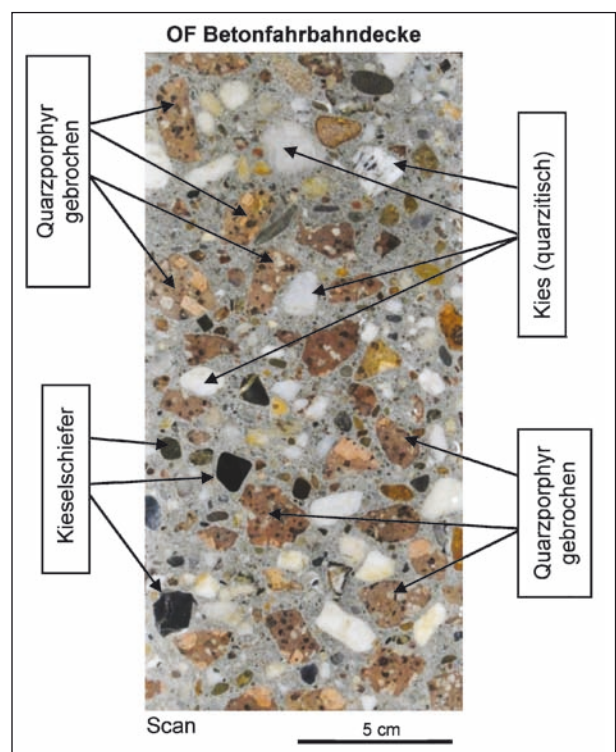


Bild 23: Gefügearübersicht des Fahrbahndeckenbetons (Vertikalschnitt) aus Segment 24

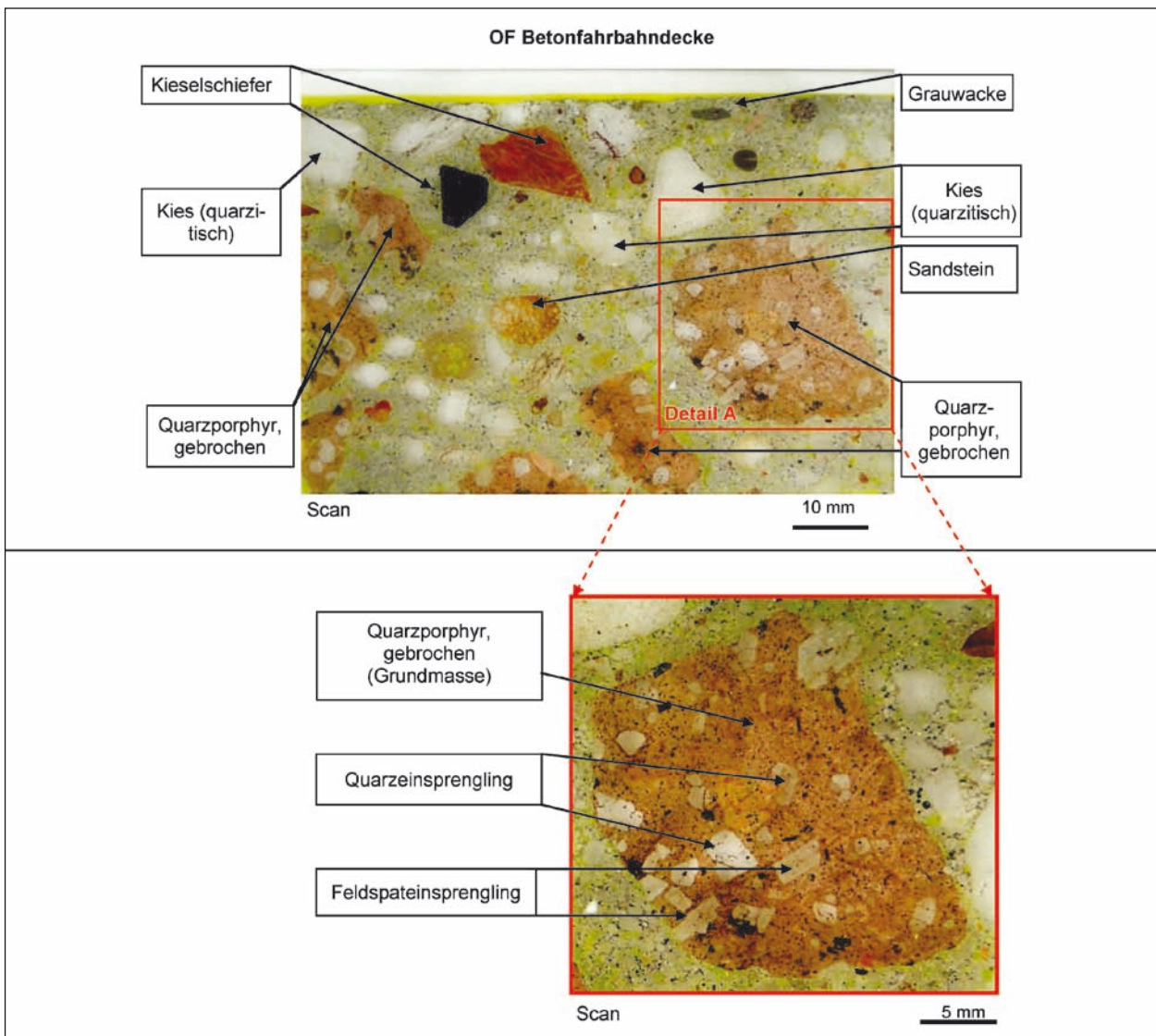


Bild 24: Dünnschliff des Fahrbahndeckenbetons

Zur Bewertung der AKR-Empfindlichkeit der Gesteinskörnung wurde der Bestandsbeton der BAB A 14 polarisationsmikroskopisch untersucht. Das Bild 24 zeigt exemplarisch ein Dünnschliffpräparat eines Vertikalschnitts der Fahrbahndecke in der Übersicht. Es wird deutlich, dass es sich bei der zur Betonherstellung eingesetzten gebrochenen Gesteinskörnung um eine hellrötliche Varietät des Quarzporphyrs des Halle-Vulkanit-Komplexes handelt. Dieser Quarzporphyr ist ein magmatisches Gestein des Saale-Beckens, dessen subvulkanische Entstehung zeitlich auf die stratigrafische Grenze von Karbon und Perm zu beziehen ist (sog. Rotliegendes). Das Gefüge dieses sog. „Hallischen Porphyrs“ ist felsitisch. Das Detail A in Bild 24 zeigt außerdem Quarz- und Feldspateinsprenglinge, die bei diesem Porphyrvorkommen in eine feinkristalline Grundmasse eingebettet sind. Die rötliche Fä-

rbung ist auf die Durchstäubung der Grundmasse mit einem Hämatit zurückzuführen.

Das in Bild 25 dargestellte polarisationsmikroskopische Bild zeigt bei gekreuzten Polarisatoren einen Ausschnitt eines Porphyrkorns (rechte Bildseite) mit einem Quarzeinsprengling in der Grundmasse des Porphyrs.

Die Grundmasse des Porphyrs besteht aus feinkristallinem Quarz sowie alkalibetonem Feldspat. Dieser Porphyrtyp kann aufgrund der zu beobachtenden Gefügekenneichen in Bezug auf die Kristallinität der Grundmasse als mikrogranitisch eingestuft werden.

Anhand der polarisationsmikroskopischen Untersuchung der Gesteinskörnung wird deutlich, dass innerhalb der verwendeten Kiesfraktion des Fahr-

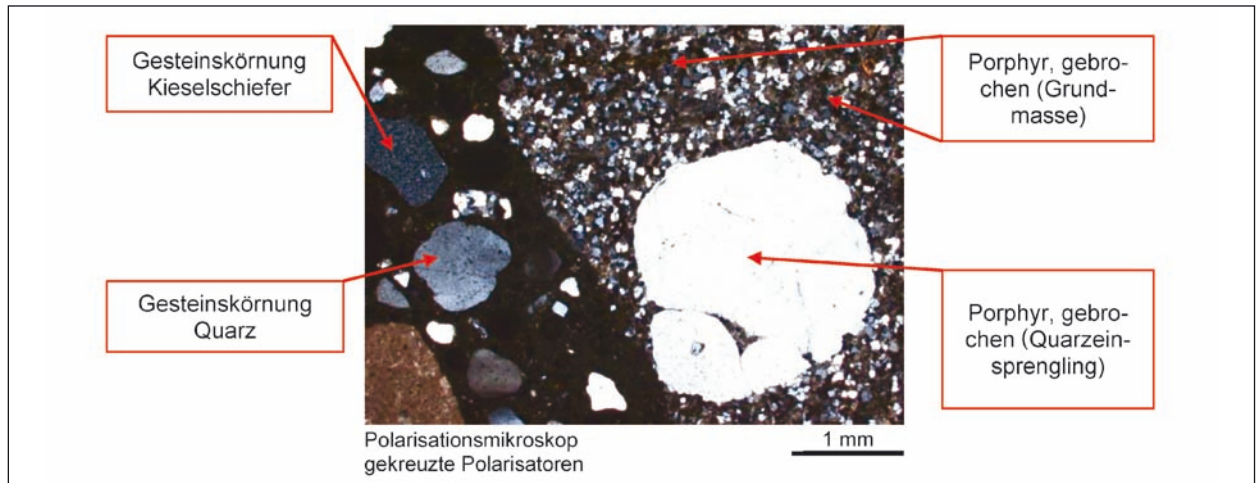


Bild 25: Quarzeinsprengling in gebrochenem Porphyr

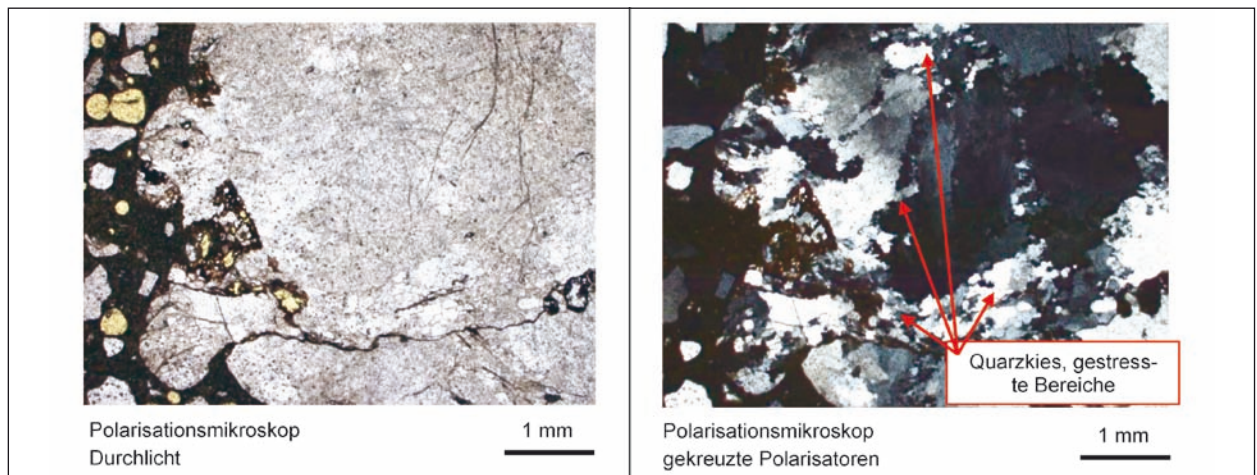


Bild 26: Visualisierung von Quarzkies vom Stresstyp III anhand polarisationsmikroskopischer Untersuchung. Dünnschliff im Durchlicht (links) und mit gekreuzten Polarisatoren (rechts)

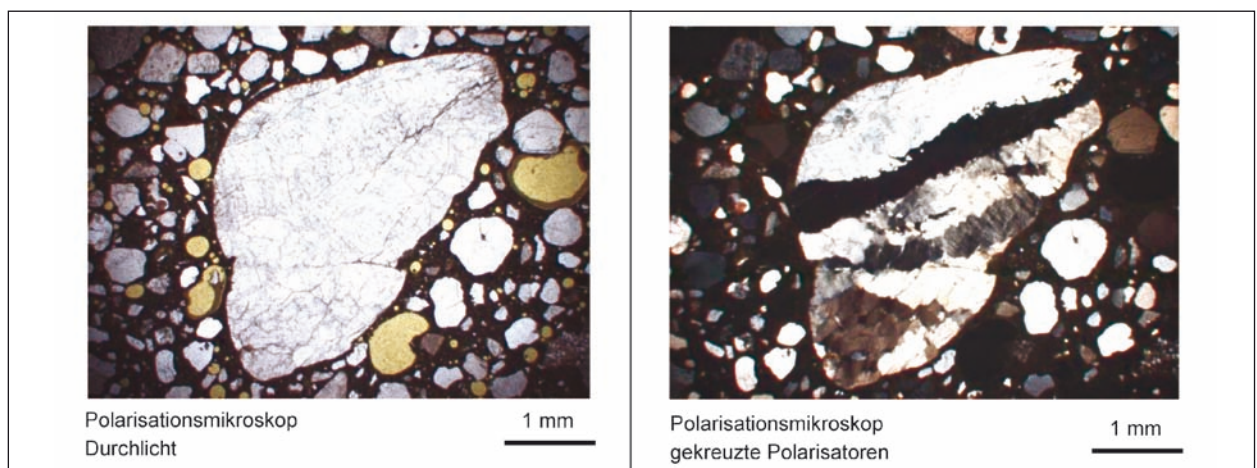


Bild 27: Visualisierung von Quarzkies vom Stresstyp III anhand polarisationsmikroskopischer Untersuchung. Dünnschliff im Durchlicht (links) und mit gekreuzten Polarisatoren (rechts)

bahndeckenbetons in einem erheblichen Maß gestresste Quarze auftreten. Beispielhaft hierfür stehen die Bilder 26 und 27. Die quarzbetonten Anteile zeigen bei gekreuzten Polarisatoren neben einer

undulösen Auslöschung auch Rekristallisationsbereiche von Quarz auf. Entsprechend der Klassifikation von gestressten Quarztypen nach STARK [31], sind diese Bestandteile der Kiesfraktion dem

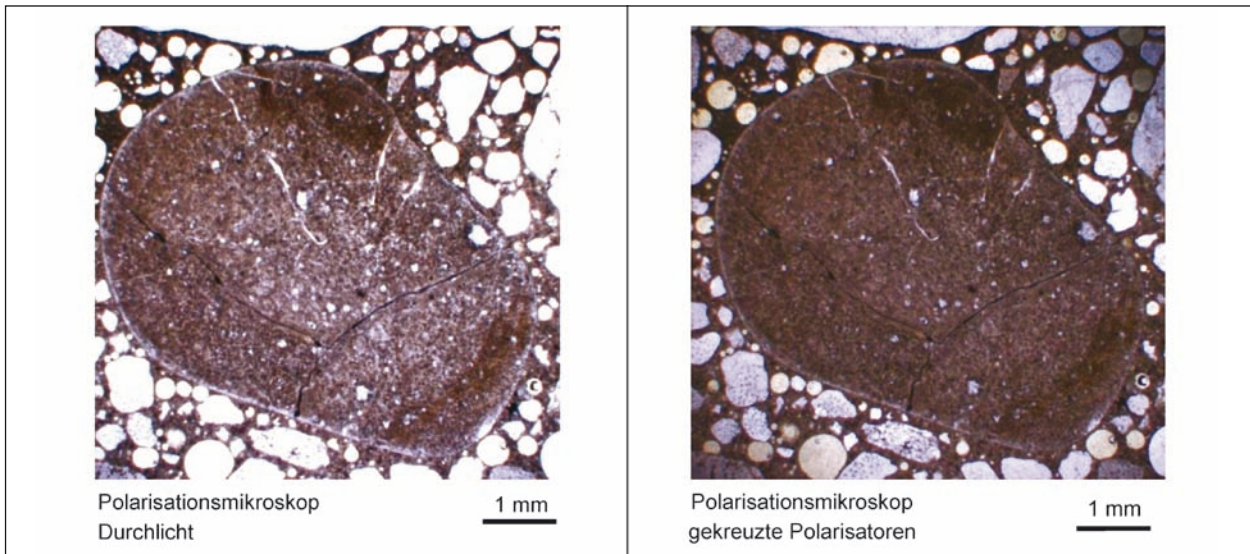


Bild 28: Visualisierung von Kieselschiefer anhand polarisationsmikroskopischer Untersuchung eines Dünnschliffs im Durchlicht (links) und mit gekreuzten Polarisatoren (rechts)

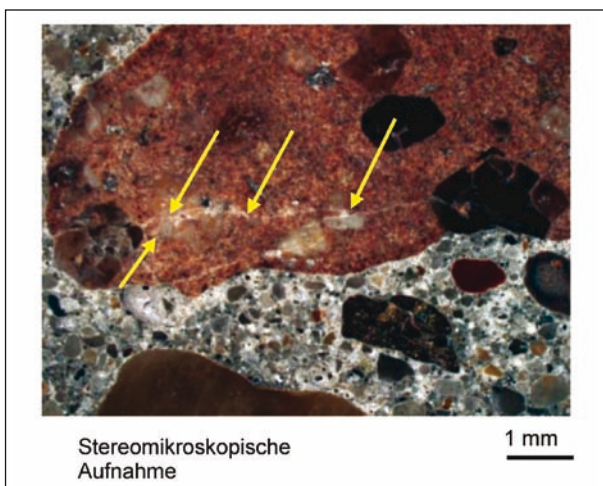


Bild 29: Gerissene Porphyrkörnung im Anschliffbild

Stresstyp III zuzuordnen. Sie weisen somit ein deutlich gesteigertes Maß an Reaktivität aufgrund der Störungen des Quarzkristallgitters in Bezug auf das Schädigungspotenzials bei der Alkali-Kieselsäure-Reaktion auf.

Neben diesen gestressten quarzitischen Anteilen sind in der verwendeten Kiesfraktion dunkel gefärbte Kiesel-schiefer als Bestandteile der eingesetzten Kiesfraktion zu erkennen. Bild 28 zeigt ein typisches polarisationsmikroskopisches Bild dieser Kiesel-schieferbestandteile der Kiesfraktion des Bestandsbetons.

Zusammenfassend ergibt die petrografische Beschreibung der verwendeten Gesteinskörnung, dass die im Bestandsbeton vorhandene Kiesfraktion partiell als potenziell alkalireaktiv einzustufen

ist. Hervorzuheben sind hierbei die quarzitischen Bestandteile sowie der Kiesel-schiefer der Kies-körn-ung.

Eine Aussage im Hinblick auf eine erhöhte AKR-Reaktivität der eingesetzten gebrochenen Gesteinskörnung kann in diesem Zusammenhang pauschal jedoch nicht getroffen werden, da die AKR-Reaktivität von Quarzporphyren maßgeblich durch die Ausbildung der Grundmasse bestimmt wird. Einen Hinweis auf eine mögliche Reaktivität des Porphyrs zeigt die nachfolgende stereomikroskopische Aufnahme (siehe Bild 29), die einen bereits bestehenden Riss innerhalb der Porphyrkörn-ung des Ausbaubetons aufweist (siehe Pfeile).

4.2.2 Laborbeton

Ausgangsstoffe und Herstellung

Zur besseren Herausarbeitung des Einflusses der Hydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess wurde zusätzlich in das Versuchsprogramm ein Laborbeton einbezogen. Dabei wurde der Beton praxisnah in Anlehnung an eine Straßenbaurezeptur nach ZTV-Beton 07 [32] zusammengesetzt (Tabelle 9).

Für die Herstellung des Laborbetons wurde in der Sandfraktion (≤ 2 mm) ein Quarzsand verwendet, während für die Korngruppen 2-22 mm Sauerländer Grauwacke als gebrochene Gesteinskörnung gewählt wurde. Die Gesteinsroh-dichte der Grauwacke liegt bei $2,68 \text{ g/cm}^3$ und die Wasseraufnahme wurde mit 0,5 M.-% nach einer Prüfdauer von

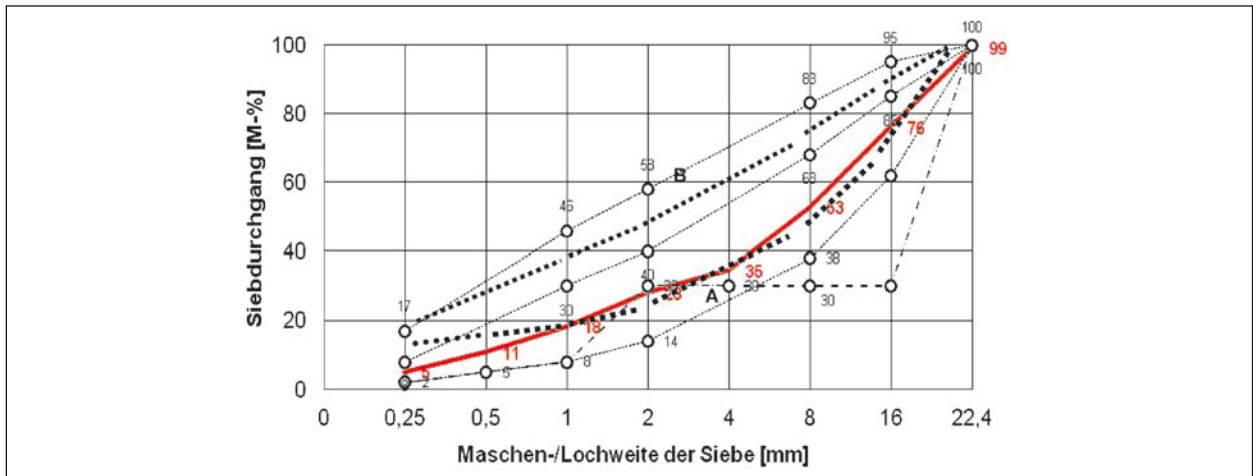


Bild 30: Sieblinie der Gesteinskörnung des Laborbetons

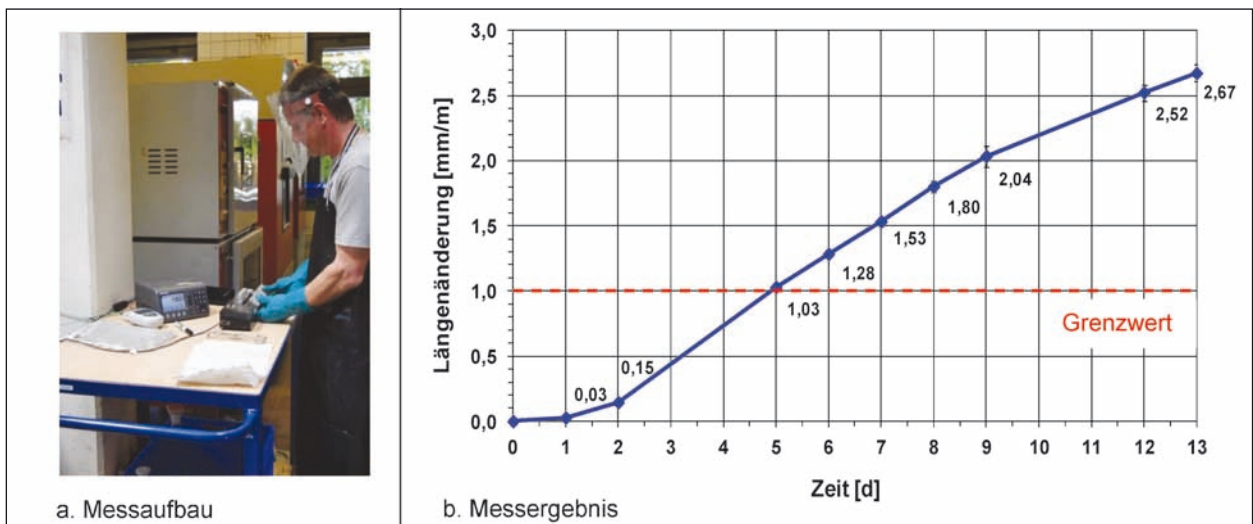


Bild 31: Dehnungsprüfung an Mörtelprismen mit gebrochener Sauerländer Grauwacke der Korngruppe 11/16 im Schnellprüfverfahren nach Teil 3 der Alkalrichtlinie des DAfStb [34]

24 Stunden gemäß DIN EN 1097-6 [33] bestimmt. Das Bild 30 zeigt die gewählte Kornbandverteilung der Sieblinie der Gesteinskörnung zur Herstellung des Laborbetons. Die Sieblinie ist stetig und liegt im betontechnologisch als günstig bewerteten Bereich AB.

Als Zement gelangte ein Straßenbauzement vom Typ CEM I 42,5N (st) der Firma Cemex aus dem Werk Rüdersdorf zum Einsatz. Wie Tabelle 9 zeigt, weist der gewählte Zement ein Natriumäquivalent von 0,76 M.-% auf. Sein Blaine-Wert liegt bei $3.750 \text{ cm}^2/\text{g}$ und der Wasseranspruch bei 26 M.-%.

Als Luftporenbildner fand das Produkt LPS A-94 der Firma Sika Anwendung. Der eingestellte Wasser/Zement-Wert lag bei 0,45. Auf die Zugabe eines Fließmittels wurde verzichtet. Zur Realisierung eines möglichst hohen AKR-Schädigungspoten-

Zement	Art	CEM I 42,5N (st)
	Na ₂ O-Äquivalent	0,76 M.-%
	Gehalt	360 kg/m ³
w/z-Wert		0,45
Gesteinskörnung	Korngruppe 0/2 mm	Quarzsand
	Korngruppe 2/8 mm	Grauwacke
	Korngruppe 8/16 mm	
	Korngruppe 16/22 mm	
Zusatzmittel	Luftporenbildner	0,9 kg/m ³ LPS A-94 (Sika)

Tab. 9: Zusammensetzung des Laborbetons

zials fand wie bereits erwähnt in den gebrochenen Gesteinskorngruppen von 2 bis 22 mm eine Sauerländer Grauwacke Anwendung. Zur ersten Ab-

schätzung des Reaktionspotenzials wurde orientierend die Korngruppe 11/16 mittels Schnellprüfverfahren nach dem Teil 3 der Alkalirichtlinie des DAfStb [34] geprüft. Den hierbei ermittelten Dehnungsverlauf zeigt das Bild 31b. Es wird deutlich, dass der Dehnungsgrenzwert von 1,0 mm/m um das 2,6fache überschritten wird.

Zur Absicherung des Prüfumfangs wurden insgesamt 14 Platten mit den Abmessungen 50 x 30 x 10 cm³ und zwei großformatige Balken mit den Abmessungen 200 x 50 x 27 cm³ hergestellt. Auch hier wurde zur Gewährleistung des Praxisbezugs die Oberfläche der Platten und Balken mit einem Be-

senstrich versehen. Einen optischen Eindruck vom Herstellungsprozess der Platten und Balken vermitteln die Bilder 32 und 33.

Allgemeine Charakterisierung

Einen Überblick über ausgewählte Frischbetonkennwerte des Laborbetons gibt die Tabelle 10. Das ermittelte Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 [35] des Laborbetons lag nach 10-minütiger Reifezeit bei 340 mm und hat eine Einordnung in die Konsistenzklasse F2 „steif“ zur Folge. Das 30 Minuten nach Mischende bestimmte mittlere Ausbreitmaß von 315 mm ist ein Indiz für ein geringes

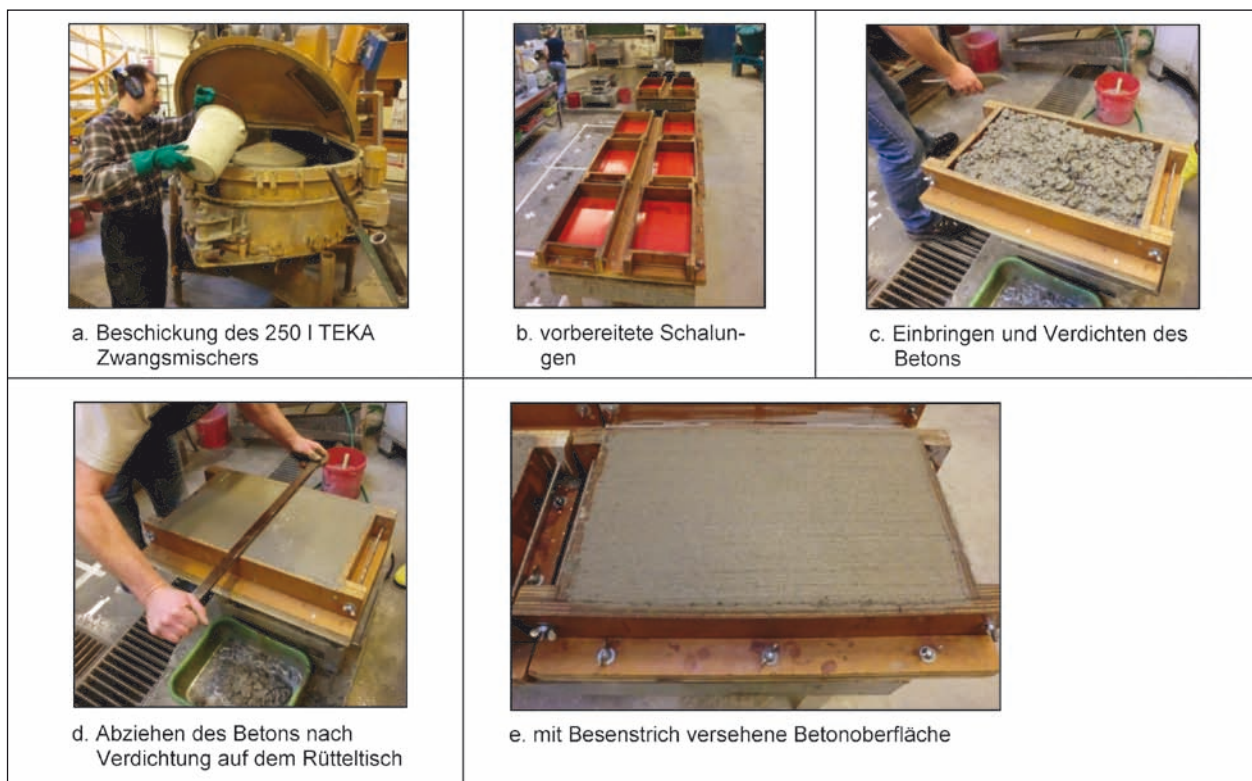


Bild 32: Dokumentation der Plattenherstellung aus Laborbeton



Bild 33: Dokumentation der Balkenherstellung aus Laborbeton

Rücksteifen. Der nach DIN EN 12350-7 [36] bestimmte Luftporengehalt des Frischbetons betrug nach 10-minütiger Reifezeit 5,8 Vol.-%. Damit werden die in den ZTV-Beton-Stb 07 [32] festgelegten Anforderungen von $\geq 4,0$ Vol.-% an Straßenbaubetone mit einem Größtkorn von 22 mm erfüllt. Auch 30 Minuten nach dem Mischprozess beträgt der Luftporengehalt noch 5,1 Vol.-% und genügt somit den vorstehenden Anforderungen. Die Bestimmung der Frischbetonrohichte erfolgte nach DIN EN 12350-6 [37].

Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit des sich ausbildenden Betongefüges auf Praxisverhältnisse wurden die Betonplatten nach ihrer Herstellung einen Tag in der Schalung belassen, danach 13 Tage bei 20 °C und 97 % relativer Luftfeuchte gelagert und anschließend bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte bis zur Applikation des jeweiligen Hydrophobierungsmittels konditioniert. Einen Überblick über die bei diesem Auslagerungsregime ermittelten Festbetonkennwerte zeigt Tabelle 11. Die nach DIN EN 12390-3 [38] ermittelte Druckfestigkeit betrug im Mittel 46,6 N/mm² und stimmt mit der Druckfestigkeitsklasse C30/37 nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 [39] sowie mit den Anforderungen an die Druckfestigkeit nach ZTV-Beton-Stb 07 [32] für

Frischbetonkennwerte (Mittelwerte)		
Ausbreitmaß [mm]	10 min	340/340
	30 min	330/300
Luftporengehalt [Vol.-%]	10 min	5,8
	30 min	5,1
Rohdichte [kg/m ³]		2.316

Tab. 10: Ausgewählte Frischbetonkennwerte des Laborbetons

Kennwert	Mittelwert	Standardabweichung
Druckfestigkeit [N/mm ²]	46,6	1,4
Rohdichte [kg/m ³]	2.240	0,012
offene Porosität [Vol.-%]	13,4	0,46
Gesamtporosität [Vol.-%]	15,03	0,23
Kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient [kg/m ² h ^{-0,5}]	0,90	0,05

Tab. 11: Ausgewählte charakteristische Kennwerte des Laborbetons

Fahrbahndeckenbetone überein. Der im Vergleich zum Bestandsbeton erhöhte Wasseraufnahmekoeffizient des Laborbetons ist ein Indikator für seine höhere Porosität.

Zur Charakterisierung des Gefügezustandes des Laborbetons erfolgten bereits vor der AKR-provozierenden Lagerung mikroskopische Untersuchungen am Dünnschliff. So ist im Bild 34 der Scan eines großformatigen Dünnschliffs des Laborbetons dargestellt. Dieser wurde aus einem Vertikalschnitt einer Betonplatte gewonnen.

Es zeigt sich, dass die Grauwacke in zwei Varietäten auftritt. Die in der Übersicht als Detail G1 gekennzeichnete aufgehellt erscheinende Varietät, die den Hauptanteil der gebrochenen Gesteinskörnung repräsentiert, zeigt im mikroskopischen Bild eine deutlich quarzbetonte Zusammensetzung. Die als G2 bezeichnete dunkel erscheinende Varietät

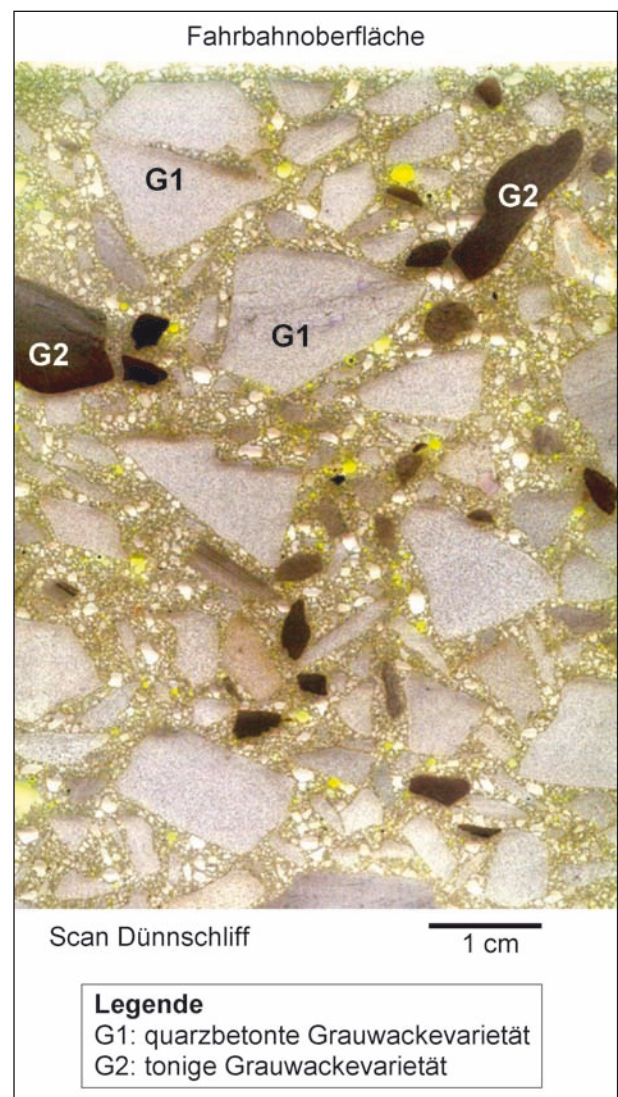


Bild 34: Vertikalschnitt durch Laborbeton

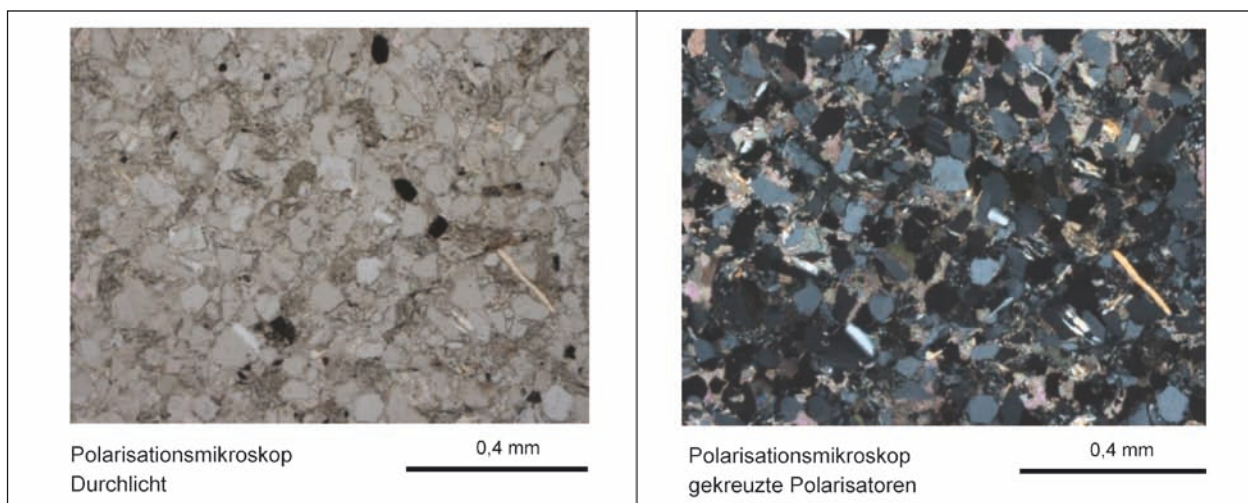


Bild 35: Gefügedarstellung Grauwacke, Dünnschliff

ist im mikroskopischen Bild durch lichtoptisch indifferente tonige Bestandteile gekennzeichnet.

Die polarisationsmikroskopischen Aufnahmen in Bild 35 zeigen die Gefügebildung der Grauwackevarietät G1 aus Bild 34. Das Gefüge ist als kompakt und korngestützt zu beschreiben. Es ist mikroskopisch keine offene Porosität innerhalb des Korngefüges erkennbar. Die Kornzusammensetzung der Grauwacke ist dabei deutlich quarzbetont. Als Nebengemengteile treten alkalibetonte Feldspäte, Calcit sowie untergeordnet Muskovit auf.

4.3 Bewertung und Optimierung der Applikation der Hydrophobierung

4.3.1 Auswahl, Zusammensetzung und Viskosität der Hydrophobierungsmittel

Im Rahmen der Untersuchungen zur Applikation von Hydrophobierungsmitteln wurden neben dem bereits auf der Erprobungsstrecke der BAB A 14 verwendeten Produkt WA65 der Firma Silico-Tec GmbH zusätzlich die Einsetzbarkeit zweier alternativer Hydrophobierungsmittel partiell in die Untersuchungen mit einbezogen. So stellten, basierend auf einem von der BAM erarbeiteten anwendungsspezifischen Lastenheft, die Firma Remmers Baustofftechnik GmbH das Produkt LM7 sowie die Firma Ionys AG das neuartige Hydrophobierungsmittel GEL30 für Eignungsuntersuchungen zur Verfügung. Während bei den Produkten WA65 und LM7 der Wirkstoff Oktyltriethoxysilan in Wasser emulgiert ist, wird dieser beim GEL30 in ein Polyacrylatgel eingebunden. Letzteres ermöglicht laut Hersteller eine drastische Re-

duzierung des Wirkstoffgehalts. Anzumerken ist zu dem jeweils eingesetzten Wirkstoff, dass dieser beim WA65 in kettenförmiger n-Oktylform sowie bei den Produkten LM7 und GEL30 in verzweigter iso-Oktylform vorliegt.

Eine besondere Rolle kommt der Viskosität des Hydrophobierungsmittels bei seiner Applikation auf der Betonfahrbahndecke zu. So hat das Gefälle der Betonfahrbahndecke ein verstärktes Abfließen des applizierten Hydrophobierungsmittels zur Folge. Aus dieser Sicht erscheint ein höher viskoses Produkt zielführender zu sein. Allerdings steht diesem die schlechtere Verarbeitbarkeit bei einer Applikation mit dem Airless-Sprühverfahren entgegen. Bisher wird jedoch die Viskosität als Kennwert in den Produktblättern nicht ausgewiesen. Eine produktspezifische Prüfnorm ist gleichfalls bis jetzt nicht verfügbar. Aus diesem Grund wurde die dynamische Viskosität der Hydrophobierungsmittel in Anlehnung an die Kunststoffnorm DIN EN ISO 3219 [40] mittels eines Rotationsviskosimeters bei definiertem Geschwindigkeitsgefälle bestimmt. Im konkreten Fall erfolgte die Viskositätsmessung mit dem Viskometer MCR 501 der Firma Physics. Dabei gelangte das Kegel-Platte-Verfahren in einem Bereich bis 500 Umdrehungen pro Sekunde zum Einsatz. Die Temperatur der Messzelle wurde dabei konstant bei 23 °C gehalten. Einen optischen Eindruck von der Messapparatur vermittelt das Bild 36a.

Das Ergebnis der dynamischen Viskositätsmessungen an den unterschiedlichen Hydrophobierungsmitteln zeigt Bild 36b vergleichend für zwei ausgewählte Drehgeschwindigkeiten. Ausgehend von der dynamischen Viskosität des marktüblichen Hydro-

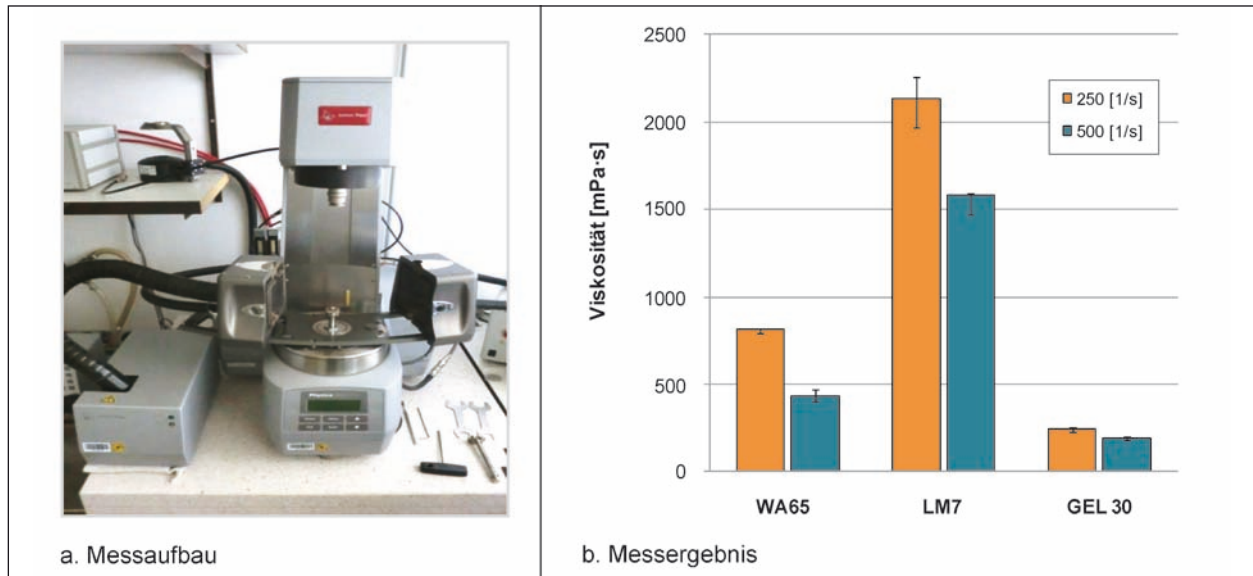


Bild 36: Ermittlung der dynamischen Viskosität mittels Rotationsviskosimeter in Anlehnung an DIN EN ISO 3219 [40]

Beurteilungskriterium	Art des Hydrophobierungsmittels			
	WA65	LM7	GEL30	
Typ	Emulsion	Emulsion	Polyacrylatgel	
Wirkstoff	n-Oktyltriethoxysilan	iso-Oktyltriethoxysilan	iso-Oktyltriethoxysilan	
Wirkstoffgehalt [M-%]	ca. 65 M.-%	ca. 70 M.-%	ca. 30 M.-%	
dynamische Viskosität [mPa s]	250 s ⁻¹	815	2.130	242
	500 s ⁻¹	433	1.580	193

Tab. 12: Charakteristika eingesetzter Hydrophobierungsmittel

phobierungsmittels WA65 bei einer Drehgeschwindigkeit von 250 Umdrehungen pro Sekunde zeigt sich, dass dieser Kennwert beim LM7 das 2,6fache sowie beim GEL30 lediglich einen Bruchteil (30 %) davon beträgt. Dies lässt darauf schließen, dass das Produkt LM7 hochviskos und das Produkt GEL30 niedrigviskos eingestellt ist. Letzteres legt die Vermutung nahe, dass ein verstärktes Abfließen des GEL30 von der Betonoberfläche zu befürchten ist. Andererseits ist die Verarbeitbarkeit des Produktes LM7 beim Airless-Sprühverfahren zu hinterfragen.

Einen zusammenfassenden Überblick über die Zusammensetzung und die ermittelte dynamische Viskosität der eingesetzten Hydrophobierungsmittel gibt die Tabelle 12.

4.3.2 Optimierung des Applikationsregimes

Untersuchung des Einflusses der hygrothermischen Vorkonditionierungen des Bestands- und Laborbetons auf den Feuchtehaushalt

Wie bereits in Kapitel 3.2.5 herausgearbeitet, übt der Feuchtegehalt in der Betonrandzone einen maßgebenden Einfluss auf die Güte der Hydrophobierung aus. In diesem Kontext stellt sich die Frage, welche Auswirkungen auf den Feuchtehaushalt in der Betonrandzone die standardmäßige Reinigung der Oberfläche der Betonfahrbahn vor der Applikation des Hydrophobierungsmittels hat. Die Reinigung erfolgt mit dem Hochdruckwasserstrahlverfahren bei 600 bar mit nachgeschalteter Wasserabsaugung. Dieses Prozedere erfolgt in der Regel einen Tag vor der Applikation von Hydrophobierungsmitteln auf Betonfahrbahndecken.

Zur Klärung dieser Fragestellung wurde ein Balken aus der Ausbauplatte der BAB A 14 herausgearbeitet und nach einer ca. einjährigen Vorkonditionie-

nung bei Hallenklima dem vorstehend beschriebenen Reinigungsregime im Labor unterworfen. Zur zeitlichen Verfolgung der Entwicklung des Feuchtehaushalts in der Betonrandzone wurden sowohl vor als auch 2 Stunden, 1 Tag und 3 Tage nach der Hochdruckwasserstrahlreinigung mit unmittelbar nachgeschalteter Wasserabsaugung die Feuchte-

profile in der Betonrandzone mittels NMR-Mouse der Firma Magritek bestimmt. Einen optischen Eindruck von den Arbeiten vermittelt das Bild 37.

Das Ergebnis der NMR-Feuchtemessung in der Betonrandzone des Ausbausegments zeigt das Bild 38. Es ist deutlich erkennbar, dass die Feuchtefront

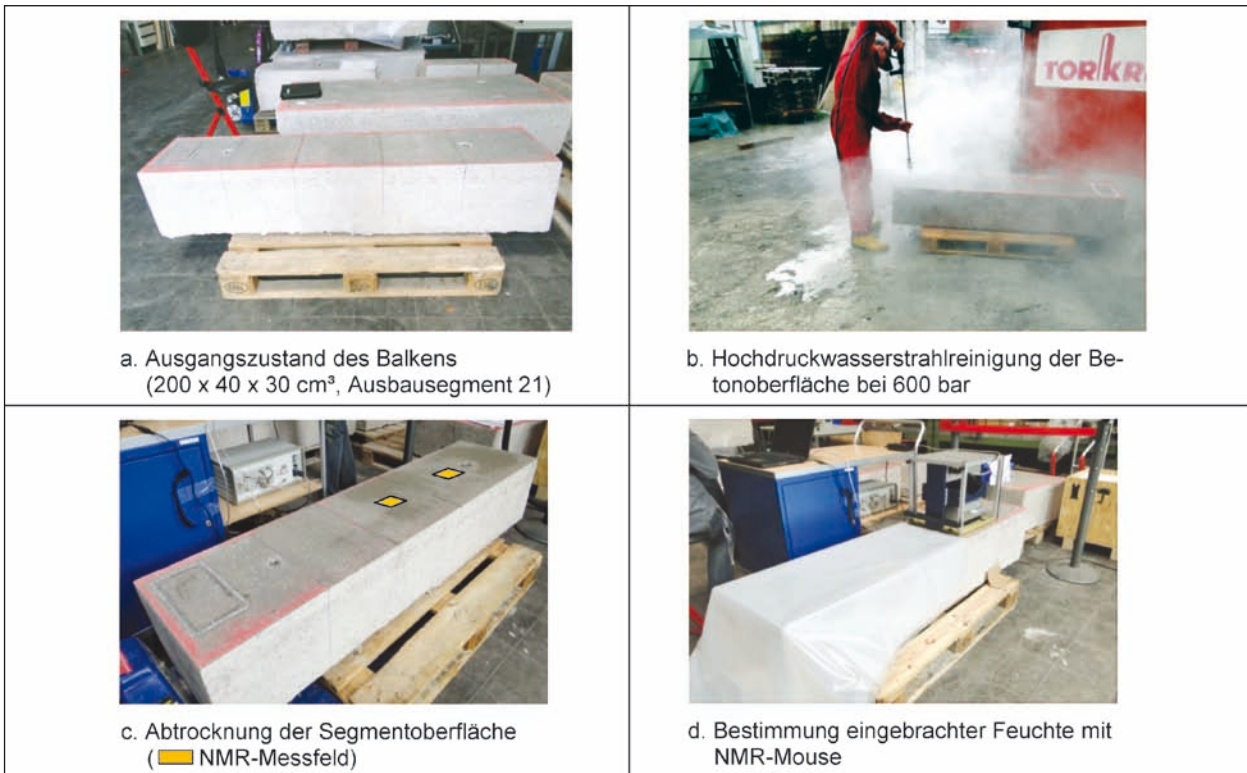


Bild 37: Fotodokumentation zur Hochdruckwasserstrahlreinigung und NMR-Feuchtemessung an einem großen Ausbausegment

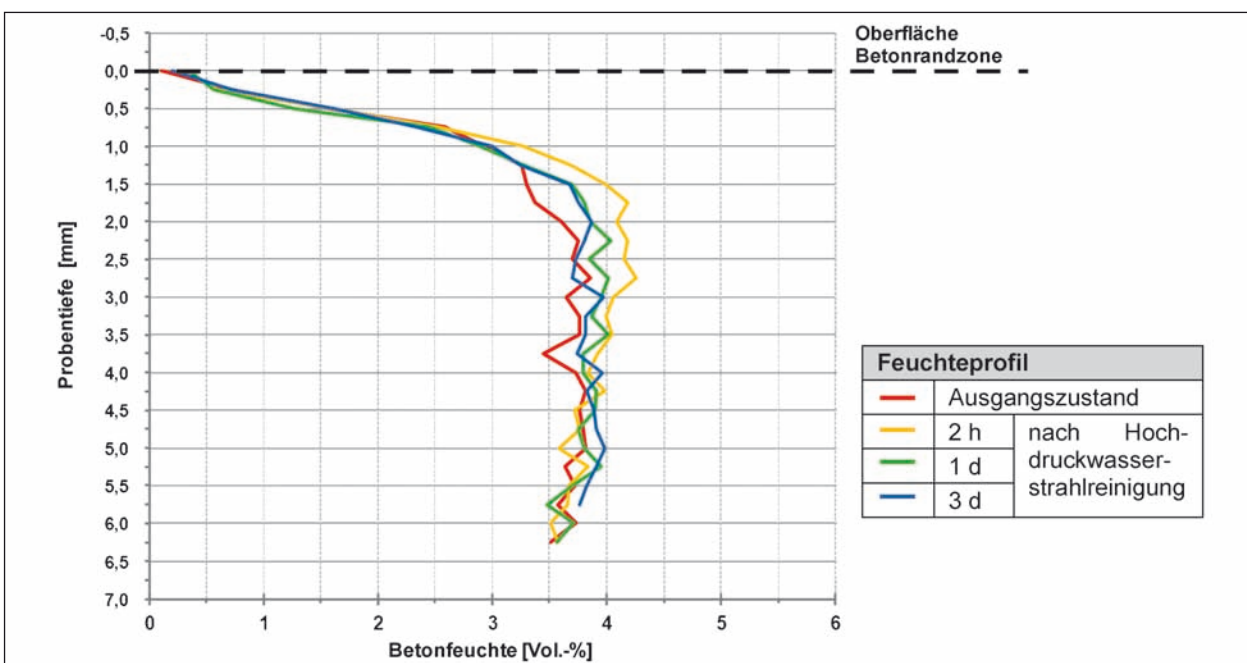


Bild 38: Feuchteprofile vor und nach Hochdruckwasserstrahlreinigung bei 600 bar in der Betonrandzone des Ausbausegments

infolge der Hochdruckwasserstrahlreinigung nur bis in eine maximale Tiefe von etwa 4 mm eindringt. Der Feuchtegehalt erfährt dabei kurzzeitig eine maximale Zunahme um ca. 0,6 Vol.-%. Nach einem Tag beträgt diese lediglich 0,3 Vol.-%. Dies lässt den Schluss zu, dass die Hochdruckwasserstrahlreinigung in der Praxis zu keiner signifikanten Veränderung des Feuchteprofils in der Betonrandzone führt und somit die Güte der Hydrophobierung der Betonrandzone quasi nicht beeinträchtigt.

Untersuchung des Einflusses verschiedenartiger hygrothermischer Vorkonditionierungen des Bestands- und Laborbetons auf den Feuchtehaushalt

Nach der Klärung des Einflusses der Hochdruckwasserstrahlreinigung auf den Feuchtehaushalt in der Randzone des Bestandsbetons galt es nun, die Bedingungen für die hygrothermische Vorkonditionierung der Prüfkörper des Bestands- und Laborbetons für die Hydrophobierung zu definieren. Dabei ist auch hier die Kenntnis des Feuchteprofils in der Betonrandzone von zentraler Bedeutung. Zur systematischen Erfassung des Feuchteinflusses wurden folgende zwei Lastfälle betrachtet:

- Lastfall 1 (LF1)
Vorkonditionierung der Prüfkörper ohne Wasserbeaufschlagung:
 - 7-tägige Vorlagerung bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 %.
- Lastfall 2 (LF2)
Vorkonditionierung der Prüfkörper mit Wasserbeaufschlagung:
 - a) 7-tägige Vorlagerung bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % (entspricht LF1).
 - b) 3-tägige Wasserbeaufschlagung mit 10 mm Wassersäule auf der Applikationsoberfläche des Prüfkörpers bei 20 °C.
 - c) 1-tägige Lagerung bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 %.

Die Feuchtemessungen erfolgten mit einer NMR-Mouse an je drei Prüfkörpern des Bestands- und Laborbetons mit den einheitlichen Abmessungen von 40 x 10 x 4 cm³ nach den jeweiligen Phasen des Vorkonditionierungsregimes bei Lastfall 2. Das Messfeld der hier verwendeten NMR-Technik hat

eine Größe von 50 x 50 mm². Das Tiefeninkrement bei den Messungen betrug 0,25 mm und die maximale Messtiefe 15 mm. Aus Vergleichbarkeitsgründen zu den Prüfkörpern der Klimawechsellagerung wurde die für die Hydrophobierung vorgesehene Oberfläche unmittelbar nach dem Prüfkörperzuschnitt mittels Partikelstrahler vorbehandelt.

Die für den Bestands- und Laborbeton phasenspezifisch im Lastfall 2 ermittelten Feuchteprofile (Doppelbestimmungen) sind in den Bildern 39 und 40 exemplarisch für je einen Prüfkörper dargestellt. Dabei ergibt sich für den Bestandsbeton folgendes Bild:

- Einstellung eines mittleren Feuchtegehalts über der Tiefe von ca. 3 bis 4 Vol.-% nach 7-tägiger Lagerung der Prüfkörper bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte (LF2a bzw. LF1),
- Erhöhung des mittleren Feuchtegehalts über die gesamte Tiefe auf 6-7 Vol.-% nach dreitägiger Wasserbeaufschlagung (LF2b),
- Verminderung des mittleren Feuchtegehalts über der Tiefe um ca. 1 Vol.-% bis in eine Prüfkörpertiefe von 8 mm nach 1-tägiger Trocknung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte (LF2c).

Demgegenüber ruft die dreitägige Wasserbeaufschlagung und anschließende Trocknung beim Laborbeton deutlich höhere Veränderungen im Feuchteprofil hervor. Diese stellen sich wie folgt dar:

- Einstellung eines leicht erhöhten mittleren Feuchtegehalts von ca. 3 bis 4,5 Vol.-% nach 7-tägiger Lagerung der Prüfkörper bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte (LF1 bzw. LF2a),
- Erhöhung des mittleren Feuchtegehalts mit stark ausgeprägtem Gradienten nach dreitägiger Wasserbeaufschlagung, höchste Werte wurden mit bis zu 13 Vol.-% im äußeren Randbereich ermittelt,
- drastische Verminderung des mittleren Feuchtegehalts in der äußeren Randzone nach 1-tägiger Trocknung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte.

Neben der tiefenaufgelösten Bestimmung des Feuchtegehalts in der Randzone des Bestands- und Laborbetons wurde zusätzlich die Wasseraufnahme gravimetrisch während der dreitägigen Wasserbeaufschlagung (aufstehende Wassersäule von 10 mm) bestimmt. Als Messzeitpunkte wurden

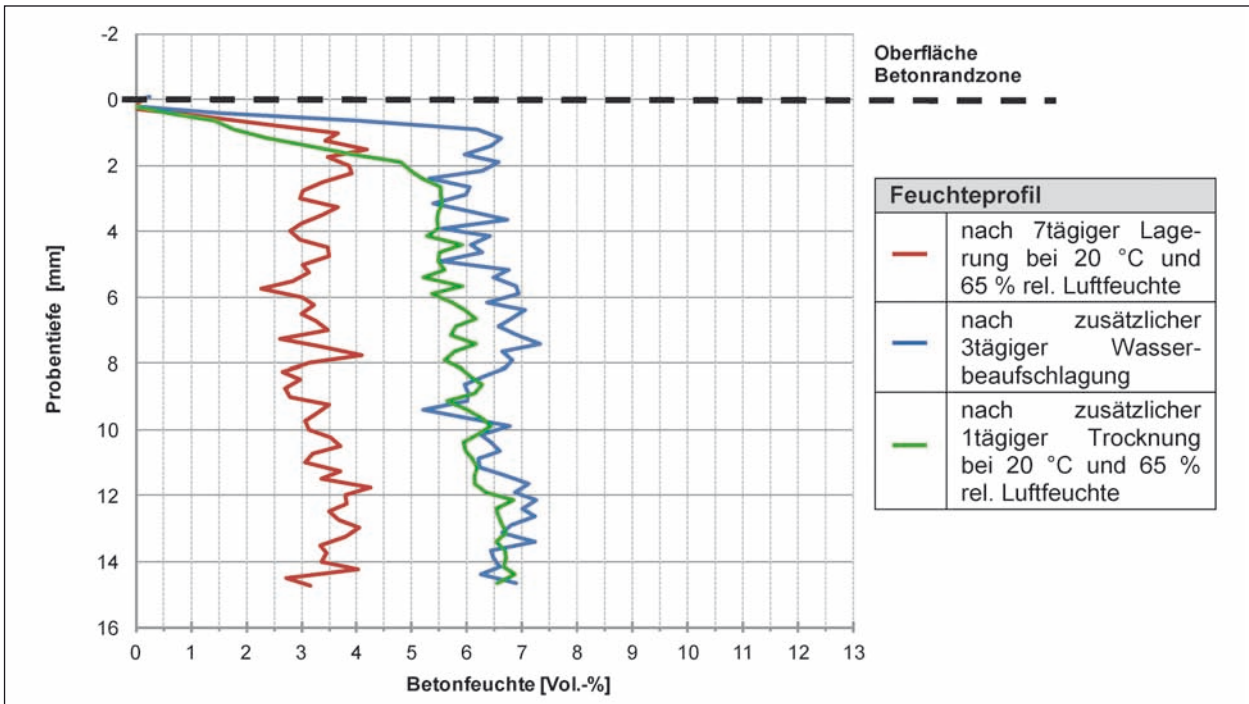


Bild 39: Phasenspezifisch ermittelte Feuchteprofile im Bestandsbeton während der Vorkonditionierung nach Lastfall 2

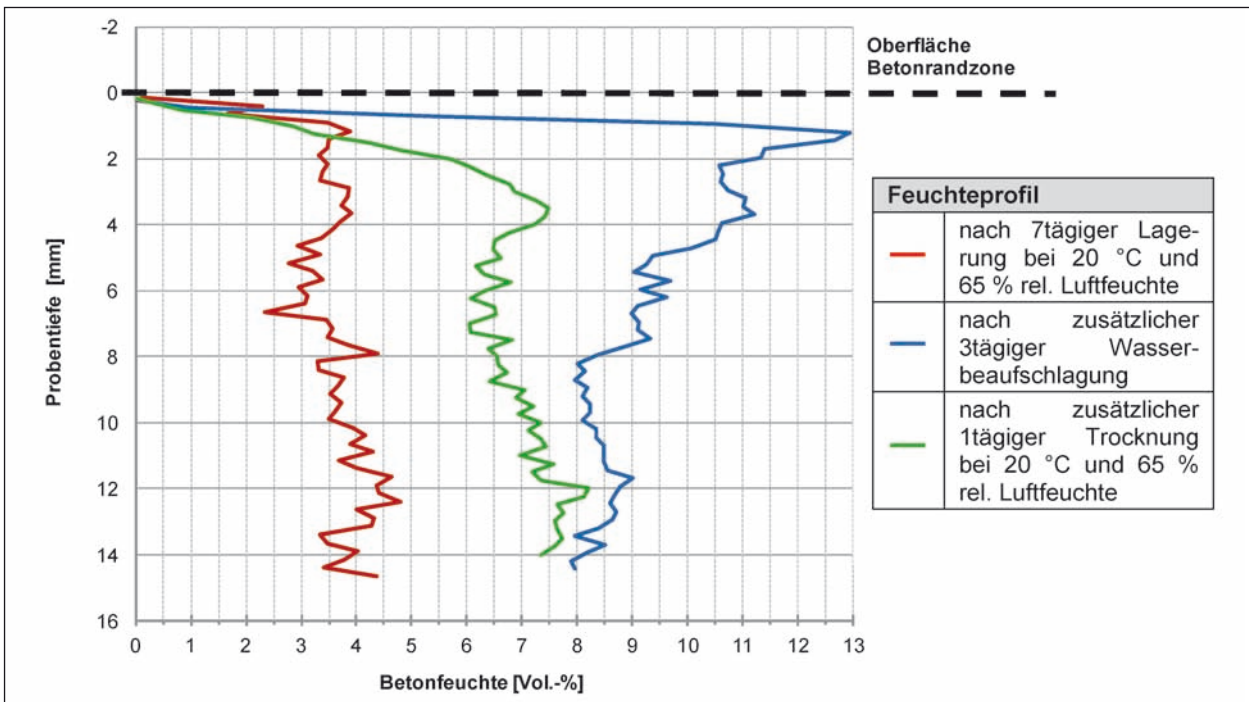


Bild 40: Phasenspezifisch ermittelte Feuchteprofile im Laborbeton während der Vorkonditionierung nach Lastfall 2

dabei 1, 2, 24 und 72 Stunden nach Aufbringen des Wassers gewählt.

Die im Bild 41a dargestellten Ergebnisse zeigen auch hier, dass der Laborbeton eine deutlich höhere Wasseraufnahme als der Bestandsbeton aufweist und bestätigt somit den Befund der NMR-Messungen.

Zusätzlich wurde die Wasserabgabe der Prüfkörper nach dreitägiger Wasserbeaufschlagung während der Trocknungsphase bei 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % gravimetrisch bestimmt. Die im Bild 41b aufgetragenen Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass der Laborbeton mit der höheren Ausgangsfeuchte deutlich mehr Wasser abgibt als der trockenere Bestandsbeton.

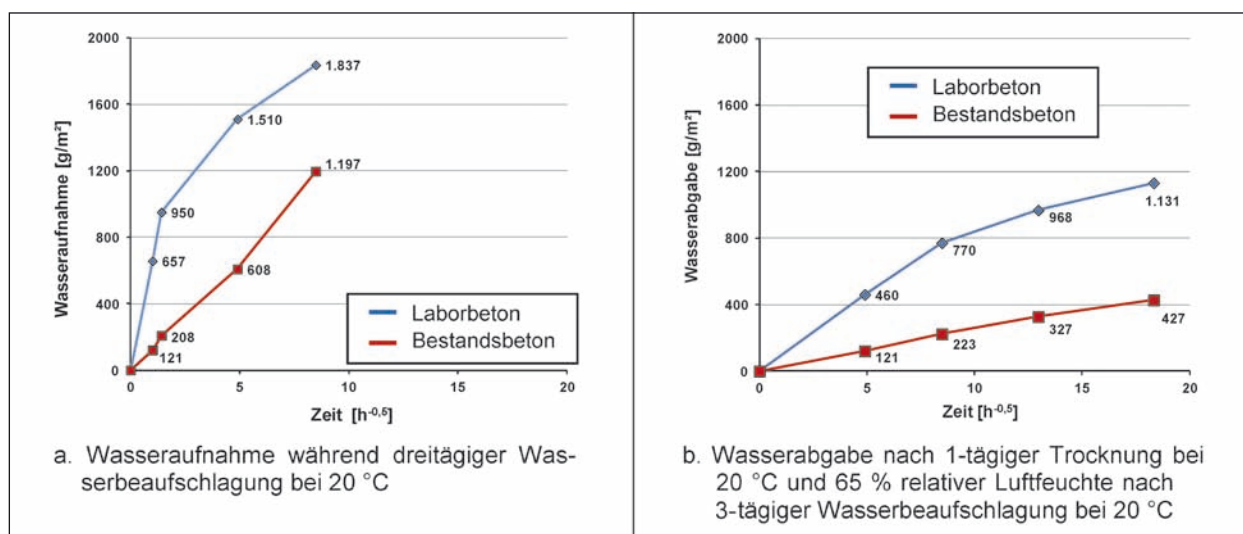


Bild 41: Zeitliche Verläufe gravimetrisch ermittelter Wasseraufnahme und -abgabe des Bestands- und Laborbetons während der hygrothermischen Vorkonditionierung

Analyse der Auswirkungen der Vorkonditionierungen der Bestands- und Laborbetone auf das Applikationsverhalten und die Güte der Hydrophobierung

• Motivation und Prüfprogramm

Es galt nun basierend auf den vorstehenden Feuchteuntersuchungen den Einfluss der Vorkonditionierung (Lastfälle 1 und 2) auf das Applikationsverhalten und die Güte der Hydrophobierung beim Bestands- und Laborbeton zu untersuchen. Als Hydrophobierungsmittel kamen hierbei folgende drei in Kapitel 4.3.1 bereits näher beschriebene Produkte zum Einsatz:

- WA65 der Firma Silico-Tec GmbH,
- LM7 der Firma Remmers Baustofftechnik GmbH,
- GEL30 der Firma Ionys AG.

Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse erfolgten die Prüfungen jeweils an drei Prüfkörpern. Die Prüfkörperabmessungen betragen 40 x 10 x 4 cm³. Die für die Applikation des Hydrophobierungsmittels vorgesehenen Oberflächen aller Prüfkörper wurden aus Vergleichbarkeitsgründen partikelgestrahlt. Das generelle Erfordernis einer solchen Oberflächenbehandlung resultiert dabei aus der Notwendigkeit der Entfernung des Markiersprays beim ausgebauten Bestandsbeton. Auf die Oberfläche der so vorbehandelten Probenreihen des Bestands- und Laborbetons wurden nach

erfolgter verschiedenartiger hygrothermischer Vorkonditionierung vergleichend die unterschiedlichen Hydrophobierungsmittel appliziert. Zur besseren Übertragbarkeit auf Praxisverhältnisse wurde dabei die Applikationsfläche mit einem Gefälle von 2 % versehen. Die Applikationsmenge betrug unabhängig von der Art des Hydrophobierungsmittels bei allen Prüfkörpern 280 g/m². Der Auftrag erfolgte generell in einem Arbeitsgang mittels Pinsel. Unmittelbar nach der Applikation des jeweiligen Hydrophobierungsmittels wurde dessen Reaktionskinetik auf der Betonoberfläche visuell verfolgt. Dabei konnten beispielsweise die Zeitpunkte für das Brechen der Hydrophobierungsemulsionen und der Beginn des Ablaufens des jeweiligen Hydrophobierungsmittels bestimmt werden. Die Ablaufmenge des Hydrophobierungsmittels selbst wurde gravimetrisch nach Absaugen am tiefsten Punkt der geneigten Applikationsfläche bestimmt. Zwei Wochen nach der Applikation des Hydrophobierungsmittels wurde die Eindringtiefe in die Betonrandzone an einer vertikalen Schnittfläche im Sprühtest, d. h. unter Nutzung des ABERLEFFEKTS, bestimmt. Die Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels selbst stellt ein wesentliches Kriterium für die Güte der Hydrophobierung der Betonrandzone dar. Zusätzlich wurde zur zeitlichen Abschätzung der Wiederbefahrbarkeit der hydrophobierten Betonoberfläche die zeitliche Entwicklung der Griffigkeit mittels SRT-Pendelgerät in Anlehnung an die DIN 13036-4 [27] und das FGSV-Merkblatt MB Griff [26] bestimmt. Als Messzeitpunkte wurden dabei neben der Referenzmessung im Ausgangszustand weitere Messungen Prüfungen 3, 7, 10 und 14 Tage nach der Applikation des

		Betonart/hygrothermische Vorkonditionierung/Art des Hydrophobierungsmittels										
		Bestandsbeton mit Vorkonditionierung						Laborbeton mit Vorkonditionierung				
		Lastfall 1			Lastfall 2			Lastfall 1			Lastfall 2	
		WA65	LM7	GEL30	WA65	LM7	GEL30	WA65	LM7	GEL30	WA65	LM7
Prüfung	1	Visuelle Verfolgung der Reaktionskinetik nach Applikation des Hydrophobierungsmittels										
	2	Gravimetrische Ermittlung der Ablaufmenge des Hydrophobierungsmittels infolge Neigung der Applikationsoberfläche										
	3	Ermittlung der Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels in die Betonrandzone										
	4	Bestimmung der zeitlichen Veränderung der SRT-Werte für die Bewertung der Griffigkeitsentwicklung										
Lastfall 1: ohne Wasserbeaufschlagung Lastfall 2: mit Wasserbeaufschlagung												

Tab. 13: Prüfprogramm zur Analyse der Auswirkungen der Vorkonditionierung der Bestands- und Laborbetons auf das Applikationsverhalten und die Güte der Hydrophobierung

Hydrophobierungsmittels durchgeführt. Es ist aus der Praxis bekannt, dass die Griffigkeit nach der Applikation des Hydrophobierungsmittels eine starke Verminderung erfährt und diese sich erst mit fortschreitender Vernetzungsreaktion des Produkts wieder erhöht.

Einen zusammenfassenden Überblick über das Prüfprogramm gibt die Tabelle 13.

• **Prüfergebnisse und Auswertung**

Die mit dem vorstehenden Prüfprogramm gewonnenen Ergebnisse sind in den Bildern 42-1 bis 45-3 dargestellt. Dabei werden die Prüfergebnisse je-

weils vergleichend für die einzelnen Hydrophobierungsmittel auf gleichartig vorkonditioniertem Bestands- bzw. Laborbeton aufgezeigt.

In den Bildern 42-1 bis 42-4 sind die Prüfergebnisse für den Bestandsbeton ohne Wasserbeaufschlagung (Lastfall 1) bei der Applikation der Hydrophobierungsmittel WA65, LM7 und Gel 30 vergleichend dargestellt. Das Bild 42-1 gibt visuell Aufschluss über die Reaktionskinetik der verschiedenartigen Hydrophobierungsmittel auf der Betonoberfläche. Eine vergleichende Betrachtung der zeitversetzt nach Applikation der unterschiedlichen Hydrophobierungsmittel aufgenommenen Fotos von der Applikationsoberfläche zeigt, dass von den beiden

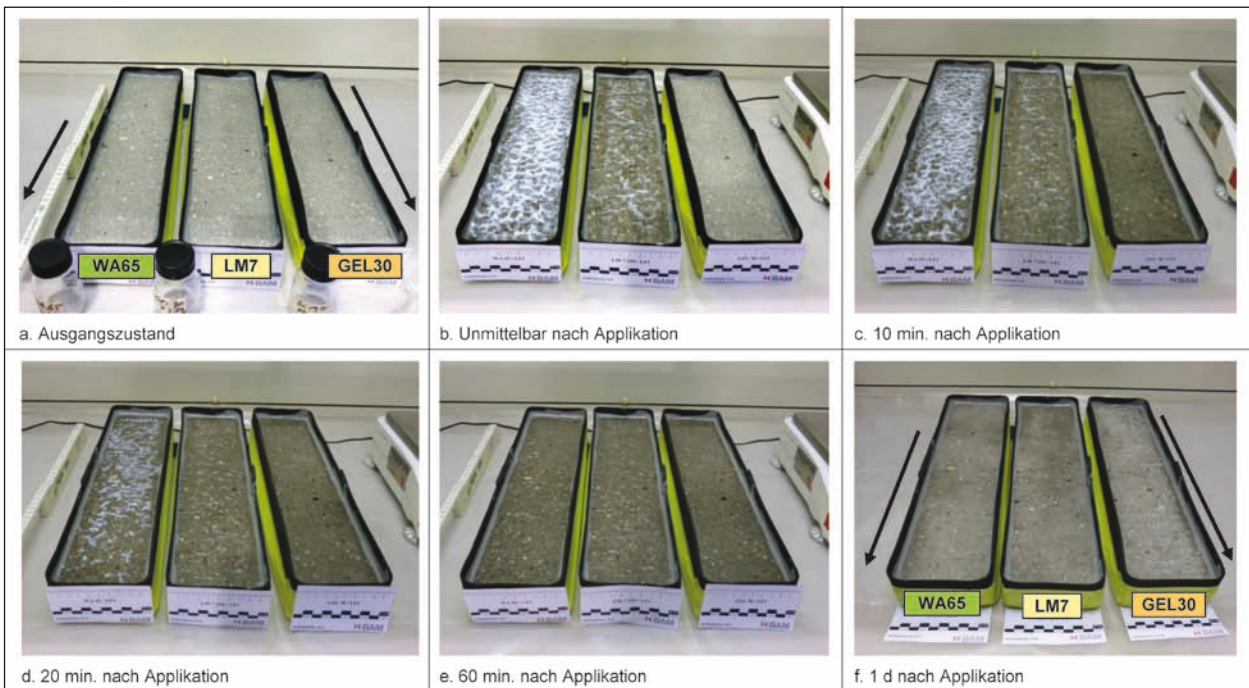


Bild 42-1: Dokumentation der visuellen Begutachtung der Oberfläche der Prüfkörper des Bestandsbetons vor und nach der Applikation verschiedenartiger Hydrophobierungsmittel – Vorkonditionierung mit Lastfall 1 (ohne Wasserbeaufschlagung)

emulgierten Systemen das Hydrophobierungsmittel LM7 sofort nach Applikation bricht. Demgegenüber weist das Hydrophobierungsmittel WA65 erst ca. 20 min. nach Applikation deutliche Anzeichen des Brechens auf. Dieses Bewertungskriterium kann auf GEL30 nicht übertragen werden, da hier der Wirkstoff nicht in Wasser emulgiert sondern in ein Polyacrylatgel eingebunden wird.

Das Bild 42-2 veranschaulicht das unterschiedliche Ablaufverhalten der einzelnen Hydrophobierungsmittel auf der 2 % geneigten Applikationsoberfläche. Es wird deutlich, dass 120 Minuten nach der Applikation lediglich 53 % des niedrigviskosen GEL30 auf der Betonoberfläche verbleibt. Bei den höherviskosen Emulsionssystemen WA65 und LM7 hingegen verbleiben 72 bzw. 69 % auf der Betonoberfläche. Angemerkt sei in diesem Kontext, dass

das Brechen von Hydrophobierungsemulsionen nicht direkt mit der Verflüssigung der Hydrophobierung gekoppelt ist.

Das Bild 42-3 gibt Aufschluss über die Eindringtiefe der einzelnen Hydrophobierungsmittel. Diese wurden unter Nutzung des Abperleffekts mittels Sprüh-test an frischen, sägerauh belassenen Vertikal-schnitten der Prüfkörper 14 Tage nach der Applikation ermittelt. Die gemessene wirksame Eindringtiefe des WA65 und LM7 betrug 4-6 mm bzw. 5-7 mm. Im Gegensatz zu den gleichmäßig verlaufenden Hydrophobierungsfronten bei der Oberflächenbehandlung des trockenen Bestandsbetons mit WA65 und LM7 ist beim GEL30 nur partiell eine hydrophobierende Wirkung im Vertikalschnitt des Prüfkörpers erkennbar. Die Eindringtiefen des Produkts schwanken hier zwischen 0 und 5 mm.

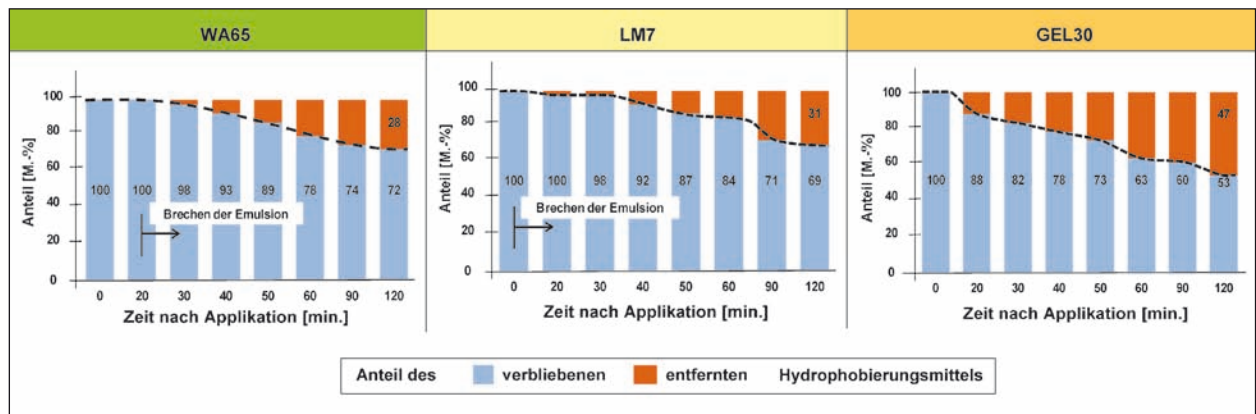


Bild 42-2: Gravimetrisch ermittelte Ablaufmenge des Hydrophobierungsmittels infolge Neigung der Applikationsoberfläche bei den Prüfkörpern des Bestandsbetons nach der Applikation verschiedenartiger Hydrophobierungsmittel – Vorkonditionierung mit Lastfall 1 (ohne Wasserbeaufschlagung)

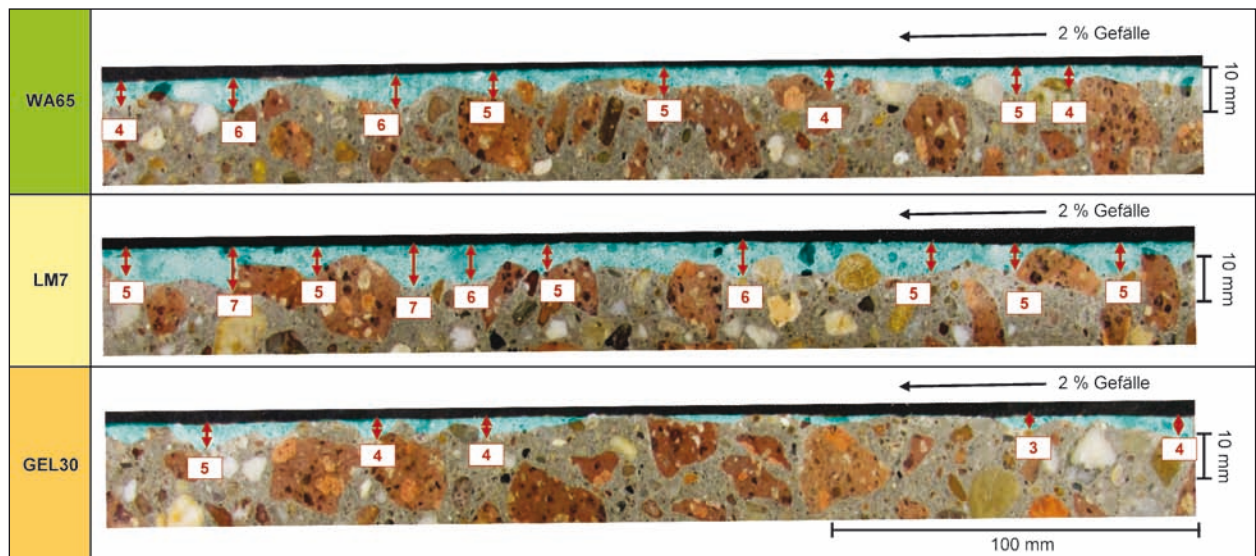


Bild 42-3: Eindringtiefe verschiedenartiger Hydrophobierungsmittel in die Randzone des Bestandsbetons (hydrophober Bereich eingefärbt) – Vorkonditionierung mit Lastfall 1 (ohne Wasserbeaufschlagung)

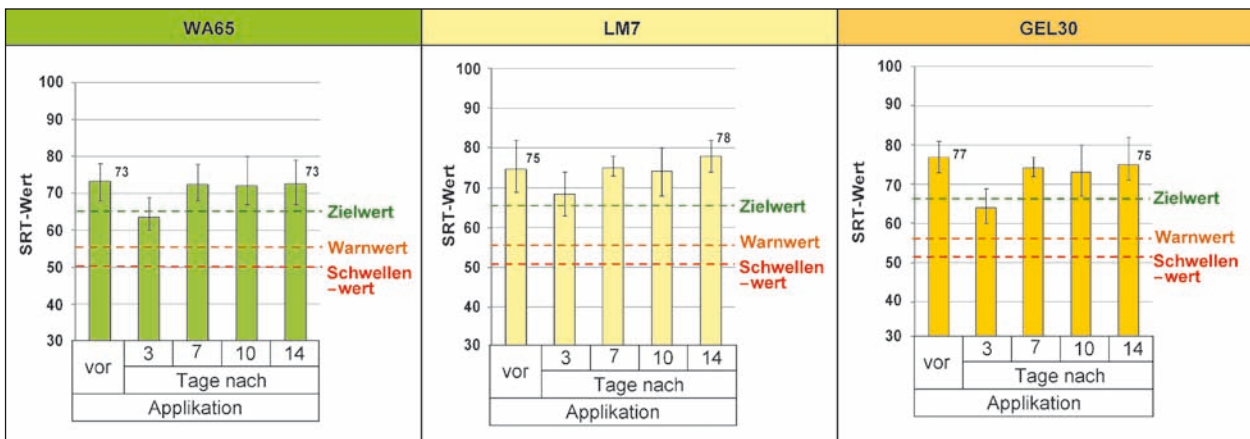


Bild 42-4: Entwicklung des SRT-Wertes auf der Oberfläche des Bestandsbetons nach der Applikation verschiedenartiger Hydrophobierungsmittel – Vorkonditionierung mit Lastfall 1 (ohne Wasserbeaufschlagung)

Die Entwicklung des SRT-Wertes, als Indikator für die Griffigkeit der Betonoberfläche, nach Applikation des jeweiligen Hydrophobierungsmittels zeigt das Bild 42-4. Es ist erkennbar, dass der SRT-Wert der verschiedenartig hydrophobierten Betonoberflächen drei Tage nach der Applikation noch deutlich kleiner ist als der Referenzwert im Ausgangszustand nach dem Partikelstrahlen. Dabei tritt jedoch beim Einsatz der Produkte WA65 und Gel30 nur eine geringfügige und bei der Verwendung von LM7 keine Unterschreitung des Zielwertes auf. Angemerkt werden muss in diesem Kontext, dass dieser positive Umstand primär auf die vorgeschaltete Oberflächenbehandlung mittels Partikelstrahler

zurückzuführen ist und nur eingeschränkt auf die Praxis übertragen werden kann.

Aufschluss über den Einfluss einer Wasserbeaufschlagung des Bestandsbetons (Lastfall 2) auf das Applikationsverhalten und die Güte der Hydrophobierung geben die Bilder 43-1 bis 43-4. Die vergleichende Betrachtung der zeitversetzt aufgenommenen Fotos der Betonoberfläche nach der Applikation der einzelnen Hydrophobierungsmittel zeigt, dass die beiden Emulsionssysteme WA65 und LM7 infolge der Wasserbeaufschlagung der Applikationsfläche zeitverzögert brechen. Auffallend ist, dass die mit WA65 und LM7 hydrophobierten Ober-

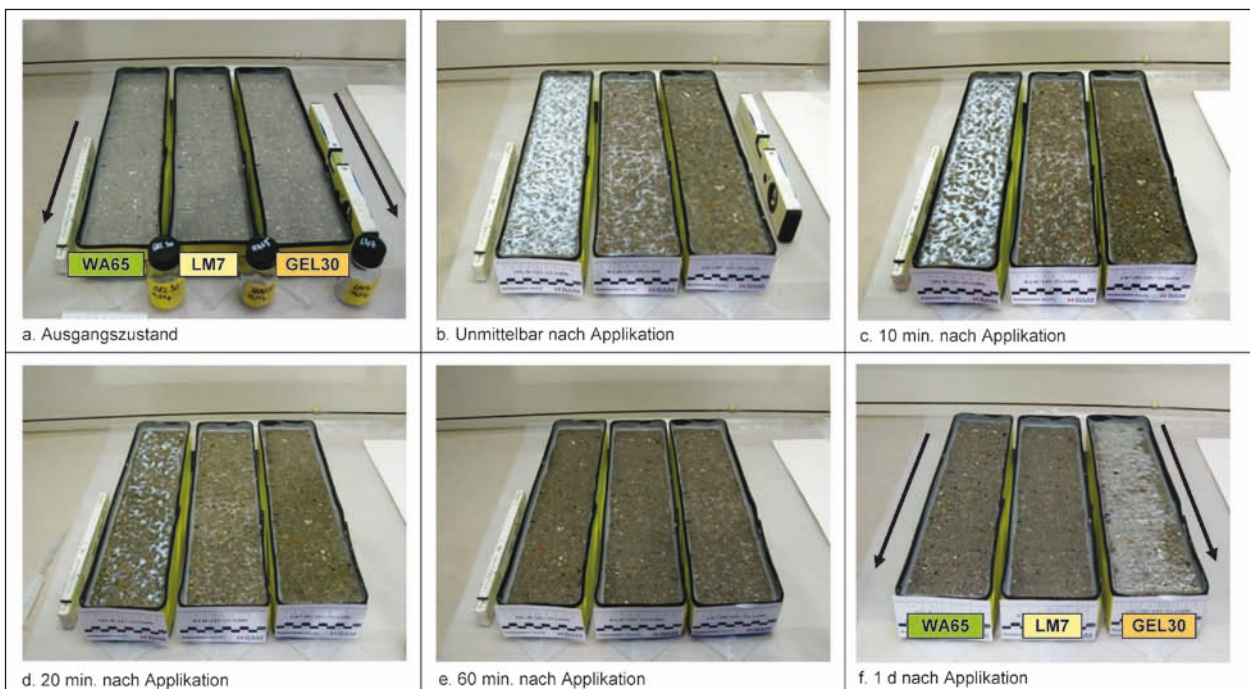


Bild 43-1: Dokumentation der visuellen Begutachtung der Oberfläche der Prüfkörper des Bestandsbetons vor und nach der Applikation verschiedenartiger Hydrophobierungsmittel – Vorkonditionierung mit Lastfall 2 (mit Wasserbeaufschlagung)

flächen im Vergleich zum Ausgangszustand noch einen Tag nach Applikation mattfeucht erscheinen. Auch das Ablaufverhalten der einzelnen Hydrophobierungsmittel ändert sich bei Wasserbeaufschlagung der Applikationsfläche deutlich. So ist in Bild 43-2 erkennbar, dass 120 Minuten nach Applikation deutlich mehr des jeweiligen Hydrophobierungsmittels auf der Applikationsfläche verbleibt. Allerdings zeigt das Bild 43-3, dass dieser Umstand nicht mit einer erhöhten Eindringtiefe des jeweiligen Hydrophobierungsmittels einhergeht. Vielmehr kommt es zur Ausbildung einer ungleichmäßigen Hydrophobierungsfrent im Vertikalschnitt des Prüfkörpers. Zusätzlich führt die erhöhte Menge des jeweils auf der Applikationsfläche verbliebenen Hydrophobierungsmittels kurzzeitig zu einer drastischen Verminderung der Griffigkeit der Betonoberfläche. So zeigt das Bild 43-4, dass insbesondere drei Tage nach

der Applikation der SRT-Wert bei allen verschiedenartig hydrophobierten Oberflächen jeweils unter den Warnwert fällt. Bei den Produkten WA65 und LM7 wird sogar der Schwellenwert unterschritten. Allerdings ist dieser kritische Zustand bereits nach sieben Tagen nicht mehr gegeben.

Einen zusammenfassenden Überblick über die Untersuchungsergebnisse zum Einfluss einer Wasserbeaufschlagung des Bestandsbetons auf das Applikationsverhalten und die Güte der Hydrophobierung gibt die Tabelle 14.

In den Bildern 44-1 bis 44-3 sind die Prüfergebnisse für den Laborbeton ohne Wasserbeaufschlagung (Lastfall 1) bei der Applikation der Hydrophobierungsmittel WA65, LM7 und GEL30 vergleichend dargestellt. Die Fotos zur zeitlichen Entwicklung der auf die Oberfläche des Laborbetons appli-

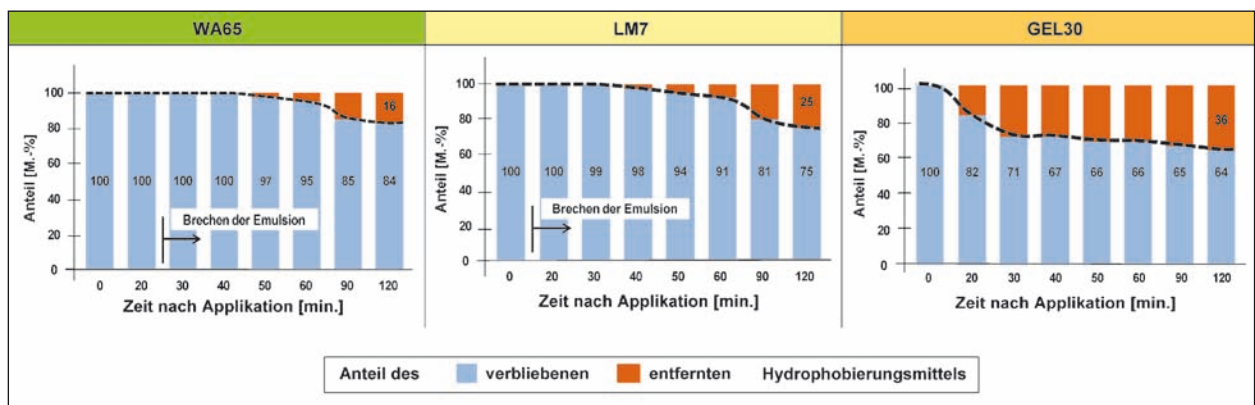


Bild 43-2: Gravimetrisch ermittelte Ablaufmenge des Hydrophobierungsmittel infolge Neigung der Applikationsoberfläche bei den Prüfkörpern des Bestandsbetons nach der Applikation verschiedenartiger Hydrophobierungsmittel – Vorkonditionierung mit Lastfall 2 (mit Wasserbeaufschlagung)

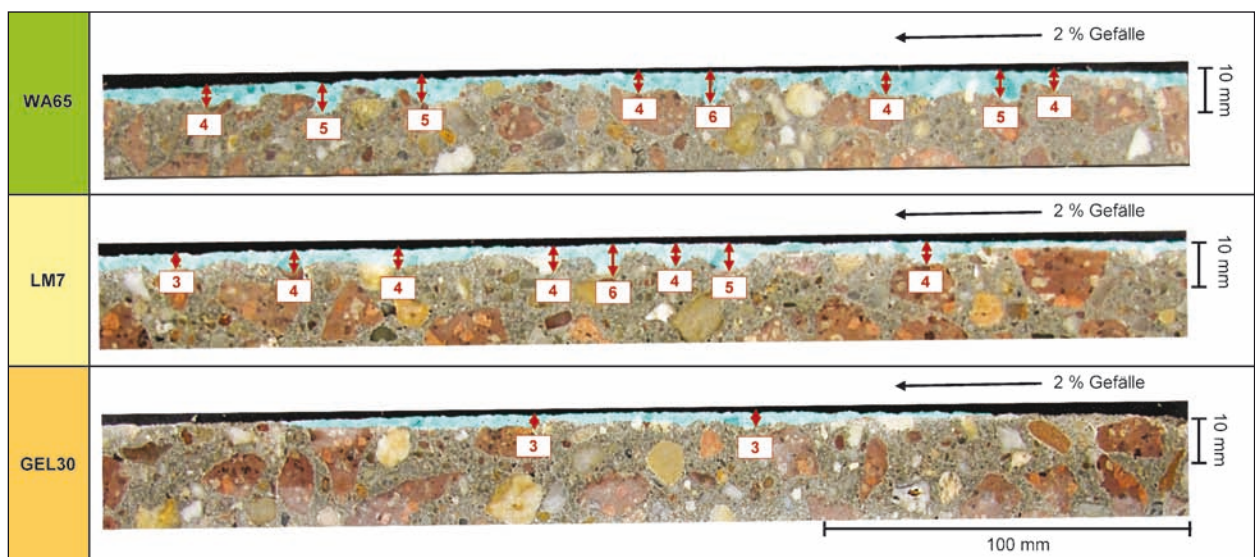


Bild 43-3: Eindringtiefe verschiedenartiger Hydrophobierungsmittel in die Randzone des Bestandsbetons (hydrophober Bereich eingefärbt) – Vorkonditionierung mit Lastfall 2 (mit Wasserbeaufschlagung)

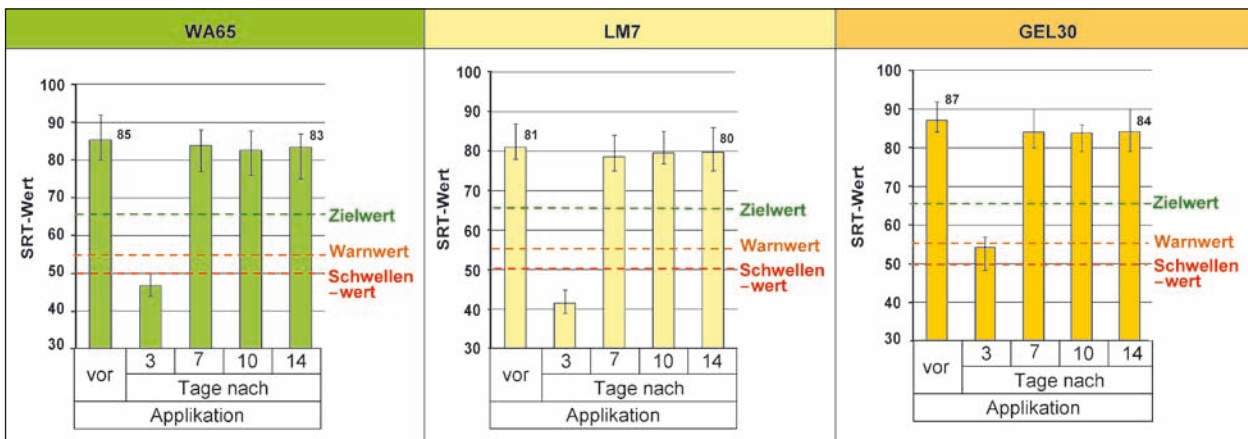


Bild 43-4: Entwicklung des SRT-Wertes auf der Oberfläche des Bestandsbetons nach der Applikation verschiedenartiger Hydrophobierungsmittel – Vorkonditionierung mit Lastfall 2 (mit Wasserbeaufschlagung)

Beurteilungskriterium	Betonart/hygrothermische Vorkonditionierung/Art des Hydrophobierungsmittels					
	Bestandsbeton mit Vorkonditionierung					
	Lastfall 1			Lastfall 2		
	WA65	LM7	GEL30	WA65	LM7	GEL30
visuell erkennbare Reaktionskinetik nach Applikation	Brechen der Emulsion		nicht erkennbar	Brechen der Emulsion		nicht erkennbar
	10-20 min	sofort		20-30 min	10-20 min	
	nach Applikation			nach Applikation		
Ablaufverhalten auf geneigter Applikationsfläche	Ablaufbeginn			Ablaufbeginn		
	30 min	20 min	sofort	40-50 min	30-40 min	sofort
	nach Applikation			nach Applikation		
	gesamte Ablaufmenge			gesamte Ablaufmenge		
	28 %	31 %	47 %	16 %	25 %	36 %
Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels	4-6 mm	5-7 mm	0-5 mm	1-6 mm	2-6 mm	0-3 mm
	Ausbildung der Hydrophobierungsfront			Ausbildung der Hydrophobierungsfront		
	gleichmäßig		ungleichmäßig	ungleichmäßig		
Griffigkeitsentwicklung auf Applikationsfläche	kein signifikanter Abfall des 3 d SRT-Wertes unter den geforderten Zielwert			signifikanter Abfall des 3 d SRT-Wertes unter Warn- bzw. Schwellenwert		

Tab. 14: Zusammenfassung der Ergebnisse der Applikationsuntersuchungen mit verschiedenartigen Hydrophobierungsmitteln am Bestandsbeton

zierten Hydrophobierung in Bild 45-1 zeigen, dass die Emulsion des Produktes WA65 sofort und nicht erst nach 10-20 Minuten wie beim gleichartig vorbehandelten Bestandsbeton bricht. Weiterhin ist im Gegensatz zum Bestandsbeton bei allen auf den trockenen Laborbeton (Lastfall 1) applizierten Hydrophobierungsmitteln kein Abfließen nach Applikation erkennbar. Bemerkenswert ist, dass dies trotzdem zu keiner signifikanten Erhöhung der Eindringtiefe des jeweiligen Hydrophobierungsmittels führt (siehe Bild 44-2). So besitzt diese bei dem Produkt WA65 mit 5-7 mm in etwa die gleiche Grö-

ßenordnung wie beim gleichartig behandelten Bestandsbeton. Bei der Applikation des Produktes LM7 auf den Laborbeton beträgt die gemessene Eindringtiefe 3-6 mm und ist somit leicht geringer als beim Bestandsbeton. Während bei den beiden Emulsionssystemen die Hydrophobierungsfront in der Randzone des Laborbetons gleichmäßig ausgebildet ist, weist diese bei der Applikation des GEL30 eine sehr hohe Ungleichmäßigkeit auf. Die Griffigkeitsentwicklung nach Applikation des jeweiligen Hydrophobierungsmittels auf den Laborbeton ist ähnlich wie bei dem gleichartig vorbehandelten

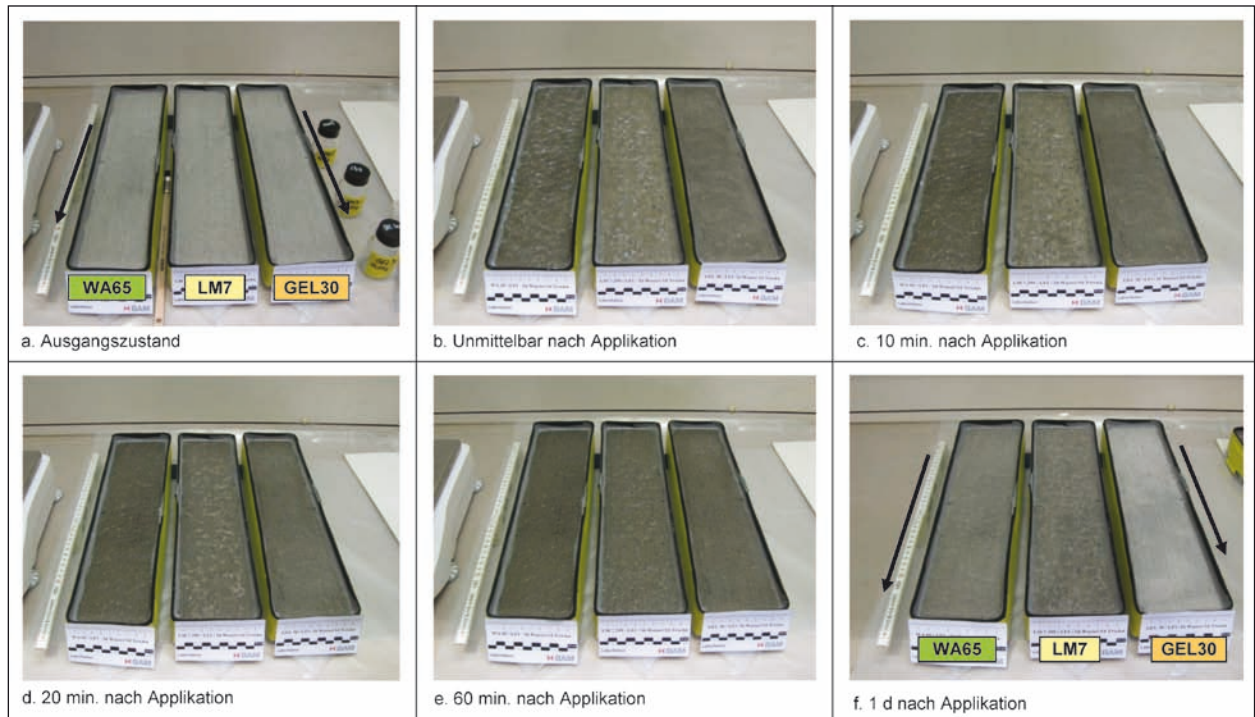


Bild 44-1: Dokumentation der visuellen Begutachtung der Oberfläche der Prüfkörper des Laborbetons vor und nach der Applikation verschiedenartiger Hydrophobierungsmittel – Vorkonditionierung mit Lastfall 1 (ohne Wasserbeaufschlagung)

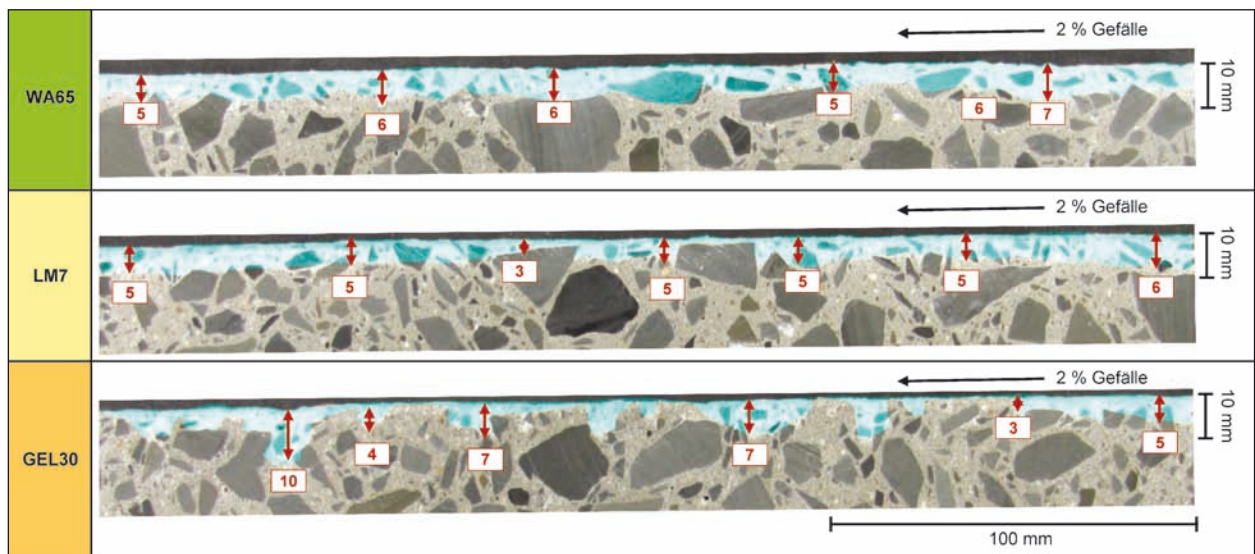


Bild 44-2: Eindringtiefe verschiedenartiger Hydrophobierungsmittel in die Randzone des Laborbetons (hydrophober Bereich eingefärbt) – Vorkonditionierung mit Lastfall 1 (ohne Wasserbeaufschlagung)

Bestandsbeton (siehe Bild 44-3). So sinken die SRT-Werte nicht unter den geforderten Zielwert von 65. Allerdings sei auch hier angemerkt, dass dieser positive Umstand primär auf die vorgeschaltete Oberflächenbehandlung mittels Partikelstrahler zurückzuführen ist und nur eingeschränkt auf die Praxis übertragen werden kann.

Aufschluss über den Einfluss einer Wasserbeaufschlagung des Laborbetons (Lastfall 2) auf das Ap-

plikationsverhalten und die Güte der Hydrophobierung geben die Bilder 45-1 bis 45-3. Wie Bild 45-1 zeigt, brechen die beiden Emulsionssysteme durch die Wasserbeaufschlagung des Laborbetons zwar später als ohne Wasserbeaufschlagung, jedoch gegenüber dem gleichartig vorbehandelten Bestandsbeton mit 20-30 Minuten (WA65) und 10-20 Minuten (LM7) deutlich früher. Ähnlich wie beim trockenen Laborbeton ist auch hier trotz Wasserbeaufschlagung kein Abfließen des Hydropho-

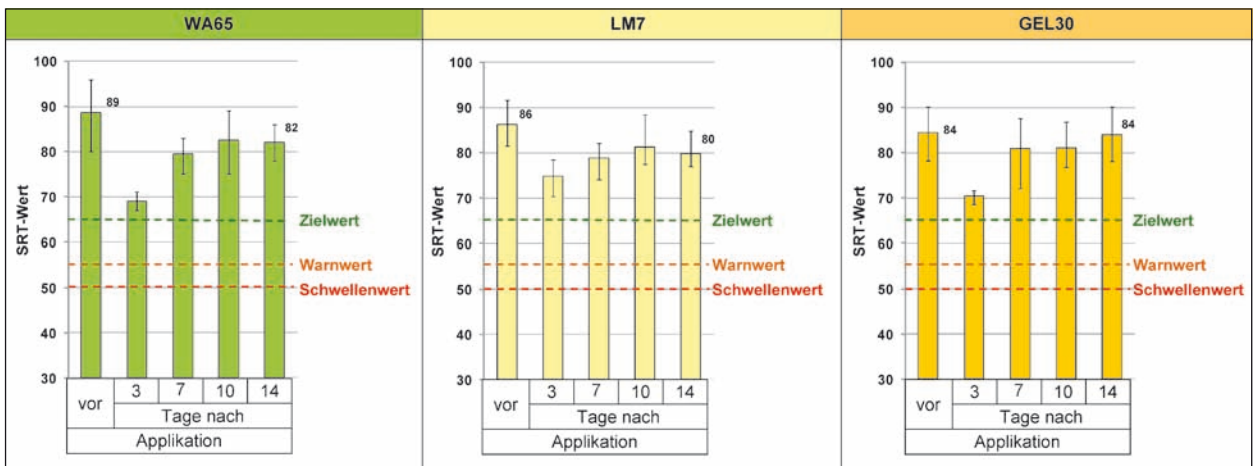


Bild 44-3: Entwicklung des SRT-Wertes auf der Oberfläche des Laborbetons nach der Applikation verschiedenartiger Hydrophobierungsmittel – Vorkonditionierung mit Lastfall 1 (ohne Wasserbeaufschlagung)

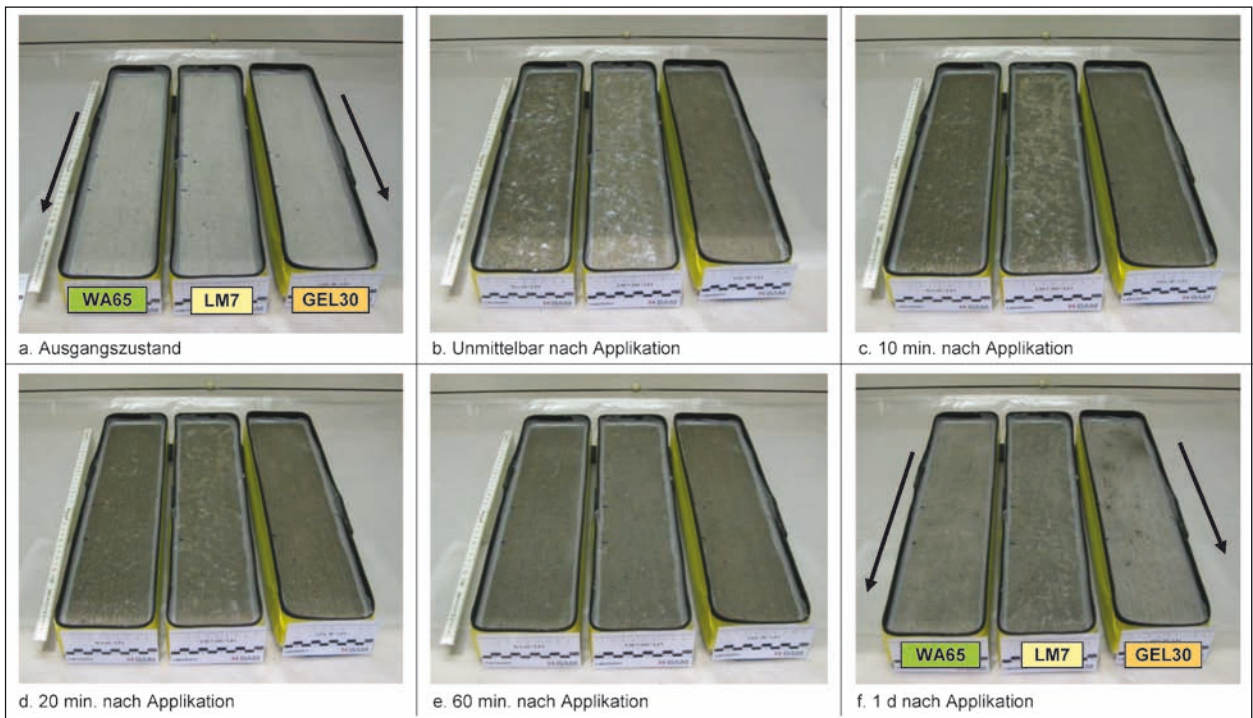


Bild 45-1: Dokumentation der visuellen Begutachtung der Oberfläche der Prüfkörper des Laborbetons vor und nach der Applikation verschiedenartiger Hydrophobierungsmittel – Vorkonditionierung mit Lastfall 2 (mit Wasserbeaufschlagung)

bierungsmittels auf der Betonoberfläche erkennbar. Das steht im Gegensatz zu dem Verhalten bei der Applikation der jeweiligen Hydrophobierungsmittel auf dem gleichartig vorkonditionierten Bestandsbeton. Die Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels erfährt mit Ausnahme des Produktes LM7 durch die Wasserbeaufschlagung des Laborbetons tendenziell eine Verminderung. Die Hydrophobierungsfrenten sind auch hier bei der Applikation der Emulsionssysteme gleichmäßig ausgebildet, während bei dem GEL30 die hydrophobierende Wirkung nur

partiell gegeben ist. Das Bild 45-3 zeigt abschließend, dass die Wasserbeaufschlagung des Laborbetons keinen signifikanten Einfluss auf die Griffigkeitsentwicklung nach der Applikation des jeweiligen Hydrophobierungsmittels hat. So fallen alle SRT-Werte selbst drei Tage nach der Applikation der Hydrophobierungsmittel nicht unter den Zielwert von 65.

Einen zusammenfassenden Ergebnisüberblick gibt abschließend die Tabelle 15.

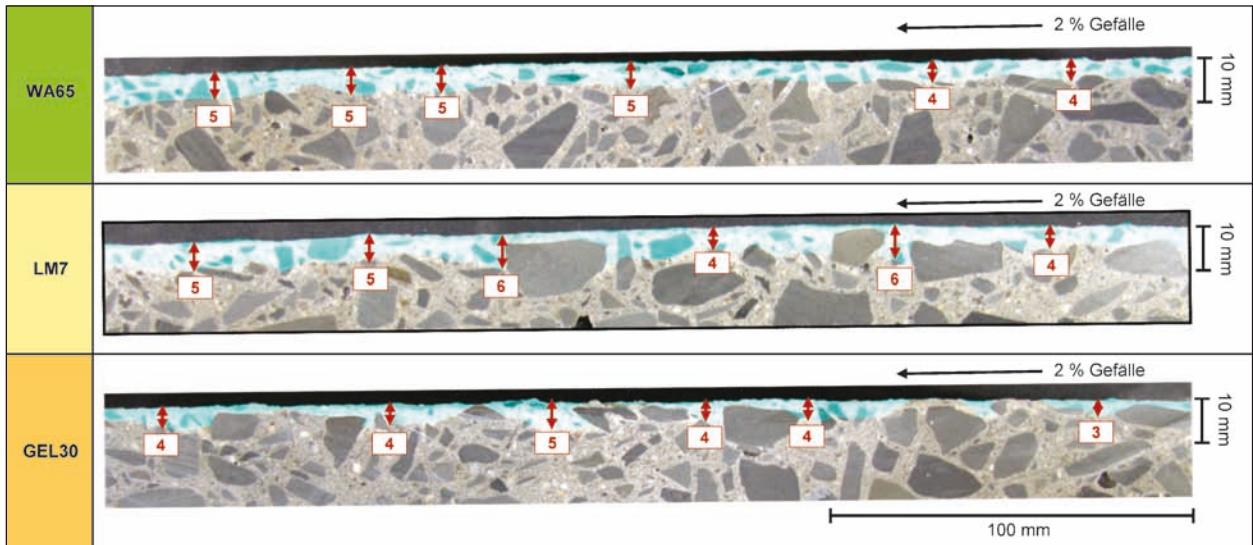


Bild 45-2: Eindringtiefe verschiedenartiger Hydrophobierungsmittel in die Randzone des Laborbetons (hydrophober Bereich eingefärbt) – Vorkonditionierung mit Lastfall 2 (mit Wasserbeaufschlagung)

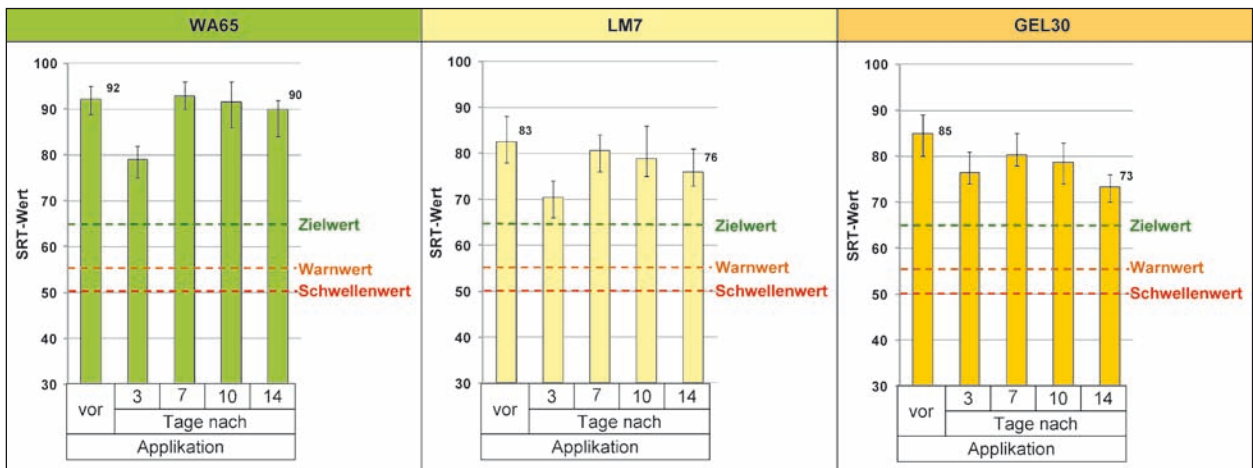


Bild 45-3: Entwicklung des SRT-Wertes auf der Oberfläche des Laborbetons nach der Applikation verschiedenartiger Hydrophobierungsmittel – Vorkonditionierung mit Lastfall 2 (mit Wasserbeaufschlagung)

Beurteilungskriterium	Betonart/hydrotherm. Vorkonditionierung/Hydrophobierungsmittel					
	Laborbeton mit Vorkonditionierung					
	Lastfall 1			Lastfall 2		
	WA65	LM7	GEL30	WA65	LM7	GEL30
visuell erkennbare Reaktionskinetik nach Applikation	Brechen der Emulsion		nicht erkennbar	Brechen der Emulsion		nicht erkennbar
	sofort	sofort		5-10 min	5-10 min	
Ablaufverhalten auf geeigneter Applikationsfläche		kein Ablaufen nach Applikation		kein Ablaufen nach Applikation		
Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels	5-7 mm	3-6 mm	0-10 mm	4-5 mm	4-6 mm	0-5 mm
	Ausbildung der Hydrophobierungsfront		ungleichmäßig	Ausbildung der Hydrophobierungsfront		ungleichmäßig
gleichmäßig		gleichmäßig				
Griffigkeitsentwicklung auf Applikationsfläche	keine Absenkung des SRT-Wertes unter den geforderten Zielwert			keine Absenkung des SRT-Wertes unter den geforderten Zielwert		
Lastfall 1: ohne Wasserbeaufschlagung						
Lastfall 2: mit Wasserbeaufschlagung						

Tab. 15: Zusammenfassung der Ergebnisse der Applikationsuntersuchungen mit verschiedenartigen Hydrophobierungsmitteln am Laborbeton

sellagerung (KWL) [41] untersucht. Mit diesen Versuchen sollte herausgefunden werden, ob durch die klimatischen Einwirkungen die hydrophobierte Betonrandzone eine Alterung und somit einen Verlust der Wirksamkeit erfährt. Gleichzeitig gibt die hierbei als Prüfgröße ermittelte Dehnung Aufschluss über die Auswirkungen der Hydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess.

Zusätzlich wurde im Prüfszenario C die Eignung des 60°C-Betonversuchs [42] zur Beurteilung der Auswirkungen einer Hydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess im Bestandsbeton untersucht. Zusätzlich erfolgten adäquate Untersuchungen an zwei Laborbetonen mit einem erhöhten inneren AKR-Schädigungspotenzial. Dieses wurde zum einen durch die Verwendung von Grauwacke und zum anderen durch die Einstellung eines erhöhten Na_2O -Äquivalent sichergestellt. Letzteres wurde vergleichend einerseits mittels Aufdotierung eines Straßenbauzements mit NaCl sowie andererseits durch die Verwendung eines alkalireichen Prüfzement realisiert. Die Prüfkörper aus dem Bestandsbeton und den verschiedenartigen Laborbetonen wurden exemplarisch allseitig mit dem Produkt WA65 hydrophobiert.

Vertiefende mikroskopische und mikrochemische Untersuchungen des Bestandsbetons und der Laborbetone sollten zusätzlich Aufschluss über die Alkaliverteilung und die Ausprägung des AKR-Schädigungsprozesses bei den Prüfszenarien B und C geben.

4.4.2 Schwingbalken mit aufstehender Prüflösung (Prüfszenario A)

Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit der hydrophobierten Betonrandzone wurden vergleichend die

Transport- und Degradationsprozesse bei zwei Schwingbalken bei gleichzeitig aufstehender 5%iger NaCl-Lösung ohne und mit Hydrophobierung der Oberfläche verfolgt. Bei beiden Balken kam aus Vergleichbarkeitsgründen derselbe Laborbeton zum Einsatz (Betonzusammensetzung siehe Tabelle 9 in Kapitel 4.2.2). Die Abmessungen der Balken betragen $200 \times 50 \times 27 \text{ cm}^3$. Die Prüffläche beider Balken wurde mit einem Besenstrich versehen. Die Prüffläche eines Balkens wurde nach seiner hygrothermischen Vorkonditionierung gemäß Lastfall 2 (Kapitel 4.3.2) mit dem Hydrophobierungsmittel WA65 behandelt. Die Auftragsmenge betrug dabei 280 g/m^2 . Aus Vergleichbarkeitsgründen wurden beide Balken in einem Alter von ca. 60 Tagen geprüft.

Einen optischen Eindruck von der verwendeten Versuchsanordnung für die kombinierte Beanspruchung der großformatigen Balken vermittelt das Bild 46. Als statisches System wurde ein Träger auf zwei Stützen mit beidseitiger Anordnung eines Kragarms gewählt. Die dynamische Lasteintragung erfolgte symmetrisch im äußeren Randbereich der Kragarme. Dadurch wurde eine gleich bleibende Biegebeanspruchung auf der Oberseite des Balkens zwischen den Auflagern realisiert. Dies wiederum ist die Voraussetzung für einen möglichst gleichmäßigen Eintrag der aufstehenden 5%igen NaCl-Lösung. Das Aufstehen der Prüflüssigkeit auf der mit einem Besenstrich texturierten Oberseite des Prüfkörpers wurde durch ein Umkleben des oberen Bereichs der Mantelfläche mit einem Moosgummi analog der bewährten Verfahrensweise bei der Klimawechselagerung sichergestellt. Einen Überblick über das Belastungsregime und die simultan bzw. zyklisch durchgeführten Messungen gibt die Tabelle 17. So wurden nach einer 7-tägigen Vorkonditionierung mittels aufstehender 5%iger

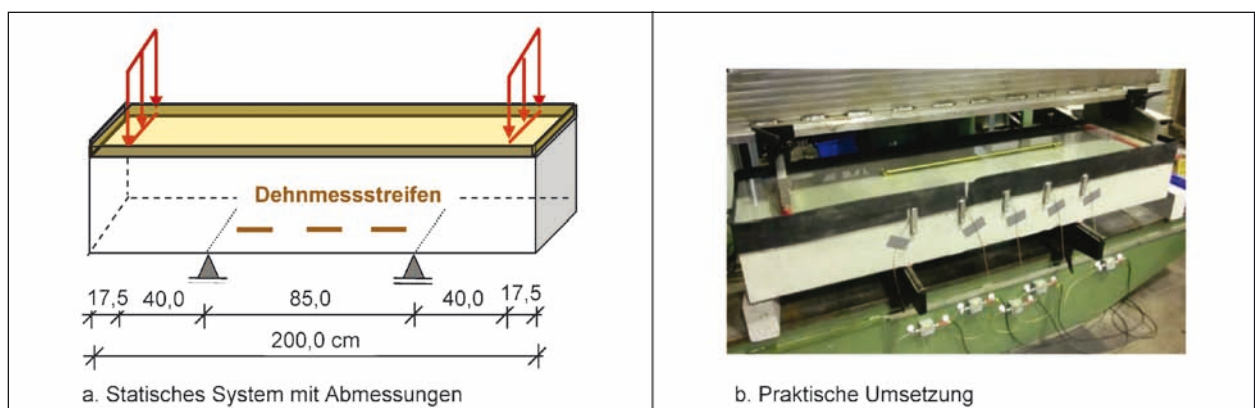


Bild 46: Versuchsanordnung für Schwingversuch mit gleichzeitig aufstehender Prüflösung

Belastungsregime in zeitlicher Reihenfolge		Art der Messung			
		Menge aufstehender Prüflösung (Gravimetrie)	Feuchteprofil (NMR)	Ultraschalllaufzeit (Oberflächenwelle)	Dehnung zwischen Auflagern auf Balkenunterseite
vor	7 d Vorkonditionierung mit aufstehender Prüflösung (5 % NaCl)	x	x	x	-
nach		x	x	x	-
20 Belastungszyklen (1 Mio. Lastwechsel)		-	-	-	x
1 Ruhezyklus (Prüflösung entfernt)		x	-	x	-
20 Belastungszyklen (1 Mio. Lastwechsel)		x	-	-	x
1 Ruhezyklus (Prüflösung entfernt)		x	-	x	-
30 Belastungszyklen (1,5 Mio. Lastwechsel)		-	-	-	x
1 Ruhezyklus (Prüflösung entfernt)		x	-	x	-
30 Belastungszyklen (1,5 Mio. Lastwechsel)		-	-	-	x
1 Ruhezyklus (Prüflösung entfernt)		x	x	x	-

Tab. 17: Belastungsregime und durchgeführte Messungen

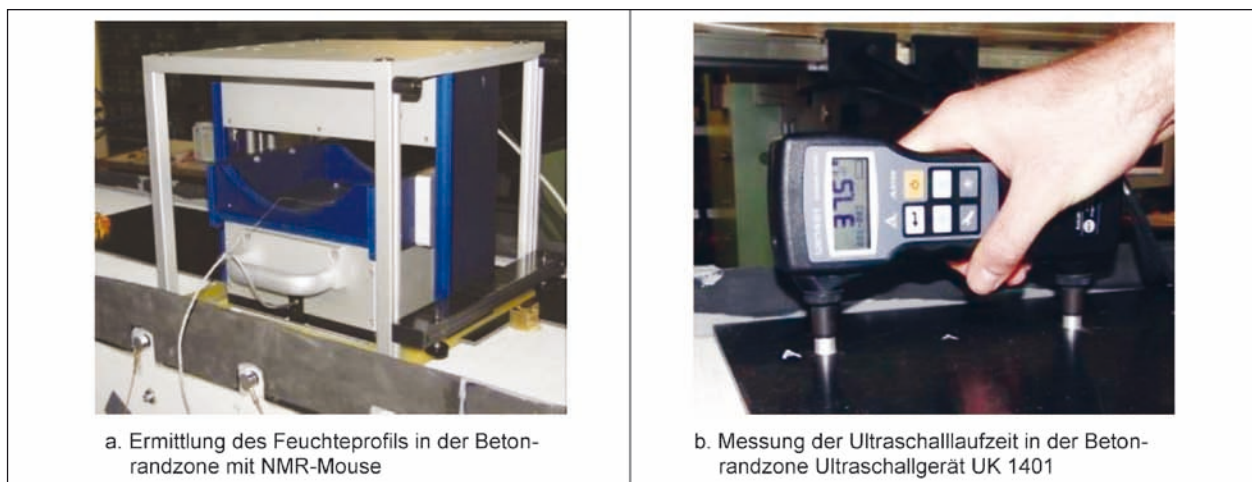


Bild 47: Erfassung von Zustands- und Schädigungsindikatoren in der Betonrandzone im Ruhezyklus

NaCl-Prüflösung die Balken einem aus intermittierenden Ruhe- und Belastungszyklen bestehenden Prüfregime unterzogen.

Die diskontinuierliche Bestimmung der Masse der aufstehenden Prüflösung mittels Wägung und des Feuchteprofils mit der NMR-Mouse PM 25 der Firma Magritek (siehe Bild 47a) sollten dabei Aufschluss über den Eintrag der Prüflösung in den Balken in Abhängigkeit von der Degradation des Betons geben. Nach erfolgter Wägung wurde hierbei die Prüflösung wieder aufgegeben. Die ermüdungs-

induzierte Betondegradation selbst wurde einerseits mittels Messung der Ultraschalllaufzeit im Bereich der Betonrandzone verfolgt, wobei das Ultraschallgerät UK 1401 der Firma Acoustic Control Systems Ltd. (siehe Bild 47b) Anwendung fand. Andererseits wurde auf der Unterseite des Balkens zwischen den Auflagern die Dehnung mit Dehnmessstreifen verfolgt. Dieses erfolgte simultan in der Rampenphase des jeweiligen Belastungszyklus. In diesem Kontext vermittelt das Bild 48 einen Eindruck von der Art der mechanischen Beanspruchung und der zeitlichen Einordnung der Deh-

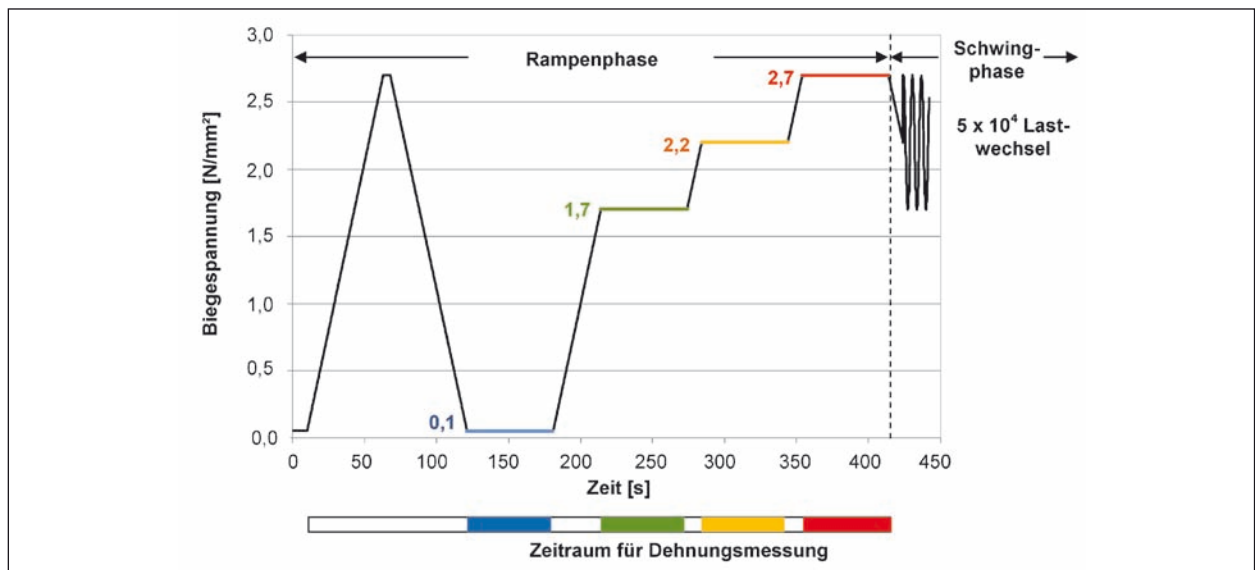


Bild 48: Mechanische Beanspruchung und zeitliche Einordnung der Dehnungsmessung während eines Belastungszyklus

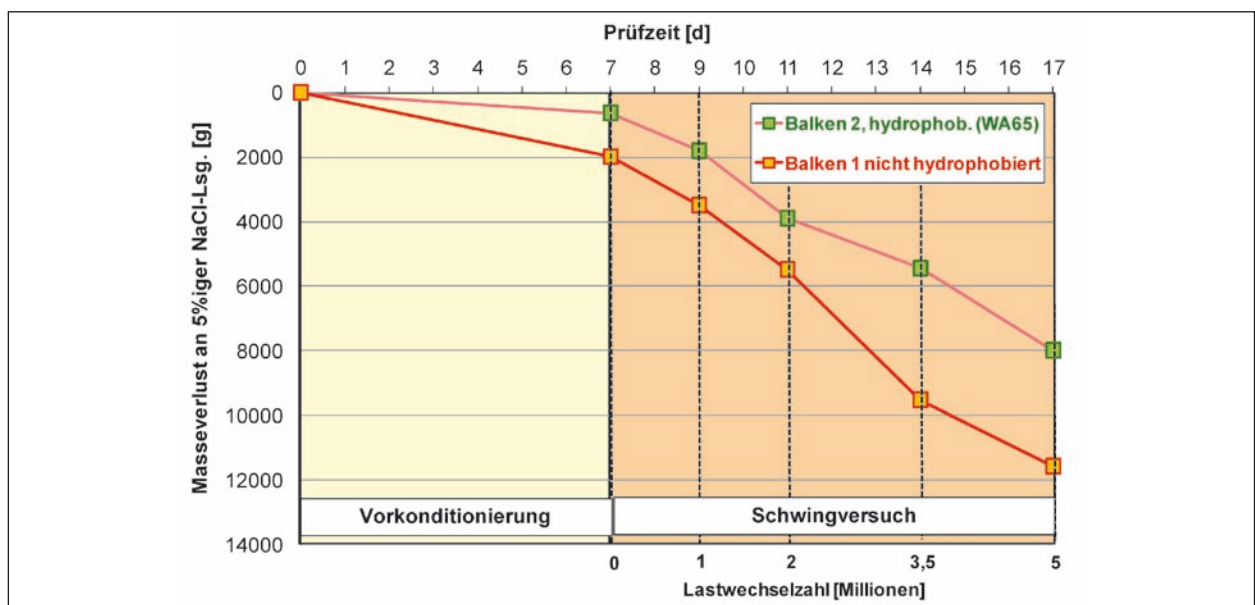


Bild 49: Zeitliche Entwicklung der Menge an 5%iger NaCl-Lsg. auf dem Betonbalken ohne und mit Hydrophobierung während der Vorkonditionierung und dem Schwingversuch (Messung im Ruhezyklus)

nungsmessung. Nach der Rampenphase wurden in jedem Belastungszyklus 50.000 Lastwechsel mit einer Oberspannung von 2,7 N/mm² bei einer Schwingbreite von 1,0 N/mm² und einer Frequenz von 7 Hz in den Balken eingetragen. Die gewählte Oberspannung entspricht dabei ca. 60 % der Biegezugspannung des Balkens. Es wurde so eine Beanspruchung simuliert, die im Prüfkörper Spannungen hervorruft, welche sich in einer Betonfahrbahn aus der Überlagerung von temperaturbedingten Wölbspansungen und der im Bereich der Querscheinfuge aus Überrollungen der Achse eines Lkws mit 40 t induzierten Spannungen ergeben

[43]. Insgesamt erfuhr jeder Balken hierbei 5 Millionen Lastwechsel.

Die Ergebnisse der Schwingversuche sind in den Bildern 49 bis 53 dargestellt. Aufschluss über den Eintrag an 5%iger NaCl-Lsg. in den Balken ohne und mit hydrophobierter Oberfläche geben die Bilder 49 bis 51. So zeigt das Bild 49 erwartungsgemäß, dass sowohl nach der Vorkonditionierung als auch nach Beendigung des Schwingversuchs auf dem Balken mit der hydrophobierten Oberfläche noch eine größere Menge an NaCl-Lsg. aufsteht als auf dem Balken ohne Hydrophobierung. Es ist

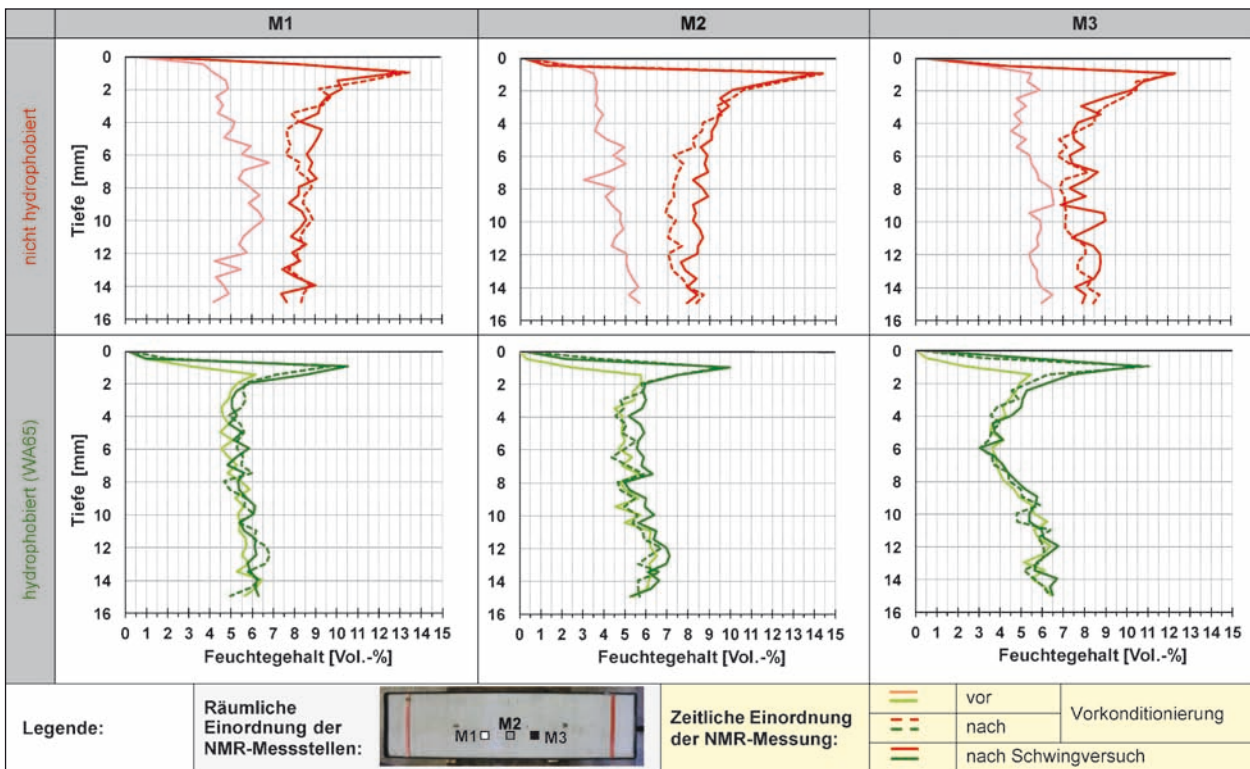


Bild 50: Messstellenspezifische NMR-Feuchteprofile in der Betonrandzone ohne und mit Hydrophobierung zu definierten Zeitpunkten des Belastungsregimes (Messung im Ruhezyklus)

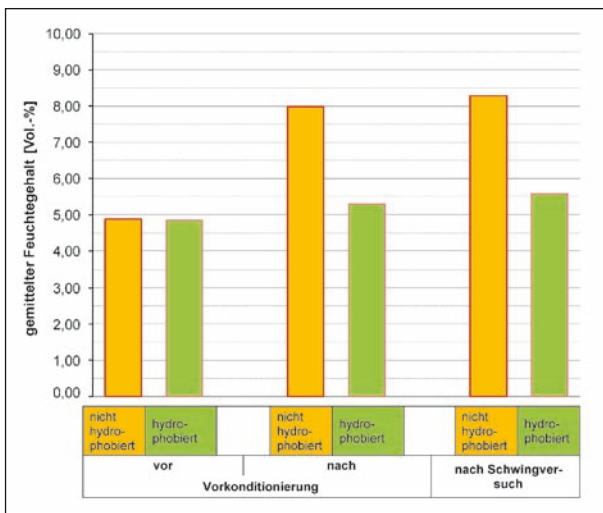


Bild 51: Aus NMR-Feuchteprofilen generierter mittlerer Feuchtegehalt in der Betonrandzone ohne und mit Hydrophobierung (Messung im Ruhezyklus)

jedoch bei beiden Balken in diesem Kontext anzumerken, dass trotz der Abdeckung der Balken mit einer PE-Folie ein großer Teil der Prüflösung über die Prüfzeit verdunstet und somit nicht in die Betonrandzone eingetragen wird. Einen detaillierten Aufschluss über den Feuchteeintrag in die Betonrandzone der Balken ohne und mit Hydrophobierung geben die jeweils an drei Messstellen mit der NMR-Mouse bis in eine Tiefe von 15 mm ermittel-

ten Feuchteprofile (siehe Bild 50). Diese wurden sowohl vor und nach der Vorkonditionierung als auch nach dem Schwingversuch vergleichend ermittelt. Es wird deutlich, dass ausschließlich in den Balken ohne Hydrophobierung primär während der Konditionierungsphase eine größere Menge an Prüflösung eingetragen wird. So erfährt hier der mittlere Feuchtegehalt in der Betonrandzone eine Erhöhung von 4,9 auf ca. 8 Vol.-% (siehe Bild 51). Im Vergleich dazu erhöht sich der mittlere Feuchtegehalt in der Betonrandzone des hydrophobierten Balkens lediglich um 0,4 Vol.-%. Erstaunlich ist, dass sich bei beiden Balken (ohne und mit Hydrophobierung) der mittlere Feuchtegehalt in der Betonrandzone im anschließenden Schwingversuch nicht signifikant erhöht. Das legt die Vermutung nahe, dass die Betonbalken nur eine relativ geringe Degradation erfahren haben. Gestützt wird diese Feststellung durch Ergebnisse der Ultraschall-Laufzeitmessung in der Betonrandzone (siehe Bild 52). Es ist unabhängig vom Vorhandensein einer Hydrophobierung bei beiden Balken während der Vorkonditionierung eine Verringerung der Ultraschalllaufzeit erkennbar. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den Eintrag der Prüflösung in die Betonrandzone zurückzuführen. Bei dem sich anschließenden Schwingversuch verringert sich insbesondere bei dem nichthydrophobierten Balken

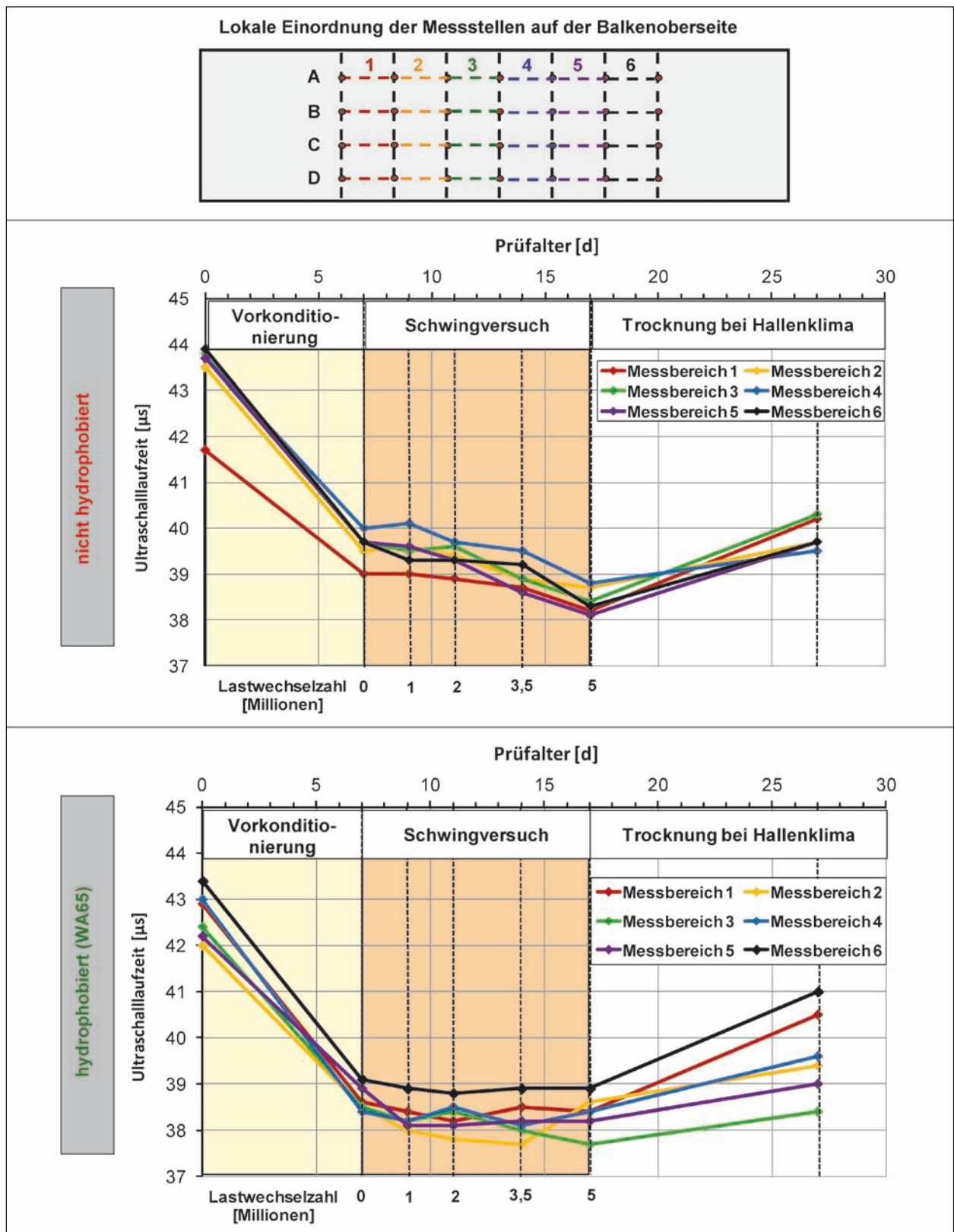


Bild 52: Ultraschalllaufzeit in der Betonrandzone ohne und mit Hydrophobierung, gemittelt über vier Messstellen über die Balkenbreite (Messung im Ruhezyklus)

tendenziell die Ultraschalllaufzeit. Auch hier dürfte die erhöhte Aufnahme der Prüflösung in der Betonrandzone ursächlich für diese Erscheinung sein. So

werden mit der Prüflösung die Poren und Risse gefüllt und ermöglichen so eine bessere Ausbreitung der Ultraschallwellen. Bei den hydrophobier-

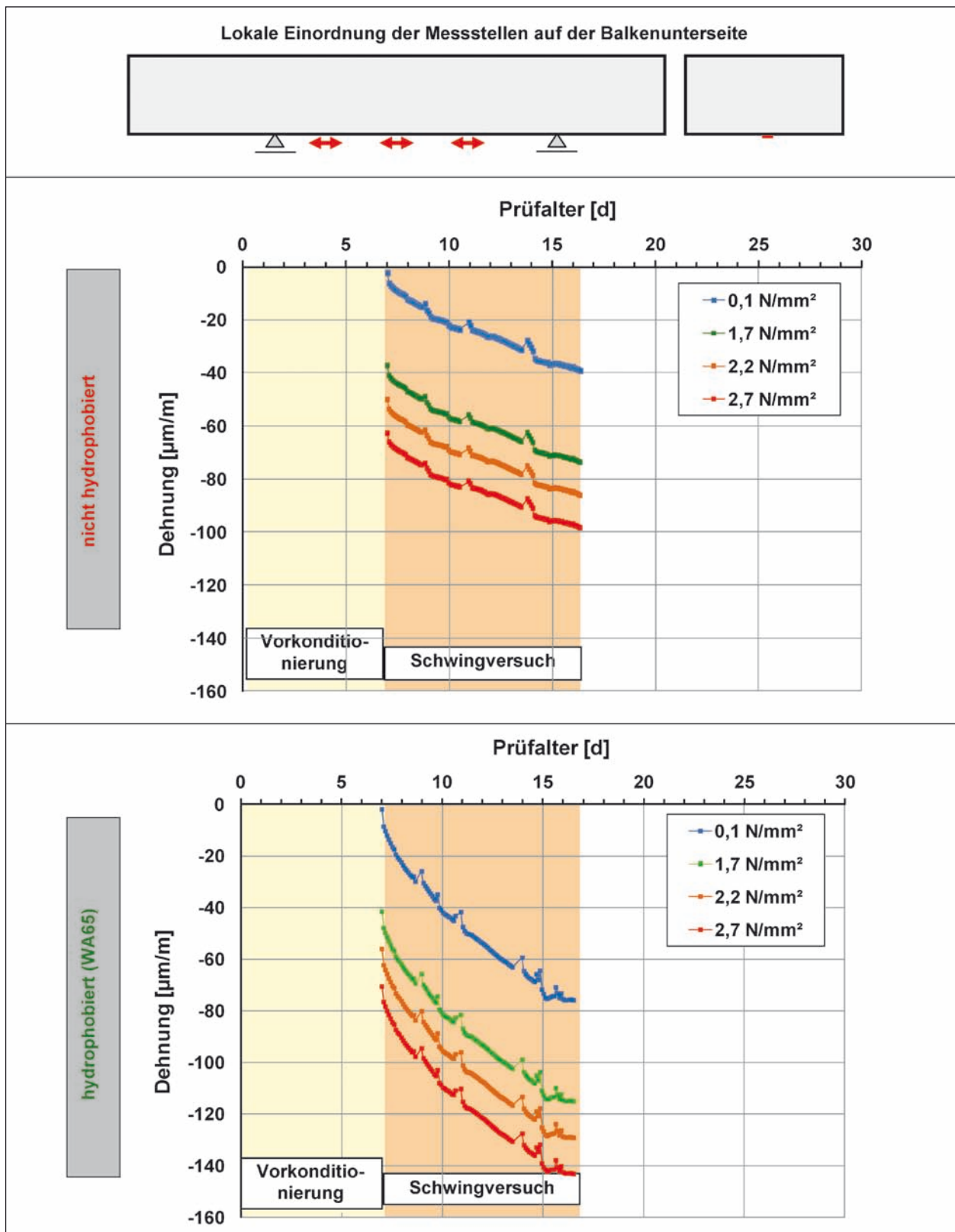


Bild 53: Mittlere Dehnung der unteren Betonrandzone des Balkens ohne und mit Hydrophobierung der Oberseite (Messung in der Rampenphase im Belastungszyklus)

ten Betonbalken hingegen ist die Veränderung der Ultraschalllaufzeit im Schwingversuch vernachlässigbar.

Wie aus Bild 53 ersichtlich, hat die Hydrophobierung der Betonbalken auch Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der Stauchung auf der Unterseite des

Betonbalkens in der Rampenphase der Belastungszyklen. So ist bei den Balken ohne Hydrophobierung der Dehnungsfortschritt auf der Balkenunterseite geringer ausgeprägt als bei den hydrophobierten Balken. Dies ist vermutlich auf die erhöhte Durchfeuchtung der oberen Betonrandzone und die einhergehende Behinderung der hygrischen Dehnung durch den trockenen Kernbereich des Balkens zurückzuführen. Dadurch werden Druckspannungen in der oberen Betonrandzone generiert, die entlastend wirken.

Insgesamt lassen die am Schwingbalken mit aufstehender Prüflösung gewonnenen Ergebnisse die Aussage zu, dass die gewählte Beanspruchung die Dauerhaftigkeit der hydrophobierten Randzone nicht signifikant beeinträchtigt.

4.4.3 Klimawechsellagerung (Prüfszenario B)

Nach der Analyse des Einflusses der ermüdungsinduzierten Degradation des Laborbetons galt es nun, die Auswirkungen der klimatischen Einwirkungen und des externen Tausalzeintrags in den Fahrbahndeckenbeton auf die Wirksamkeit des Hydrophobierungsmittels zu untersuchen. Hierfür gelangte das von der Bauhaus-Universität Weimar für die prognostische Beurteilung des AKR-Restschädigungspotenzials entwickelte Klimawechsellagerungsverfahren [41] zum Einsatz. So ist dieses AKR-Performanceprüfverfahren nach dem ARS 04/2013 [44] auch bei der Beurteilung der Eignung

von Gesteinskörnungen bzw. Betonzusammensetzungen für WS-Grundprüfungen anzuwenden.

Kurzbeschreibung des Prüfverfahrens

Bei der Klimawechsellagerung (siehe Bild 54) werden die Bestandsbetonprüfkörper aus dem BAB-Netz mindestens acht Klimawechselzyklen ausgesetzt. Die Laborbetonprüfkörper hingegen werden 12 derartiger Zyklen unterzogen. Jeder Zyklus besteht dabei aus einer ca. 4-tägigen Trocknungsphase, einer 14-tägigen Nebelphase und einer 3-tägigen Frost-Tauwechselphase. Die Trocknungsphase wird mit einer Temperaturschockbeanspruchung eingeleitet. Nach der Trocknungsphase bei 60 °C und der sich anschließenden Abkühlung auf 20 °C werden jeweils drei Prüfkörper einer Prüfserie vergleichend mit entmineralisiertem Wasser bzw. einer 3,6%igen NaCl-Lösung beaufschlagt, die während der Nebel- und der Frost-Tauwechselphase auf dem Prüfkörper verbleibt. Hierzu werden die Prüfkörper analog dem schwedischen Slab-Test [45] präpariert (siehe Bild 55a). Die Tausalzmenge wird dabei so bemessen, dass in einem Zyklus ca. 360 g NaCl/m² in Form einer Lösung auf die Prüfkörperoberfläche appliziert werden. Wenn in diesem Kontext unterstellt wird, dass mit einem modernen Streufahrzeug ca. 15 g/m² NaCl auf den Fahrbahndeckenbeton aufgebracht wird, entspricht die in einem Zyklus aufgebrauchte Streusalzmenge ca. 24 Streueinsätzen. Nach Beendigung der Frost-Tauwechselphase wird die Prüflösung auf den Prüfkör-

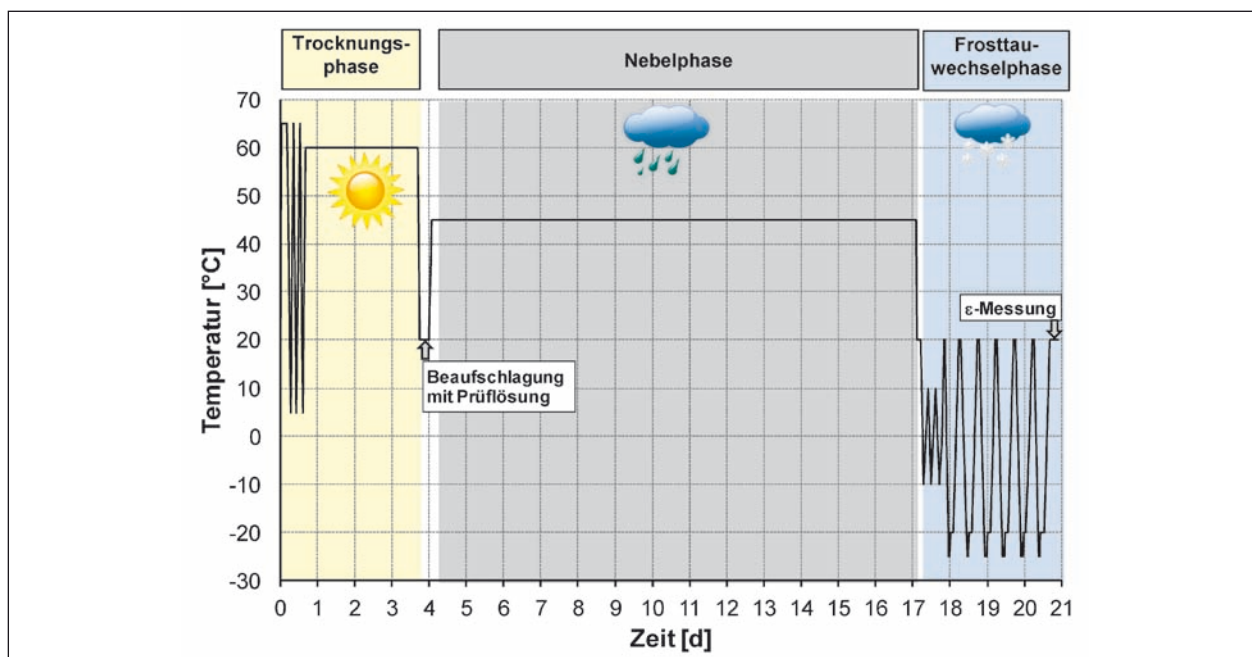


Bild 54: Einwirkungsphasen eines Klimawechselzyklus in Anlehnung an [41]



Bild 55: Impressionen zur Klimawechsellagerung

pern entfernt und anschließend deren Masse und Längenänderung bestimmt. Die Bezugswerte für die Bewertung der Veränderung dieser Messgrößen werden im ersten Zyklus nach der Trocknungsphase bestimmt. Zu Beginn der Trocknungsphase wird die zuvor entfernte Prüflösung wieder aufgebracht. Nach der Trocknungsphase werden auf den Prüfkörpern neue Prüflösungen aufgebracht. Die Abmessungen der KWL-Prüfkörper betrug bei Bestands- und Laborbeton jeweils $40 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$.

Im Kontext der Überprüfung der Wirksamkeit der Hydrophobierung mit der Klimawechsellagerung gelangten die Produkte WA65 und LM7 nach hygrothermischer Vorkonditionierung der Prüfkörper (Kapitel 4.3.2) zum Einsatz. Ihre Auftragsmenge betrug sowohl beim Bestands- als auch beim Laborbeton 280 g/m^2 . Die Applikation erfolgte mittels eines einmaligen Pinselauftrags. Zur Sicherstellung eines hinreichenden Polymerisationsgrades der auf Silan basierenden Hydrophobierungsmittel wurden die Prüfkörper nach ihrer Hydrophobierung zwei Wochen in der Prüfhalle und danach eine Woche bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65% bis zur Einbringung in die Baustoffprüfkammer zwischengelagert. Die Ergebnisse der Klimawechsellagerung werden nachfolgend separat für die Bestands- und Laborbetone jeweils vergleichend ohne und mit Hydrophobierung der Prüffläche aufgezeigt.

Klimawechsellagerung des Bestandsbetons ohne und mit Hydrophobierung

• Prüfprogramm

Zur Analyse der Auswirkungen der Hydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess wurden

beim Bestandsbeton zwei Hauptserien einer Klimawechsellagerung unterzogen.

In einer ersten Hauptserie wurden sowohl aus der Plattenmitte als auch aus dem Bereich der Querscheinfuge Prüfkörper gewonnen. Nach dem Zerschneiden der Prüfkörper wurden diese sieben Tage bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65% vorkonditioniert (Kapitel 4.3.2, Lastfall 1). Als Hydrophobierungsmittel gelangte hierbei ausschließlich das Produkt WA65 zum Einsatz. Die Applikationsfläche war dabei nicht geneigt. Bei dieser Hauptserie wurden die Prüfkörper vergleichend ohne und mit Hydrophobierung mit entmineralisiertem Wasser (Teilserien 1.0 und 1.1) bzw. $3,6\%$ iger NaCl-Lösung (Teilserien 1.2 und 1.3) beaufschlagt. Zur weitergehenden Bewertung des Einflusses des Tausalzes auf den AKR-Schädigungsprozess wurde einerseits in der Trocknungsphase die $3,6\%$ ige NaCl-Lösung entfernt (Teilserien 1.6 und 1.7) sowie andererseits zusätzlich als Prüfmedium eine 20% ige NaCl-Lösung verwendet (Teilserien 1.4 und 1.5).

In der zweiten Hauptserie wurden die Prüfkörper ausschließlich aus den Bereich der Querscheinfuge für die Klimawechsellagerung gewonnen. Hiermit sollte eine größere Vorschädigung des Betongefüges Berücksichtigung finden. Die Prüfkörperoberfläche wurde auch hier zur Vermeidung verfälschender Einflüsse partikelgestrahlt. Zur besseren Simulation der praktischen Verhältnisse wurden die Prüfkörper einer dreitägigen Wasserbeaufschlagung mit anschließender eintägiger Trocknung vor der Applikation des jeweiligen Hydrophobierungsmittels unterzogen (entsprechend Kapitel 4.3.2, Lastfall 2). Zusätzlich wurde die Applikationsoberfläche mit einer Neigung von 2% versehen. Bei die-

Nr. der Serie	Bestandsbeton						Prüfmedium					
	Entnahmebereich		Zustand				entmineralisiertes Wasser	3,6%ige NaCl-Lösung	20%ige NaCl-Lösung	3,0%ige MgCl ₂ -Lösung		
	der Proben											
	Plattenmitte	Querscheinfuge	Vorbehandlung			ohne					mit	
			partikelgestraht	Vorkonditionierung		Hydrophobierung						
LF 1	LF 2	Neigung bei Hydrophobier.				WA65	LM7	GEL30				
1.0							x	-				
1.1							-	x				
1.2							x	-				
1.3	x	x	x	x	-	-	-	x	-	-		
1.4							x	-		-		
1.5							-	x		x		
1.6							x	-		(x) ¹		
1.7							-	x		-		
2.0							x	-				
2.1							-	x				
2.2							x	-		x		
2.3								x				
2.4	-	x	x	-	x	x			x	-		
2.5							-			x		
2.6									x	-		
2.7										x		
2.8							x	-	-			
Lastfall 1: ohne Wasserbeaufschlagung						Lastfall 2: mit Wasserbeaufschlagung						
¹ (x) veränderte Einwirkung der NaCl-Lösung (Trocknungsphase ohne NaCl-Lösung)												

Tab. 18: Prüfprogramm für die Klimawechsellagerung des Bestandsbetons zur Abschätzung des Einflusses der Hydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess

ser Hauptserie wurden zunächst die Prüfkörper vergleichend ohne und mit appliziertem WA65 mit entmineralisiertem Wasser (Serien 2.0 und 2.1) sowie 3,6%iger NaCl-Lösung (Serien 2.2 und 2.3) bei der Klimawechsellagerung beaufschlagt. Zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit alternativer Hydrophobierungsmittel wurden adäquate Versuche mit dem Produkt LM7 (Serien 2.4 und 2.5) durchgeführt. Zur Abschätzung des Einflusses der Salzart auf den AKR-Schädigungsprozess wurde zusätzlich bei einer Prüfserie (Serie 2.8) eine 3%ige MgCl₂-Lösung als Prüfmedium verwendet.

Einen zusammenfassenden Überblick über die Versuche mit der Klimawechsellagerung am Bestandsbeton gibt die Tabelle 18.

Die detaillierten Prüfergebnisse der ersten Hauptserie sind den Bildern 56 und 57 zu entnehmen. Dabei werden ausgehend vom fotografisch dokumentierten Entnahmeort des jeweiligen Prüfkörpers der zeitliche Verlauf der mittleren Dehnung über die

Zyklenzahl der Klimawechsellagerung vergleichend für die Serien ohne und mit Hydrophobierung aufgetragen. Aus den Diagrammen in Bild 56 ist ersichtlich, dass die Hydrophobierung der Prüffläche mit dem Produkt WA65 sowohl bei der Beaufschlagung mit entmineralisiertem Wasser als auch mit 3,6%iger NaCl-Lösung zu einer verminderten Dehnung führt. Dabei ist dieser Effekt bei der Beaufschlagung mit NaCl-Lösung deutlich stärker ausgeprägt als mit entmineralisiertem Wasser. Bemerkenswert ist auch, dass die ermittelte Dehnung bei den nicht hydrophobierten Prüfkörpern nach 12 Zyklen der Klimawechsellagerung unabhängig von der Art des Prüfmediums nahezu den gleichen Wert erreicht. Zur Verifizierung der Ursachen für diese Feststellung und aufgrund der ohnehin nur mäßigen mittleren Dehnungswerte von 0,69 bzw. 0,74 mm/m bei der Beaufschlagung des unbehandelten Bestandsbetons mit entmineralisiertem Wasser bzw. 3,6%iger NaCl-Lösung wurden umfangreiche mikroskopische und mikrochemische Untersuchun-

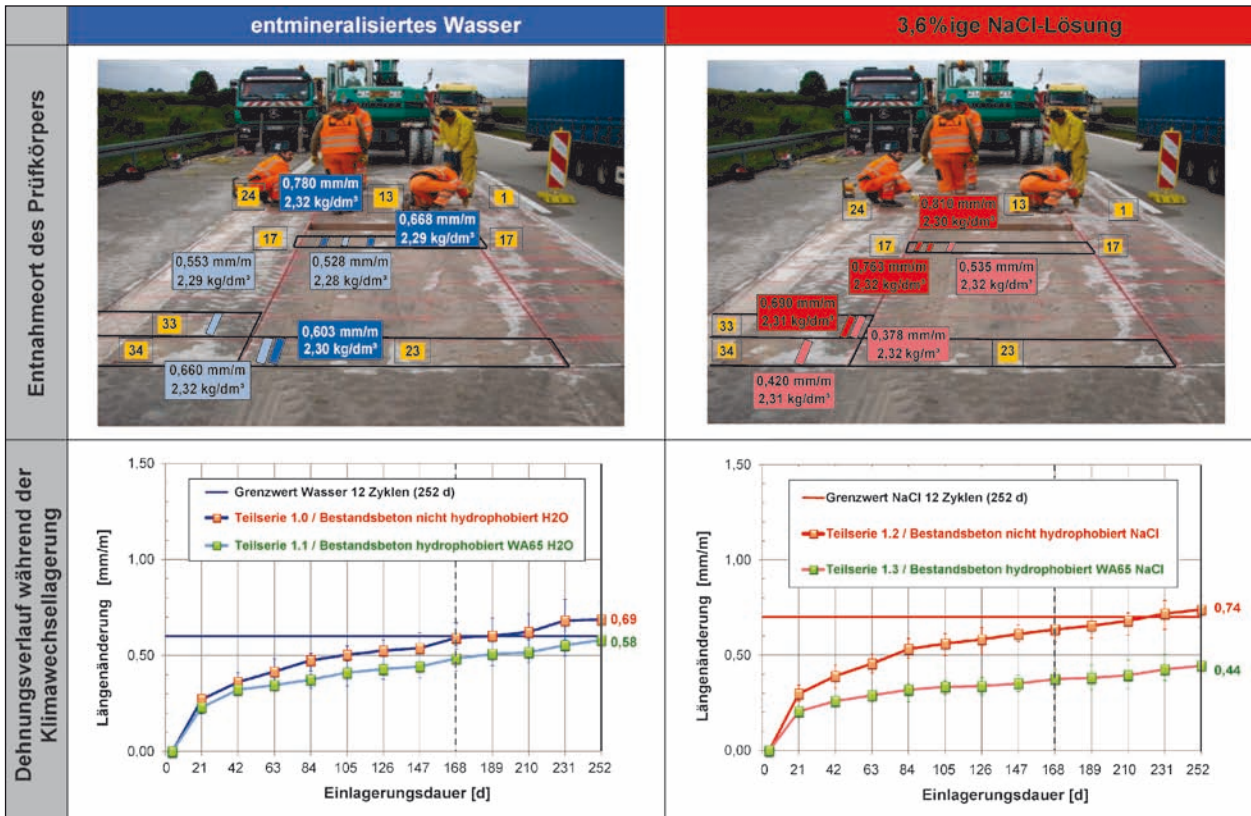


Bild 56: Ergebnis der Klimawechsellaagerung der Prüfkörper des Bestandsbetons aus Plattenrand und -mitte ohne und mit appliziertem Hydrophobierungsmittel WA65 bei vergleichender Beaufschlagung mit entmineralisiertem Wasser (Serien 1.0-1.1) und 3,6%iger NaCl-Lösung (Serien 1.2-1.3)

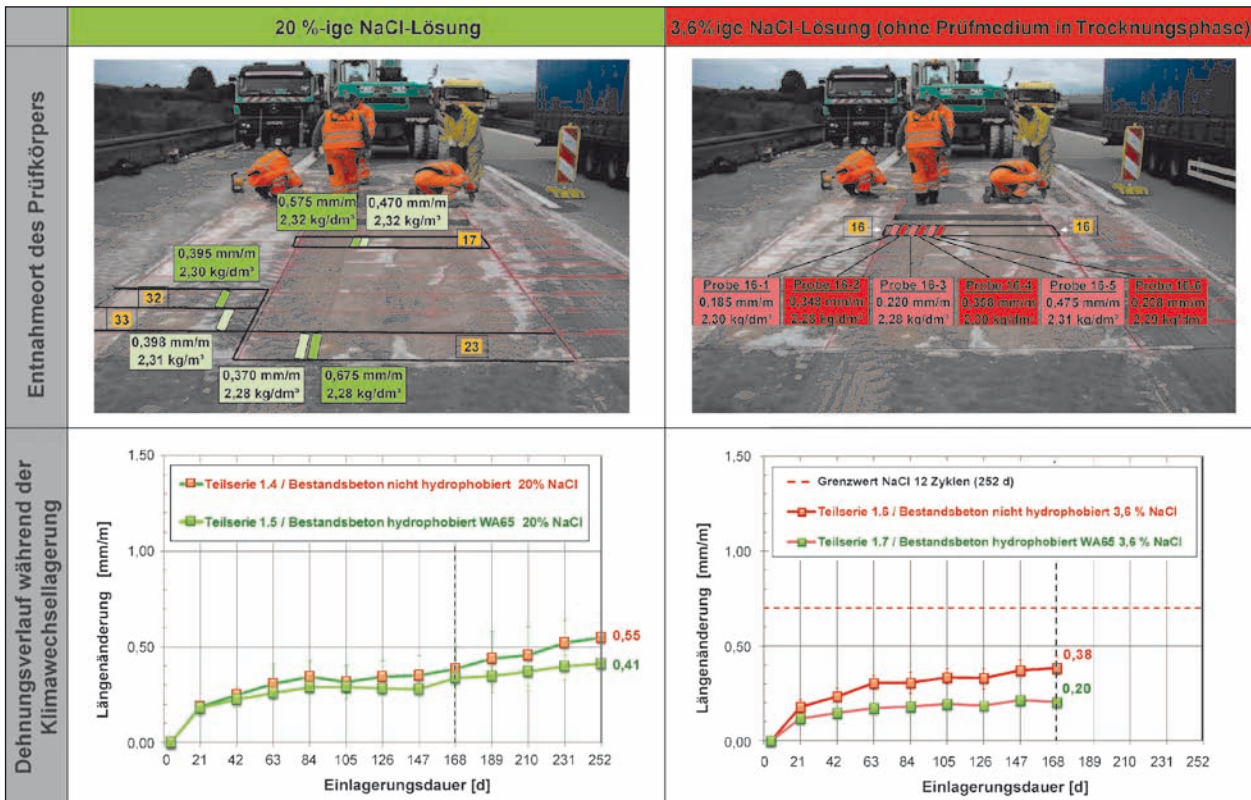


Bild 57: Ergebnis der Klimawechsellaagerung der Prüfkörper des Bestandsbetons aus Plattenrand und -mitte ohne und mit appliziertem Hydrophobierungsmittel WA65 bei vergleichender Beaufschlagung mit 20%iger NaCl-Lösung (Serie 1.4-1.5) sowie 3,6%iger NaCl-Lösung mit Entfernung des verbliebenen Prüfmediums in der Trocknungsphase (Serien 1.6-1.7)

gen am Bestandsbeton vor und nach der Klimawechsellaagerung durchgeführt. Diese werden in Kapitel 4.4.3 näher erläutert.

Zusätzlichen Aufschluss über den Einfluss des externen Salzeintrags auf den AKR-Schädigungsprozess gibt das Bild 57. Hierbei wird deutlich, dass einerseits die Erhöhung der NaCl-Konzentration des Prüfmediums von 3,6 M.-% auf 20 M.-% bei Klimawechsellaagerung des unbehandelten Bestandsbetons zu einer Verminderung der Dehnung von 0,74 auf 0,55 mm/m nach 12 Zyklen der Klimawechsellaagerung führt. Es wird vermutet, dass dies auf die Ausbildung einer Salzbarriere zurückzuführen ist, die den Feuchte- und Salztransport in das Innere des Prüfkörpers behindert. Andererseits zeigt sich, dass der Verzicht der Beaufschlagung der Prüffläche mit der 3,6%igen NaCl-Lösung während der Trocknungsphase in den einzelnen Zyklen der Klimawechsellaagerung gleichfalls zu einer Verminderung der Dehnung führt. Dies lässt den Schluss zu, dass das verminderte Feuchteangebot und die fehlende Aufkonzentration der Salze in den Trocknungsphasen der Klimawechsellaagerung ebenfalls einen signifikant verminderten Feuchte- und Salzeintrag in das Innere des Prüfkörpers bedingt.

Die detaillierten Ergebnisse der zweiten Hauptserie der Klimawechsellaagerung sind den Bildern 58 bis 60 zu entnehmen. Die vergleichende Betrachtung von Bild 58 bestätigt, dass sich nach Abschluss der Klimawechsellaagerung (12 Zyklen) auch bei den ausschließlich aus dem Bereich der Querscheinfuge entnommenen Prüfkörpern der gleiche Trend bei den Dehnungsverläufen wie bei den Serien 1.0 bis 1.3 abgezeichnet hat. So bewirkt hier gleichfalls die Applikation des Hydrophobierungsmittels WA65 eine deutliche Reduzierung der mittleren Dehnung der Prüfkörper. Dabei ist im Gegensatz zu der Hauptserie 1 die Dehnungsverminderung bei Beaufschlagung mit entmineralisiertem Wasser (Serien 2.0 und 2.1) und 3,6%iger NaCl-Lösung (Serien 2.2 und 2.3) gleich stark ausgeprägt. Bild 59 zeigt, dass das Hydrophobierungsmittel LM7 eine vergleichbare Wirksamkeit wie WA65 besitzt. So liegen auch hier die ermittelten Dehnungen bei Beaufschlagung der Prüfkörper mit entmineralisiertem Wasser (Serie 2.4) und 3,6%iger NaCl-Lösung (Serie 2.5) deutlich unter den jeweiligen Grenzwerten.

Aufgrund der Applikationsprobleme mit dem Hydrophobierungsmittel GEL30 wurde auf eine Klima-

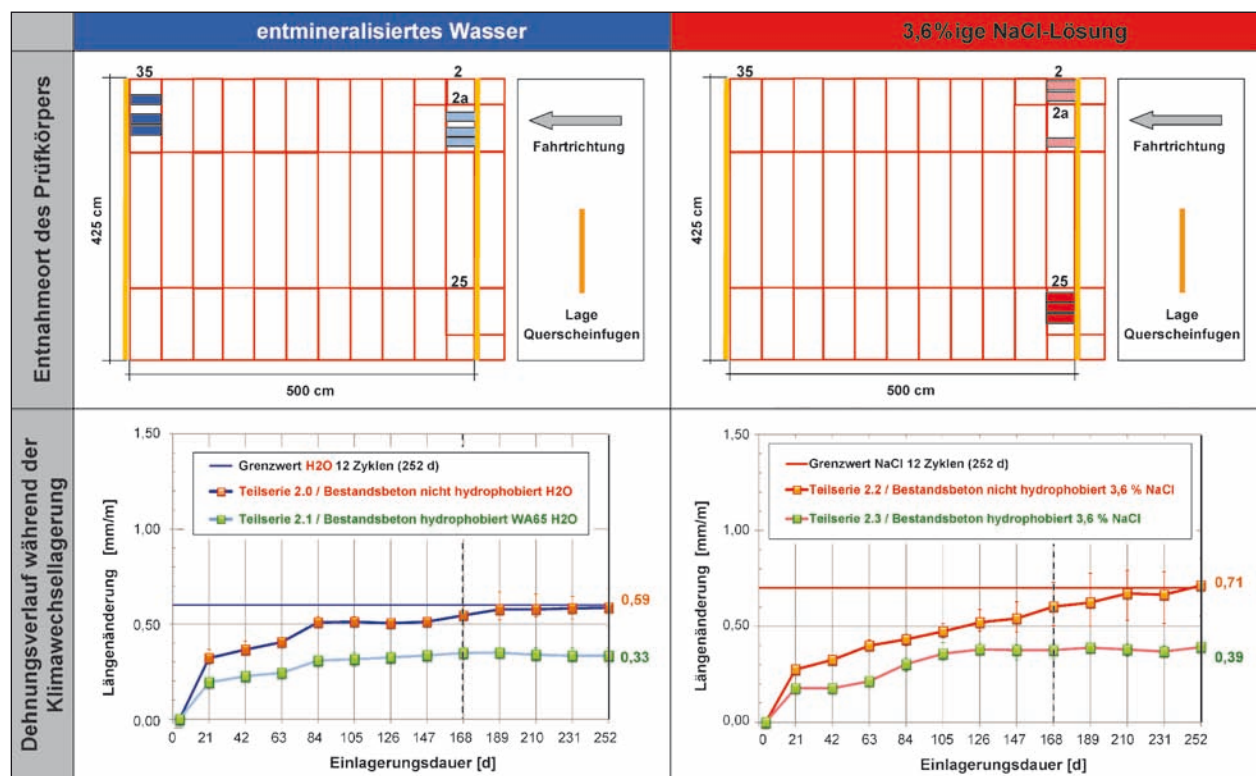


Bild 58: Ergebnis der Klimawechsellaagerung der Prüfkörper des Bestandsbetons aus dem Plattenrand ohne und mit appliziertem Hydrophobierungsmittel WA65 bei vergleichender Beaufschlagung mit entmineralisiertem Wasser (Serien 2.0-2.1) und 3,6%iger NaCl-Lösung (Serie 2.2-2.3)

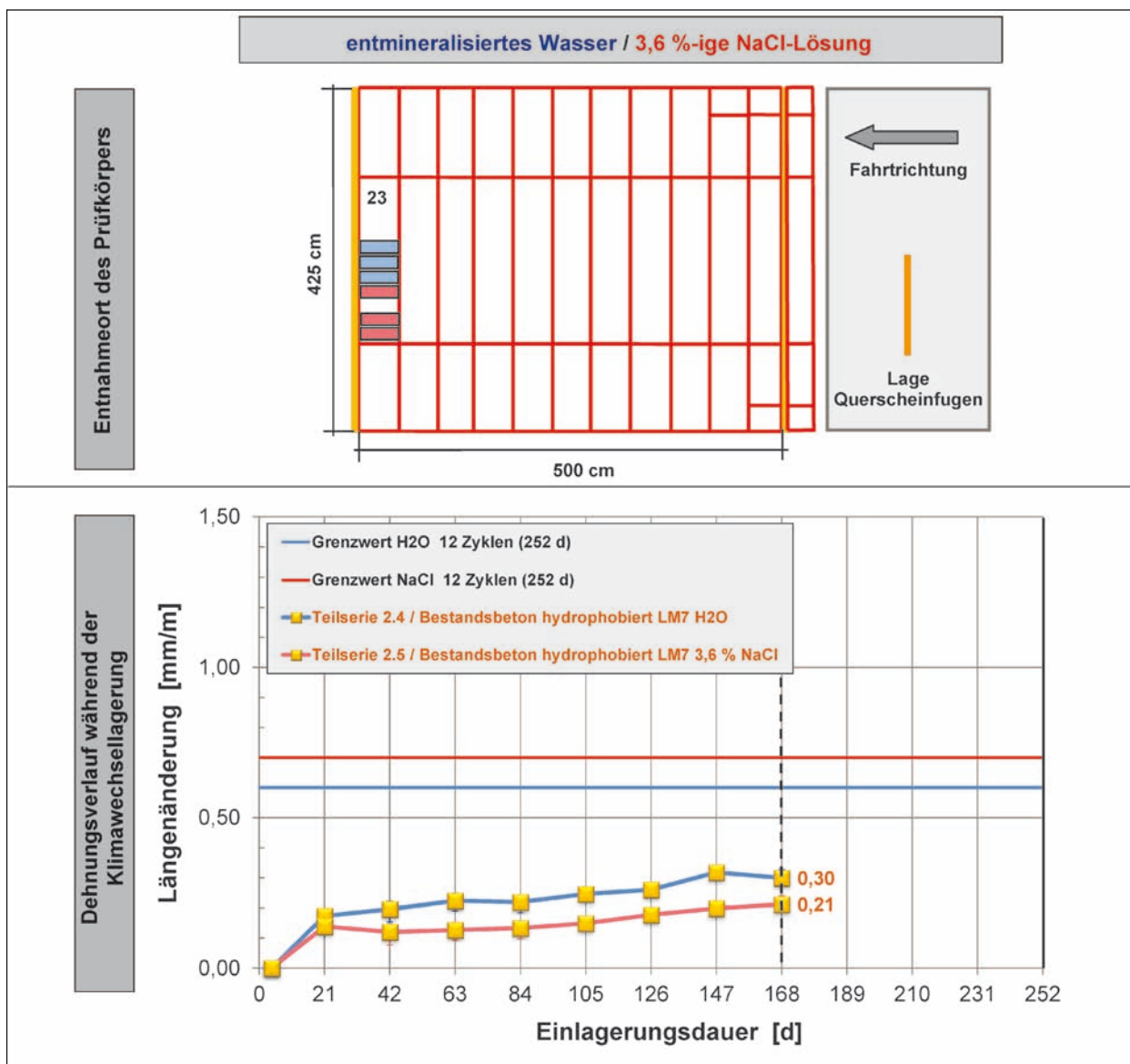


Bild 59: Ergebnis der Klimawechsellagerung der Prüfkörper des Bestandsbetons aus Plattenrand mit appliziertem Hydrophobierungsmittel LM7 bei Beaufschlagung mit entmineralisiertem Wasser (Serie 2.4) und 3,6%iger NaCl-Lösung (Serie 2.5)

wechsellagerung derartig behandelter Proben verzichtet (Serien 2.6 und 2.7).

Bemerkenswert sind die in Bild 61a und Bild 61b dargestellten Ergebnisse bis zum achten Zyklus der Klimawechsellagerung des unbehandelten Ausbaubetons aus dem Bereich der Querscheinfuge bei Verwendung von MgCl₂ als Prüfmedium (Serie

2.8). Es wird deutlich, dass die Dehnung durch die Substitution des Tausalzes NaCl durch MgCl₂ eine drastische Verminderung erfährt.

Einen zusammenfassenden Überblick über die Ergebnisse der Klimawechsellagerung der insgesamt 15 Teilserien des Ausbaubetons gibt die Tabelle 19.

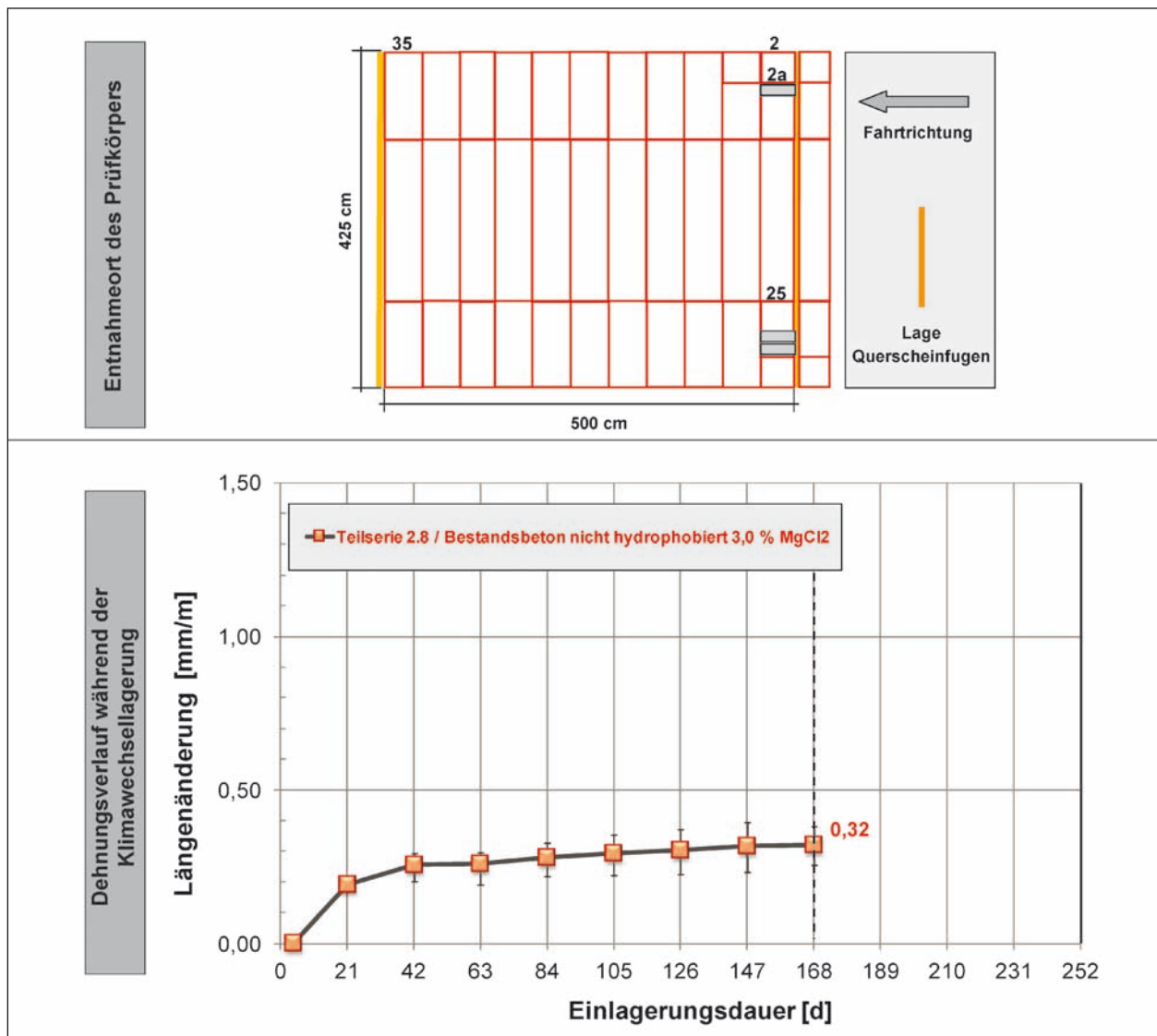


Bild 60: Ergebnis der Klimawechsellaagerung der Prüfkörper des Bestandsbetons aus Plattenrand ohne Hydrophobierung bei Beaufschlagung mit 3%iger $MgCl_2$ -Lösung (Serie 2.8)

Vertiefende mikroskopische und mikrochemische Untersuchungen am unbehandelten Bestandsbeton vor und nach der Klimawechsellaagerung

• Motivation

Wie bereits im Kapitel 4.4.3 ausgeführt, stellte sich die Frage, warum die Dehnung des Bestandsbetons nach 12 Zyklen der Klimawechsellaagerung einen so kleinen Wert annimmt und sich nur gering bei der unterschiedlichen Beaufschlagung mit den Prüfmedien entmineralisiertes Wasser und 3,6%ige NaCl-Lösung unterscheidet. Ein möglicher Erklärungsansatz besteht darin, dass der Bestandsbeton bereits vor der Klimawechsellaagerung einen erhöhten Salzgehalt in der Betonrandzone aufweist. Weiterhin stellt sich die Frage, ob durch die Klima-

wechsellaagerung eine schädigende AKR hervorgerufen wurde.

• Analyse der Natrium- und Chloridverteilung

Die vergleichende flächenhafte Analyse der Natrium- und Chloridverteilung im Vertikalschnitt des Bestandsbetons vor und nach der Klimawechsellaagerung mit 3,6%iger NaCl-Lösung erfolgte mittels der Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Bei dieser, erst seit Kurzem im Bauwesen eingesetzten Methode wird ein gepulster Laserstrahl auf die Baustoffoberfläche fokussiert. Durch die hohe Leistungsdichte des applizierten Laserstrahls wird ein kleines Volumen des Baustoffs verdampft und ein Plasma erzeugt. Die elementspezifische Strahlung des Plasmas wird spektroskopisch

Nr. der Serie	Bestandsbeton										Prüfmedium bei KWL				Dehnung nach KWL [mm/m] ²⁾	
	Entnahmebereich		Zustand								entmineralisiertes Wasser	3,6%ige NaCl-Lösung ¹⁾	20%ige NaCl-Lösung	3,0%ige MgCl ₂ -Lösung	8 Zyklen	12 Zyklen
	der Proben															
	Plattenmitte	Querscheinfuge	partikelgestrahit	Vorbehandlung		Neigung bei Hydrophobier.	Hydrophobierung									
				LF 1	LF 2		ohne	mit								
						-	WA65	LM7	GEL30							
1.0							x	-			x	-			0,59	0,69
1.1							-	x				-			0,48	0,58
1.2							x	-				x			0,63	0,74
1.3	x	x	x	x	-	-	-	x				x			0,37	0,44
1.4							x	-			-	-	x		0,39	0,55
1.5							-	x				-			0,37	0,41
1.6							x	-				(x)			0,38	-
1.7							-	x							0,20	-
2.0							x	-			x	-			0,55	0,59
2.1							-	x				-			0,35	0,33
2.2							x	-				x			0,60	0,71
2.3								x				-			0,38	0,39
2.4	-	x	x	-	x	x			x		x	-			0,30	-
2.5							-	-				x			0,21	-
2.6										x		-			-	-
2.7												x			-	-
2.8							x	-				-		x	0,32	-

Lastfall 1: ohne Wasserbeaufschlagung
Lastfall 2: mit Wasserbeaufschlagung
¹⁾ (x) veränderte Einwirkung der NaCl-Lösung (Trocknungsphase ohne NaCl-Lösung)

Tab. 19: Übersicht über die Ergebnisse zur Abschätzung des Einflusses der Hydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess mittels Klimawechsellaagerung des Bestandsbetons

analysiert. Es können mit dieser Methode alle chemischen Elemente nachgewiesen werden. Mittels Kalibrierung sind quantitative Aussagen möglich [46]. Im vorliegenden Fall wurde insbesondere die Natrium-, Chlor- und Calciumverteilung im Vertikalschnitt des Prüfkörpers mittels LIBS bestimmt. Letzteres ermöglicht die Separation der primär interessierenden Zementsteinmatrix von der Gesteinskörnung als sog. Zementsteinkriterium. So wird in der Regel in der Zementsteinmatrix ein wesentlich höherer Calciumgehalt als in der Gesteinskörnung vorgefunden. Aufgrund der begrenzten Ortauflösung von LIBS kann jedoch nur die Gesteinskörnung ab 0,5 mm eliminiert werden sodass sich im vorliegenden Fall die quantitative Elementanalyse auf den Feinmörtelgehalt bezieht.

Bild 61a und Bild 61b zeigen exemplarisch die Natrium- und Chloridverteilung über den Vertikalschnitt des Bestandsbetons vor der Klimawechsellaagerung. Es ist deutlich erkennbar, dass während der bisherigen Nutzung des Fahrbahndeckenbetons kein signifikanter externer Natrium- und Chlorideintrag in den Bestandsbeton erfolgte. Grundlegend anders sieht dies nach der Klimawechsellaagerung des Bestandsbetons aus. So zeigen die Bilder 62a und 62b, dass bis in eine Tiefe von ca. 55 mm erhöhte Natriumgehalte bzw. bis in eine Tiefe von ca. 65 mm erhöhte Chloridgehalte im Prüfkörper vorgefunden werden. Das tiefere Eindringen des Chlorides gegenüber dem Natrium ist auf Chromatografieeffekte zurückzuführen [49].

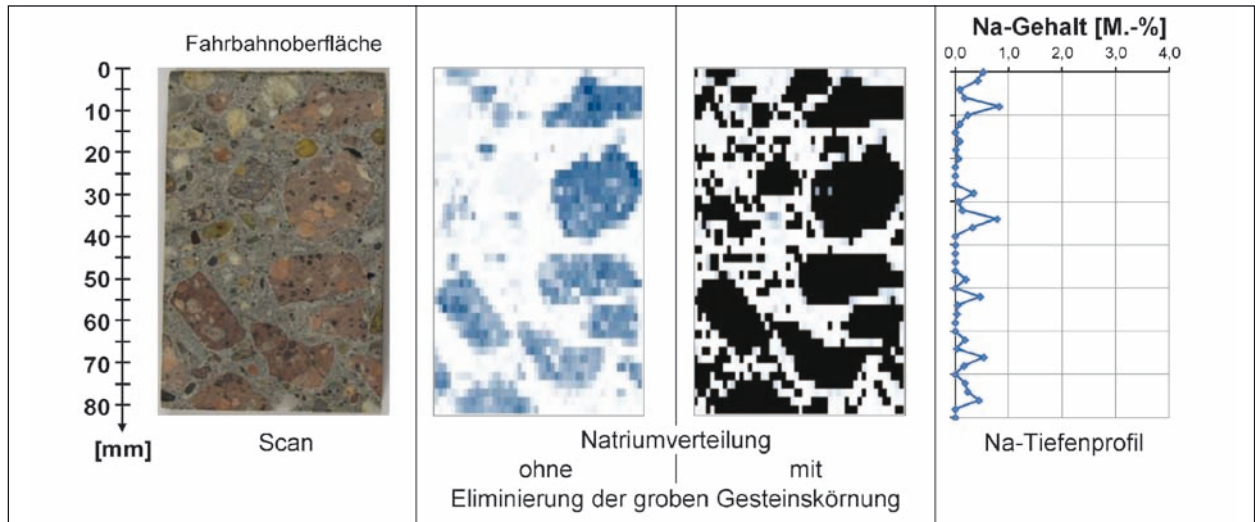


Bild 61a: Mit LIBS bestimmte Natriumverteilung im Vertikalschnitt des Bestandsbetons vor der Klimawechsellagerung (Prüfkörper 16-7, Plattenmitte)

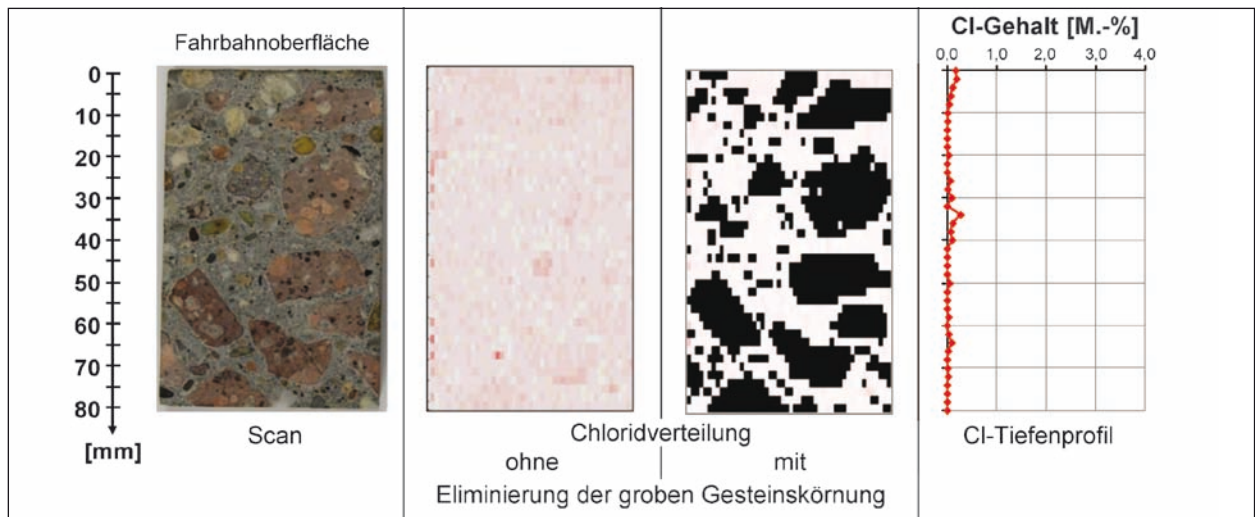


Bild 61b: Mit LIBS bestimmte Chloridverteilung im Vertikalschnitt des Bestandsbetons vor der Klimawechsellagerung (Prüfkörper 16-7, Plattenmitte)

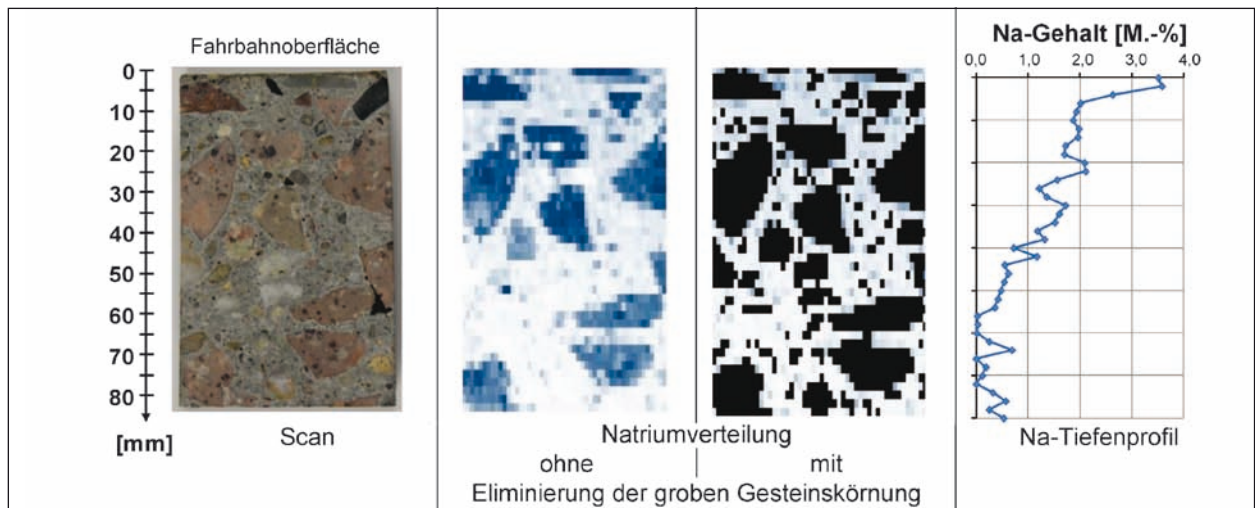


Bild 62a: Mit LIBS bestimmte Natriumverteilung im Vertikalschnitt des Bestandsbetons nach der Klimawechsellagerung mit 3,6%iger NaCl Lösung (Prüfkörper 17-4, Plattenmitte)

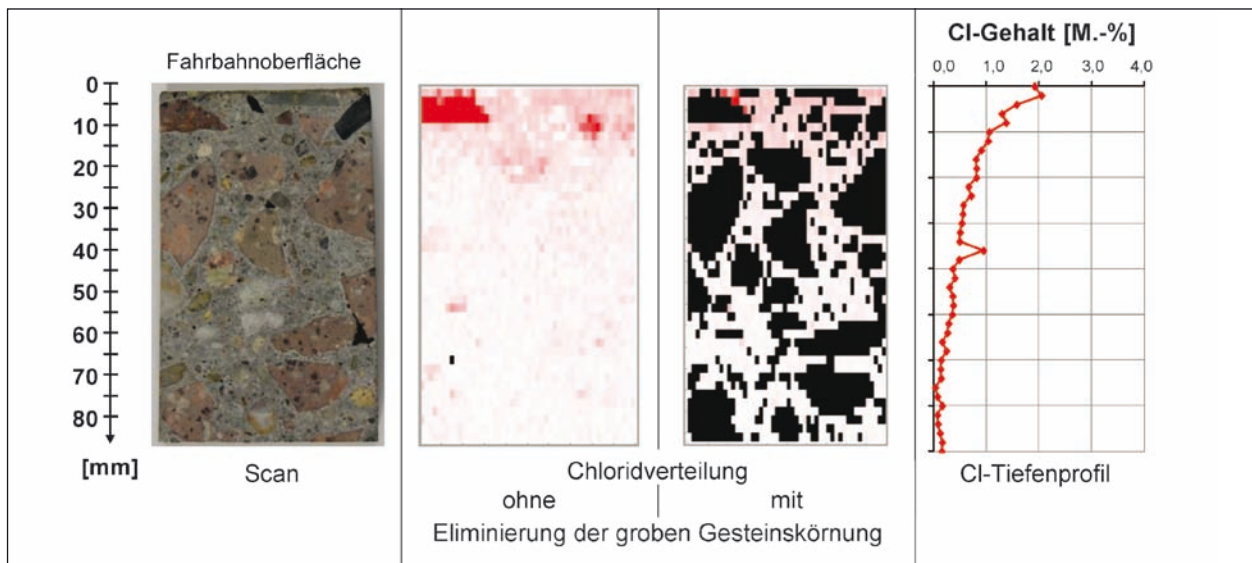


Bild 62b: Mittels LIBS bestimmte Chloridverteilung im Vertikalschnitt des Bestandsbetons nach der Klimawechsellaagerung mit 3,6%iger NaCl Lösung (Prüfkörper 17-4, Plattenmitte)

Die vorstehend dargestellten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die bei der Klimawechsellaagerung des Bestandsbetons festgestellte annähernd gleiche Dehnung bei Verwendung des Prüfmediums entmineralisiertes Wasser und 3,6%ige NaCl-Lösung sich nicht über den externen Alkaliintrag erklären lassen. Aufgrund dessen wird in den folgenden drei Kapiteln vertiefend der Phasenneubildung nachgegangen.

- **Analyse des AKR-Gels mit Uranylacetattest**

Der Uranylacetattest (UAT) dient als Diagnosemethode zum qualitativen Nachweis eines AKR-Gels im Beton. Er basiert auf der Verdrängung von Natriumionen aus dem AKR-Gel durch Uranylionen aufgrund ihrer hohen Affinität zu Silikaten. Bei der Prüfung wird die frische Bruchfläche des zu untersuchenden Betons mit einer wässrigen 5%igen Uranylacetat-Lösung ($\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2$) behandelt und anschließend nach einer ca. 10-minütigen Einwirkungszeit der Lösung gründlich mit destilliertem Wasser gespült. Der Nachweis des AKR-Gels erfolgt anschließend an der trockenen Bruchfläche durch die Fluoreszenzanregung (grün) des Uranylions (UO_2^{2+}) im kurzwelligen UV-Licht.

Das Bild 63 zeigt vergleichend die Bruchflächen der Prüfkörper des Bestandsbetons bei Tages- und

UV-Licht vor und nach der Klimawechsellaagerung (12 Zyklen). Die geringen Indikationen im Fluoreszenzbild des Bestandsbetons vor der Klimawechsellaagerung (Prüfkörper 16-7) lassen den Schluss zu, dass keine Anzeichen einer AKR gegeben sind. Die Fluoreszenzbilder der Bruchflächen des Betons nach der Klimawechsellaagerung (Prüfkörper 17-5 und 17-4) hingegen deuten darauf hin, dass in geringem Maße eine AKR stattgefunden hat. Das Ausmaß ist jedoch als nicht betonschädigend einzustufen.

- **Gefügeanalyse mittels Dünnschliffmikroskopie**

Für die vertiefenden Gefügeuntersuchungen am Polarisationsmikroskop wurden aus weiteren Teilproben der bereits vorstehend aufgeführten Prüfkörper des Bestandsbetons ohne und mit Klimawechsellaagerung großformatige Dünnschliffe hergestellt. Diese wurden anschließend mittels eines Polarisationsmikroskops im polarisierten Durchlicht und bei gekreuzten Polarisatoren auf AKR-Indikatoren untersucht. Dabei war die Bildung von Rissen und AKR-Gelen von zentralem Interesse. Zusätzlich wurde geprüft, ob eine sekundären Ettringitbildung (SEB) stattgefunden hat. Basierend auf der vorgefundenen Ausprägung und Häufigkeit der In-

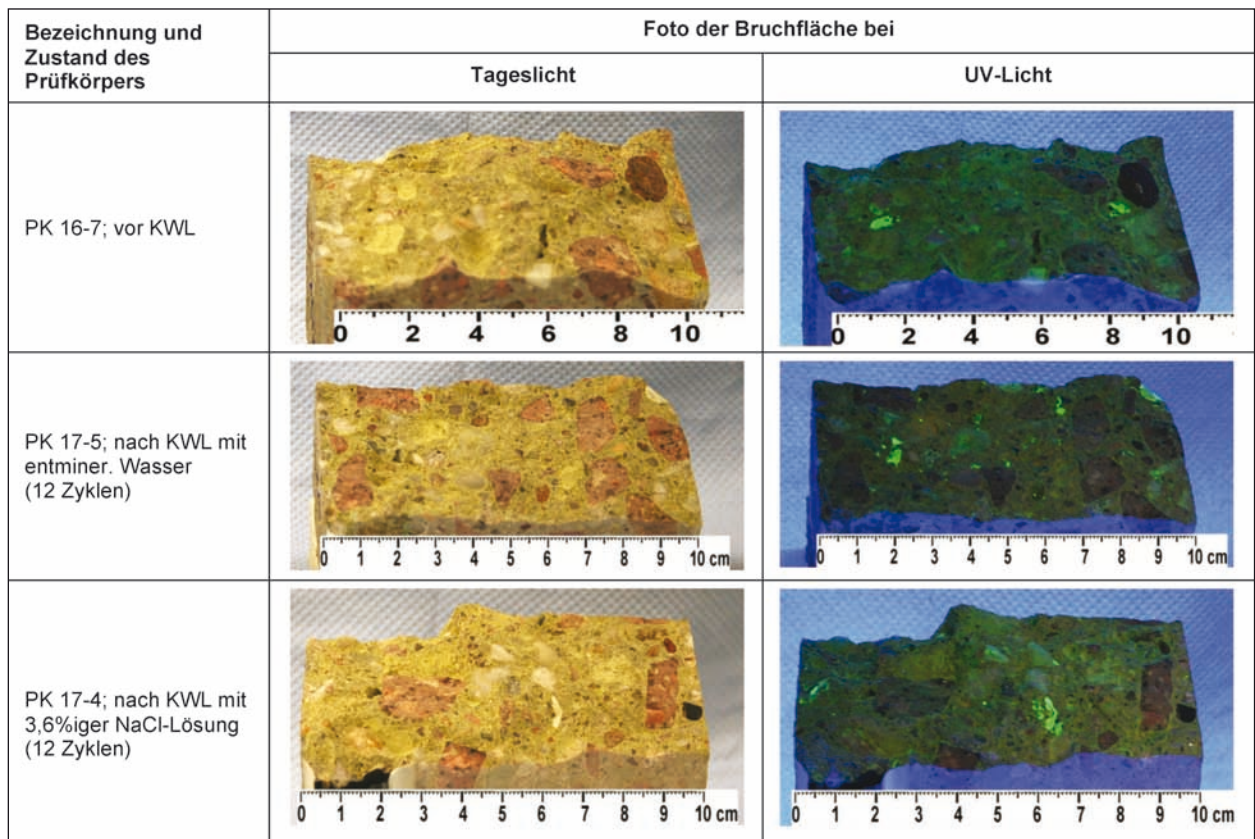


Bild 63: Ergebnis des Uranylacetattests am Bestandsbeton vor und nach der Klimawechsellaagerung

Kategorie	Erläuterung
-	kein Merkmal erkennbar
+	punktuell eindeutige Merkmale
++	häufig deutliche Merkmale
+++	vorhandene Merkmale im beton-schädigendem Ausmaß

Tab. 20: Kategorien zur Bewertung der Häufigkeit des Vorkommens von AKR- und SEB-Indikatoren

dikationen wurde der Gefügestand des jeweiligen Bestandsbetons nach dem in der Tabelle 20 dargestellten Schema bewertet. Die Ergebnisse der Dünnschliffuntersuchungen sind für den Bestandsbeton ohne Klimawechsellaagerung (Ausbauzustand) in den Bildern 64a bis 64c sowie nach Klimawechsellaagerung in den Bildern 65a bis 65c bzw. 66a bis 66c detailliert dokumentiert und bewertet. Ein zusammenfassendes Bild hierzu gibt die Tabelle 21.

Es kann festgestellt werden, dass die polarisationsmikroskopischen Untersuchungen das Ergebnis

Bezeichnung und Zustand des Prüfkörpers	Bewertung vorgefundener Indikatoren bei	
	AKR	SEB
PK 16-7; vor KWL	+	-
PK 17-5; nach KWL (12 Zyklen)	+	++
PK 17-4; nach KWL (12 Zyklen)	+	++

Tab. 21: Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse der Polarisationsmikroskopie an den Dünnschliffen des Bestandsbetons vor und nach der Klimawechsellaagerung

des Uranylacetattests bestätigen. So wurden auch hier lediglich punktuell Gelbildungen am Bestandsbeton ohne und mit Klimawechsellaagerung festgestellt. Demgegenüber ist die sekundäre Ettringitbildung insbesondere bei den Bestandsbetonen nach der Klimawechsellaagerung deutlich ausgeprägt. Es stellt sich in diesem Kontext die Frage, ob die festgestellte Grenzwertüberschreitung der Dehnung primär auf eine sekundäre Ettringitbildung zurückzuführen ist.

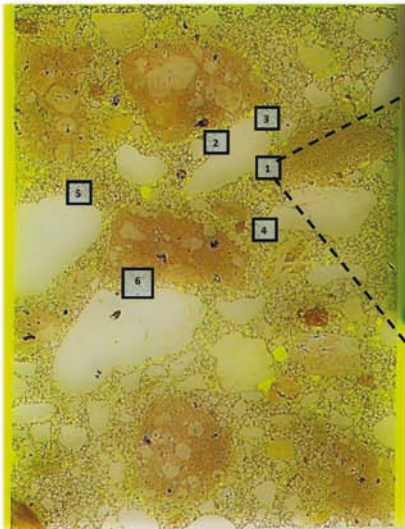
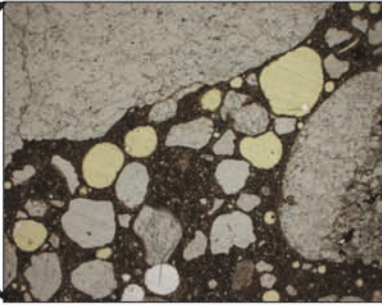
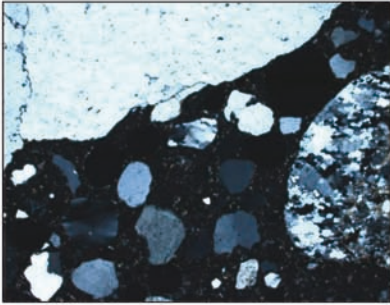
Fahrbahnoberfläche 		Probe: Teilprobe des Prüfkörpers 16-7 Detailbild: 1						
Scan Dünnschliff 20 mm		 Polarisationsmikroskop polarisiertes Durchlicht mm	 Polarisationsmikroskop gekreuzte Polarisatoren 5 mm					
		Indikationen <ul style="list-style-type: none"> keine Gelphasen in Poren keine gesteigerte Sulphatphasenbildung 		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Bewertung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AKR</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Sekundäre Ettringitbildung (SEB)</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table> Legende: - kein Merkmal erkennbar	Bewertung		AKR	-
Bewertung								
AKR	-							
Sekundäre Ettringitbildung (SEB)	-							

Bild 64a: Ergebnis der Dünnschliffuntersuchungen am Vertikalschnitt des Bestandsbetons vor der Klimawechsellagerung

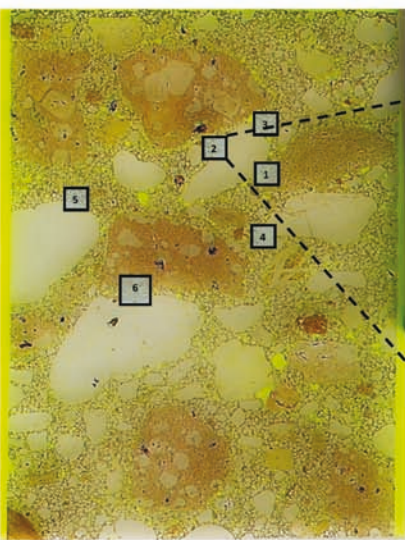
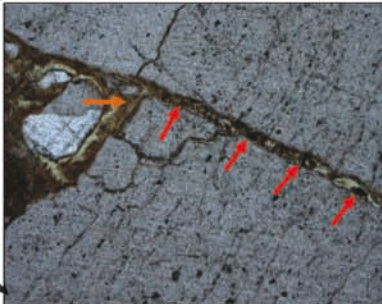
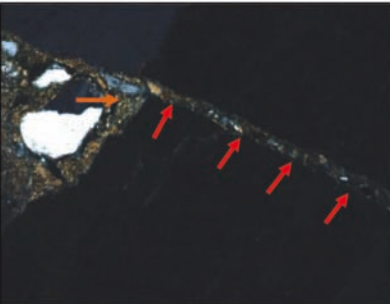
Fahrbahnoberfläche 		Probe: Teilprobe des Prüfkörpers 16-7 Detailbild: 2						
Scan Dünnschliff 20 mm		 Polarisationsmikroskop polarisiertes Durchlicht 2,5 mm	 Polarisationsmikroskop gekreuzte Polarisatoren 2,5 mm					
		Indikationen <ul style="list-style-type: none"> Riss in Quarzkörnung → Alteration der angrenzenden Zementsteinmatrix → 		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Bewertung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AKR</td> <td>+</td> </tr> <tr> <td>Sekundäre Ettringitbildung (SEB)</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table> Legende: - kein Merkmal erkennbar + punktuell eindeutige Merkmale	Bewertung		AKR	+
Bewertung								
AKR	+							
Sekundäre Ettringitbildung (SEB)	-							

Bild 64b: Ergebnis der Dünnschliffuntersuchungen am Vertikalschnitt des Bestandsbetons vor der Klimawechsellagerung

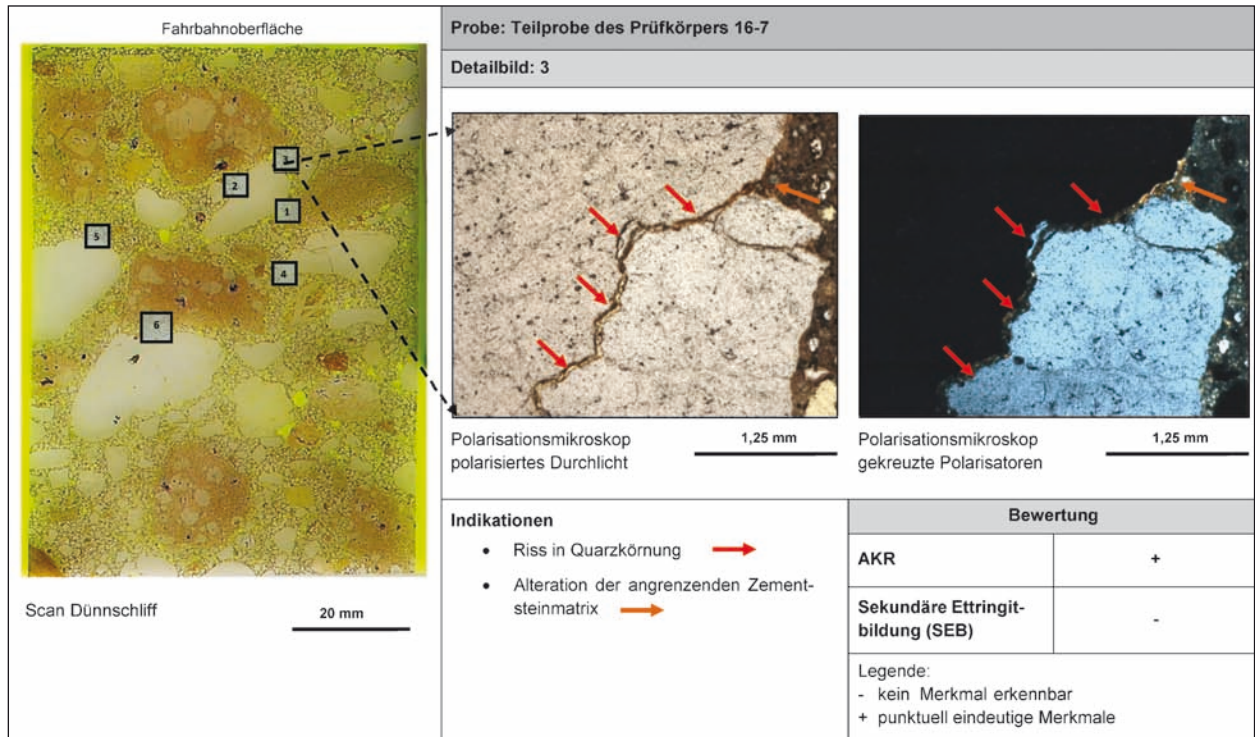


Bild 64c: Ergebnis der Dünnschliffuntersuchungen am Vertikalschnitt des Bestandsbetons vor der Klimawechsellagerung

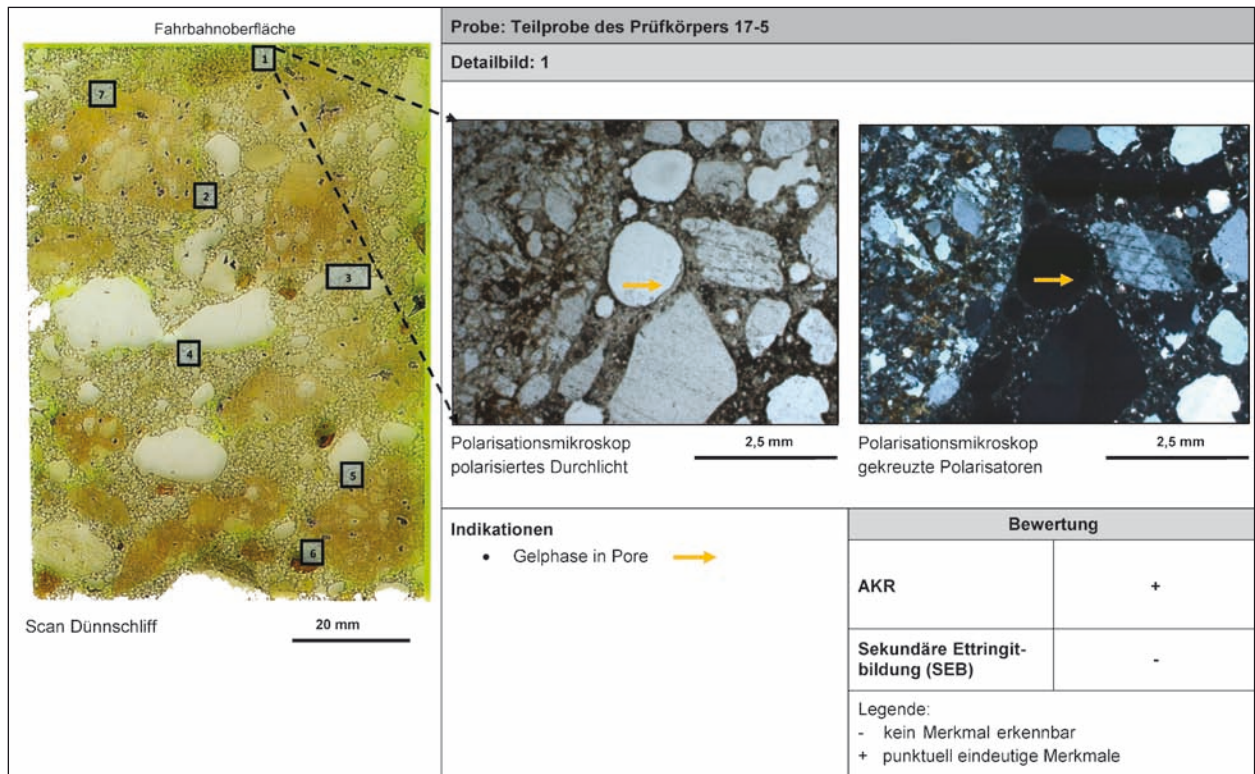


Bild 65a: Ergebnis der Dünnschliffuntersuchungen am Vertikalschnitt des Bestandsbetons nach der Klimawechsellagerung (entmineralisiertes Wasser)

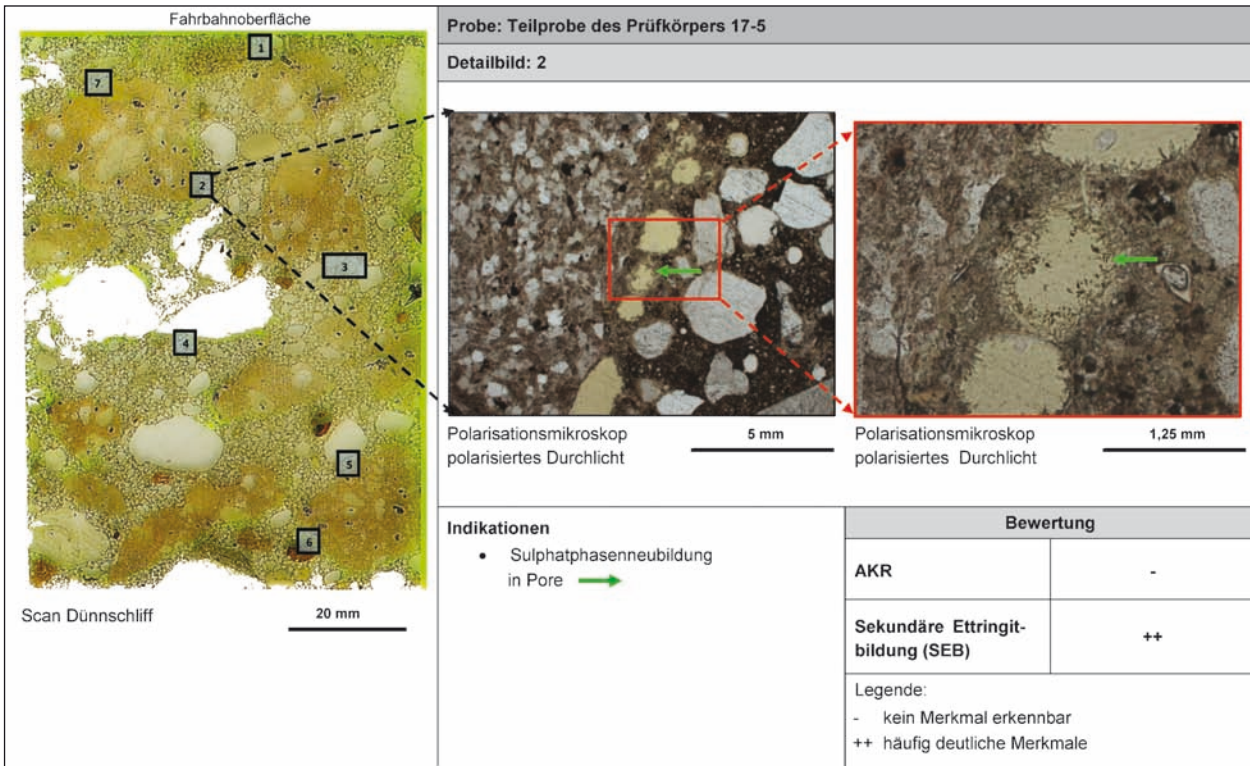


Bild 65b: Ergebnis der Dünnschliffuntersuchungen am Vertikalschnitt des Bestandsbetons nach der Klimawechsellagerung (entmineralisiertes Wasser)

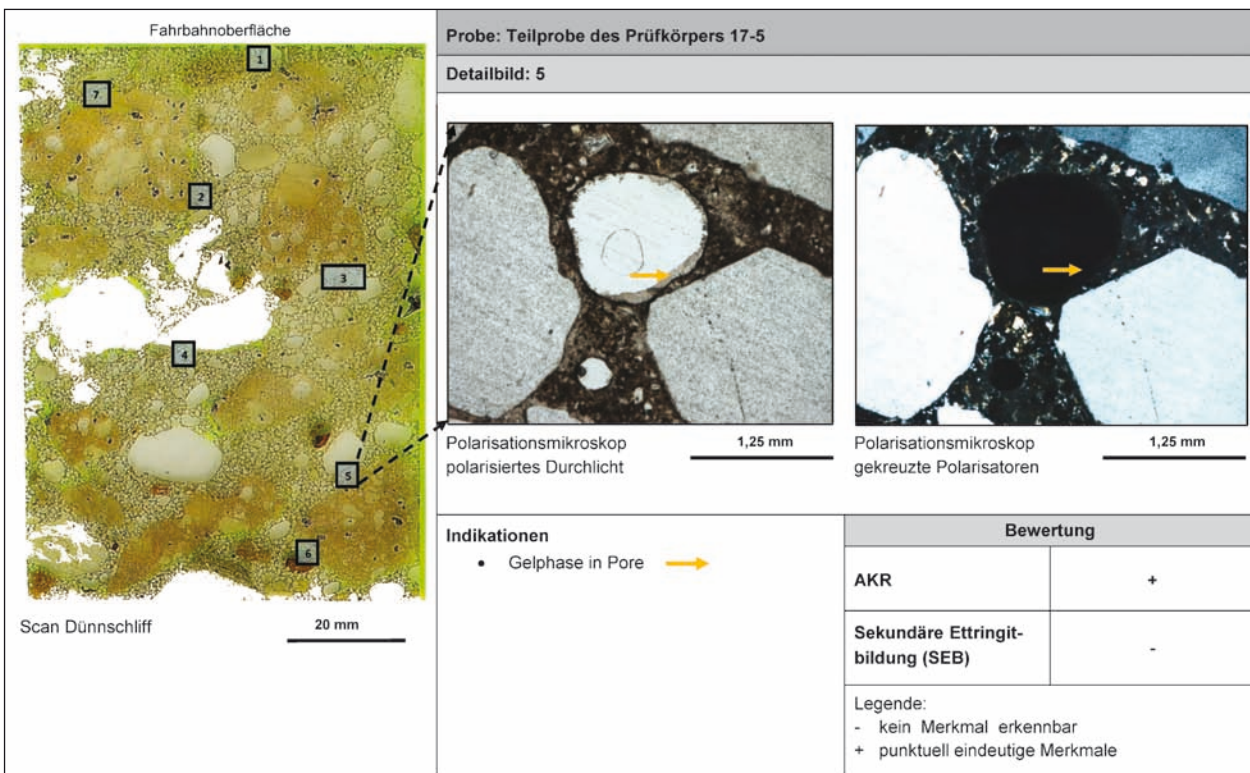


Bild 65c: Ergebnis der Dünnschliffuntersuchungen am Vertikalschnitt des Bestandsbetons nach der Klimawechsellagerung (entmineralisiertes Wasser)

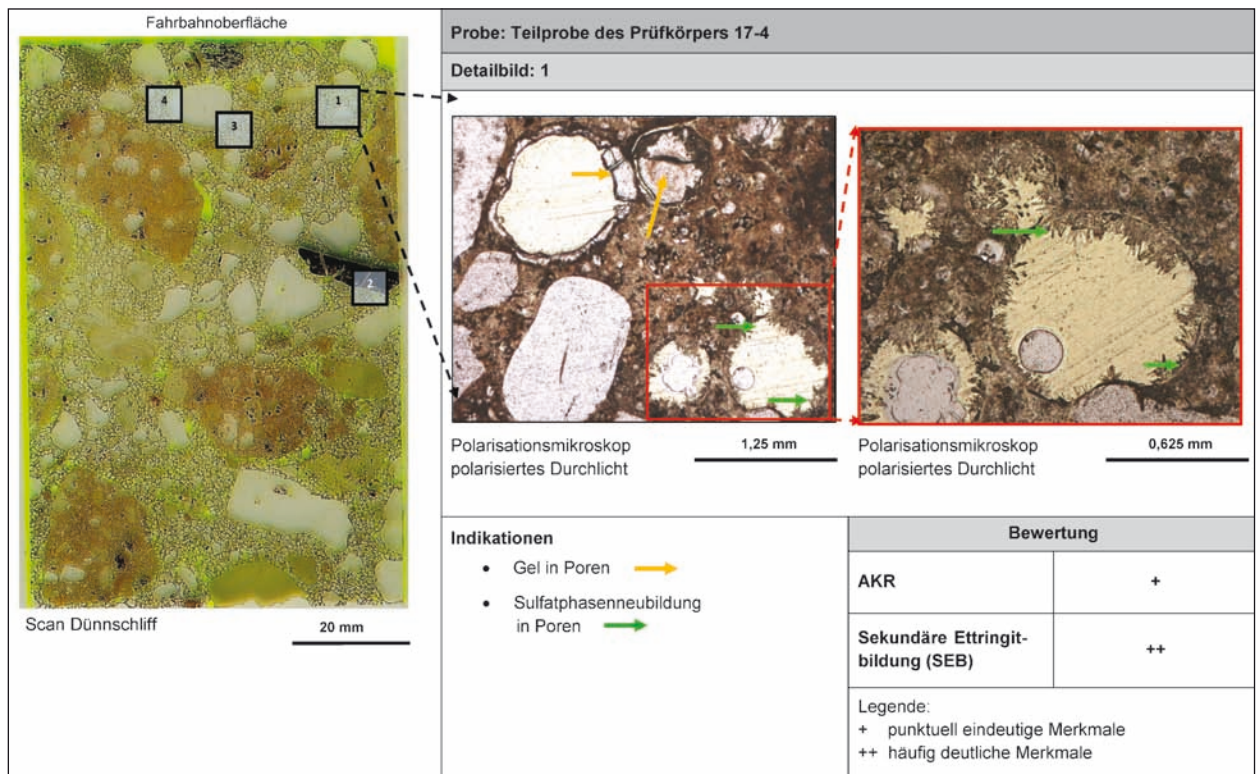


Bild 66a: Ergebnis der Dünnschliffuntersuchungen am Vertikalschnitt des Bestandsbetons nach der Klimawechsellagerung (3,6%ige NaCl-Lösung)

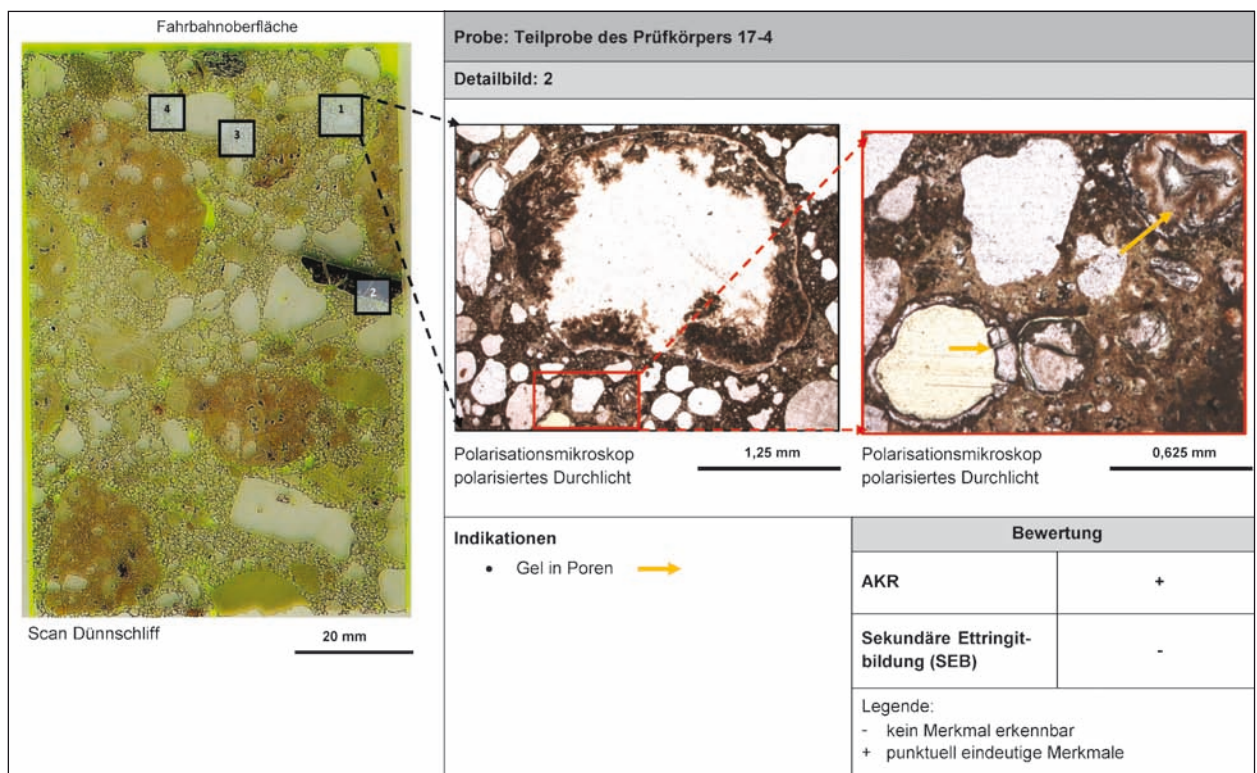


Bild 66b: Ergebnis der Dünnschliffuntersuchungen am Vertikalschnitt des Bestandsbetons nach der Klimawechsellagerung (3,6%ige NaCl-Lösung)

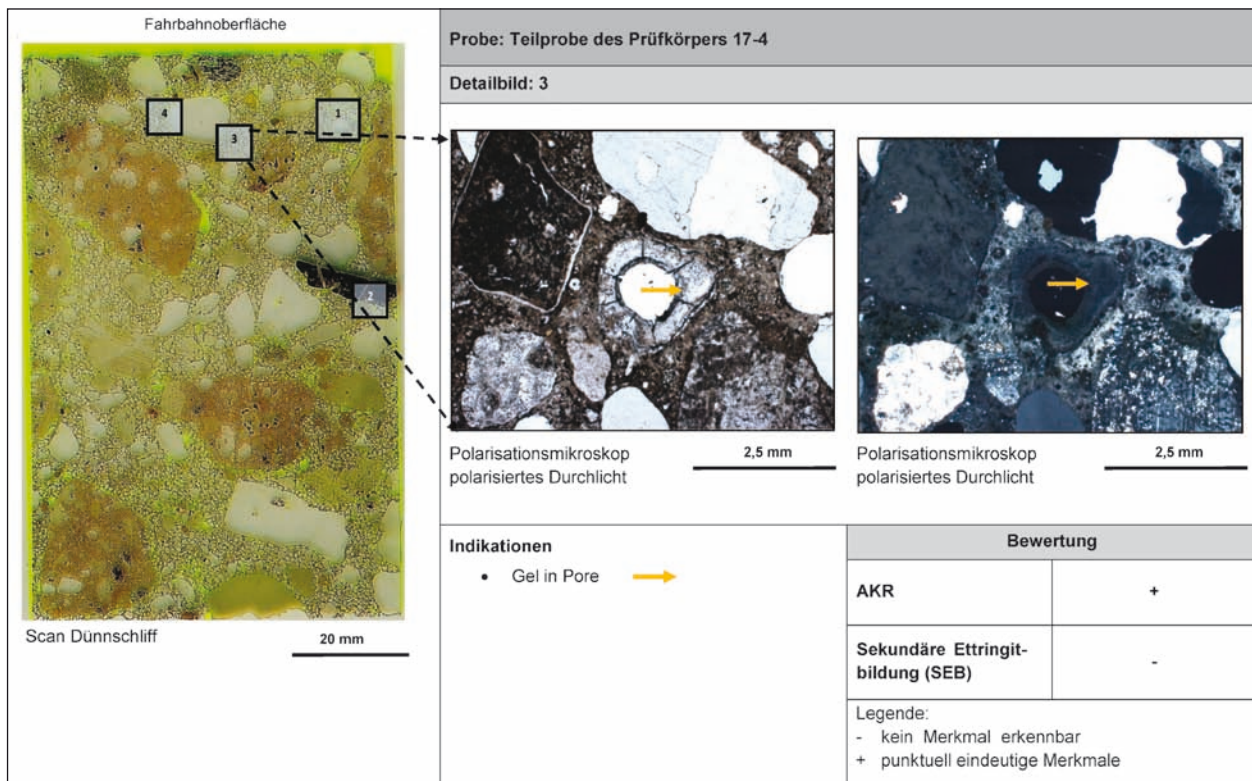


Bild 66c: Ergebnis der Dünnschliffuntersuchungen am Vertikalschnitt des Bestandsbetons nach der Klimawechsellagerung (3,6%ige NaCl-Lösung)

• Ergänzende Gefügeuntersuchungen mit REM/EDX

Zur weiteren Absicherung des Befundes der Polarisationsmikroskopie wurden nach der Klimawechsellagerung ausgewählte Bereiche der Bruchflächen der Teilproben des Bestandsbetons einer vertiefenden Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) und begleitender energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) unterzogen. Die Untersuchungen erfolgten an Bruchflächen des Betons und dienten primär der Phasenbestimmung von Gefügebildungen.

Das Bild 67 zeigt ausgehend vom Oberflächenscan die Einordnung zweier Messpunkte der Bruchfläche der Teilprobe des Prüfkörpers 17-4. Dabei konnte bei der Messstelle 1 die Bildung von AKR-Gel in einer Pore nachgewiesen werden. Bei der Messstelle 2 hingegen wurde sekundäres Ettringit in einer Pore detektiert. Die gleichartig aufbereiteten Ergebnisse in Bild 68 für die Teilprobe des Prüfkörpers 17-5 zeigen, dass hier lediglich Ettringit und kein AKR-Gel auftritt.

Resümierend kann festgestellt werden, dass diese Untersuchungsergebnisse den Befund der Polarisationsmikroskopie bestätigen.

• Ergänzende mikrochemische Untersuchungen mit Mikro-Röntgenfluoreszenzanalyse (MRFA)

Zur weiteren Abklärung der Rolle der sekundären Ettringitbildung wurde zusätzlich an Anschliffen von Vertikalschnitten des Bestandsbetons ohne und mit Klimawechsellagerung die Schwefelverteilung flächenhaft analysiert. Das Bild 69 zeigt ausgehend vom Scan des jeweiligen Anschliffs die dort ermittelte Verteilung von Schwefel. Eine vergleichende Betrachtung der Elementverteilungsbilder zeigt, dass offensichtlich unabhängig von der Art des Prüfmediums die Klimawechsellagerung bevorzugt in den Porenräumen des Bestandsbetons zu einer sekundären Ettringitbildung führt. Damit werden alle bisher gewonnenen Befunde bestätigt.

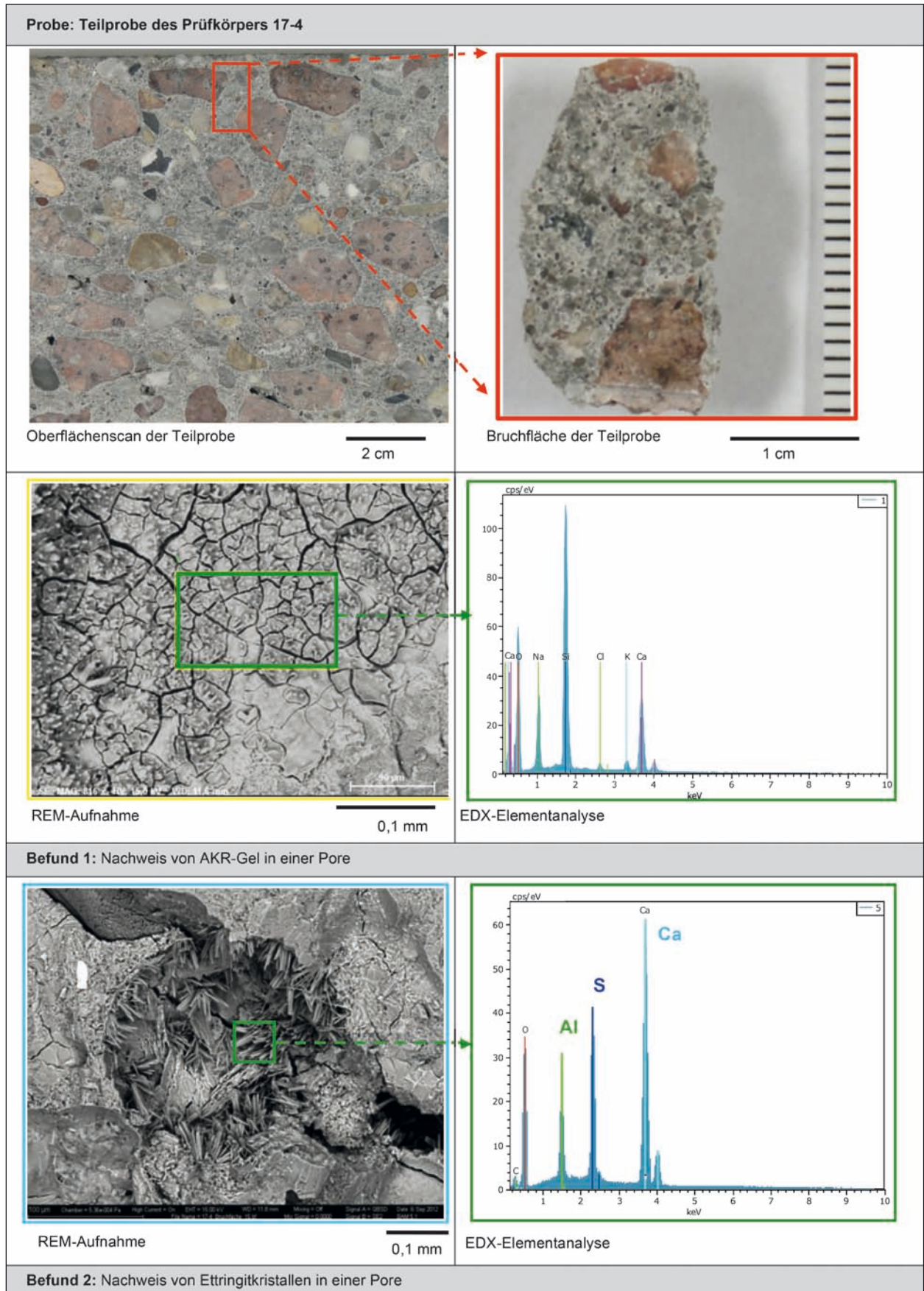


Bild 67: Ergebnis der REM/EDX-Untersuchungen an der Bruchfläche des Bestandsbetons nach der Klimawechsellaagerung mit 3,6%iger NaCl-Lösung

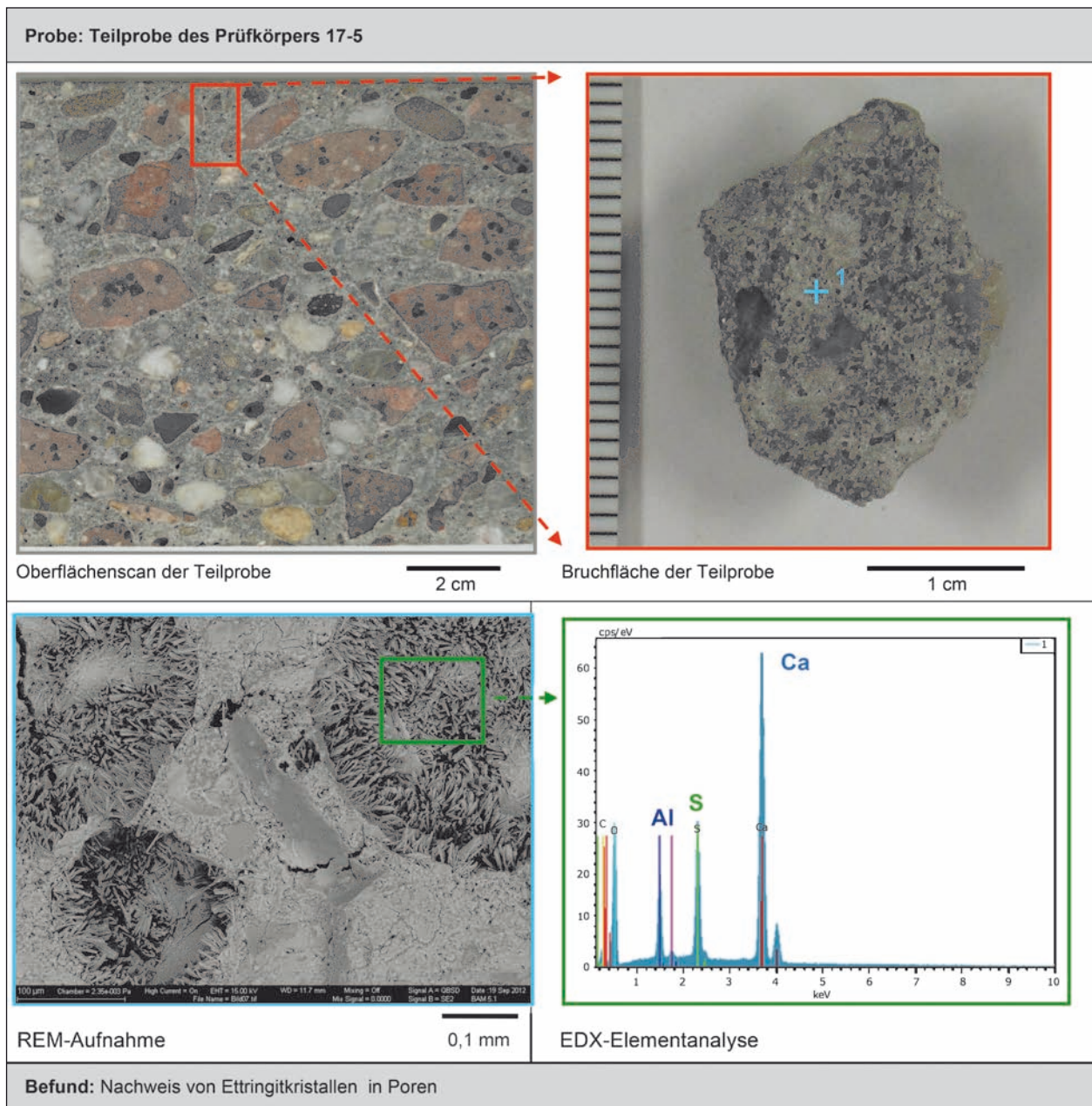


Bild 68: Ergebnis der REM/EDX-Untersuchungen an der Bruchfläche des Bestandsbetons nach der Klimawechsellagerung mit entmineralisiertem Wasser


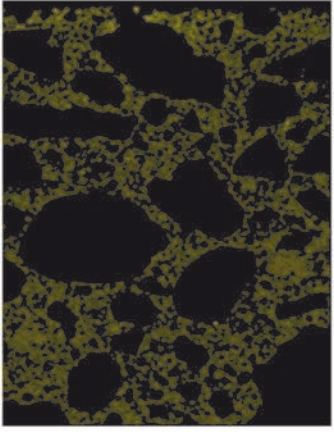

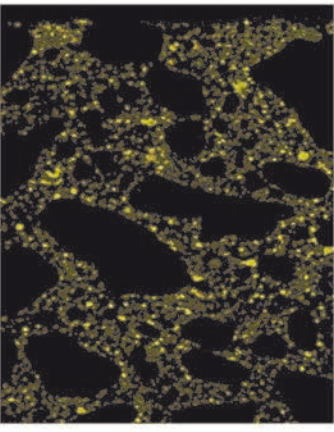

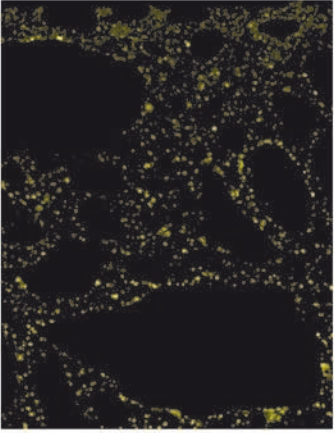
<p>vor KWL (Teilprobe von Prüfkörper 16-7)</p>	 <p>Scan des Anschliffs</p> <p>1 cm</p>	 <p>MRFA Schwefelmapping</p> <p>1 cm</p>
<p>nach KWL mit entmineralisiertem Wasser, 12 Zyklen (Teilprobe von Prüfkörper 17-5)</p>	 <p>Scan des Anschliffs</p> <p>1 cm</p>	 <p>MRFA Schwefelmapping</p> <p>1 cm</p>
<p>nach KWL mit 3,6 %iger NaCl-Lösung, 12 Zyklen (Teilprobe von Prüfkörper 17-4)</p>	 <p>Scan des Anschliffs</p> <p>1 cm</p>	 <p>MRFA Schwefelmapping</p> <p>1 cm</p>

Bild 69: Ergebnis der MRFA-Untersuchungen an Anschliffen des Bestandsbetons vor und nach der Klimawechselagerung

Zustand und Art der Probe		Ausprägung der Schadensindikatoren bei jeweiliger Prüfung						
		Uranylacetattest	Polarisationsmikroskopie		REM/EDX		MRFA	
		Bruchfläche	Dünnschliff		Bruchfläche		Anschliff	
		AKR-Gel	AKR	SEB	AKR	SEB	AKR	SEB
vor KWL (Teilprobe von Prüfkörper 16-7)		-	+	-	 	 	-	-
nach KWL mit	entmineral. Wasser, 12 Zyklen (Teilprobe von Prüfkörper 17-5)	+	+	++	-	++	-	++
	3,6%iger NaCl-Lösung, 12 Zyklen (Teilprobe von Prüfkörper 17-4)	+	+	++	+	++	-	++
- kein Merkmal; + punktuell eindeutige Merkmale; ++ häufig deutliche Merkmale								

Tab. 22: Zusammenfassung der Ergebnisse der Gefügeuntersuchungen am Bestandsbeton

Fazit

Die bei der Klimawechsellagerung des Bestandsbetons festgestellte annähernd gleiche Dehnung bei Verwendung der Prüfmedien entmineralisiertes Wasser und 3,6%ige NaCl-Lösung ist nicht über den externen Alkalieintrag erklärbar. Die zusammenfassend in der Tabelle 22 dargestellten Ergebnisse der weiterführenden Gefügeuntersuchungen zeigen, dass sowohl vor als auch nach der Klimawechsellagerung im Bestandsbeton nur punktuell das AKR-Gel in Poren nachweisbar ist. Auffallend ist allerdings, dass unabhängig von der Art des Prüfmediums bei der Klimawechsellagerung im Bestandsbeton verstärkt eine sekundäre Ettringitbildung auftritt. Das lässt den Schluss zu, dass die nicht betonschädigende AKR durch eine sekundäre Ettringitbildung überlagert wird. Aus diesem Grund war es für die Bewertung des Einflusses der Hydrophobierung auf die betonschädigende AKR zwingend erforderlich, das Prüfprogramm um einen Laborbeton mit einem hohen AKR-Schädigungspotenzial zu erweitern.

Klimawechsellagerung des Laborbetons ohne und mit Hydrophobierung

Prüfprogramm

Zur Erhöhung der Aussagesicherheit erfolgten die am Bestandsbeton in der Hauptserie 2 der Klimawechsellagerung durchgeführten Untersuchungen nochmals weitestgehend an dem in Kapitel 4 bereits beschriebenen Laborbeton. Aus Vergleichbarkeitsgründen erfuhr dieser die gleiche Vorbehandlung wie der Bestandsbeton. So wurde die Prüffläche der Prüfkörper partikelgestrahlt. Anschließend wurden diese hygrothermisch mit Lastfall 2 für

Nr. der Serie	Laborbeton						Prüfmedium		
	Zustand der Proben						entmineralisiertes Wasser	3,6%ige NaCl-Lösung	
	Vorbereitung			Hydrophobierung					
	partikelgestrahlt	Vorkonditionierung		Neigung der Prüffläche bei Hydrophobier.	Gel30	WA65			LM7
		LF 1	LF 2						
3.0				-	-				x
3.1				-	x		-	-	
3.2				-	-	-	-	x	
3.3	x	-	x	x	x		x	-	
3.4				-	-	x	-	x	
3.5							-	x	

Tab. 23: Prüfprogramm zur Abschätzung des Einflusses der Hydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess mittels Klimawechsellagerung des Laborbetons

die Applikation der Hydrophobierungsmittel vorkonditioniert (Kapitel 4.3.2). Als Hydrophobierungsmittel gelangten dabei sowohl das Produkt WA65 als auch LM7 zum Einsatz. Beide Produkte wurden auf eine um 2 % geneigte Prüffläche mittels eines einmaligen Pinselauftrags appliziert. Die Applikationsmenge betrug dabei 280 g/m². Zur Sicherstellung eines hinreichenden Polymerisationsgrades der auf dem Silan basierenden Hydrophobierungsmittel wurden die Prüfkörper nach ihrer Hydrophobierung zwei Wochen in der Prüfhalle und danach eine Woche bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % bis zur Einbringung in die Baustoffprüfkammer zwischengelagert. Einen zusammenfassenden Überblick über das Prüfprogramm gibt Tabelle 23.

• Prüfergebnisse und Auswertung

Die detaillierten Prüfergebnisse der Klimawechsellaagerung der dritten Hauptserie mit dem Laborbeton (Serie 3.0-3.5) sind Bild 70 zu entnehmen. Dabei zeigt Bild 70 (oben), dass die Beaufschlagung der Prüffläche des Laborbetons mit entmineralisiertem Wasser bei der Klimawechsellaagerung unabhängig vom Vorhandensein einer Hydrophobierung nach 12 Zyklen nur eine sehr geringe Dehnung weit unter dem Grenzwert zur Folge hat. Dies ist auf das fehlende Angebot von Alkalien zurückzuführen. Ein völlig anderes Bild wird bei Beaufschlagung der Prüffläche der Laborbetone mit 3,6%iger NaCl-Lösung sichtbar. So zeigt Bild 70 (unten), dass die Prüferserie ohne Hydrophobierung nach sieben Zyklen der Klimawechsellaagerung

den Dehnungsgrenzwert erreicht. Nach 12 Zyklen stellt sich hier eine Dehnung von 2,2 mm/m und somit circa der dreifache Betrag des Grenzwertes ein. Demgegenüber sind die Dehnungen der Prüferserien mit einer hydrophobierten Prüffläche unabhängig von der Art des Hydrophobierungsmittels nach 12 Zyklen mit 0,17 bzw. 0,13 mm/m vernachlässigbar gering. Damit wurde der Nachweis erbracht, dass unter den gewählten Prüfbedingungen einer Klimawechsellaagerung die Hydrophobierung der Prüffläche des Laborbetons mit WA65 bzw. LM7 den AKR-Schädigungsprozess signifikant vermindert.

Einen zusammenfassenden Überblick über die Ergebnisse der Klimawechsellaagerung des Laborbetons gibt die Tabelle 24.

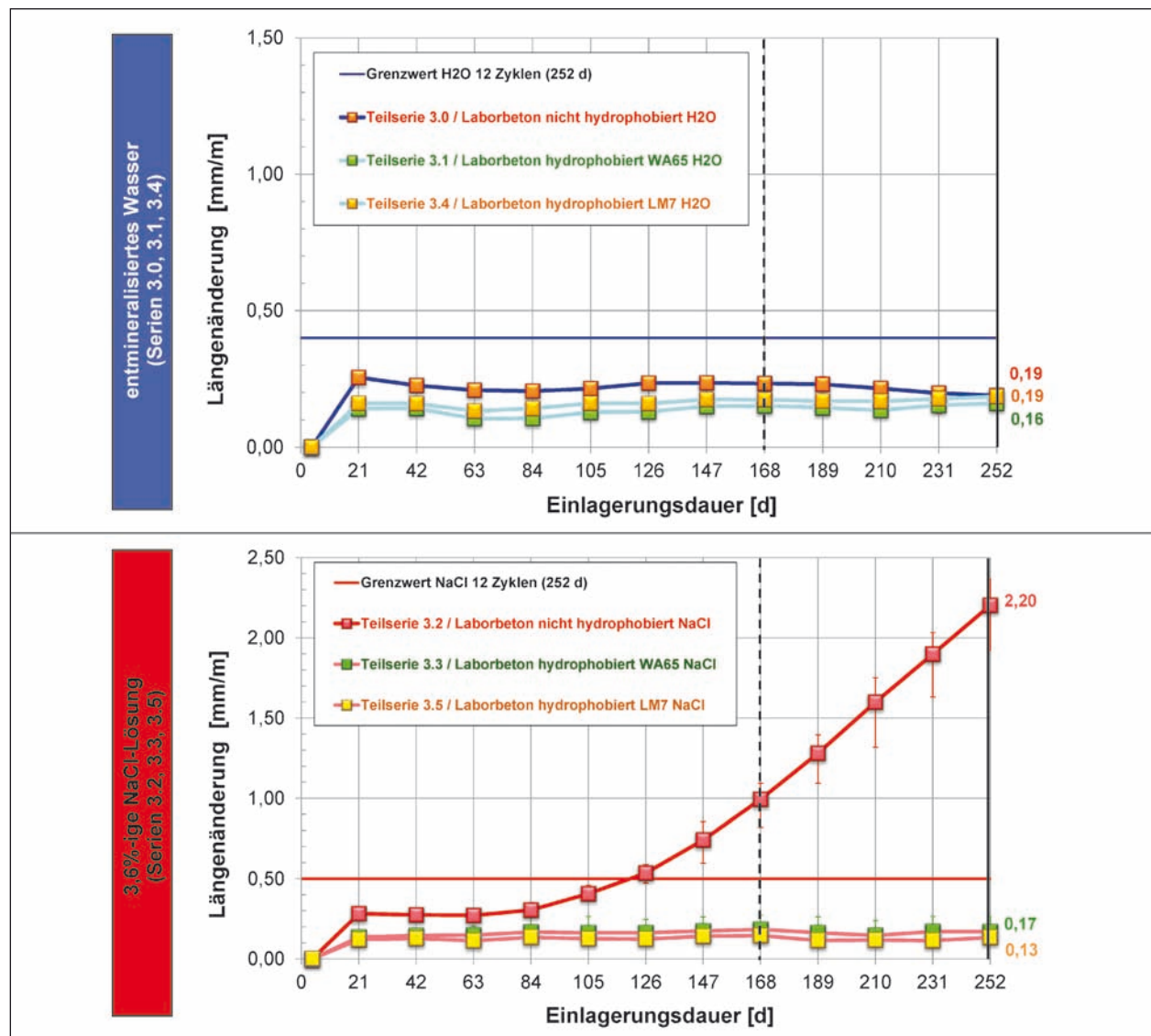


Bild 70: Ergebnis der Klimawechsellaagerung der Prüfkörper des Laborbetons (ohne und mit Hydrophobierung WA65 und LM7) bei vergleichender Beaufschlagung mit entmineralisiertem Wasser und 3,6%iger NaCl-Lösung

Nr. der Teilserie	Laborbeton						Prüfmedium		Dehnung nach KWL [mm/m]		
	Zustand der Proben						entmineralisiertes Wasser	3,6%ige NaCl-Lösung			
	Vorbehandlung			ohne							mit
	partikelgestrahit	Vorkonditionierung		Neigung der Prüffläche bei Hydrophobierung	Hydrophobierung				8 Zyklen		12 Zyklen
LF 1		LF 2	-		WA65	LM7					
3.0											
3.1				x	-		x	-	0,23	0,19	
3.2				-	-		-	-	0,15	0,16	
3.3	x	-	x	x	-		-	x	0,99	2,20	
3.4				-	-		x	-	0,18	0,17	
3.5				-	-	x	-	-	0,17	0,19	
							-	x	0,15	0,13	

Lastfall (LF) 1: ohne Wasserbeaufschlagung
Lastfall (LF) 2: mit Wasserbeaufschlagung

Tab. 24: Übersicht über die Ergebnisse zur Abschätzung des Einflusses der Hydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess mittels Klimawechsellagerung des Laborbetons

Vertiefende mikroskopische und mikrochemische Untersuchungen am Laborbeton nach der Klimawechsellagerung

• **Analyse der Natrium- und Chloridverteilung**

Eine zentrale Rolle bei der Bewertung der signifikant unterschiedlichen Dehnungen der Prüfkörper aus Laborbeton spielt der reduzierte Tausalz- und Feuchteeintrag durch die Oberflächenhydrophobierung. Zur Verifizierung des Natrium- und Chlorideintrags gelangte auch hier LIBS zum Einsatz. Die flächenhafte Analyse der Natrium- und Chloridverteilung erfolgte dabei vergleichend an Vertikalschnitten der Prüfkörper ohne und mit hydrophobierter Oberfläche (Teilserie 3.2 bzw. 3.3) nach der Klimawechsellagerung mit Beaufschlagung mit einer 3,6%igen NaCl-Lösung. Die vergleichende Betrachtung der Bilder 71a mit 72a sowie 71b mit

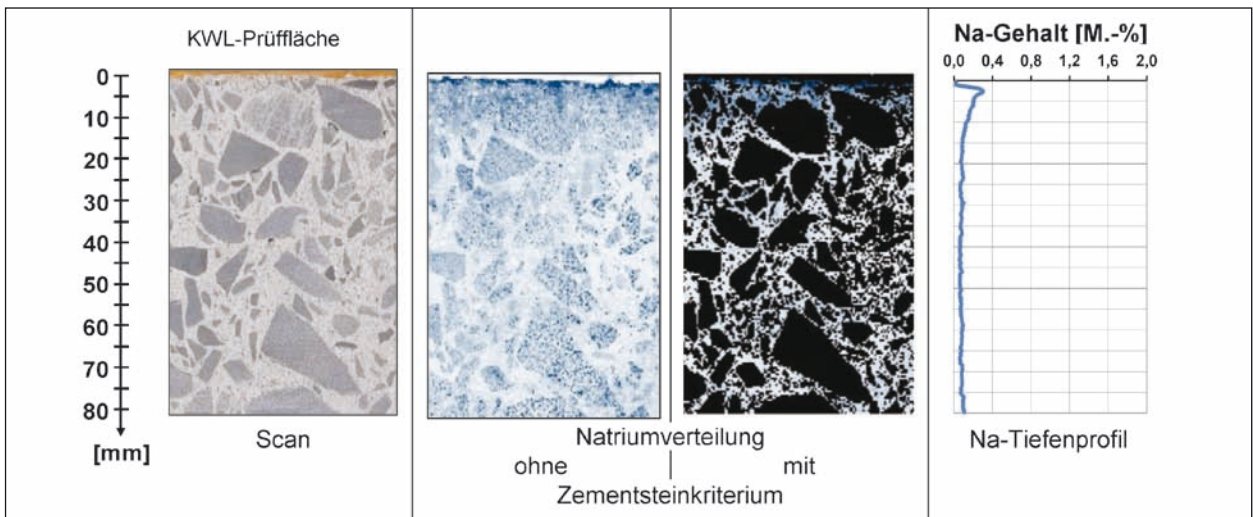


Bild 71a: Mit LIBS bestimmte Natriumverteilung im Vertikalschnitt des hydrophobierten Laborbetons nach der Klimawechsellagerung bei Beaufschlagung mit einer 3,6%igen NaCl-Lösung (12 Zyklen)

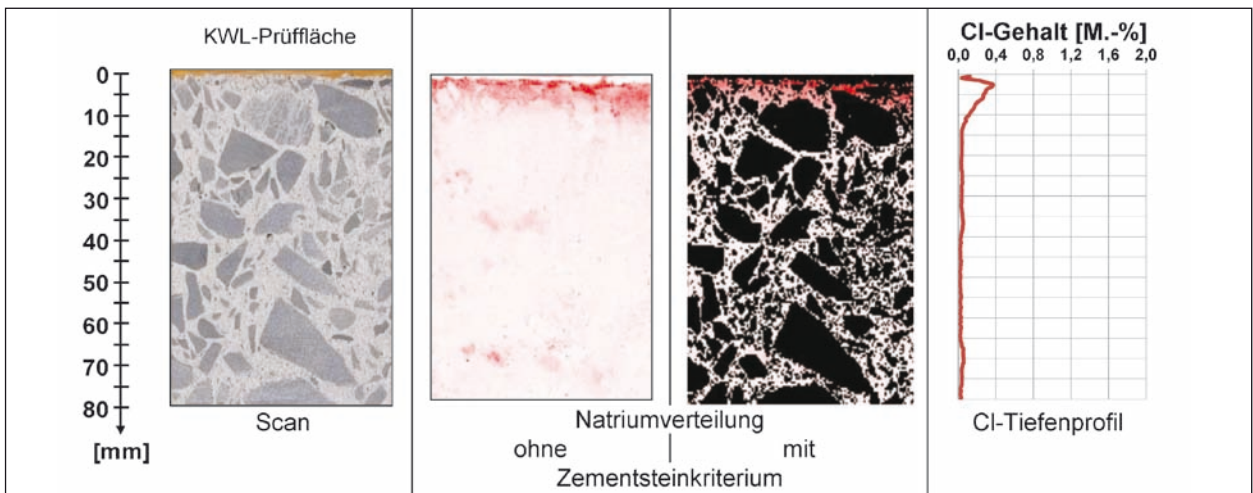


Bild 71b: Mit LIBS bestimmte Chlorverteilung im Vertikalschnitt des hydrophobierten Laborbetons nach der Klimawechsellagerung bei Beaufschlagung mit einer 3,6%igen NaCl-Lösung (12 Zyklen)

72b zeigt deutlich, dass durch die Hydrophobierung der Natrium- und Chloreintrag während der Klimawechsellaagerung bei Beaufschlagung mit 3,6%iger NaCl-Lösung signifikant vermindert wird. So erfährt die maximale Eindringtiefe im betrachteten Proben-ausschnitt nach 12 Zyklen der Klimawechsellaagerung bei Natrium bzw. Chlor eine Reduzierung von 80 mm auf ca. 15 mm bzw. 10 mm. Das wiederum hat zur Folge, dass die Alkalien als eine wesentliche Voraussetzung für den Ablauf einer AKR bei den hydrophobierten Proben in einer deutlich geringeren Menge und nur bis in eine relativ kleine Tiefe zur Verfügung stehen.

• Gefügeanalyse mittels Dünnschliff-mikroskopie

Zur Gefügeuntersuchung am Polarisationsmikroskop wurde nach der Klimawechsellaagerung mit Beaufschlagung mit 3,6%iger NaCl-Lösung aus dem Prüfkörper LB17 der Teilserie 3.2 (Laborbeton, nicht hydrophobiert) ein großformatiger Dünnschliff hergestellt. Dieser wurden anschließend auf AKR-Indikatoren untersucht. Dabei waren auch hier die Riss- und AKR-Gelbildung von zentralem Interesse. Zusätzlich wurde das Vorkommen einer sekundären Ettringitbildung (SEB) geprüft.

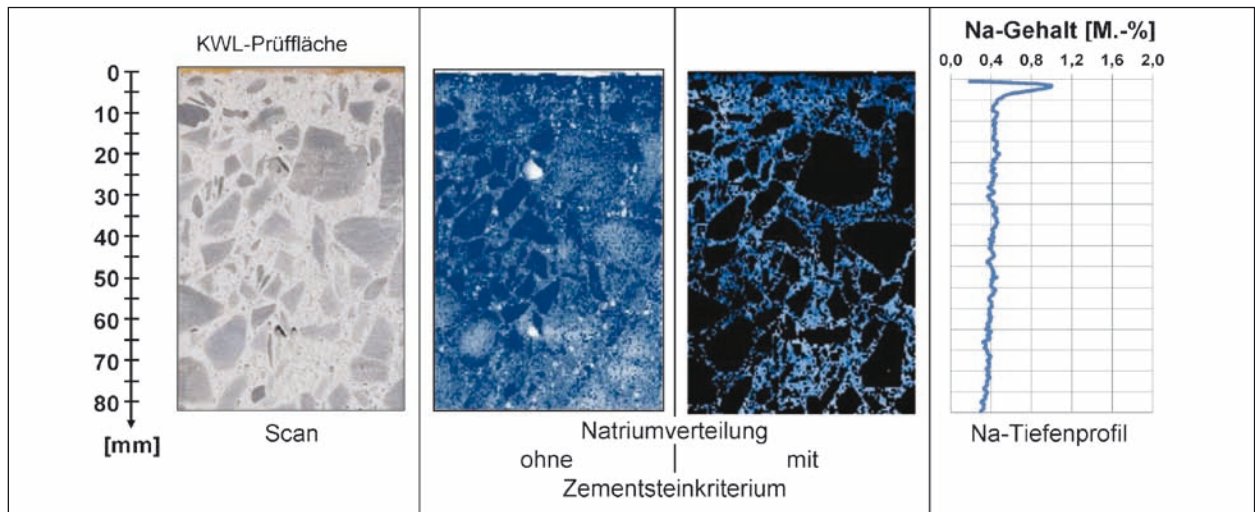


Bild 72a: Mit LIBS bestimmte Natriumverteilung im Vertikalschnitt des nicht hydrophobierten Laborbetons nach der Klimawechsellaagerung bei Beaufschlagung mit einer 3,6%igen NaCl-Lösung (12 Zyklen)

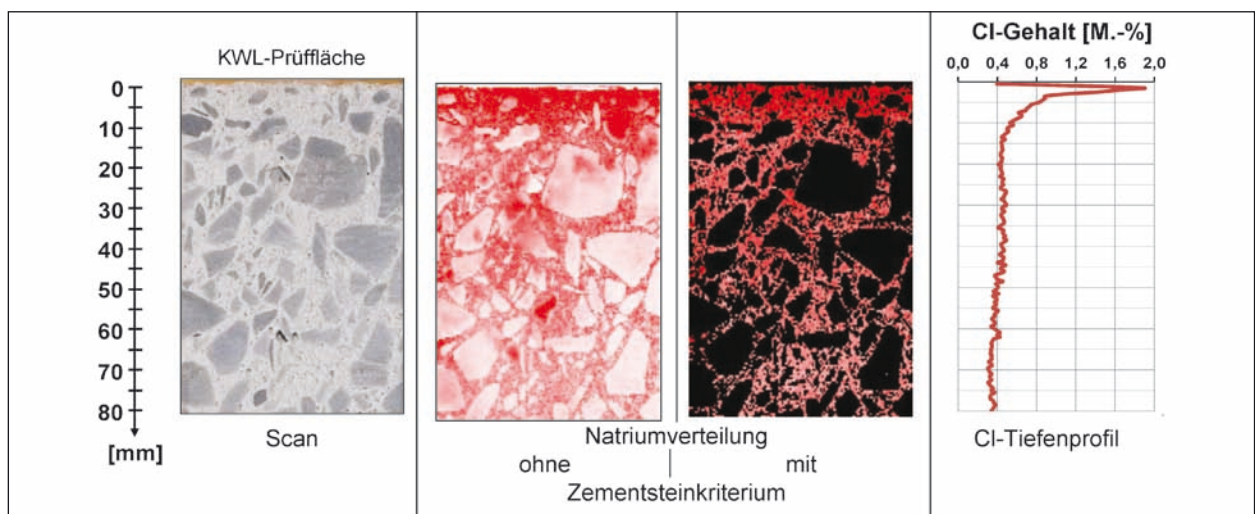


Bild 72b: Mit LIBS bestimmte Chlorverteilung im Vertikalschnitt des hydrophobierten Laborbetons nach der Klimawechsellaagerung bei Beaufschlagung mit einer 3,6%igen NaCl-Lösung (12 Zyklen)

Das Ergebnis der Dünnschliffuntersuchung nach 12 KWL-Zyklen ist in den Bildern 73a bis 73c detailliert dokumentiert und bewertet. Dabei wurde sowohl in

den Poren als auch in Rissen ein AKR-Gel identifiziert. Zusätzlich wurde in den Poren vermehrt Ettringit vorgefunden.

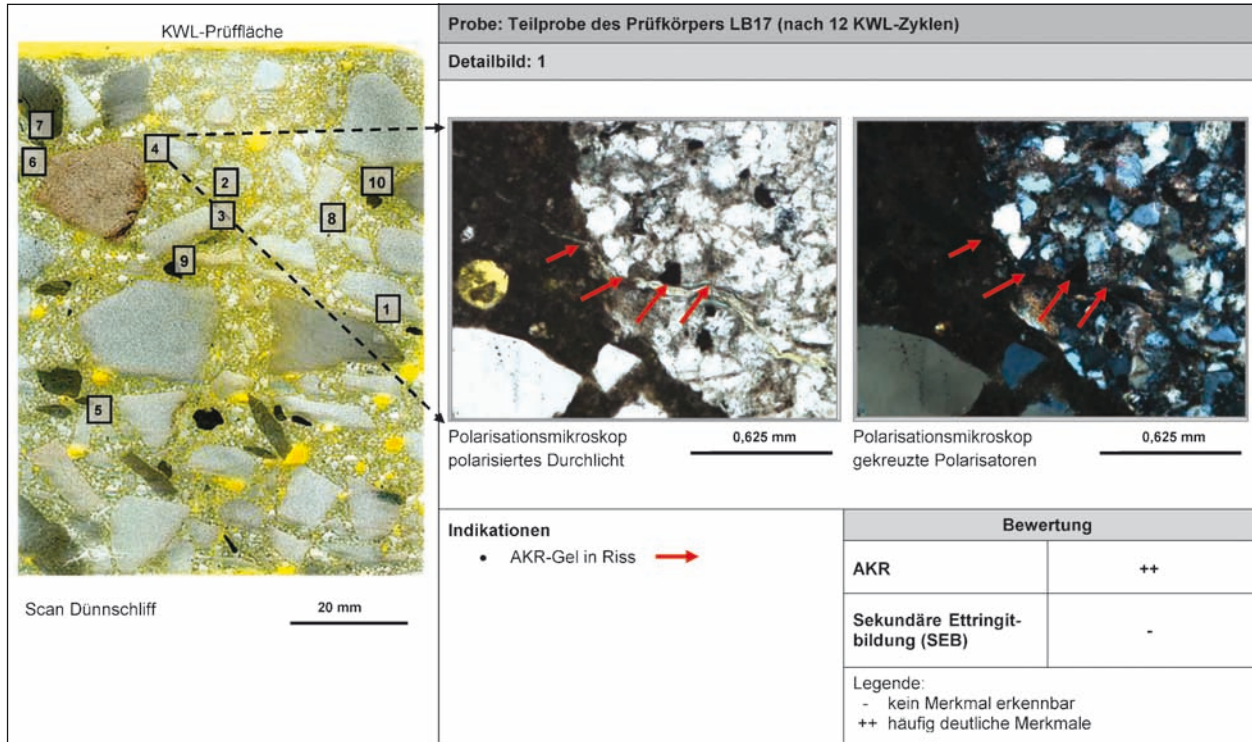


Bild 73a: Ergebnis der Dünnschliffuntersuchungen am Vertikalschnitt des Laborbetons nach der Klimawechsellagerung (3,6%ige NaCl-Lösung)

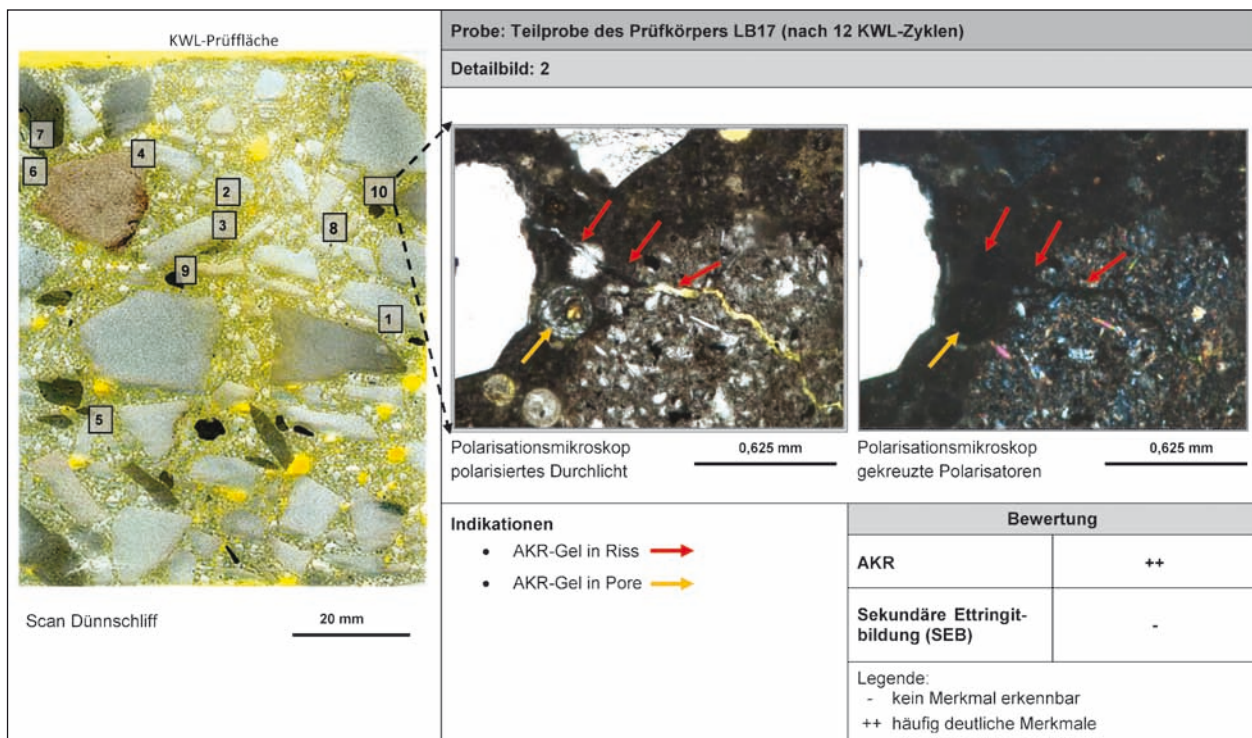


Bild 73b: Ergebnis der Dünnschliffuntersuchungen am Vertikalschnitt des Laborbetons nach der Klimawechsellagerung (3,6%ige NaCl-Lösung)

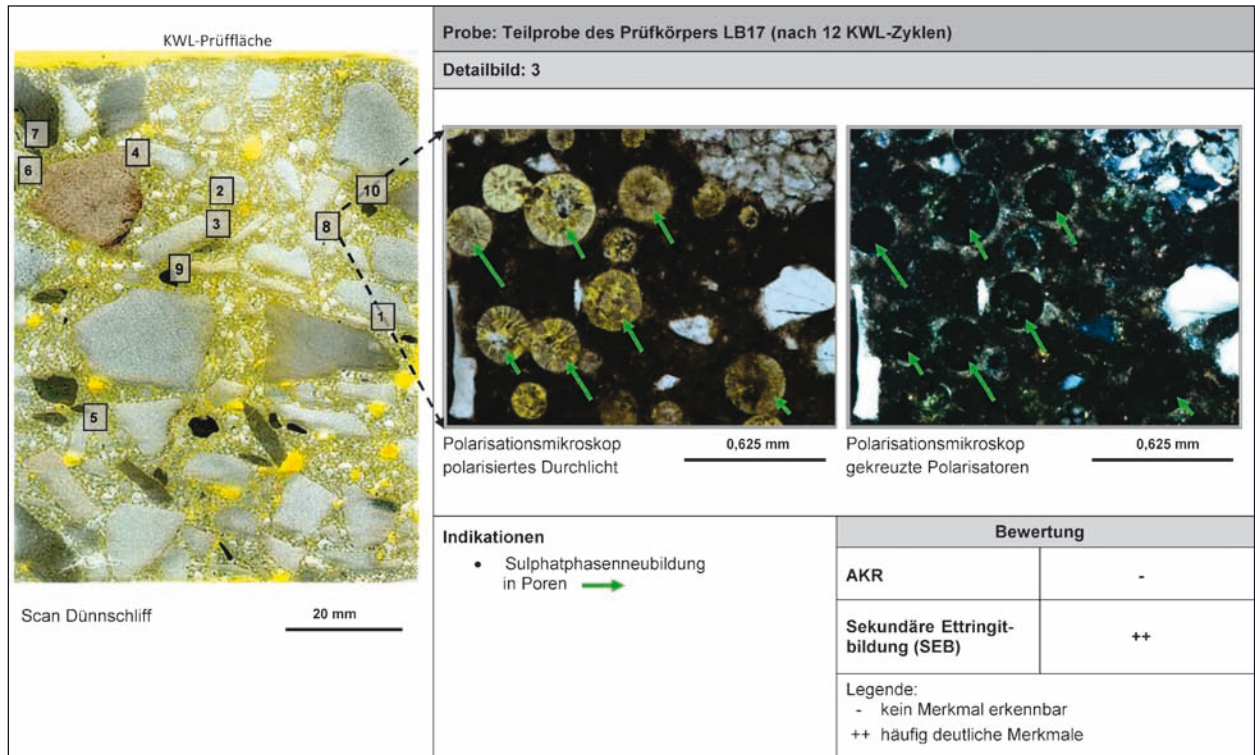


Bild 73c: Ergebnis der Dünnschliffuntersuchungen am Vertikalschnitt des Laborbetons nach der Klimawechsellagerung (3,6%ige NaCl-Lösung)

Bezeichnung und Zustand des Prüfkörpers	Bewertung vorgefundener Indikatoren bei	
	AKR	SEB
LB17; nach KWL (12 Zyklen)	++	++

Tab. 25: Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse der Polarisationsmikroskopie an den Dünnschliffen des nicht hydrophobierten Laborbetons nach der Klimawechsellagerung (3,6%ige NaCl-Lösung)

Einen zusammenfassenden Befund zu den Untersuchungen gibt die Tabelle 25.

• **Ergänzende Gefügeuntersuchungen mit REM/EDX**

Zur Absicherung des Ergebnisses der Polarisationsmikroskopie wurde der Prüfkörpers LB17 nach Abschluss der Klimawechsellagerung ebenfalls einer vertiefenden Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) und begleitender energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) unterzogen. Die Analysen erfolgten an einer Betonbruchfläche und dienten der Phasenbestimmung von Gefügebildungen.

Bild 74 zeigt, ausgehend vom Oberflächenscan, die Einordnung zweier Messpunkte auf der Bruchfläche der Teilprobe des Prüfkörpers LB17. Dabei konnte bei der Messstelle 1 die Bildung von AKR-Gel als Porenfüllung nachgewiesen werden. Bei der Messstelle 2 hingegen wurde sekundärer Ettringit in einer Pore detektiert. Dies untermauert den Befund der Polarisationsmikroskopie.

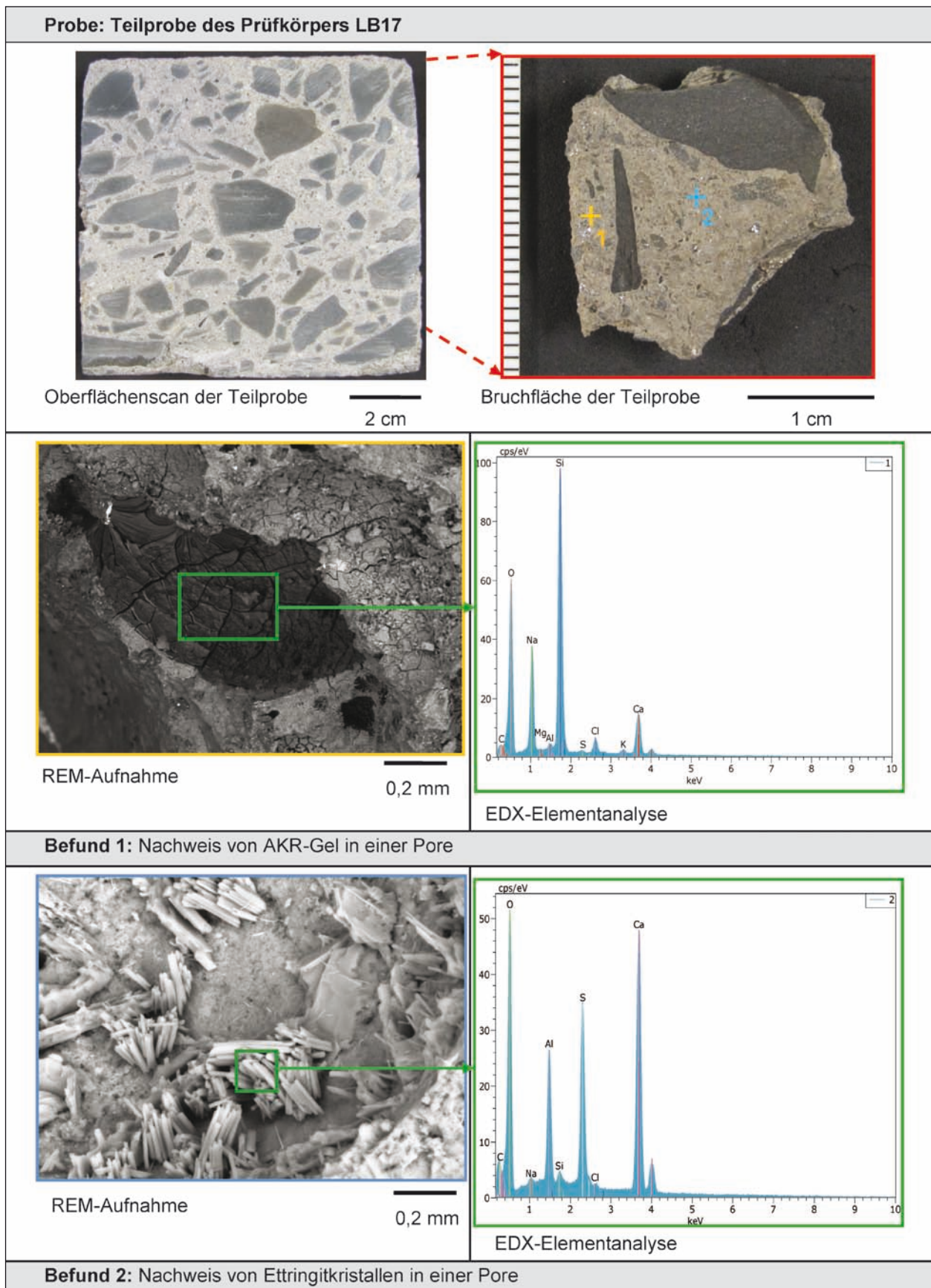


Bild 74: Ergebnis der REM/EDX-Untersuchungen an der Bruchfläche des Laborbetons nach der Klimawechsellagerung mit 3,6%iger NaCl-Lösung

• Fazit

Bei der vergleichenden Untersuchung des Laborbetons mit alkaliempfindlicher Gesteinskörnung (Grauwacke) ohne und mit Hydrophobierung wurde bei der Klimawechsellagerung gezeigt, dass an Prüfkörpern mit hydrophobierter Prüffläche (Teilserien 3.1, 3.3, 3.4 u. 3.5) keine über die hygrischen Dehnung hinaus gehende Längenänderung festgestellt werden konnte. Ähnlich verhielten sich die nicht hydrophobierten Prüfkörper, die mit demineralisiertem Wasser beaufschlagt wurden (Teilserie 3.0). Im Gegensatz dazu überschreitet die nicht hydrophobierte und mit 3,6%iger NaCl-Lösung beaufschlagte Teilserie 3.2 den Grenzwert von 0,5 mm/m bereits nach dem 6. Zyklus der KWL. Die nach der AKR-provozierenden Lagerung erfolgten mikrochemischen Untersuchungen mit LIBS belegen, dass durch die Oberflächenhydrophobierung der Tausalzeintrag in den Laborbeton signifikant reduziert wird und damit der AKR-Schädigungsprozess stark vermindert wird. Die exemplarisch bei der Teilserie 3.2 durchgeführten mikroskopischen Untersuchungen am nicht hydrophobierten Laborbeton nach der Klimawechsellagerung lassen darauf schließen, dass es sich bei den Phasenneubildungen um eine stark ausgeprägte AKR mit einer begleitenden sekundären Ettringitbildung handelt.

4.4.4 60°C-Betonversuch (Prüfszenario C)

• Prüfprogramm

Ergänzend zur Klimawechsellagerung wurde der Einfluss der Hydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess auch in Anlehnung an den 60°C-Beton-

tonversuch (Prüfszenario C) analysiert [42]. Dabei wurden die Untersuchungen exemplarisch mit dem Hydrophobierungsmittel WA65 durchgeführt. Als Betone gelangten einerseits der Bestandsbeton sowie andererseits der Laborbeton ohne und mit erhöhtem inneren AKR-Schädigungspotenzial zum Einsatz. So wurde beim Laborbeton zunächst mit einem Straßenbauzement mit einem Na₂O-Äquivalent von 0,76 M.-% gearbeitet. Darauf basierend wurde anschließend zur Erhöhung des inneren AKR-Schädigungspotenzials das Na₂O-Äquivalent des Laborbetons auf 1,3 M.-% gemäß Alkali-Rili [42] erhöht. Dies erfolgte einerseits mittels Aufdotierung des Straßenbauzements mit einer Natriumchloridlösung sowie andererseits durch den Einsatz eines Prüfzementes mit einem Na₂O-Äquivalent von 1,22 M.-% und einer geringen Zugabe von Natriumchloridlösung. Die Frisch- und Festbetonkennwerte der so hergestellten Laborbetone sind der Tabelle 26 zu entnehmen. Auffallend ist bei den Frischbetonkennwerten, dass die Laborbetone mit dem erhöhten Natriumäquivalent einen verminderten Luftporengehalt und somit eine erhöhte Rohdichte aufweisen. Das korreliert auch mit einer erhöhten Trockenrohichte des Festbetons. Auffallend ist in diesem Kontext die Verminderung der Druckfestigkeit des Laborbetons mit dem s_d-Zement bei Aufdotierung mit der NaCl-Lösung.

Die für die AKR-provozierende Lagerung vorgesehenen prismatischen Prüfkörper mit den Abmessungen 28 x 7,5 x 7,5 cm³ der einzelnen Serien wurden analog im Kapitel 4.2.2 „Allgemeine Charakterisierung“ aus Betonplatten gewonnen. Die Betonplatten selbst wurden nach ihrer Herstellung für einen Tag in der Schalung belassen, danach

Prüfgröße			Laborbeton mit einem Zementgehalt von 360 kg/m ³ und einem Na ₂ O-Äquivalent von		
			0,76 M.-% (s _d -Zement)	1,30 M.-%	
				s _d -Zement, aufdotiert mit NaCl	Prüfzement, gering aufdotiert mit NaCl
Frischbeton- kennwerte	Ausbreitmaß [mm]	10 min	350/335	355/340	330/320
		30 min	330/320	320/310	310/310
	Luftporengehalt [Vol.-%]	10 min	5,2	4,3	2,9
		30 min	4,7	3,2	2,3
Rohdichte [kg/m ³]		2.304	2.340	2.420	
Festbeton- kennwerte	Druckfestigkeit [N/mm ²]	43,6	38,6	43,9	
	Trockenrohichte [kg/m ³]	2.260	2.310	2.385	

Tab. 26: Frisch- und Festbetonkennwerte der Laborbetone

13 Tage bei 20 °C und 97 % relativer Luftfeuchte gelagert und anschließend bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte weitere 14 Tage konditioniert. Danach wurden die Prüfkörper zugeschnitten und erneut ca. eine Woche bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte bis zur allseitigen Applikation des Hydrophobierungsmittels gelagert. Dieses wurde mittels einmaligen Pinselauftrags auf die Mantelfläche und die Stirnseite der Prismen appliziert. Nach Applikation des Hydrophobierungsmittels wurden die Prüfkörper weitere zwei Wochen bei Hallenklima gelagert und anschließend über einem Zeitraum von 7 Tagen bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte bis zum Start der Einlagerung konditioniert.

Die Einlagerung der einzelnen Prüfserien in die Prüfbehälter des 60°C-Betonversuchs erfolgte aus Vergleichbarkeitsgründen einheitlich in einem Alter

von ca. 10 Wochen. In den Prüfbehältern wurden die Prüfkörper mindestens 140 Tage über Wasser bei 60 °C gelagert. Zur Zustandserfassung der Prüfkörper während der AKR-provozierenden Lagerung wurde ihre Länge und Masse diskontinuierlich bei 23 °C und ca. 100 % relativer Luftfeuchte bestimmt. Zusätzlich wurde nach Beendigung des 60°C-Betonversuchs der Natrium- und Kaliumgehalt in der Behälterflüssigkeit mit einem optischen Emissionsspektrometer (ICP-OES) bestimmt. Dies soll Rückschlüsse auf die Auslaugung der Prüfkörper während der AKR-provozierenden Lagerung ermöglichen. Einige Impressionen vom 60°C-Betonversuch vermitteln die Fotos im Bild 75.

Einen zusammenfassenden Überblick über die in Anlehnung an den 60°C-Betonversuch geprüften Serien gibt abschließend die Tabelle 27.

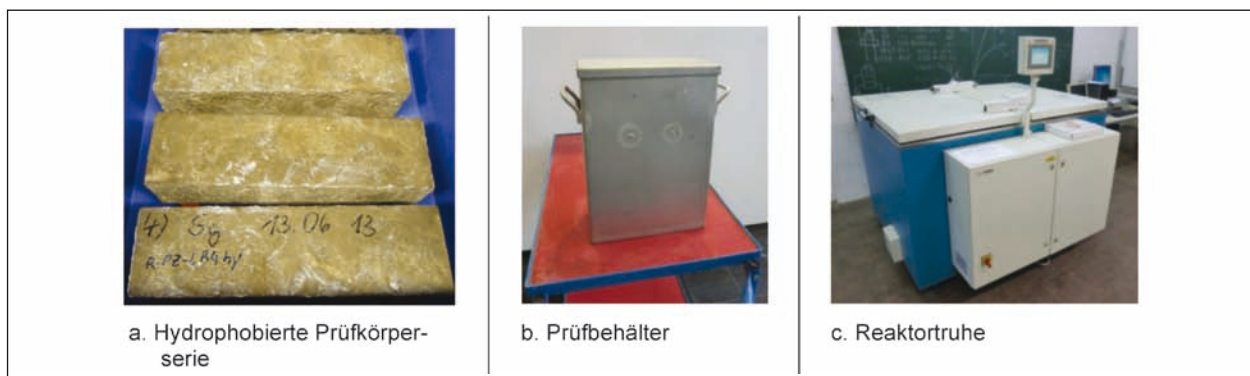


Bild 75: Impressionen von der in Anlehnung an den 60°C-Betonversuch durchgeführten AKR-provozierenden Lagerung

	Bestandsbeton		Laborbeton mit Na ₂ O-Äquivalent von					
			0,76 M.-%		1,30 M.-%			
	Ausbauzustand		s _d -Zement		s _d -Zement, aufdotiert mit NaCl		Prüfzement, gering aufdotiert mit NaCl	
	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
	Hydrophobierung							
BB 1.0	X							
BB 1.1		X						
LB 2.0			X					
LB 2.1				X				
LB 3.0					X			
LB 3.1						X		
LB 4.0							X	
LB 4.1								X

Tab. 27: Prüfprogramm zur Abschätzung des Einflusses der Hydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess mittels 60°C-Betonversuch

• Prüfergebnisse und Auswertung

Die zeitlichen Verläufe der bei den einzelnen Prüferien ermittelten Längen- und Massenänderungen sind den Bildern 76 bis 79 zu entnehmen. Bei einer vergleichenden Betrachtung der Masseänderung aller Prüferien fällt auf, dass die allseitig hydrophobierten Prüfkörper, unabhängig davon ob es sich um Bestands- oder Laborbetone handelt, zeitlich verzögert Feuchtigkeit aufnehmen. Dabei stellt sich nach 147 Tagen bei allen Prüferien mit Hydrophobierung ein deutlich geringerer Feuchtegehalt als bei den nicht hydrophobierten Prüferien ein. Bemerkenswert ist in diesem Kontext, dass sowohl der Bestandsbeton als auch der Laborbeton mit dem Straßenbauzement ohne zusätzliche Auf-

dotierung trotz verminderter Feuchteaufnahme bei vorhandener Hydrophobierung höhere Dehnungswerte als im unbehandelten Zustand aufweist. Als mögliche Ursache hierfür kann insbesondere bei dem betrachteten Laborbeton die verstärkte Alkaliauslaugung der nicht hydrophobierten Prüfkörper angesehen werden. Dies lässt sich mit den Ergebnissen der quantitativen Analyse an Kalium und Natrium in der Behälterflüssigkeit belegen (siehe Bild 80). Dies wiederum hat eine verminderte Neuphasenbildung und somit eine geringere Dehnung zur Folge. Allerdings ist bei den unbehandelten Prüfkörpern der aufdotierten Laborbetone trotz erhöhter Alkaliauslaugung keine verminderte Dehnung gegenüber dem hydrophobierten Zustand erkennbar. Ein möglicher Erklärungsansatz wäre der stark er-

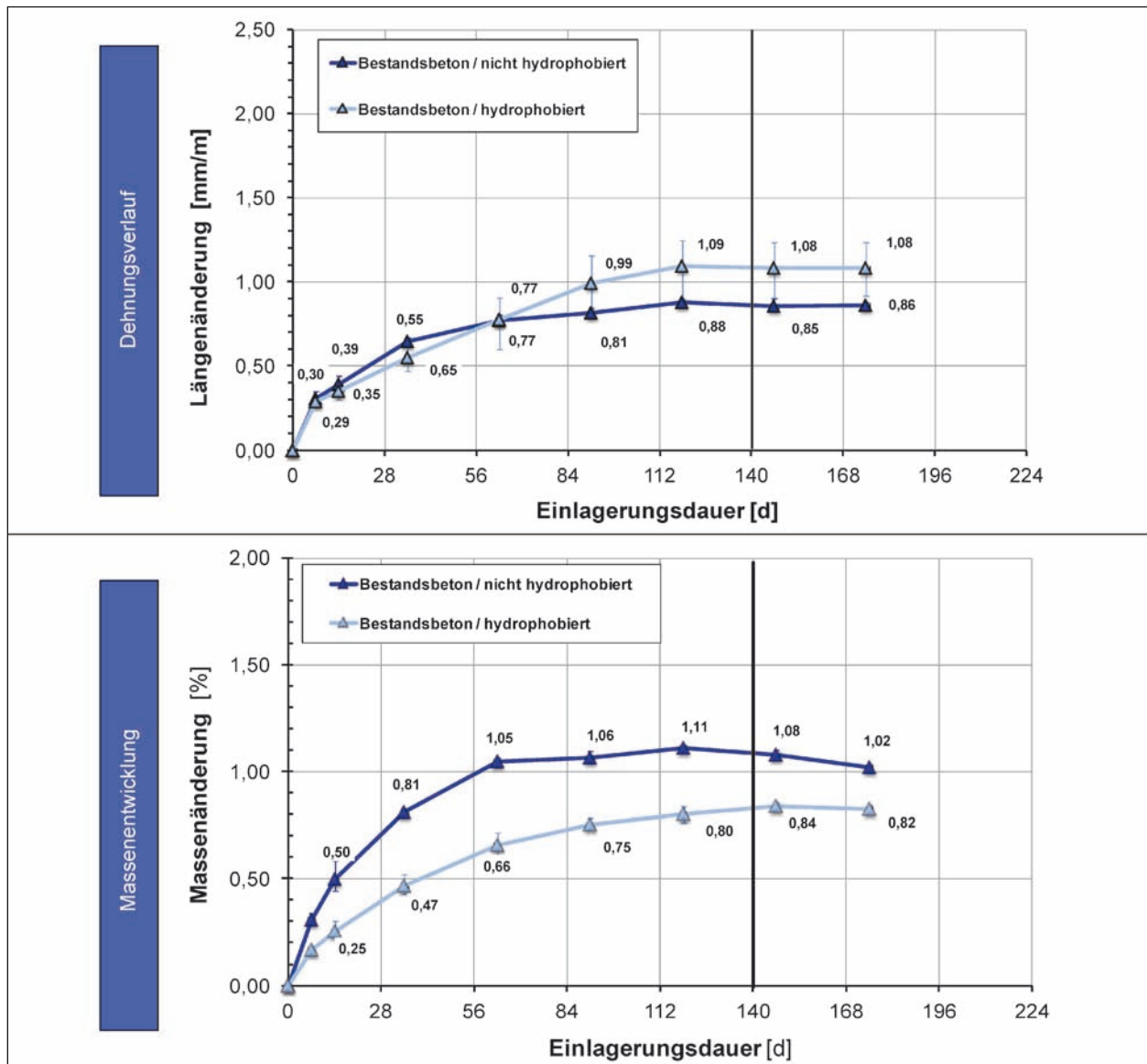


Bild 76: Ergebnis der in Anlehnung an den 60°C-Betonversuch durchgeführten AKR-provozierenden Lagerung der Prüfkörper aus Bestandsbeton ohne und mit allseitig appliziertem Hydrophobierungsmittel WA65

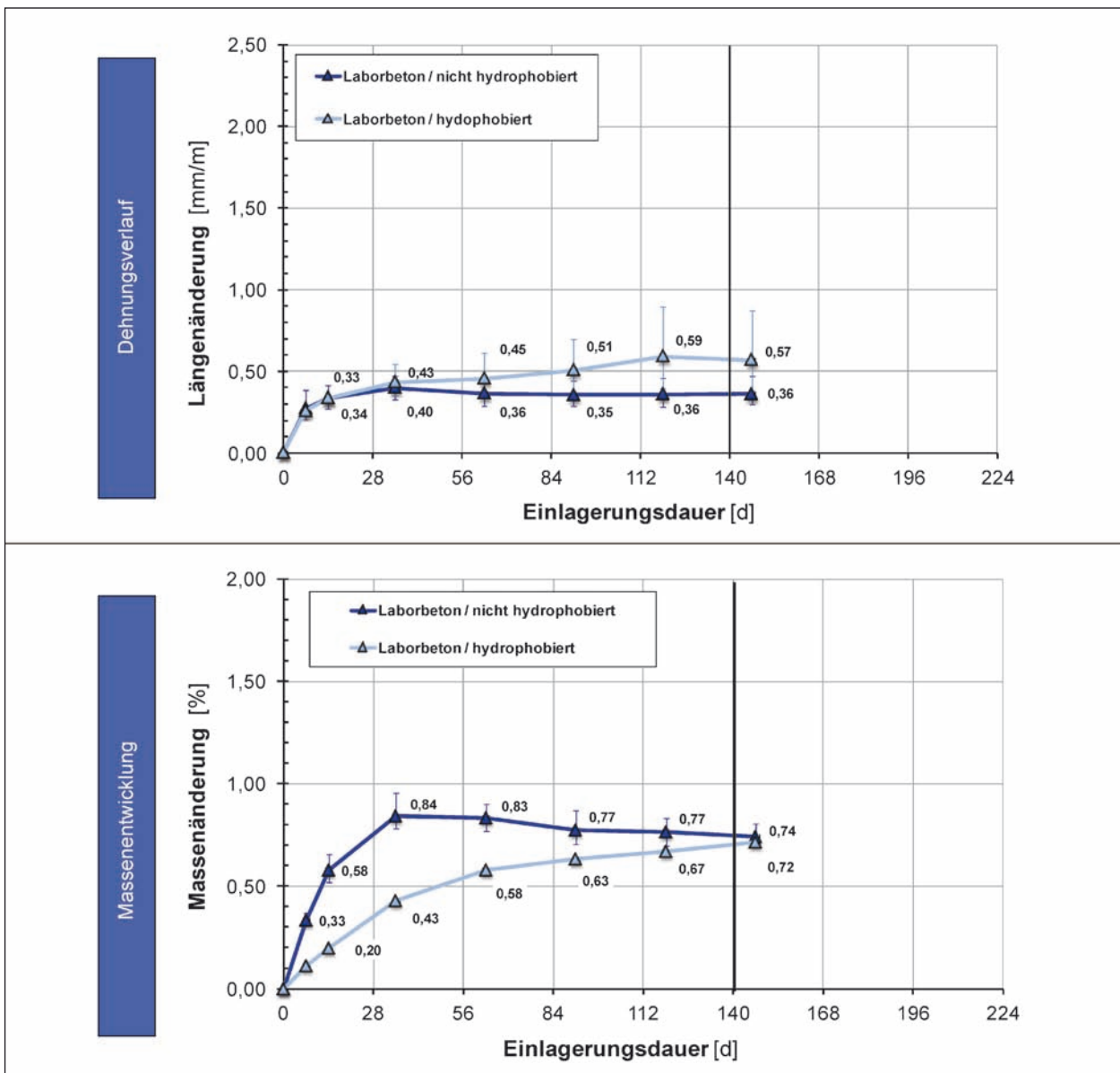


Bild 77: Ergebnis der in Anlehnung an den 60°C-Betonversuch durchgeführten AKR-provozierenden Lagerung der Prüfkörper aus Laborbeton (Na_2O -Äquivalent des Zements: 0,76) ohne und mit allseitig appliziertem Hydrophobierungsmittel WA65

höhte Grundgehalt an Alkalien im Prüfkörper. So stellt die hier ermittelte Alkaliauslaugung offensichtlich bei diesem aufdotierten Beton keine limitierende Größe für den AKR-Schädigungsprozess dar. Die ursprünglich vermutete starke Verminderung der Dehnung durch die Hydrophobierung ist am stärksten bei dem Laborbeton mit Prüfzement erkennbar. So nehmen hier die Dehnungen nach 147 Tagen Werte von 1,81 bzw. 1,11 mm/m an.

Einen zusammenfassenden Überblick über alle Ergebnisse der 60°C-Betonversuche gibt die Tabelle 28 sowie ergänzend hierzu die im Anhang A1 dargestellten Ergebnisse der polarisationsmikroskopischen Untersuchungen der Prüfserien LB 3.0 bis LB 4.1.

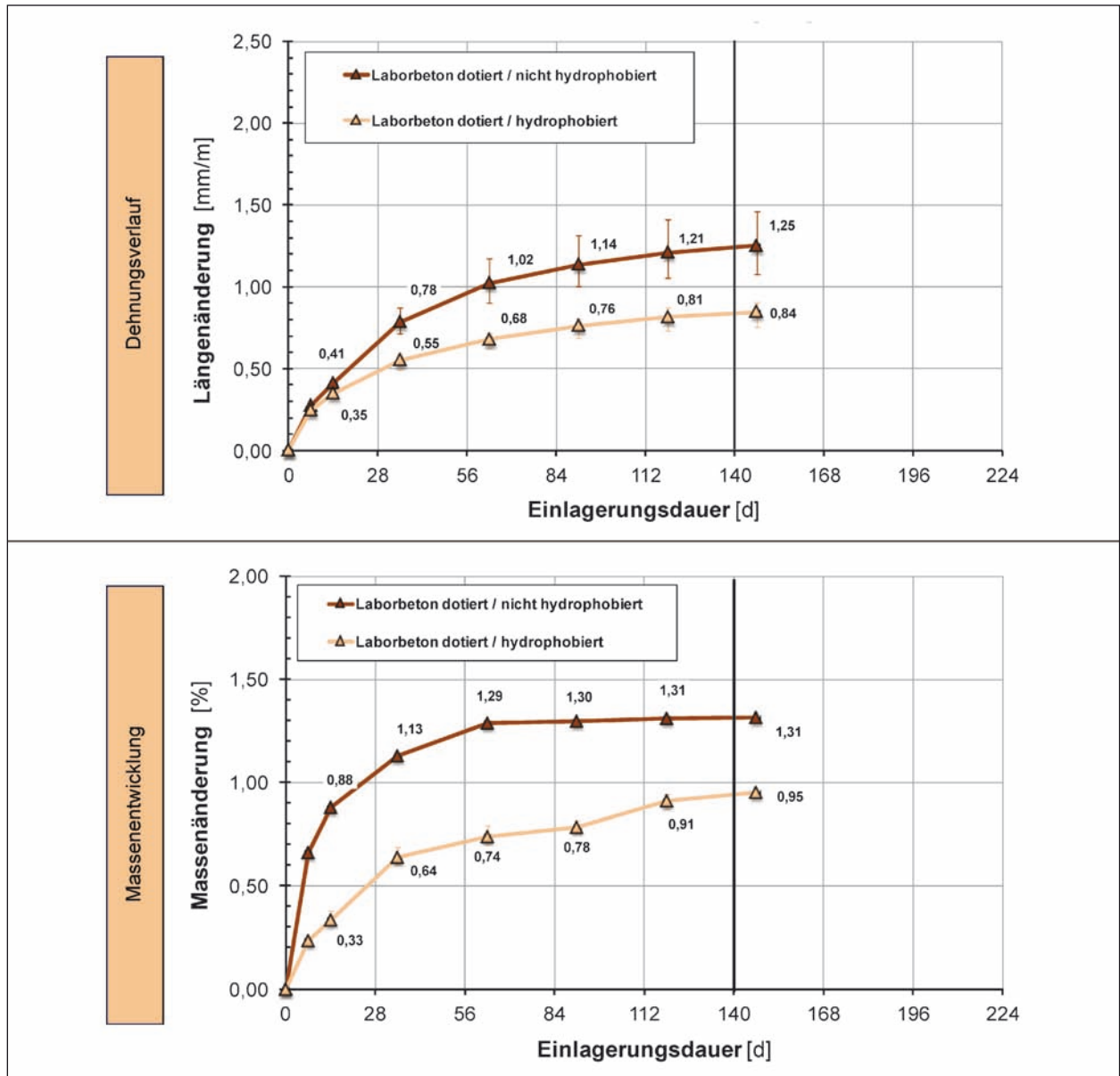


Bild 78: Ergebnis der in Anlehnung an den 60°C-Betonversuch durchgeführten AKR-provozierenden Lagerung der Prüfkörper aus Laborbeton (Aufdotierung des s_d -Zements mit NaCl-Lösung auf Na_2O -Äquivalent von 1,30) ohne und mit allseitig appliziertem Hydrophobierungsmittel WA65

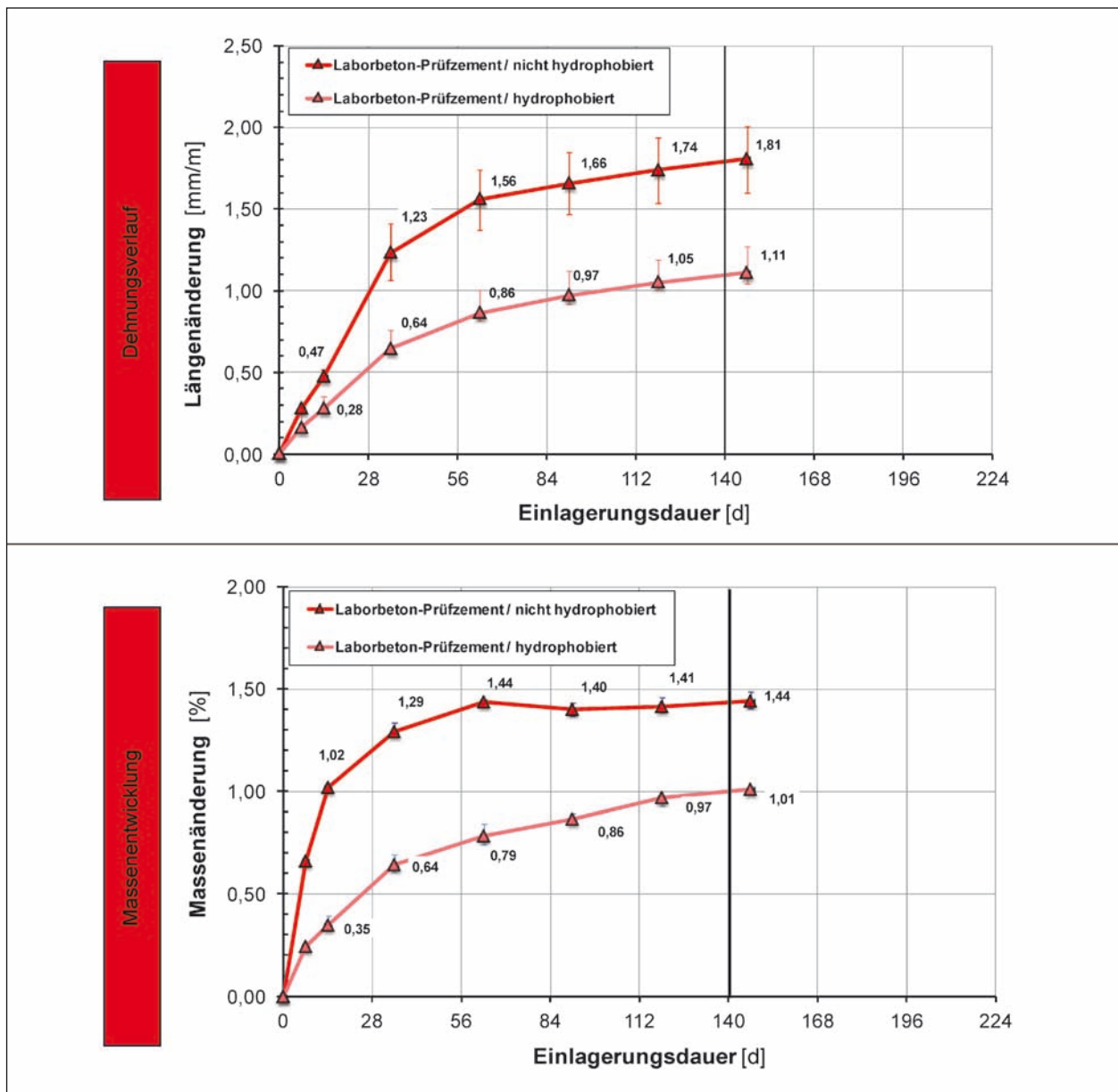


Bild 79: Ergebnis der in Anlehnung an den 60°C-Betonversuch durchgeführten AKR-provozierenden Lagerung der Prüfkörper aus Laborbeton (geringe Aufdotierung des Prüfzements mit NaCl-Lösung auf Na_2O -Äquivalent von 1,30) ohne und mit allseitig appliziertem Hydrophobierungsmittel WA65

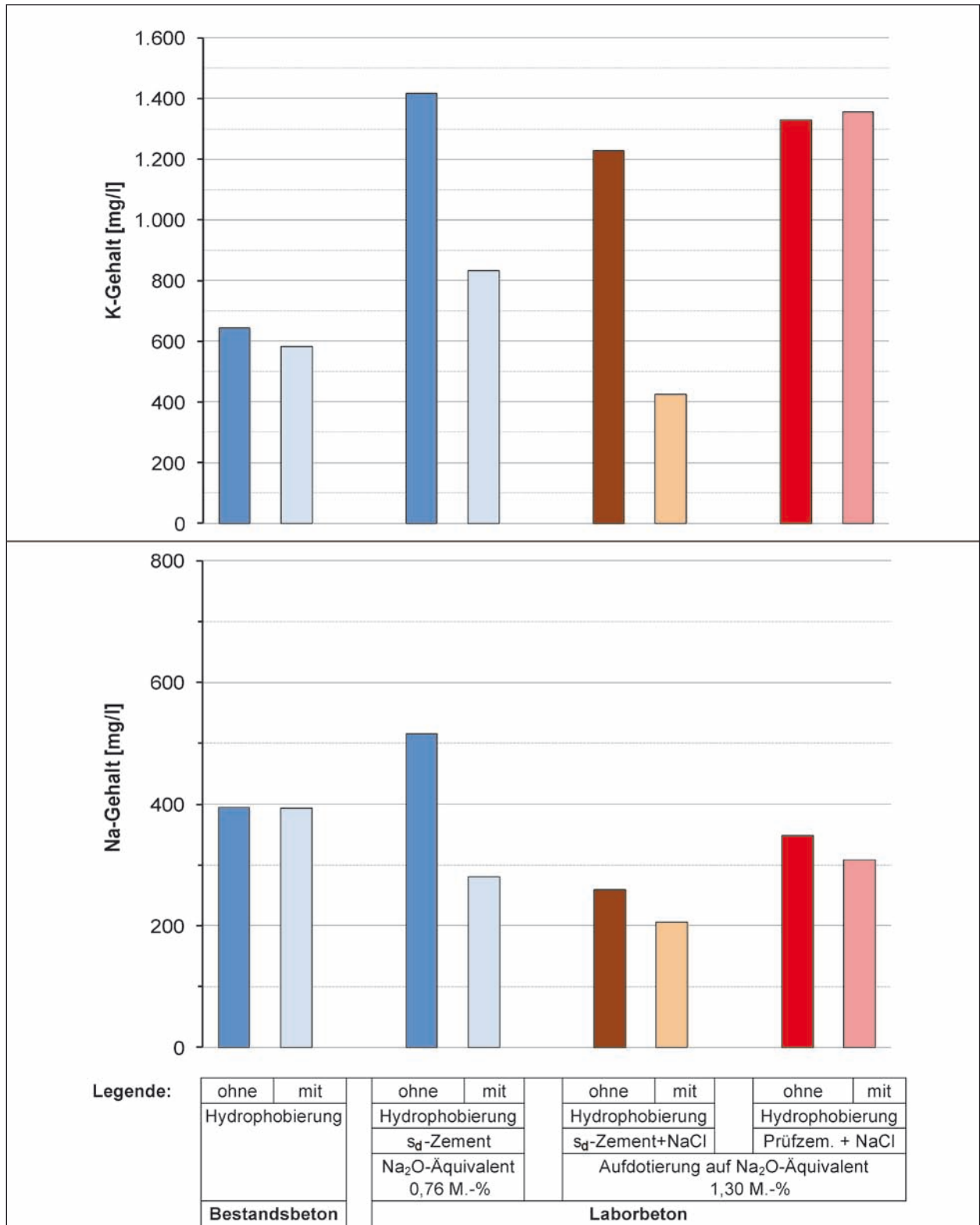


Bild 80: Natrium- und Kaliumgehalt in der Behälterflüssigkeit der jeweiligen Prüferserie nach Beendigung der in Anlehnung an den 60°C-Betonversuch durchgeführten AKR-provozierenden Lagerung der Prüfkörper

	Bestandsbeton		Laborbeton mit Na ₂ O-Äquivalent von						Dehnung nach 147 d [mm/m]	Massezunahme nach 147 d [%]
			0,76 M.-%		1,30 M.-%					
	Ausbau- zustand		s _{ii} -Zement		s _{ii} -Zement, aufdotiert mit NaCl		Prüfzement, gering aufdotiert mit NaCl			
Hydrophobierung										
BB 1.0	X								0,85	1,08
BB 1.1		X							1,08	0,84
LB 2.0			X						0,36	0,74
LB 2.1				X					0,57	0,72
LB 3.0					X				1,25	1,31
LB 3.1						X			0,84	0,95
LB 4.0							X		1,81	1,44
LB 4.1								X	1,11	1,01

Tab. 28: Übersicht über die Ergebnisse zur Abschätzung des Einflusses der Hydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess beim Bestands- und Laborbeton nach der AKR-provozierenden Lagerung in Anlehnung an den 60°C-Betonversuch

Zusammenfassend lassen die vorstehend aufgezeigten und diskutierten Ergebnisse des 60 °C-Betonversuchs ohne externe Alkalizufuhr den Schluss zu, dass die Hydrophobierung bei Betonen mit geringen Alkaligehalten nicht zwangsläufig eine verminderte Neuphasenbildung und somit erhöhte Dehnungen zur Folge hat. Andererseits ist bei den hier gewählten Randbedingungen erkennbar, dass die Hydrophobierung den AKR-Schädigungsprozess bei Betonen mit hohem Alkaligehalt durch eine reduzierte externe Feuchtezufuhr vermindert.

5 Monitoring

5.1 Vorbemerkungen

Ausgehend von der Tatsache, dass der AKR-Schädigungsprozess stets im vom Fugenbereich der Betonfahrbahnplatte beginnt, kommt der Analyse der Transportprozesse an diesem Ort eine zentrale Bedeutung zu. Dabei ist der Feuchte- und Salztransport von primärem Interesse. Aus diesem Grunde wurde im Rahmen dieses Projektes erstmals ein komplexes Monitoringsystem aufgebaut, das die Verfolgung des zeitlichen Verlaufs der örtlichen Feuchte-, Salz- und Temperaturverteilung ermöglicht. Dabei wird vergleichend der Feuchte- und Salzhaushalt ohne und mit einer Hydrophobierung mit WA65 unter Berücksichtigung der thermischen Randbedingungen betrachtet.

Die Feuchte- und Salzverteilung wird, wie im ersten Zwischenbericht [47] bereits ausführlich erläutert, mittels TDR-Messtechnik erfasst. Die konkrete Anwendung erforderte eine Anpassung der TDR-Sensoren. Die hierfür notwendige Entwicklungsarbeit erfolgte durch das Institut für Agrophysik der polnischen Akademie der Wissenschaften. Da mit der TDR-Messtechnik nur indirekt der Feuchte- und Salzgehalt bestimmt wird, ist für die quantitative Messung eine Kalibrierung zwingend notwendig. Die hierfür erforderlichen umfangreichen Untersuchungen wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Bauklimatik der TU Dresden durchgeführt. Die Ergebnisse hierzu sind der Anlage A2 zu entnehmen.

Die Messungen selbst erfolgen in Absprache mit der BAST an vier im Bereich der Querscheinfuge ausgebauten Betonfahrbahnsegmenten. Diese Segmente wurden nach ihrer Vorkonfektionierung in eine stark befahrene Fahrbahndecke auf dem Gelände der BAM eingebracht.

5.2 Beschreibung und Konfektionierung der Auslagerungsproben

Die zeitliche Entwicklung der Feuchte- und Salzverteilung wird an vier ausgebauten Segmenten des Ausbaubetons mit den Abmessungen 79 x 37 x 33 cm³ verfolgt. Nähere Informationen zur Gewinn-

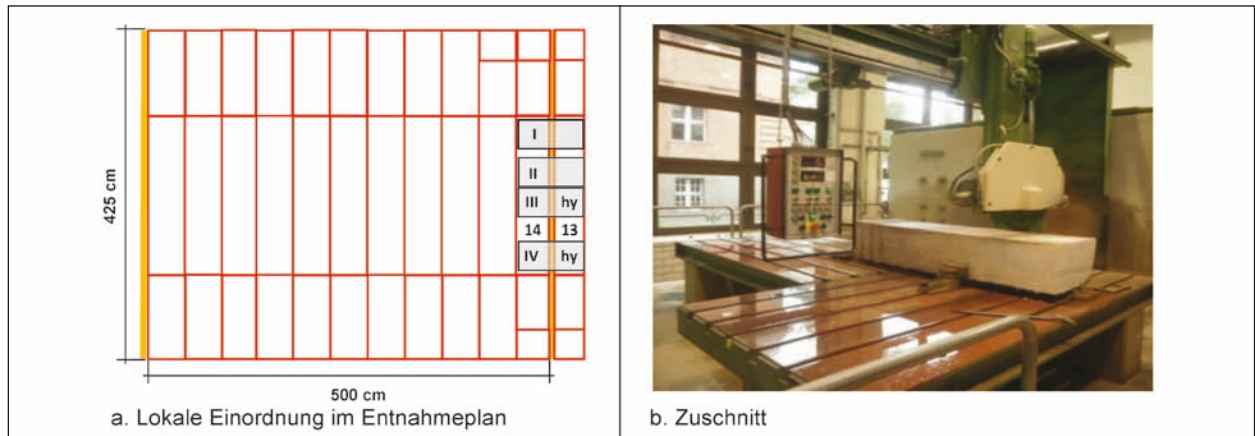


Bild 81: Gewinnung der Ausbausegmente für Auslagerungsversuche

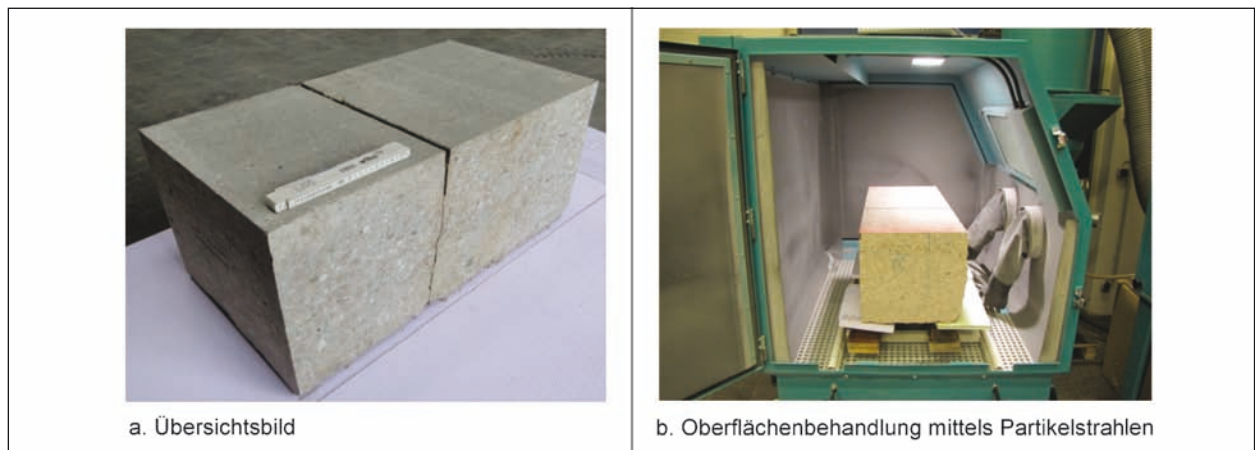


Bild 82: Ausbausegment



Bild 83: Vorbereitung der Auslagerungssegmente für das Einbringen der Messsonden

nung der Ausbausegmente gibt das Bild 81. Einen optischen Eindruck vom Ausbausegment vermittelt Bild 82a. Zur Eliminierung verfälschender Messeinflüsse durch Farbreste wurde die Oberfläche aller Ausbausegmente partikelgestrahlt (siehe Bild 82b).

In einem weiteren Schritt wurden die Messpositionen festgelegt und dort für die Aufnahme der TDR-Sonden jeweils planparallele Bohrlöcher mit Spezialbohrern eingebracht (siehe Bild 83). Anschließend wurden die Ausbausegmente III und IV

für die Applikation des Hydrophobierungsmittels WA65 eine Woche bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 % vorkonditioniert. Danach wurden außer der Applikationsoberfläche alle Seiten bei beiden Ausbausegmenten durch PP-Folie gesperrt, um eine allseitige

Silanbeaufschlagung des Prüfkörpers aus der Gasphase zu vermeiden. Aus Vergleichbarkeitsgründen mit der Praxis wurde das Produkt WA65 in einer Menge von 280 g/m² auf einer 2 % geneigten Applikationsfläche aufgetragen. Das Ergebnis der visuellen Beobachtung der Oberfläche des Aus-

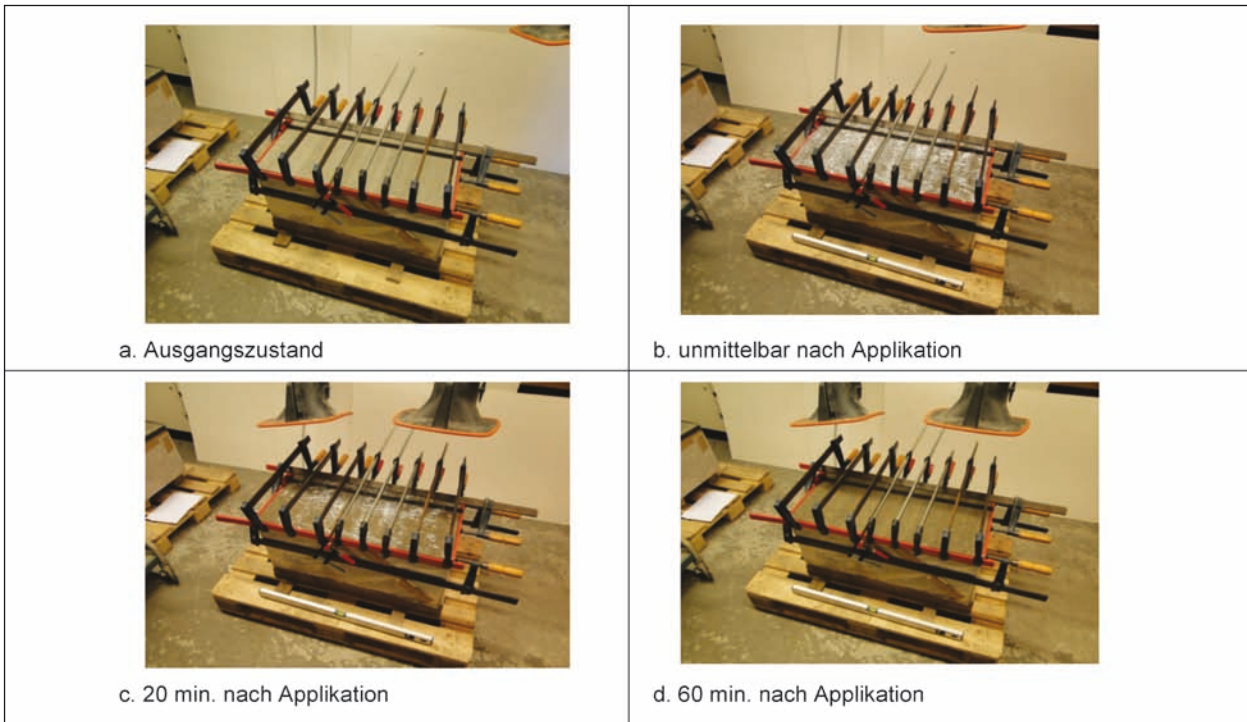


Bild 84: Dokumentation der visuellen Begutachtung der Oberfläche des Ausbausegments III nach der Applikation des Produkts WA65

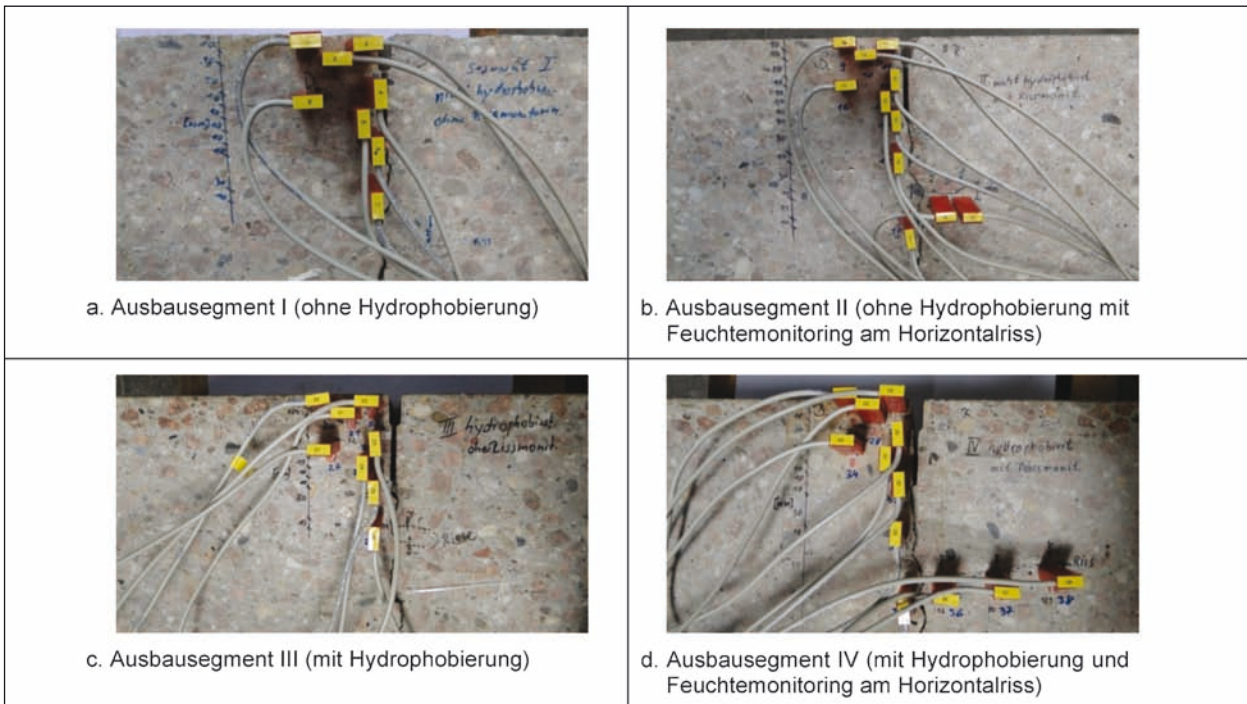


Bild 85: Anordnung der TDR-Sonden der einzelnen Ausbausegmente

bausegments nach der Applikation des Produktes WA65 ist im Bild 84 zu ausgewählten Zeitpunkten dokumentiert.

Ein Detail der Seitenansicht jedes Ausbausegments mit bereits eingebrachten TDR-Sensoren zeigt das Bild 85. Dabei ist in den Bildern 85b und 85d erkennbar, dass bei den Ausbausegmenten II und IV die Feuchte- und Salzverteilung zusätzlich im Bereich der horizontal verlaufenden Risse in der Höhe der Dübel erfasst wird. Die exakte Lage der Sensoren ist im Anhang A3 dargestellt.

Zur Vermeidung störender Einflüsse im Einbauzustand (externer Feuchte- und Salzeintrag) wurde die Mantelfläche der Betonsegmente mittels eines bituminösen Dickspachtels gesperrt. Zusätzlich wurde die Seite mit den eingebrachten TDR-Sonden mit einer schützenden Einhausung versehen. Zur Verminderung eines direkten Feuchteeintrags in die Querscheinfuge wurde in diese eine Kunststoffplatte eingepresst. Diese Lösung soll eine fehlende Flankenhaftung des Fugenvergussmaterials simulieren. Einen optischen Eindruck vom Einbau der so konfektionierten Segmente vermittelt das Bild 86.



Bild 86: Erstellung des Monitoringsystems

Die Wetterstation zur Erfassung der äußeren klimatischen Einwirkungen und das Monitoringsystem wurden am 7. November 2013 in Betrieb genommen.

5.3 Ergebnisse und Bewertung

Die mit dem Monitoringsystem gewonnenen Ergebnisse wurden bereits für den Zeitraum vom 7.11.2013 bis 6.1.2014 aufbereitet und ausgewertet.

Die Bilder 87 und 88 zeigen exemplarisch vergleichend die zeitliche Entwicklung der Feuchtegehaltsveränderung an ausgewählten Messstellen in der Betonrandzone bei je einem Ausbausegment ohne und mit Hydrophobierung in Abhängigkeit von den Regenereignissen. Auffallend ist dabei, dass die Feuchtegehaltsänderungen beim nicht hydrophobierten Ausbausegment I nach einem Regenereignis tendenziell stärker ausgeprägt sind als bei dem hydrophobierten Ausbausegment III. Dies betrifft ins-

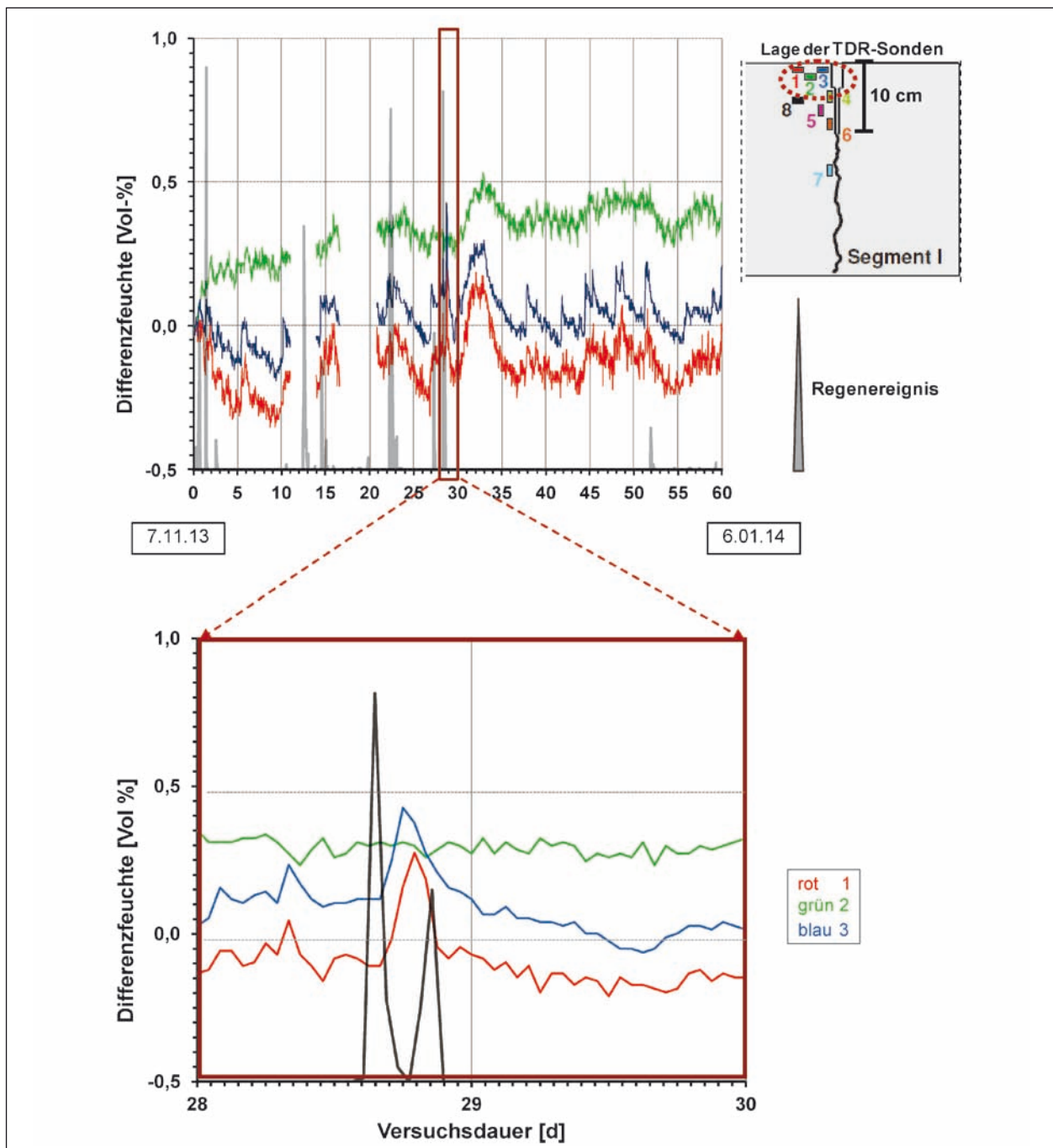


Bild 87: Zeitliche Entwicklung der örtlichen Feuchtegehaltsveränderung an ausgewählten Messstellen in der Betonrandzone bei nicht hydrophobiertem Ausbausegment I für die Sonden 1, 2 und 3

besondere die Messstellen 1 und 3 (Ausbausegment I) bzw. 20 und 22 (Ausbausegment III). So erhöht sich beim nicht hydrophobierten Ausbausegment I im betrachteten Zeitintervall zwischen dem 28. und 30. Tag der Feuchtegehalt primär nach dem ersten Regenereignis um ca. 0,4 Vol.-%. Bei vorhandener Hydrophobierung erfährt der Feuchtegehalt an den vergleichbaren Messstellen im gleichen Zeitintervall lediglich eine Erhöhung um 0,25 Vol.-%. Die höhere Feuchteempfindlichkeit dieser Messstellen ist auf die

geringe Betondeckung der Sonden von ca. 10 mm zurückzuführen. So ist bei der Messstelle 2 bzw. 21 in einer Tiefe von ca. 20 mm unter der Betonoberfläche im betrachteten Zeitintervall vom 28. bis 30. Tag keine signifikante Veränderung des Feuchtegehalts erkennbar. Angemerkt sei in diesem Zusammenhang, dass bei den oberflächennahen TDR-Messstellen mit hoher Wahrscheinlichkeit das auf der Betonoberfläche aufstehende Wasser im Messvolumen zusätzlich erfasst wird.

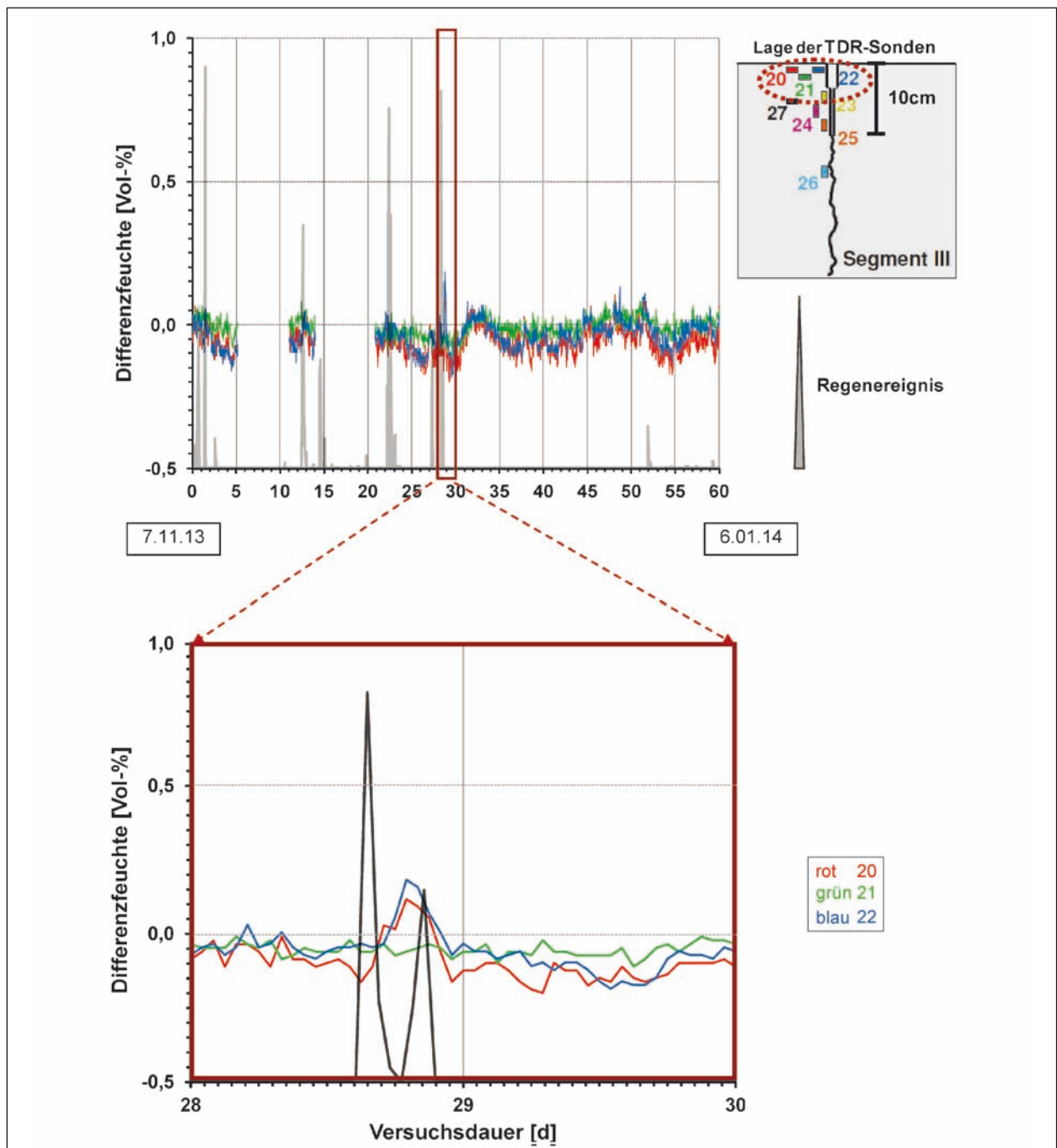


Bild 88: Zeitliche Entwicklung der örtlichen Feuchtegehaltsveränderung an ausgewählten Messstellen in der Betonrandzone bei hydrophobiertem Ausbausegment III für die Sonden 20, 21 und 22

Die Bilder 89 und 90 vermitteln einen Eindruck von der zeitlichen Feuchtegehaltsänderung im Bereich der Querscheinfuge bei den Ausbausegmenten I und III im gleichen Messzeitraum. Es zeigt sich, dass hier die beiden Regenereignisse nicht sofort sondern zeitlich verzögert bei den Messtellen 6 und 25 erhöhte Feuchtegehaltsänderungen zur Folge

haben. Ein möglicher Erklärungsansatz hierfür wäre die stauende Nässe im Fugengrund.

Abschließend zeigt das Bild 91 vergleichend die zeitliche Feuchtegehalts- und Temperaturänderung bei den Messtellen 17, 18 und 19 des nicht hydrophobierten Ausbausegments II. Diese Messtellen

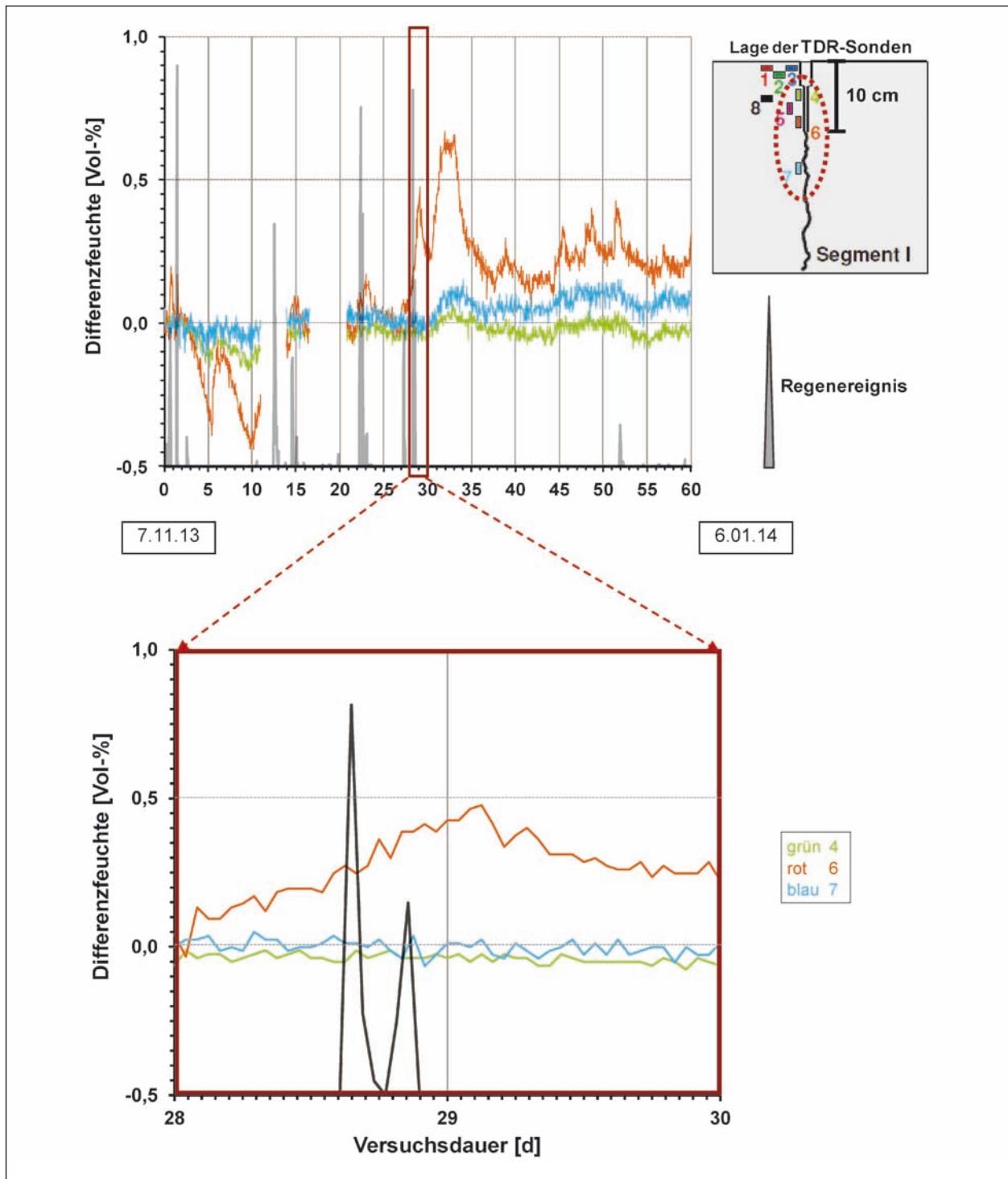


Bild 89: Zeitliche Entwicklung der örtlichen Feuchtegehaltsveränderung an ausgewählten Messtellen im Bereich der Querscheinfuge bei nicht hydrophobiertem Ausbausegment I für die Sonden 4, 6 und 7

befinden sich im Bereich des horizontal verlaufenden Risses (maximale Breite 0,25 mm), der mit dem Trennriss in der Querscheinfuge verbunden ist. Der Anstieg des Feuchtegehalts bei den Messstellen 18 und 19 im betrachteten Messzeitraum lässt auf eine Kapillaraktivität des Horizontalrisses schließen.

Natürlich ist der bisher betrachtete Messzeitraum zu kurz, um grundlegende Erkenntnisse zum Feuchte-, Salz- und Temperaturhaushalt abzuleiten. Aus dem Grund kommt dem mehrjährigen Langzeitmonitoring eine zentrale Bedeutung zu.

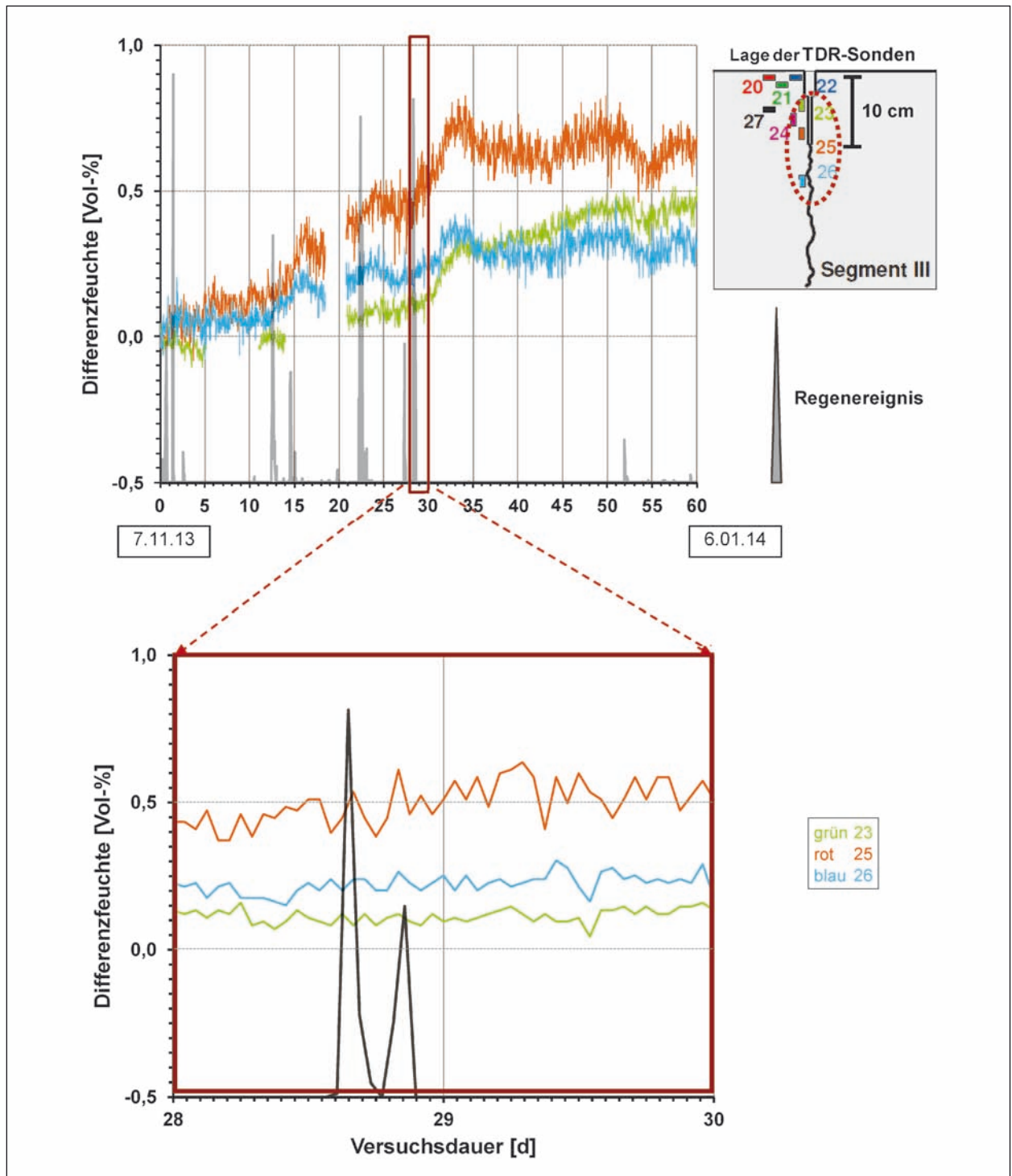


Bild 90: Zeitliche Entwicklung der örtlichen Feuchtegehaltsveränderung an ausgewählten Messstellen im Bereich der Querscheinfuge bei hydrophobiertem Ausbausegment III für die Sonden 23, 25 und 26

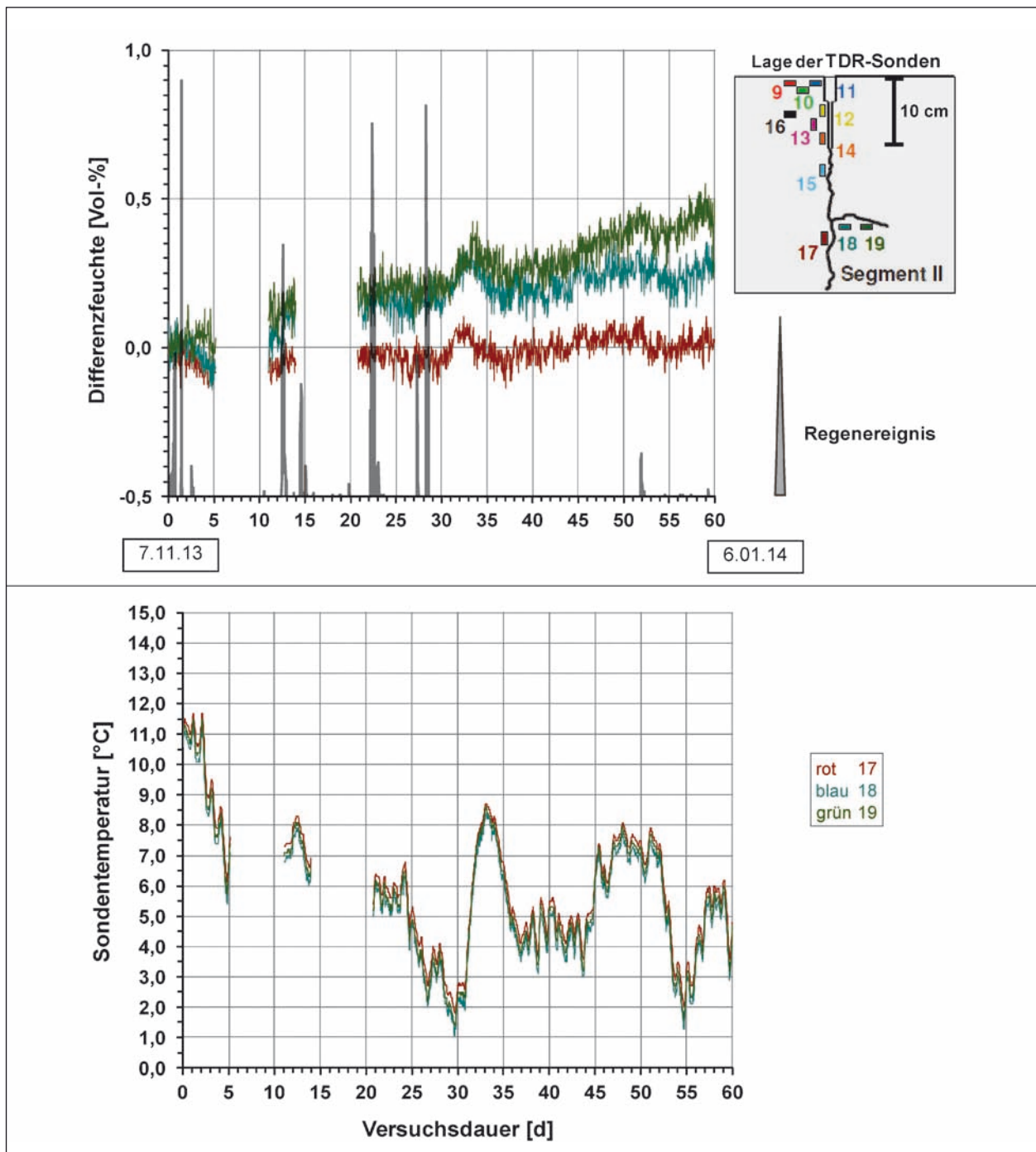


Bild 91: Zeitliche Entwicklung der örtlichen Feuchtegehaltsänderung und der Temperatur an ausgewählten Messstellen im Bereich des Horizontalrisses beim nicht hydrophobierten Ausbausegment II für die Sonden 17, 18 und 19

6 Zusammenfassende Betrachtungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens galt es, die Applikation einer Oberflächenhydrophobierung bei Betonfahrbahndecken zu optimieren und deren Einfluss auf die schädigende AKR zu bewerten.

Die zunächst durchgeführte Literaturrecherche zum Stand der Technik auf diesem Gebiet ergab, dass bisher auch international primär Silane zur Hydrophobierung von Betonen mit erhöhtem AKR-Schädigungspotenzial im Betonstraßenbau Einsatz finden. Dies erfolgte jedoch mit sehr unterschiedlichem Erfolg. So führte einerseits die Applikation von Silanen auf Betonschutzwänden in Kanada nachweislich zu einer Verminderung des AKR-Schädigungsprozesses. Andererseits konnte in den USA die Wirksamkeit einer solchen Oberflächenhydrophobierung an Betonschutzwänden und an Betonfahrbahndecken nur sehr eingeschränkt nachgewiesen werden. In Deutschland hingegen liegen bisher lediglich erste Erfahrungen zum Einsatz der auf dem Wirkstoff n-Oktyltriethoxysilan basierenden pastösen Hydrophobierungsemulsion WA65 auf AKR-vorgeschädigten Abschnitten der BAB A 14 und A 9 vor. Grundlegende wissenschaftliche Untersuchungen hierzu fehlen auf nationaler Ebene.

Vor diesem Hintergrund erfolgten umfangreiche Laboruntersuchungen, die die Optimierung der Applikation des Hydrophobierungsmittels, die Bewertung der Dauerhaftigkeit der hydrophobierten Betonrandzone und die Analyse der Auswirkungen der Oberflächenhydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess zum Gegenstand hatten. Als Hydrophobierungsmittel gelangten dabei neben dem bereits erwähnten WA65 zusätzlich die nach den Vorgaben des im Projekt erarbeiteten Lastenheftes optimierten Hydrophobierungsmittel LM7 und GEL30 als Alternativen zum Einsatz. Als Wirkstoff fand in den beiden zuletzt aufgeführten Produkten iso-Oktyltriethoxysilan Anwendung. Dieses wird beim LM7 als Emulsion aufbereitet und beim GEL30 in ein Acrylatgel eingearbeitet. Alle Untersuchungen erfolgten vergleichend an einem Bestandsbeton eines BAB-Abschnittes der A 14 mit einschichtigem Aufbau einerseits und einem Laborbeton mit einem erhöhten AKR-Schädigungspotenzial andererseits.

Zur Bewertung des Applikationsverhaltens des Hydrophobierungsmittels wurde ein praxisnahes

Prüfregime entwickelt. Dieses sieht die Applikation des jeweiligen Produkts auf eine 2 % geneigte Prüffläche des definiert hygrothermisch vorkonditionierten Prüfkörpers des Bestands- bzw. Laborbetons vor. Als besonders praxisrelevant hat sich bei der Vorkonditionierung eine siebentägige Vorlagerung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte mit anschließender dreitägiger Wasserbeaufschlagung der Prüffläche und eintägiger Trocknung bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte erwiesen (Lastfall 2). Unter den gegebenen Randbedingungen stellte sich in der Betonrandzone des Laborbetons mit ca. 7,0 Vol.-% ein deutlich höherer Feuchtegehalt als im Bestandsbeton mit ca. 5,5 Vol.-% ein.

Für die Beurteilung des Applikationsverhaltens der Hydrophobierungsmittel auf der so vorkonditionierten Betonprüffläche haben sich folgende Kriterien bewährt:

- visuelle Verfolgung der Reaktionskinetik nach Applikation des Hydrophobierungsmittels,
- Ermittlung der Ablaufmenge des Hydrophobierungsmittels infolge Neigung der Applikationsoberfläche,
- Bestimmung der Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels,
- Verfolgung der Griffigkeitsentwicklung mittels SRT-Werten.

Generell wiesen alle Hydrophobierungsmittel beim Bestandsbeton aufgrund der geringeren Porosität und Alkalität der Betonrandzone ein deutlich schlechteres Applikationsverhalten als beim Laborbeton auf. Einen zusammenfassenden Überblick hierzu gibt die Tabelle 29 mit einer farbcodierten Bewertung der Einzelergebnisse. Deshalb wird empfohlen, bei einer Erhaltungsmaßnahme mit einer Oberflächenhydrophobierung auf einem BAB-Abschnitt die Eignungsprüfung eines Hydrophobierungsmittels generell an dem realen Bestandsbeton durchzuführen. Zudem zeigte die zeitabhängige Entwicklung des SRT-Wertes auf, dass nach erfolgter Hydrophobierung unter Praxisbedingungen voraussichtlich eine Sperrung des Streckenabschnitts von mind. 7 Tagen nach erfolgter Applikation erforderlich ist.

Zur Analyse der Dauerhaftigkeit der hydrophobierten Betonrandzone und der Auswirkungen der Hydrophobierung auf den AKR-Schädigungsprozess gelangten folgende drei Prüfscenarien zum Einsatz:

Beurteilungskriterium	Bestandsbeton			Laborbeton		
	WA65	LM7	GEL30	WA65	LM7	GEL30
Beginn des Brechens der Emulsion [min]	25	15	-	10	10	-
Ablaufmenge bei geeigneter Applikationsfläche [M-%]	16	25	12	0	0	0
Eindringtiefe [mm]	1-6	2-6	0-1	5	5	6-8
mittlerer SRT-Wert	3	Tage nach Applikation	47	79	71	76
	7		83	92	81	81
Legende: ohne Beanstandungen mit Einschränkungen nicht akzeptabel						

Tab. 29: Applikationsverhalten der Hydrophobierungsmittel auf der Prüffläche des Bestands- und Laborbetons (hygrothermische Vorkonditionierung nach Lastfall 2)

- Simulation der zyklischen Biegezugbeanspruchung der Betonrandzone ohne und mit Hydrophobierung bei gleichzeitigem externen Alkalieintrag mittels Schwingversuchen an großformatigen Balken aus Laborbeton mit aufstehender Natriumchloridlösung (Prüfszenario A),
- Simulation klimatischer Einwirkungen auf den Bestands- und Laborbeton mittels Klimawechsellagerung (Prüfszenario B),
- Simulation AKR-provozierender Bedingungen auf Bestands- und verschiedenartige Laborbetone in Anlehnung an den 60°C-Betonversuch (Prüfszenario C).

Die bei den einzelnen Prüfszenarien gewonnenen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Prüfszenario A: Im Gegensatz zu dem Balken ohne Hydrophobierung war beim exemplarisch mit dem Hydrophobierungsmittel WA65 behandelten Balken während der gesamten Beanspruchungszeit kein Eintrag von Prüflösung feststellbar. Dies kann als eindeutiger Indikator für die Dauerhaftigkeit der hydrophobierten Randzone bei der gewählten Beanspruchung gesehen werden.
- Prüfszenario B: Die Hydrophobierung des Bestandsbetons mit WA65 bzw. LM7 führte unabhängig von der Entnahmeposition aus der Betonfahrbahnplatte bei der Klimawechsellagerung mit externer Alkalizufuhr zu einer verminderten Dehnung der Prüfkörper. Der moderate Betrag der Dehnungsreduzierung nach 12 Zyklen von 0,74 auf 0,44 mm/m ist dabei auf das relativ geringe AKR-Restschädigungspotenzial des Bestandsbetons zurückzuführen. Dies wurde durch umfassende mikroskopische und

mikrochemische Untersuchungen belegt. Demgegenüber bedingt die Hydrophobierung des deutlich AKR-empfindlicheren Laborbetons sowohl mit WA65 als auch mit LM7 eine drastische Verminderung der Dehnung bei der Klimawechsellagerung mit externer Alkalizufuhr. So beträgt diese nach 12 Zyklen 2,2 mm/m beim unbehandelten Laborbeton, während die hydrophobierten Prüfserien lediglich Dehnungswerte von 0,17 bzw. 0,13 mm/m annehmen. Vertiefende mikroskopische und mikrochemische Untersuchungen zeigen, dass die hohen Dehnungswerte beim unbehandelten Laborbeton durch eine AKR verbunden mit einer stark ausgeprägten sekundären Ettringitbildung induziert wurden. Die geringe Dehnung des behandelten Bestands- und Laborbetons über die gesamte Zyklenzahl der Klimawechsellagerung lässt auf eine hinreichende Wirksamkeit der Hydrophobierung bei der gewählten Beanspruchung schließen.

- Prüfszenario C: Die allseitige Hydrophobierung der Proben aus Bestands- bzw. Laborbeton mit einem geringen Grundgehalt an Alkalien hat nicht zwangsläufig eine Verminderung der Dehnung im Betonversuch bei 60 °C über Wasser zur Folge. Vielmehr kann die Alkaliauslaugung der unbehandelten Proben aus den gleichartigen Betonen zu einer Dehnungsreduzierung führen. Liegt jedoch ein erhöhter Grundgehalt an Alkalien im Beton vor, so führt die Hydrophobierung aufgrund der verminderten externen Feuchtzufuhr zu einer signifikanten Dehnungsreduzierung. So erfährt beispielsweise der Laborbeton mit einem Prüfzement und einem Na-Äquivalent von 1,30 M.-% im gesamten Prüfzeitraum durch die allseitige Hydrophobierung mit WA65 nur eine mittlere Dehnung

von 1,11 mm/m, während die unbehandelte Prüfserie einen mittleren Dehnungswert von 1,81 mm/m aufweist. Die dazugehörige Feuchtegehaltsänderung beträgt bei der unbehandelten Prüfserie 1,44 M.-% und bei der hydrophobierten Prüfserie lediglich 1,01 M.-%.

Ergänzend zu den Laboruntersuchungen wurde im Rahmen dieses Projektes ein Auslagerungsprüfstand für vier Ausbausegmente aus einem BAB-Abschnitt der A 14 zur Analyse des Feuchte- und Salzhaushalts im Bereich der Querscheinfuge aufgebaut. Für das Monitoring der Feuchte- und Salzverteilung wurden die Ausbausegmente im Bereich der Querscheinfuge mit speziell für diesen Anwendungsfall entwickelten TDR-Sonden bestückt. Bei zwei der Ausbausegmente wurde die Fahrbahnoberfläche mit dem Hydrophobierungsmittel WA65 behandelt. Die so vorkonfektionierten vier Ausbausegmente wurden in eine in Betrieb befindliche Fahrbahndecke auf dem BAM-Gelände eingebracht. Zusätzlich wurde zur Erfassung der Umgebungsbedingungen am gleichen Ort eine Wetterstation errichtet. Die Wetterstation und das Monitoringsystem wurden am 7. November 2013 in Betrieb genommen. Die im bisherigen Betriebszeitraum gewonnenen Ergebnisse sind plausibel. Allerdings ist der bisher betrachtete Messzeitraum zu kurz bemessen, um grundlegende Erkenntnisse zum Feuchte-, Salz- und Temperaturhaushalt innerhalb der Betonfahrdecke in Abhängigkeit von dem Vorhandensein einer Hydrophobierung abzuleiten. Aus dem Grund kommt dem mehrjährigen Langzeitmonitoring eine zentrale Bedeutung zu.

7 Literatur

- [1] Deutscher Bundestag: Antwort auf die Kleine Anfrage der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen (Drucksache 16/12210): Zerstörung des Fahrbahnbelages durch die Alkali-Kieselsäure-Reaktion110.3.09, <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/16/122/1612210.pdf>
- [2] H-BEB-AKR: Hinweise für die Schadensdiagnose und die bauliche Erhaltung von AKR-geschädigten Fahrbahndecken aus Beton. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsgruppe Betonstraßen. Ausgabe 2013, 6. Entwurf, Stand 22.05.2013.
- [3] LITTMANN, K.; MENGEL, U.; HERMANN, U.: Hydrophobierungen. Unimagazin, Leibnitz Universität Hannover, 2002
- [4] GERDES, A.: Hydrophobieren – Grundlagen und Anwendung. WTA-Schriftenreihe, Heft 10, Aedificatio Verlag, 2000
- [5] DIN EN 1504: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Teil 2: Oberflächenschutzsysteme für Beton. Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [6] DAfStb-Richtlinie: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie, Rili-SIB) – Teil 1: Allgemeine Regelungen und Planungsgrundsätze, Teil 2: Bauprodukte und Anwendung, Teil 3: Anforderungen an die Betriebe und Überwachung der Ausführung, Teil 4: Prüfverfahren. Beuth Verlag, Berlin, Oktober 2001
- [7] ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten – Teil 3: Massivbau, Abschnitt 4: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, Bundesanstalt für Straßenwesen. Verkehrsblatt Verlag, April 2010
- [8] WTA-Merkblatt 3-17: Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen, Ausgabe: 08/2009/D, Entwurf
- [9] DIN V 18026: Oberflächenschutzsysteme für Beton aus Produkten nach DIN EN 1504 Teil 2, Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [10] SASSE, H. R. u. a.: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen unter Verwendung von Kunststoffen. Sachstandsbericht. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft Nr. 443, Beuth Verlag, Berlin, 1994
- [11] OEHMICHEN, D. S.: Mechanismen der Hydrophobierung zementgebundener Werkstoffe mit siliciumorganischen Verbindungen. Dissertation. Universität Fridericiana Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2008
- [12] DIN EN 14630: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Bestimmung der Karbonatisierungstiefe im Festbeton mit der Phenolphthalein-Prüfung. Beuth Verlag, Berlin, 2007

- [13] DIN EN 13580: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Wasseraufnahme und Alkalibeständigkeit für hydrophobierte Imprägnierungen. Beuth Verlag, Berlin, 2002
- [14] ZTV-SIB 90: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen. Der Bundesminister für Verkehr; Verkehrsblatt Verlag. Dortmund, 1990
- [15] RAUPACH, M.; WOLFF, L.: Dauerhaftigkeit neuer Hydrophobierungen auf Beton. Abschlussbericht Forschungsvorhaben F 677, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bau- und Wohnforschung, Fraunhofer IRB Verlag, 10.10.2002
- [16] RAUPACH, M.; WOLFF, L.; MAULTZSCH, M.; GÜNTHER, K.: Prüf- und Anforderungskriterium für die Dauerhaftigkeit von Oberflächenschutzsystemen im Rahmen der ZTV-SIB, Teil 3, Abschlussbericht, Stand 2008, unveröffentlicht
- [17] PANZER, J.; HÖRNER, H.-J.; KROPF, A.: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen Hydrophobierungsmitteln. Bericht zum Forschungsprojekt AP 02211, Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Unterreihe B: Brücken- und Ingenieurbau, Herausgeber BASt, Heft B 51, Bergisch Gladbach, August 2006
- [18] GIANNINI, E. R.; BENTIVEGNA, A. F.; FOLLIARD, K. J.: Coatings and Overlays for Concrete Affected by Alkali-Silica Reaction. Concrete Solutions, Proceedings of 4th International Conference on Concrete Repair, 26th-28th Sep. 2011, Dresden
- [19] BÉRUBÉ, M.-A.; CHOUINARD, D.; PIGEON, M.; FRENETTE, J.; BOISVERT, L.; RIVEST, M.: Effectiveness of sealers in counteracting alkali-silica reaction in plain and airentrained laboratory concretes exposed to wetting and drying, freezing and thawing, and salt water. Canadian Journal of Civil Engineering, 29 (2), 289-300, 2002
- [20] BÉRUBÉ, M.-A.; CHOUINARD, D.; PIGEON, M.; FRENETTE, J.; RIVEST, M.; VÉZINA, D.: Effectiveness of sealers in counteracting alkali-silica reaction in highway median barriers exposed to wetting and drying, freezing and thawing, and deicing salt. Canadian Journal of Civil Engineering, 29 (2), 329-337, 2002
- [21] WEHRLE, E. R.: The Effect of Coatings and Sealers Used to Mitigate Alkali-Silica Reaction and/or Delayed Ettringite Formation in Hardened Concrete. Thesis Master of Science in Engineering, University of Texas at Austin, 2010
- [22] ASTM C 1293: Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction. American Society for Testing and Materials, 2001
- [23] M BEB: Merkblatt für die Erhaltung von Betonstraßen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe „Betonstraßen“, FGSV-Verlag, Köln, FGSV 823, 1985
- [24] M BEB: Merkblatt für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen aus Beton. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe „Betonbauweisen“, FGSV Verlag, Köln, FGSV 823, 2009
- [25] DIN EN 13581: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Bestimmung des Masseverlustes von hydrophobiertem Beton nach der Beanspruchung durch Frost-Tausalz-Wechsel. Beuth Verlag, Berlin, 2002
- [26] M Griff: Merkblatt zur Bewertung der Straßen-griffigkeit bei Nässe. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe „Fahrzeug und Fahrbahn“, FGSV Verlag, Köln, FGSV 401, 2003
- [27] DIN EN 13036-4: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 4: Verfahren zur Messung der Griffigkeit von Oberflächen: Der Pendeltest. Beuth Verlag, Berlin, 2011
- [28] DIN EN 13036-3: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen – Prüfverfahren – Teil 3: Messung der horizontalen Entwässerung von Deckschichten. Beuth Verlag, Berlin, 2003
- [29] TP Beton-StB 10: Technische Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Ver-

- kehrswesen e. V., Arbeitsgruppe Betonbauweisen, Köln, 2010
- [30] DAfStb-Heft 422: Prüfung von Beton, Empfehlung und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb. Beuth Verlag, Berlin, 1990
- [31] STARK, J.; ERFURT, D.; FREYBURG, E.; GIEBSON, C.; SEYFARTH, K.; WICHT, B.: Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Schriftenreihe des F. A. Finger-Instituts für Baustoffkunde, Weimar, 2008
- [32] ZTV-Beton-StB 07: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. FGSV Verlag, Köln, FGSV 899, 2007
- [33] DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme – Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [34] DAfStb-Richtlinie 2007: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb. Beuth Verlag, Berlin, 2007
- [35] DIN EN 12350-5: Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß – Beuth Verlag, Berlin, 2000
- [36] DIN EN 12350-7: Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalte-Druckverfahren, Beuth Verlag, Berlin 2000
- [37] DIN EN 12350-6: Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischmörtelrohddichte, Beuth Verlag, Berlin, 2000
- [38] DIN EN 12390-3: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern, Beuth Verlag, Berlin 2009
- [39] DIN 1045-2/A2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1; Änderung A2, 2007
- [40] DIN EN ISO 3219:1994-10: Kunststoffe – Polymere/Harze in flüssigem, emulgiertem oder dispergiertem Zustand – Bestimmung der Viskosität mit einem Rotationsviskosimeter bei definiertem Geschwindigkeitsgefälle (ISO 3219:1993); Deutsche Fassung EN ISO 3219:1994
- [41] DAfStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Teil 4 (Entwurf): Bewertung der Eignung von Betonzusammensetzungen mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen. Vorschlag für die Beschreibung der FIB-Klima-wechselagerung als Performance-Prüfverfahren, Beuth Verlag, Berlin, 2007
- [42] DAfStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie) – Teil 3: Anhang B: Betonversuch bei 60 °C über Wasser (60°C-Betonversuch), Beuth Verlag, Berlin, 2007
- [43] SIEVERING, C.: Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahndecken unter besonderer Berücksichtigung des externen Alkalieintrags. Dissertation. Ruhr-Universität Bochum (RUB), Bochum (2012)
- [44] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) 04/2013: Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton infolge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Verkehrsblatt, Heft 5, März 2013
- [45] Swedish Standard SS 137244: Concrete testing. Hardened Concrete. Frost Resistance (Slab Test). Swedisch Standard Institute, Stockholm, 2005
- [46] WILSCH, G.; SCHAURICH, D. et al. (2011): Imaging Laser Analysis of Building Materials – Practical Examples. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 30a and 30b 1335: 1315-1322
- [47] WEISE, F.; SCHRANG, K.: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen. 1. Zwischenbericht (unveröffentlicht) zum Forschungsvorhaben FE 29.0265/2010/BASf, 2012
- [48] Empfehlungen für die Schadensdiagnose und die Bauliche Erhaltung von AKR-geschädigten Fahrbahndecken aus Beton. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung April 2012

- [49] Symposium Dauerhafter Beton- Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frosttaumittel-Beanspruchung. 6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Universität Karlsruhe (TH), März 2009

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2007

S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel, Donath, Bald, Grätz, Riedl, Möller, Oeser, Wellner, Werkmeister, Leykauf, Simon € 21,00

S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00

S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hase, Oelkers € 24,50

S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

2008

S 49: Zweischichtiger offener Asphalt in Kompaktbauweise
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden € 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hirsch € 16,00

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offener Asphaltbauweisen
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmeßmethode
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten
Blume € 16,00

S 64: Griffigkeitsprognose an offener Asphalt (OPA)
Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00

S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus
Freudenstein, Birmann € 14,00

2011

S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen
Breitenbücher, Youn € 14,50

S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalerkennung im Rahmen des TP3
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Canzler, Winkler € 16,50

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt
Ripke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.
Jansen, Kurz € 16,00

S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ im September 2010 in Bonn € 15,00

S 72: Griffigkeitsprognose an offener Asphalt – Teil 2: Neue Baumaßnahmen
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

S 73: Längsebenenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

2012

S 74: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr 2“ € 30,50

S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung
Durner € 16,50

S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren
Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50

2013

S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung
Ripke € 9,00

S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50

S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts
Durner € 15,00

2014

S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier
Jansen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn
Durner € 17,00

S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen
Maerschalk, Oertelt € 19,00

S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®
Kunz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2015

S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgemischten, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht
Radenberg, Miljković, Schäfer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung
Müller, Seidel, Böhm
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten
Hüniger, Börner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten
Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Buch, Zander
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche
Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger
Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längsebenheitsmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)
Neubeck, Wiesebrock
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen
Weise, Schrang € 19,50

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.