

Hydrophobierungs- qualität von flüssigen und pastösen Hydrophobierungsmitteln

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 51

bast

Hydrophobierungs- qualität von flüssigen und pastösen Hydrophobierungsmitteln

von

John Panzer
Hans-Jürgen Hörner
Anika Kropf

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 51

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, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt AP 02211
des Arbeitsprogrammes der Bundesanstalt für Straßenwesen:
Messung der Hydrophobierungsqualität von flüssigen
und pastösen Hydrophobierungsmitteln**

Herausgeber

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

Redaktion

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 3-86509-504-6

Bergisch Gladbach, August 2006

Kurzfassung – Abstract

Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen Hydrophobierungsmitteln

Die Untersuchungen an einer Auswahl von insgesamt 16 Hydrophobierungsmitteln zeigen, dass diese Produkte inzwischen eine hohe Qualität erreicht haben. Wenn diese Mittel regelwerksgerecht von geschultem Personal eingesetzt werden, lassen sich damit eine hohe Ausführungsqualität erzielen und Betonbauteile gegen eindringendes Wasser und darin gelöste Chloride erfolgreich schützen. Nach einer Versuchsdauer von 4 Jahren lassen die Messwert-Zeit-Kurven den Schluss zu, dass eine wesentlich höhere Dauerhaftigkeit als bei den früheren Produkten zu erwarten ist.

Aufgrund ihrer hohen Konsistenz eignen sich die pastösen Produkte insbesondere für geneigte und senkrechte Flächen besser als die dünnflüssigen Mittel. Durch den relativ hohen Wirkstoffanteil und die Zusammensetzung sowie durch die größere Kontaktzeit der pastösen Produkte an der Bauteiloberfläche ist weitestgehend zielsicher eine hohe Qualität erreichbar. Auch mit den übrigen Mitteln mit gleich hohen Wirkstoffgehalten kann eine solche Qualität erzielt werden, wenn sie unter den richtigen Applikationsbedingungen eingesetzt werden und das ausführende Personal im Umgang mit Hydrophobierungen erfahren ist.

Zu Beginn einer Applikation und während der Folgemessungen wurde immer auch die Feuchtigkeit des Betons im oberflächennahen Bereich des Betons mit einem elektrischen Feuchtemessgerät ermittelt.

In den Untersuchungen konnte belegt werden, dass

- eine deutliche Abhängigkeit der Hydrophobierungsqualität von der Feuchte während der Applikation und ebenso
- eine deutliche Abhängigkeit der Messwerte von der Feuchte während der Messung

bestehten. Mit sinkender Applikationsfeuchte nimmt die Hydrophobierungsqualität zu. Andererseits steigen mit steigender Messfeuchte die Hydrophobierungs-Messwerte, und die Hydrophobierungsqualität nimmt scheinbar ab. Tatsächlich misst man jedoch unter gleichen Feuchtebedingungen auch gleich hohe Qualitäten.

Die anlässlich der umfangreichen Untersuchungen und insbesondere in der Praxis gesammelten Erfahrungen bei den Frühjahrs- und Herbstmessungen haben erbracht, dass die Applikationsfeuchte bei höchstens 3 M-% und die Messfeuchte zwischen 1,5 M-% und 3 M-% – jeweils gemessen mit dem elektrischen Feuchtemessgerät – liegen sollten.

Eine der Voraussetzungen für die Verwendbarkeit eines Produkts als Feuchteschutz einer Betonoberfläche ist, dass es zugelassen* ist. Eine hohe Ausführungsqualität setzt darüber hinaus auch den regelwerksgerechten Einsatz der Produkte sowie einen qualifizierten Umgang damit voraus. Es müssen Probeflächen angelegt werden, und letztendlich darf auf einen Qualitätsnachweis im Rahmen der Eigenüberwachung mit dem vorgeschriebenen Messverfahren nicht verzichtet werden.

Der Originalbericht enthält als Anhänge eine Darstellung der umfangreichen Messergebnisse in Form von Messwert-Zeit-Kurven, Balkendiagrammen und Tabellen, die die Aussagen des Berichtes ergänzen. Auf die Wiedergabe dieser Anhänge wurde in der vorliegenden Veröffentlichung verzichtet. Sie liegen bei der Bundesanstalt für Straßenwesen vor und sind dort einsehbar. Verweise auf die Anhänge im Berichtstext wurden zur Information des Lesers beibehalten.

Hydrophobing quality of liquid and paste-like hydrophobing agents

The investigations on a selection of a total of 16 hydrophobing agents show that these products have meanwhile achieved a high quality. If these agents are used in accordance with the bodies of rules and regulations by trained staff, a high quality of implementation can be reached in this way and concrete components can be successfully protected against penetrating water and the chlorides dissolved in it. After a testing period of 4

* Unter zugelassenen Produkten sind solche zu verstehen, die in der Zusammenstellung der zertifizierten Stoffe und Stoffsysteme – Oberflächenschutzsysteme - geführt werden. Sie werden in Anlehnung an die Zulassung im bauaufsichtlichen Bereich Hochbau als „zugelassen“ für den Bundesfernstraßenbereich bezeichnet.

years, the measurement value-time curves lead to the conclusion that a considerably higher durability than in the case of former products can be expected.

Due to their high consistency, the paste-like products are particularly suitable for inclined and vertical surfaces, more so than thin fluids. Due to the relatively high proportion of active agents and the composition as well as the longer contact time the paste-like products have with the surface of the component, it can be assured to a large extent that a high quality will be reached. This type of quality can also be achieved with the other agents with an equally high content of active agents, if they are used under the proper application conditions and the staff carrying out the job is experienced in dealing with hydrophobing.

At the start of an application and during the subsequent measurements the moisture of the concrete in the area close to the surface was also always determined with an electric moisture measuring device.

The following could be proven in investigations:

- The hydrophobing quality clearly depends on the moisture during application and
- the measurement values also clearly depend on moisture during measurement.

The hydrophobing quality improves with a decreasing moisture during application. On the other hand, the hydrophobing measurement values increase with an increase in moisture during measurement and the hydrophobing quality apparently decreases. However, we can actually measure under the same moisture conditions as well as equally high qualities.

The experiences gathered during the extensive investigations and particularly in practice during the measurements taken in spring and autumn show that the moisture during application should lie at a maximum of 3 M-% and the moisture during measurement between 1,5 M-% and 3 M-% –

measured with the electrical moisture measuring device in each case.

One of the pre-requisites for the ability to use a product as a means of moisture protection for a concrete surface is that it has been approved*. A high quality during implementation also assumes the use of the products in accordance with rules and regulations as well as a qualified handling of these products. Test surfaces must be created and eventually there has to be proof of quality within the framework of self-monitoring using the prescribed measurement process.

The original report includes, as appendices, a representation of the extensive measurement results in the form of measurement value time graphs, bar charts and tables, which supplement the statements made in the report. The reproduction of these appendices has been rejected in the present publication. They are available at the Federal Highway Research Institute and can be viewed there. References to the appendices in the report have been maintained for the information of the reader.

* Permitted products are those designed for the composition of the certified materials and materials systems – surface protection systems. They are described as “permissible” for the area of the federal trunk roads based on the permit in the area of structural engineering approved by the building authorities

Inhalt

1	Einleitung	7	5.6	Auswahl der Hydrophobierungsmittel	16
1.1	Allgemeines	7	6	Versuchsdurchführung	16
1.2	Oberflächenschutz gemäß Regelwerk	7	6.1	Applikation der Hydrophobierungsmittel	16
2	Bedeutung einer Instandsetzung	7	6.2	Messung der Hydrophobierungsqualität	18
2.1	Kosten der Instandsetzung	7	7	Messergebnisse	20
2.2	Bedeutung einer Hydrophobierung	7	7.1	Übereinstimmung der Messergebnisse	20
2.3	Einsatzmöglichkeiten für eine Hydrophobierung	8	7.2	Abhängigkeit der Messergebnisse von der Feuchte	20
3	Qualität einer Hydrophobierung	8	7.3	Unterschiedliche Wirkqualitäten	22
3.1	Allgemeines	8	8	Zusammenfassung	23
3.2	Wirkungsweise einer Hydrophobierung	8	9	Ausblick	24
3.3	Messverfahren	9	Literatur		25
3.4	Darstellung der Messergebnisse	10			
3.5	Bestimmung der Qualität	10			
3.5.1	Bisheriges Messverfahren	10			
3.5.2	Neues Messverfahren	11			
3.5.3	Würdigung des Verfahrens nach ZTV-ING	12			
3.5.4	Gewähltes Auswerteverfahren	12			
3.6	Dauerhaftigkeit	12			
4	Veranlassung	12			
4.1	Allgemeines	12			
4.2	Voraussetzung für hohe Qualität	13			
4.3	Bewertungsgrößen	14			
4.4	Grundlage	14			
5	Versuchsprogramm	14			
5.1	Allgemeines	14			
5.2	Messprogramm	14			
5.3	Ziel der Untersuchungen	15			
5.4	Herstellung der Betonprobekörper	15			
5.5	Lagerung der Probekörper	15			

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Wenn unsere Brücken- und Ingenieurbauwerke entsprechend ihrer jeweiligen Exposition regelwerksgerecht hergestellt werden, ist eine wesentliche Voraussetzung für eine hohe Bauwerksqualität erfüllt. Bei richtiger Zusammensetzung, Verdichtung und Nachbehandlung des Betons sowie ausreichender Betondeckung sind die Bauteile dauerhaft ausgeführt, und insbesondere der Betonstahl ist weitgehend gegen Korrosion geschützt. Die Eigenschaften hoher Ausführungsqualität und Dauerhaftigkeit sollen also erreicht werden, ohne dass der Beton planmäßig einen Oberflächenschutz erhalten muss. Die ZTV-ING [2] fordern, dass ein vorbeugender Oberflächenschutz bei neuen Bauwerken allenfalls an exponierten Stellen (z. B. im Spritzwasserbereich) vorgesehen werden sollte. Ein sehr exponiertes Bauteil ist die neu erstellte Brückenkappe. Wenn die Brückenkappe kurz vor dem Winter betoniert wird, möchte man in der Regel den jungen Beton, der extrem dem Spritzwasser ausgesetzt ist, gegen das Eindringen von Wasser und betonschädigenden Stoffen, insbesondere Chloriden, mit einer geeigneten Hydrophobierung schützen. Ehe man jedoch den Beton hydrophobiert, muss er trocken und aufnahmefähig sein. Um das nachzuweisen, muss zuvor die Feuchte gemessen werden (Kapitel 4.2).

1.2 Oberflächenschutz gemäß Regelwerk

Generell sollte bei einer Neubaumaßnahme ein Oberflächenschutz planmäßig nicht oder nur in besonders begründeten Fällen vorgesehen werden. Wenn allerdings die regelwerksgemäße Ausführungsqualität nicht erzielt wird, müssen ggf. ergänzende Oberflächenschutzmaßnahmen vorgesehen werden, um schadhafte Stellen zu beseitigen und die erforderliche Dauerhaftigkeit zu erreichen. In solchen Fällen gehen derartige Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen in der Regel allerdings zulasten des Auftragnehmers.

2 Bedeutung einer Instandsetzung

2.1 Kosten der Instandsetzung

Für die insgesamt rd. 37.000 Brücken und die etwa 200 Tunnel mit einem Anlagewert von rd. 45 Mrd. € im Jahr 2003 wurden für die Erhaltung 282 Mio. € aufgewendet. Von dem Erhaltungsaufwand fließen stets rd. 20 % – im Jahr 2003 waren das 56 Mio. € – in die Betoninstandsetzung. Man kann davon ausgehen, dass davon rd. 85 % für Betonersatz- und rd. 15 % für Oberflächenschutzmaßnahmen aufgewendet wurden. Genauere Angaben liegen nicht vor. Es darf jedoch angenommen werden, dass von den Aufwendungen für die Oberflächenschutzmaßnahmen derzeit noch ein lediglich geringer Teil für die Hydrophobierung von Betonbauteilen aufgebracht wird. Zum einen sind die Kosten für solche OS-Maßnahmen relativ gering, und zum anderen werden Hydrophobierungen an Betonbauteilen noch nicht sehr häufig ausgeführt.

Der tatsächliche Aufwand für Erhaltungsmaßnahmen liegt bereits seit mehr als 10 Jahren deutlich unter den Soll-Aufwendungen. Insofern ist es umso wichtiger, die Instandsetzungsmaßnahmen in hoher Qualität dauerhaft und nachhaltig auszuführen, um zu verhindern, dass Instandsetzungsmaßnahmen wiederholt durchgeführt werden müssen und somit Haushaltsmittel aufgewendet und wertvolle Energie und Ressourcen vertan werden.

2.2 Bedeutung einer Hydrophobierung

Beton ist – in Abhängigkeit vom w/z-Wert – ein mehr oder minder offener Baustoff mit der Eigenschaft der kapillaren Saugfähigkeit. Dadurch kann er Wasser gemeinsam mit darin gelösten Schadstoffen, insbesondere Chloriden, aufnehmen. Um diesen Transport zu behindern, kann der Beton hydrophobiert werden. Da die Produktqualität und Wirksamkeit sowie die Dauerhaftigkeit der heute für die Verwendung im Bundesfernstraßenbereich zugelassenen Hydrophobierungsmittel (Kapitel 3.6) nachweislich deutlich angestiegen sind [4], kann man davon ausgehen, dass die Bedeutung der Hydrophobierung zunehmen wird. Und es ist sicherlich möglich, künftig unter bestimmten Bedingungen auch solche Betonbauteile

zu hydrophobieren, die derzeit noch mit höherwertigen Oberflächenschutz-Systemen beschichtet werden müssen. Dadurch könnten Finanzmittel eingespart und die Umwelt geschont werden.

Wenn die erforderliche Betondeckung besonders exponierter Betonbauteile¹ gemäß DIN-Fachbericht 102 [9] ausreichend ist ($c_{\text{nom}} = 4,5$ cm, $c_{\text{min}} = 4,0$ cm) und der Beton regelwerksgerecht verdichtet und nachbehandelt wurde, soll er grundsätzlich nicht ergänzend mit einem Oberflächenschutz-System geschützt werden (Kapitel 1).

Ist in besonderen Fällen dennoch ein Oberflächenschutz gegen Wasser und die darin gelösten Chloride für sehr exponierte Bauteile geplant, beispielsweise nahe am Fahrbahnrand stehende Stützen und Widerlager oder Bereiche der Tunnelinnenschale, muss der Beton nicht unbedingt mit einem schichtbildenden OS-System gegen eindringendes Wasser und Kohlendioxid beschichtet werden. In vielen Fällen reicht es aus, ihn lediglich zusätzlich mit einer Hydrophobierung zu schützen. Gegen eindringendes Kohlendioxid wirkt eine Hydrophobierung allerdings nicht (Kapitel 3.2).

2.3 Einsatzmöglichkeiten für eine Hydrophobierung

Lediglich an älteren instand gesetzten Bauwerken soll ergänzend ein OS-System vorgesehen werden, wenn die erforderliche Betondeckung planmäßig nicht erzielt werden kann. In solchen Fällen soll also ein den alkalischen Korrosionsschutz in Form des Betons ergänzender Korrosionsschutz in Form eines OS-Systems gewählt werden. Hier lässt sich vielfach, wie zuvor für neue Betonbauteile begründet, anstelle eines dickeren und schichtbildenden OS-Systems auch eine Hydrophobierung wählen. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der Ausführungen in Kapitel 1 von Bedeutung, weil neue Bauteile nur in Ausnahmefällen behandelt werden dürfen. Und im Falle einer Kappeninstandsetzung reicht in der weit überwiegenden Zahl der Fälle eine Hydrophobierung aus. Nur ganz selten

macht eine Beschichtung mit einem OS-F-System Sinn. Ein solches sehr feuchteempfindliches System ist völlig diffusionsdicht und darüber hinaus teuer. Sein Einsatz setzt eine hohe Qualifikation der ausführenden Firma voraus, und der Aufwand für die regelwerksgemäßen Prüfungen der äußeren Bedingungen und der Feuchte während der Ausführung ist erheblich. Das System darf nur aufgebracht werden, wenn die Betonoberfläche völlig trocken ist, da sonst der Haftverbund gestört wird.

3 Qualität einer Hydrophobierung

3.1 Allgemeines

Hydrophobierungen stellen wirksame und wirtschaftlich sinnvolle Lösungen zum Schutz eines Betons gegen eindringendes Wasser und darin gelöste Schadstoffe und somit zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit dar. Sie gelten im Vergleich zu aufwendigen OS-Beschichtungsmaßnahmen als einfache und weniger aufwändige Maßnahmen. Dies setzt allerdings voraus, dass sie regelwerksgemäß appliziert werden, um den Transport des Wirkstoffs in den porösen Beton zu gewährleisten und eine ausreichend dicke Betonrandzone zu belegen. Mit einer solch preisgünstigen und dennoch sehr wirksamen Methode kann der Beton über lange Zeit geschützt werden. Farbe und optisches Erscheinungsbild des Betons bleiben weitestgehend unverändert.

Somit werden durch die deutliche Reduktion der Wasseraufnahme in den Kapillarporen mit einer erfolgreichen Hydrophobierung vorwiegend die Frost- und Frost-Tausalzbeständigkeit erhöht. Ferner wird erwartet, dass damit im Oberflächenbereich von Betonbauteilen, evtl. sogar auch von Betonfahrbahnplatten, die Alkali-Kieselsäurereaktion zumindest spürbar behindert wird. Erste Untersuchungen dazu wurden auf entsprechend belasteten bzw. bereits geschädigten Betonoberflächen durchgeführt; sie sollen fortgesetzt werden.

3.2 Wirkungsweise einer Hydrophobierung

Eine Hydrophobierung wird auf die Betonoberfläche appliziert, dringt in Abhängigkeit von der Dichte bzw. der Porosität, also der Saugfähigkeit

¹ Zu den besonders exponierten Betonbauteilen gehören die Brückenkappen. Wegen der gemäß [2] zulässigen Unebenheiten in der Betonoberfläche einer Kappe ist künftig eine nominale Betondeckung von 5 cm, also ein Vorhaltemaß von 10 mm, einzuhalten.

des Betons, sowie in Abhängigkeit von seiner Feuchte während der Applikation mehrere Millimeter in das Betongefüge ein und belegt nach dem chemischen Ausreagieren die Porenwände mit einem dünnen Silikonharzfilm. Der Benetzungswinkel des Wassers vergrößert sich auf dem Silikonharzfilm auf mehr als 90° , sodass die Kapillarwände wasserabstoßend wirken und kein flüssiges Wasser in den Beton eindringen, jedoch Wasserdampf nahezu ungehindert eindringen und insbesondere austreten kann (Bild 1).

Eine Hydrophobierung verhindert allerdings nicht das Eindringen von Kohlendioxid in den Beton. Da infolge einer erfolgreichen Hydrophobierung der Beton im Randzonenbereich, insbesondere von vertikalen und stark geneigten Betonoberflächen, zunehmend austrocknet, vergrößern sich die Porenöffnungen für eindringendes Kohlendioxid geringfügig, wodurch die Gefahr einer beschleunigten Karbonatisierung droht. Andererseits wird aber auch erreicht, dass ein wesentlicher Reaktionspartner für die Korrosion, nämlich das Wasser, weitgehend entfällt, was dazu führt, dass sich im Laufe der Zeit der Korrosionsprozess stark verlangsamt.

In der Abwägung zwischen der Korrosionsgefährdung durch geringfügig gesteigerten Karbonatisierungsfortschritt einerseits und dem Vorteil einer verringerten Korrosionsgefährdung durch Wegfall des Wassers andererseits wird die Förderung der Karbonatisierung durch eine Hydrophobierung eines Betonbauteils eher als marginal eingeschätzt, und die Karbonatisierung eines hydrophobierten Betons wird nicht als kritisch angesehen. Insofern kann der befürchtete Einfluss der Hydrophobierung auf die Korrosionsbeschleunigung praktisch vernachlässigt werden.

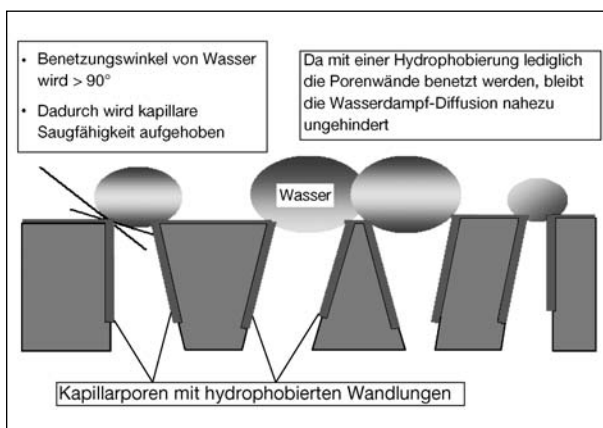


Bild 1: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer Hydrophobierung auf einer Betonoberfläche

Die Wirkstoffe der Hydrophobierungsmittel sind heute Silane, Siloxane und Silan-Siloxan-Verbindungen, also siliziumorganische, niedrig viskose Verbindungen. Nicht bewährt haben sich Siliconharze wegen ihrer geringeren Eindringtiefe und ihrer Klebrigkeit und demzufolge ihrer Neigung, zu verschmutzen. Für die Ingenieurbauwerke im Bundesfernstraßenbereich werden Hydrophobierungen in unverdünnter Form als klarflüssige Reinsilane (K), gebrauchsfertig gemischt oder als Konzentrate, die vor der Anwendung mit Wasser verdünnt werden müssen, angeboten. Darüber hinaus sind wässrige Emulsionen (E) und pastöse Mittel (P) erhältlich. Diese Produkte sind zugelassen und in der Zusammenstellung der zertifizierten OS-Systeme geführt.

3.3 Messverfahren

Das Verfahren zur Beurteilung der Qualität einer Hydrophobierung ist im Einzelnen in [3] beschrieben. Es beruht auf dem Prinzip des Ladungstransportes in elektrolytischen Lösungen. Die auf die Betonoberfläche aufgestellten Messgeber geben unter definierten Bedingungen Elektrolytflüssigkeit an den Beton ab. In Wasser gelöstes Kalziumhydroxid hat sich sehr gut als Elektrolytflüssigkeit bewährt und wird demzufolge auch immer gewählt.

Je nach Qualität des Betons und der Produkte sowie der Ausführung gelingt es, die inneren Oberflächen des Betongefüges mehr oder weniger vollständig mit Hydrophobierungsmitteln zu belegen. Das bedeutet, dass direkt abhängig von der Qualität des Hydrophobierungsmittels und der Ausführungsqualität der hydrophobierte Bereich der Betonoberfläche zwangsläufig Fehlstellen besitzt. Wenn man nun einen Messgeber aufsetzt (Bild 2) und eine definierte Spannung anlegt, findet aus der Elektrolytflüssigkeit ein Ladungstransport statt, der die hydrophobierte Zone über die vorhandenen Fehlstellen durchbricht. Der Ladungsstrom wird vom Messgeber in Form von zeitabhängigen Einzelwerten registriert, die dann in Messwert-Zeit-Kurven übernommen werden können (Bilder 3 und 4).

Die Menge der transportierten Ladungen in einer solchen Elektrolytlösung, also der Stromfluss, hängt ab von der

- elektrischen Spannung zwischen den Geber-
elektroden: Sie wird konstant gehalten,

- Länge des Transportweges (Elektrodenabstand): Wegen der Gebergeometrie bleibt die Länge des Transportweges konstant,
- elektrischen Elementarladung der Ionen: Sie ist konstant,
- Viskosität des Elektrolyten: Sie bleibt über die Messdauer konstant,
- Querschnittsfläche des Elektrolyten im Bereich der Aufstandsfläche des Messgebers: Sie ist variabel. Durch die Querschnittsfläche wird die Summe der Fehlstellen einer Hydrophobierung unterhalb der Aufstandsfläche des Messgebers repräsentiert.

Die Querschnittsfläche des Elektrolyten stellt also die einzige Messvariable in dem System dar. Somit kann also mit einer zeitabhängigen Stromflussmessung über die Summe der Fehlstellen in einer hydrophobierten Zone die Wirkung einer Hydrophobierung qualitativ und quantitativ bestimmt werden.

3.4 Darstellung der Messergebnisse

Die Qualität einer Hydrophobierung muss – wenn sie gemäß den ZTV-ING [2], Teil 3, Kapitel 4, appliziert worden ist – im Rahmen der Eigenüberwachung der Ausführung im Beisein des Auftraggebers nachgewiesen werden. Die mit jeweils 4 Messgebern (Bild 2) ermittelten Messwerte werden gemittelt und den auf den Probeflächen (Eignungsprüfung; Abschnitte 4.4 und 5.1) ermittelten Soll-Werten gegenübergestellt.

Bisher erfolgte der Qualitätsnachweis gemäß den ZTV-SIB 90 [1] über eine Messung von 90 Minuten Dauer je angefangene 100 m² hydrophobierter Fläche [2, 3]. Die ZTV-SIB 90 wurden in überarbeiteter Form als Teil 3, Kapitel 4, in die ZTV-ING übernommen. Unter anderem wegen des erheblichen Aufwandes zur Ermittlung der Messkurven wurden dort die Kriterien für die Bestimmung der Qualität wesentlich vereinfacht. Die Messergebnisse sind danach nicht mehr als Messwert-Zeit-Kurven (Bilder 3 und 4), sondern nur noch tabellarisch darzustellen.

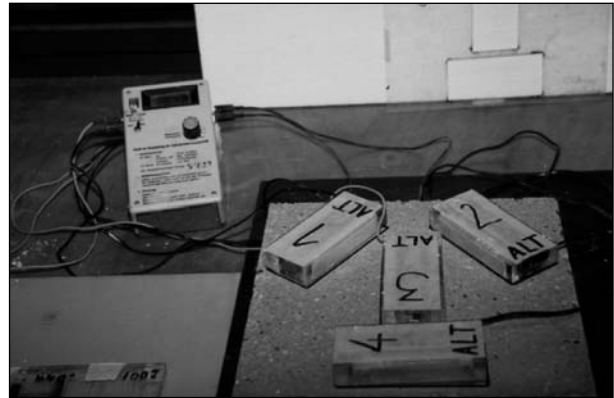


Bild 2: Konfiguration der 4 Messgeber auf einer horizontalen Betonprobeplatte

3.5 Bestimmung der Qualität

3.5.1 Bisheriges Messverfahren

Je Messreihe werden 4 Messgeber auf einer Fläche von rd. 30 cm x 30 cm aufgestellt (Bild 2).

Aus den jeweils an vier Stellen ermittelten Messwerten müssen die Mittelwerte gebildet und als Messwert-Zeit-Kurven dargestellt werden. Die auf einer horizontalen Fläche ermittelten Mittelwerte dürfen danach den Grenzwert² von 300, die auf einer vertikalen Oberfläche ermittelten Mittelwerte dürfen den Grenzwert von 600 nicht übersteigen. Um den gleichen Bewertungsmaßstab mit den unterschiedlichen Messgebern zu erzielen, ist der gemessene Vertikalwert zu halbieren bzw. der gemessene Horizontalwert zu verdoppeln.

Der Verlauf der Messkurven ist charakteristisch einerseits für die Qualität des Hydrophobierungsmittels und andererseits für die der Ausführung; darüber hinaus lässt sich aus dem Kurvenverlauf erkennen, unter welchen Feuchtebedingungen appliziert wurde (Bild 3 sowie Bilder A 1.1 bis A 1.28 in Anlage 1 des Anhangs). Verläuft die Messwert-Zeit-Kurve nahezu parallel zur Zeitachse und bleibt deutlich unterhalb des Grenzwertes 300, kann daraus geschlossen werden, dass ein trockener Beton mit ausreichender Wirkstoffmenge hydrophobiert wurde und dass das Mittel optimal die inneren Porenwandungen einer ausreichend dicken Betonrandzone belegt hat. Ebenfalls am Kurvenverlauf erkennbar ist, ob der jeweilige Wirkstoffgehalt des Produkts ausreichend war (Bild 3). Schneidet die Messwert-Zeit-Kurve vor dem 90-Minuten-Wert die Grenzwertlinie von 300, ist daraus zu schließen, dass bei sonst gleichen Bedingungen die Wirkstoffmenge nicht aus-

² Sowohl die Maßzahlen für die Grenzwerte als auch die Messwerte zur Beurteilung der Qualität der Hydrophobierung sind dimensionslos; sie werden in den Diagrammen dieses Berichtes mit Hydrowert bezeichnet.

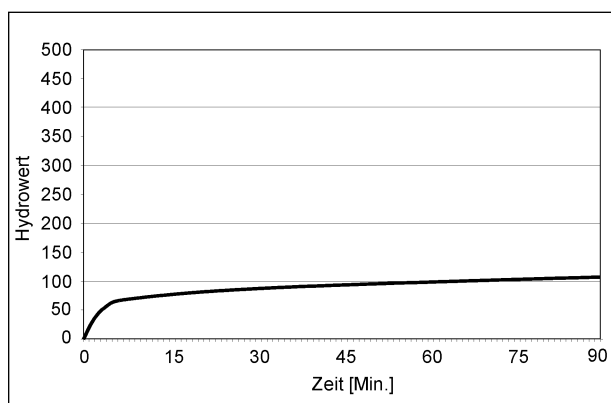


Bild 3: Messkurve von einem Hydrophobierungsmittel mit guter Wirksamkeit; der annähernd parallele Verlauf der Kurve bedeutet ein in der Betonrandzone trockenes Betongefüge und eine ausreichende Wirkstoffmenge

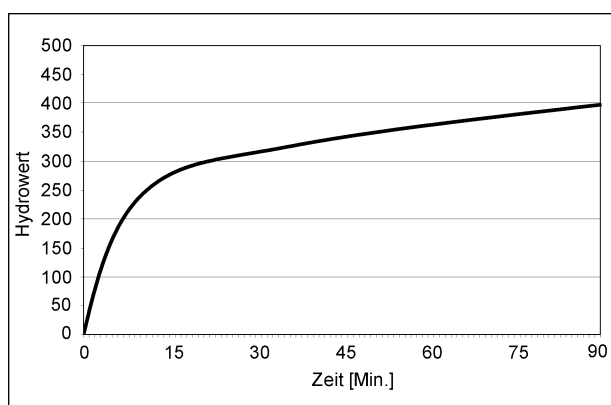


Bild 4: Messkurve von einem Hydrophobierungsmittel mit nicht ausreichender Wirksamkeit. Das Mittel war stark verdünnt; der annähernd parallele Verlauf der Kurve bedeutet ein in der Betonrandzone trockenes Betongefüge

reichte und sich zu viele Fehlstellen ergaben (Bild 4). Wird unter unzulässig hohen Feuchtebedingungen (mehr als 4 M-%) appliziert, ist zu erwarten, dass der Kurvenverlauf exponentiell nach oben verläuft und sehr schnell die Grenzwertlinie schneidet.

3.5.2 Neues Messverfahren

In den ZTV-SIB 90 [1] wurden die Messdauer mit 90 Minuten und der Grenzwert, der nicht überschritten werden darf, mit 300 festgelegt (Kapitel 3.5.1). Aufgrund langjähriger Messerfahrung ist bekannt, dass nach 15 Minuten ein Messwert von ca. 75 % des Endwertes und nach 60 Minuten einer von ca. 95 % des Endwertes erreicht wird. Aufgrund dieser Erkenntnis wurden die neuen Grenzwerte in den ZTV-ING für die 15-Minuten-Messung mit 150 auf der waagerechten und mit 300 auf der senkrechten Oberfläche festgelegt.

Ferner wurden die neuen Grenzwerte für die 60-Minuten-Messung mit 230 auf der waagerechten und mit 460 auf der senkrechten Oberfläche festgelegt. Dadurch, dass man bei der Grenzwertfestlegung für die Mittelwerte gegenüber den rechnerisch ermittelten Werten (75 % von 300 ergibt 225, 95 % von 300 ergibt 285) noch einmal deutliche Abschläge vorgenommen hat, kann in dem vereinfachten Messverfahren auf einschränkende Festlegungen zu den Einzelwerten verzichtet werden. Auf diese Weise wurde das Bewertungsverfahren wesentlich vereinfacht mit dem Ziel, die Akzeptanz bei den Anwendern zu erhöhen. Im Einzelnen wurde festgelegt:

- Die Ablesung der Messwerte erfolgt nach 15 bzw. nach 60 Minuten. Der einzuhaltende Grenzwert nach 15 Minuten beträgt – wie erwähnt – 150 und nach 60 Minuten 230 bei waagerechter Lage der Geber bzw. nach 15 Minuten 300 und nach 60 Minuten 460 bei senkrechter Lage der Geber.
- Aus den vier Einzelmesswerten werden Mittelwerte gebildet.
- Wird der Grenzwert für die 15-Minuten-Messung vom Mittelwert nicht überschritten, ist eine ausreichende Qualität der Hydrophobierung nachgewiesen, und die Messung ist beendet. Wird er überschritten und liegt zwischen 150 und 230, muss 60 Minuten lang gemessen werden.
- Wird der Grenzwert 230 für die 60-Minuten-Messung vom Mittelwert nicht überschritten, ist eine ausreichende Qualität der Hydrophobierung nachgewiesen, und die Messung ist abgeschlossen. Wird er überschritten, ist die Qualität nicht ausreichend.

Bei Versagen einer Hydrophobierung ist zu entscheiden, ob nachhydrophobiert werden soll. Unabhängig von der Wahl des erstapplizierten Produktes ist es nicht möglich, mit einem wässrigen System (Emulsion auf Wasserbasis) nachzuarbeiten. Denn auch die vorhandene Hydrophobierung mit zu geringer Qualität lässt das Wasser als Trägermaterial der Dispersion nicht bzw. nicht in ausreichender Menge eindringen. Stattdessen ist immer mit einem reinen Wirkstoff bzw. einem lösemittelhaltigen Hydrophobierungsmittel nachzuarbeiten.

3.5.3 Würdigung des Verfahrens nach ZTV-ING

Für einen raschen Nachweis dafür, ob die Hydrophobierungsqualität ausreichend ist, ist das vereinfachte Mess- und Bewertungsverfahren nach ZTV-ING geeignet. Möchte man darüber hinaus allerdings auch wissen, unter welchen Bedingungen – unterschiedlich feuchter oder trockener Betonuntergrund – der Wirkstoff appliziert worden ist und warum ggf. eine Maßnahme versagt hat bzw. die Qualität nicht ausreichend ist, sollte, wie unter Kapitel 3.5.1 beschrieben, eine Messung gemäß ZTV-SIB 90 gewählt werden. Es sollte 90 Minuten lang gemessen und die Messwerte in Form von Messwert-Zeitkurven aufgetragen werden. Die neuerdings angelegten Messwert-Zeitkurven werden nicht mehr über einer logarithmisch, sondern über einer linear geteilten Zeitachse (Abszisse) aufgetragen (Bilder 3, 4), welches die Interpretation der Kurven erleichtert.

3.5.4 Gewähltes Auswerteverfahren

Um die oben genannten Rückschlüsse auf die Ausführungsbedingungen zu ermöglichen und Gründe für die jeweils ermittelte Qualität der Hydrophobierung zu finden, wird bei der Darstellung der Ergebnisse aus den vorliegenden Untersuchungen von den Vorgaben in den ZTV-ING abgewichen. Die gemittelten Messwerte werden stattdessen nach den Vorgaben der ZTV-SIB als Messwert-Zeitkurven über 90 Minuten über einer linear geteilten Zeitachse aufgetragen.

3.6 Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit einer Hydrophobierung hängt wesentlich ab von

- der Qualität des Hydrophobierungsmittels und der Resistenz gegen die umgebende Alkalität aus dem Beton,
- der Beständigkeit des Mittels gegen chemischen Angriff und gegen Witterungseinflüsse,
- der Oberflächenbeschaffenheit und Dichtheit des Porengefüges im Beton,
- der aufgetragenen sowie der tatsächlich in die Poren eingedrungenen Wirkstoffmenge. Der Porenraum muss frei sein, damit er von dem Hydrophobierungsmittel belegt werden kann. Trockener Beton erfüllt die Bedingung in der Regel,

- dem Feuchtegehalt des Betons zum Zeitpunkt der Applikation. Der Feuchtegehalt sollte gemäß den Anforderungen der ZTV-ING, Teil 3, Kapitel 4, stets deutlich unter 4 M-% (gemessen mit dem CM-Verfahren) liegen. Empfohlen wird ein Feuchtegehalt zwischen 2 M-% und 3 M-%. Insbesondere ist es nicht möglich, jungen und demzufolge sehr feuchten Kappenbeton erfolgreich zu hydrophobieren. Erfahrungsgemäß sollte beispielsweise eine im Spätherbst hergestellte Brückenkappe frühestens im darauffolgenden Sommer, also frühestens nach rd. 6 Monaten, behandelt werden (Bilder 5 und 6).

Die zugelassenen³ Mittel erfüllen die Voraussetzungen hinsichtlich der Verträglichkeit mit dem Betonuntergrund. Denn die grundsätzliche Eignung für Beton wird im Rahmen der Grundprüfung gemäß den Technischen Lieferbedingungen und Technischen Prüfvorschriften (TL/TP OS) [5] nachgewiesen. Wenn die Mittel regelwerksgerecht appliziert werden, ist an Betonbauteilen von Brücken eine Wirksamkeitsdauer von 10 bis 15 Jahren zu erwarten.

4 Veranlassung

4.1 Allgemeines

In den Jahren 1989 bis 1995 wurden im Rahmen einer Langzeituntersuchung marktübliche Hydrophobierungsmittel der Witterung ausgesetzt und hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit untersucht [3, 4]. Hier zeigte sich, dass rd. die Hälfte der Produkte eine hohe Qualität aufwies.

Inzwischen befinden sich neben den früher üblichen dünnflüssigen und emulgierten auch pastöse Hydrophobierungsmittel auf dem Markt der Oberflächenschutz-Systeme (Kapitel 3.2), die sich insbesondere auf stark geneigten Flächen und auf Unterseiten, aber auch bei höheren Temperaturen ohne größere Verluste durch Wegfließen oder durch Verdunsten erfolgreich applizieren lassen. Dadurch, dass sich in den pastösen Mitteln Wasser

³ Unter zugelassenen Produkten sind solche zu verstehen, die in der Zusammenstellung der zertifizierten Stoffe und Stoffsysteme – Oberflächenschutzsysteme – geführt werden. Sie werden in Anlehnung an die Zulassung im bauaufsichtlichen Bereich Hochbau als „zugelassen“ für den Bundesfernstraßenbereich bezeichnet.

befindet, welches sich so lange quasi in Form eines Films über den Wirkstoff legt, bis dieser eingedrungen ist, wird eine Verdunstung selbst sehr flüchtiger Wirkstoffe weitgehend verhindert.

Erste Wirksamkeitsuntersuchungen mit neueren zugelassenen Hydrophobierungsmitteln lassen vermuten, dass die heute erhältlichen Produkte eine deutlich höhere Qualität besitzen als die besten Produkte der ersten Untersuchung [3, 4]. Aufgrund der Ergebnisse aus der ersten Serie der Langzeituntersuchungen und erster neuerer Untersuchungsergebnisse kann man davon ausgehen, dass eine Schutzmaßnahme mit den heute zugelassenen Hydrophobierungsmitteln, wie bereits erwähnt, 10 bis 15 Jahre wirksam bleibt. Weil die Einsatzfelder für eine Hydrophobierung aus finanziellen Gründen künftig vermutlich zunehmen werden, lag es also nahe, eine weitere Langzeitstudie zu starten, um sowohl an Probekörpern als auch an Betonbauteilen von Brücken nachzuweisen, dass die Dauerhaftigkeit und die Wirksamkeit der Hydrophobierungsmittel tatsächlich deutlich angestiegen sind. In den vorliegenden Untersuchungen wurden, bis auf eine Ausnahme, ausschließlich von der BASt zugelassene Produkte verwendet. Ein in die Untersuchungen einbezogenes gelartiges Hydrophobierungsmittel ist nicht zugelassen und befindet sich nicht in der Zusammenstellung der zertifizierten OS-Systeme (Kapitel 5.5).

4.2 Voraussetzung für hohe Qualität

Es ist immer noch eine weit verbreitete Regel, dass Bauherren eine Hydrophobierung des jungen Kappenbetons ausschreiben, um den Beton vor dem Frost-Tausalzangriff des ersten Winters zu schützen. Im Laufe vergangener Untersuchungen [3, 4] konnte bereits sehr früh festgestellt werden, dass feuchter Beton, also Beton mit mindestens 4 M-%-Feuchte, nur mit geringem Erfolg hydrophobiert werden kann und deshalb die Forderung nach Hydrophobierung eines solchen Betons im Widerspruch steht zur Wirkungsweise eines Hydrophobierungsmittels. Nassen Beton zu hydrophobieren macht keinen Sinn (Bild 5). Dies würde man merken, wenn man zuvor regelwerksgemäß Probeblößen (Kapitel 5.1) anlegen und darauf die Qualität messen würde. Zum einen müsste dabei auffallen, dass die nach den Angaben zur Ausführung für das entsprechende Produkt aufzubringende Menge vom Beton nicht aufgenommen werden kann. Zum anderen würde man an der Messwert-

Zeit-Kurve erkennen, dass diese sehr rasch die Grenzwertlinie schneidet, also eine ausreichende Qualität der Ausführung nicht erreicht werden kann. Eine derartige Maßnahme bringt eher Schaden als Nutzen. Besonders deutlich wurde das bestätigt an einem Großbrückenbauwerk im Zuge einer Bundesautobahn. Dort wurden mangels Erfahrung im Umgang mit Hydrophobierungen neue und noch sehr feuchte Brückenkappen mit relativ hoher Menge je m² hydrophobiert. Weder wurden zuvor Probeflächen angelegt, noch wurde der Erfolg bzw. die Wirksamkeit im Rahmen der Eigenüberwachung der Ausführung kontrolliert. Das Material konnte nicht in vollem Umfang eindringen, wurde daher weitgehend von der Kappe gespült und gelangte schließlich über die Vorflut in Fischteiche. Der angerichtete Schaden war erheblich.

Wenn junger Kappenbeton vor dem ersten Winter aus den dargelegten Gründen nicht mehr geschützt werden kann, ist es ratsam, erst im nachfolgenden Sommer zu hydrophobieren. Das Porensystem ist dann in der oberflächennahen Zone so weit ausgetrocknet, dass es in ausreichender

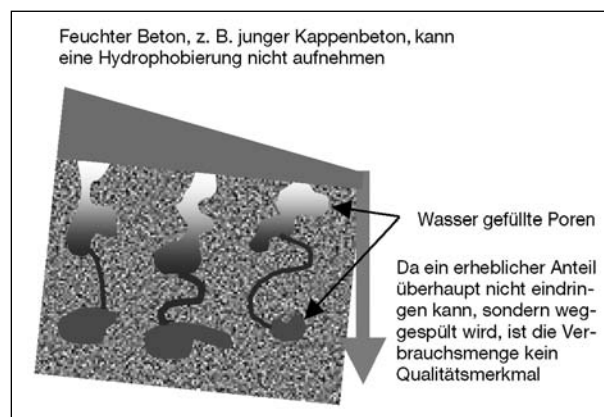


Bild 5: „Ablaufende Hydrophobierung“ auf Beton mit noch teilweise bzw. ganz mit Wasser gesättigten Poren; feuchter Beton kann die erforderliche Menge an Hydrophobierungsmittel nicht aufnehmen

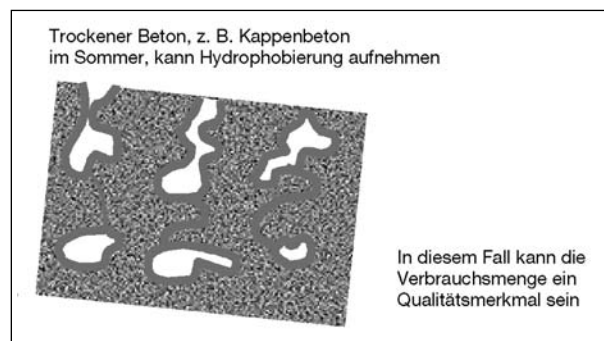


Bild 6: Ein weitgehend trockenes Betongefüge kann ausreichend Hydrophobierungsmittel aufnehmen

Menge Hydrophobierungsmittel aufnehmen kann, um die Porenwandungen zu belegen und letztlich eine gute Qualität zu erzielen (Bild 6). Da eine hochwertige Hydrophobierung das Wassereindringen behindert, Wasserdampf jedoch austreten lässt (Bild 1), werden die im Wasserdampf gelösten Chloride, die evtl. im Winter eingetragen wurden, in die oberflächennahe Zone befördert, wo sie unschädlich sind. Insofern wird eine Verschiebung der Hydrophobierungsmaßnahme in eine günstigere und trockenere Jahreszeit im Allgemeinen als nicht nachteilig angesehen.

4.3 Bewertungsgrößen

Da bisher nicht bekannt war, wie feucht der junge Beton höchstens sein darf, um noch erfolgreich behandelt werden zu können und um Empfehlungen für die Praxis aussprechen zu können, wurden die Wirksamkeitsuntersuchungen in Abhängigkeit von der Feuchte während der Applikation durchgeführt. Bei Messungen der Wirksamkeit an Brückenbauwerken im Frühjahr und Herbst eines Jahres zeigte sich darüber hinaus, dass es neben der genannten Abhängigkeit der Hydrophobierungsqualität von der Feuchte während der Applikation unabhängig davon auch eine Abhängigkeit der Messergebnisse von der Feuchte während des Messvorgangs gibt. In den vorliegenden Untersuchungen galt es also, die beiden Abhängigkeiten von der Feuchte einzugrenzen und zu quantifizieren (Kapitel 7.2).

4.4 Grundlage

Die Grundlage für die Hydrophobierung von Betonbauteilen bilden die ZTV-ING, Teil 3, Kapitel 4 [2]. Dort ist festgelegt, unter welchen Bedingungen Betonbauteile hydrophobiert werden sollen, mit welchen Geräten und wie häufig die Wirksamkeit nachzuweisen ist und welche Grenzwerte bei der Messung nicht überschritten werden dürfen. Ergänzende Hinweise für die Interpretation der Messergebnisse finden sich in Kapitel 3.5 des Berichtes.

Wesentliche Voraussetzung für eine regelwerksgemäße Ausführungsqualität ist, dass vor einer Maßnahme Probeflächen anzulegen sind (Kapitel 5.1). Eine weitere Voraussetzung ist, dass die Qualität der Hydrophobierung im Rahmen der Eigen-

überwachung der Ausführung im Beisein des Bauherrn nachgewiesen wird.

5 Versuchsprogramm

5.1 Allgemeines

In [2] ist ausdrücklich gefordert, dass vor einer Hydrophobierungsmaßnahme Probeflächen angelegt werden müssen. Die Probeflächen sind in Abstimmung mit dem Auftraggeber festzulegen und in seinem Beisein zu hydrophobieren. An diesen Flächen wird dann die Qualität bestimmt, die – sofern sie gut war – unter gleichen Bedingungen auch am Bauwerk erzielt werden muss. Diese verschärfte Forderung, vorab quasi eine Eignungsprüfung durchführen zu lassen, ist unumgänglich für die Qualität der Ausführung. Zum einen wird so die generelle Hydrophobierbarkeit des Betons festgestellt und zum anderen werden die Art, Menge und ggf. die Konzentration des Mittels festgelegt. Ohne diese Eignungsprüfung und ohne den Nachweis der Qualität besteht durchaus die Möglichkeit, dass zugelassene Produkte aus der Zusammensetzung der zertifizierten Oberflächenschutzsysteme auf der Baustelle vor der Applikation stärker als zulässig verdünnt werden. Und wenn zudem dann der Bauherr sich die Qualität der Ausführung am Bauwerk nicht nachweisen lässt, kann eine zu starke Verdünnung unbemerkt zu einer in der Regel nicht ausreichenden Qualität bzw. Wirksamkeit führen.

5.2 Messprogramm

Um die Abhängigkeit der Hydrophobierungsqualität von dem Feuchtezustand des oberflächennahen Betons während der Applikation und vom Feuchtezustand des Betons während der Messung näher einzugrenzen, wurden die Untersuchungen so angelegt, dass die

- Abhängigkeit der Messergebnisse von der Applikations-Feuchte zwischen 2 M-% und 5 M-% (Bei einem Feuchtegehalt bis höchstens 2 M-% kann man in der Regel davon ausgehen, dass die Maßnahme erfolgreich ist) und die
- Abhängigkeit der Messergebnisse von der Feuchte während der Messung zwischen 1,5 M-% und 4 M-% (andere Feuchtegehalte

wurden im Rahmen der Messungen an Bauwerkskappen nicht gemessen; sie müssen somit auch nicht weiter verfolgt werden)

ermittelt werden konnten.

Generell soll bestätigt werden, dass die Qualität einer Hydrophobierung mit zunehmender Feuchte während der Applikation tatsächlich abnimmt. Auf der Grundlage der in Abhängigkeit von der Applikationsfeuchte erzielten Qualität wurden daran anschließend die Messungen in Abhängigkeit von der Messfeuchte ermittelt.

5.3 Ziel der Untersuchungen

Wesentliches Ziel der Untersuchungen war, den Einfluss der während der Applikation gemessenen Feuchtwerte auf die Qualität der Hydrophobierung zu quantifizieren.

Eine weitere wesentliche Zielvorgabe der Untersuchungen war, die Abhängigkeit zwischen den zu unterschiedlichen Feuchtebedingungen ermittelten Messwerten und den zugehörigen Feuchtwerten zu finden und zu quantifizieren.

Das in [2], Teil 3, Kapitel 4, geforderte CM-Verfahren⁴ zur genaueren Ermittlung des Feuchtegehaltes im Betonuntergrund konnte für die vorliegenden Untersuchungen nicht gewählt werden. Zur Ermittlung der Feuchte mit dem CM-Gerät müssen jeweils kleine Betonstücke aus dem Probekörper geschlagen werden. Die Größe der Betonprüfkörper hätte für die zahlreichen Feuchteermittlungen nicht ausgereicht, und außerdem wäre auf den zerstörten Oberflächen eine Wirksamkeitsmessung der Hydrophobierungen nicht mehr möglich gewesen. Demzufolge wurden die Feuchtwerte mit einem elektrischen Feuchtemessgerät gemessen.

5.4 Herstellung der Betonprobekörper

Für die Wirksamkeitsuntersuchungen der 11 Produkte (Tabelle 1) wurden 22 Betonprobekörper hergestellt. Für die Messung der Abhängigkeit

der Qualität von der Applikationsfeuchte und für die Ermittlung der Messwerte in Abhängigkeit von der Feuchte während der Messung wurden weitere 14 Betonprobekörper hergestellt. Zur Bestimmung der Mess- und Aussagegenauigkeit des Feuchtemessgerätes wurden weitere 4 Betonprobekörper, und zur Untersuchung 5 zusätzlicher Produkte (Tabelle 1) wurden noch einmal 10 Probekörper hergestellt. Alle 50 Betonprobekörper wurden in gleicher Abmessung und Qualität im Labor der BAST gemäß DIN EN 1766 betoniert.

5.5 Lagerung der Probekörper

In der Zeit von April 2002 bis Oktober 2005 wurden die mit den jeweiligen Hydrophobierungsmitteln behandelten Versuchsplatten auf dem BAST-Gelände der Freibewitterung ausgesetzt. Dies erfolgte auf Gestellen, bei denen die Platten unter 45° Neigung etwa 10 cm über dem Boden standen (Bild 7).

In den Wintermonaten wurden die Probekörper regelmäßig mit Wasser und darin gelöstem Streusalz beaufschlagt. Die Hydrophobierungsqualität wurde in jedem Jahr jeweils im April und im Oktober gemessen. Dazu wurden die Probeplatten 5 Tage vor Beginn der jeweiligen Messdurchgänge aus der Freibewitterung in das Versuchslabor gebracht und dort für 120 h dem Normklima (21 °C, 65 % rel. Luftfeuchte) ausgesetzt. Die danach gemessenen Betonfeuchten zeigten deutliche Unterschiede zwischen den Messergebnissen, die im Herbst, und denen, die im Frühjahr ermittelt wurden (Kapitel 5.2).



Bild 7: Gestelle zur Freibewitterung der hydrophobierten Probeplatten. Die Gestelle stehen transportbereit auf Paletten

⁴ Carbid-Methode. Die Reaktion des in Beton enthaltenen Wassers mit Calciumcarbid führt zur Bildung von Acetylen-gas. Der in einem geschlossenen Behälter entstehende Gasdruck ist abhängig von der Menge der Feuchtigkeit im Beton.

5.6 Auswahl der Hydrophobierungsmittel

Zu Beginn der Untersuchungen befanden sich insgesamt 17 zugelassene Hydrophobierungsmittel von mehreren Herstellerfirmen in den Zusammenstellungen der zertifizierten Stoffe und Stoffsysteme nach [2]. Die Hersteller dieser Produkte wurden gebeten, ihre Produkte für die Langzeituntersuchungen zur Verfügung zu stellen. Für die Untersuchungen blieben schließlich 11 zugelassene Hydrophobierungsmittel, die direkt vom Hersteller bzw. Vertreiber geliefert wurden, übrig. Davon waren 3 Mittel klarflüssig, 5 emulgiert und 3 pastös. In Tabelle 1 sind die in den Untersuchungen eingesetzten Produkte aufgeführt. Dort findet sich auch ein gelartiges Produkt mit der Kennzeichnung G. Dieses gelartige Produkt ist von der BAST nicht zugelassen. Es ist im Gebinde zunächst dünnflüssig, nimmt allerdings bereits kurz nach der Applikation gelartige Eigenschaften an. Die Nummern der Proben P01 bis P16 in Tabelle 1 entsprechen nicht der tatsächlichen Probencodierung.

Nachträglich wurden noch 5 weitere Produkte, 1 klarflüssiges, 1 emulgiertes und 2 pastöse sowie 1 gelartiges Hydrophobierungsmittel, beschafft, die auf den in Kapitel 5.4 genannten 10 zusätzlichen Probepplatten geprüft wurden. Zu Beginn der Untersuchungen waren diese Produkte noch nicht zugelassen, wurden aber mit Ausnahme des Gels kurz danach in die Zusammenstellung übernommen. Das Gel ist auch weiterhin ein nicht zugelassenes Hydrophobierungsmittel.

6 Versuchsdurchführung

6.1 Applikation der Hydrophobierungsmittel

Die Applikation der jeweiligen Produkte auf die Betonprobekörper wurde im Labor unter gleich bleibenden Bedingungen innerhalb eines Tages durchgeführt. Die Ausführung erfolgte nach den Angaben zur Ausführung der zu den einzelnen Produkten gehörigen allgemeinen bauaufsichtlichen Prüf-

Nummer (entspricht nicht der Probencodierung)	Art	Produktbezeichnung	Wirkstoffanteil (Angaben zur Ausführung)	Applikationsmenge [g] (Mittelwert aus zwei Platten)	Applikationsmenge [g] nach Angaben zur Ausführung	Wirkstoffmenge [g] in Probeplatte
P01	P	Paste 1	70 %	17,42	36,00	12,19
P02	E	Emulsion 1	50 %	12,92	13,50	6,46
P03	K	Silan 1	99 %	19,85	18,00	19,65
P04	E	Emulsion 2	23 %	11,99	9,00	2,76
P05	E	Emulsion 3	25 %	19,63	18,00	4,91
P06	P	Paste 2	50 %	15,23	18,00	12,18
P07	E	Emulsion 4	25 %	20,56	18,00	5,14
P08	P	Paste 3	50 %	19,99	18,00	10,00
P09	K	Silan 2	10 %	53,04	45,00	5,30
P10	K	Silan 3	25 %	30,03	18,00	7,51
P11	E	Emulsion 5	25 %	18,95	18,00	4,74
Abweichungen der tatsächlichen Applikationsmenge von der in den Angaben zur Ausführung empfohlenen resultieren aus der unterschiedlichen Saugfähigkeit der einzelnen Betonplatten.						
Die nachträglich aufgenommenen Produkte 12 bis 16 werden hier nur nachrichtlich genannt. Der Beton der Probepplatten war während der Applikation außergewöhnlich trocken. Da auf einem Brückenbauwerk kaum ein solch niedriger Feuchtegehalt vorkommen wird, sollen diese Messwerte nicht berücksichtigt werden.						
P12	K	Silan 4	98 %	33,74	36,00	33,07
P13	E	Emulsion 6	40 %	31,85	45,00	12,74
P14	P	Paste 4	40 %	32,31	45,00	12,92
P15	P	Paste 5	50 %	18,52	18,00	9,26
P16	G	Gel	90 %	37,17	45,00	33,45
K: klarflüssig, E: emulgiert, P: pastös, G: gelartig						
Die Nummern der Proben P01 bis P16 entsprechen nicht der tatsächlichen Probencodierung						

Tab. 1: Auflistung der in den Untersuchungen eingesetzten Hydrophobierungsmittel

zeugnisse. Die Probekörper wurden bis zum Zeitpunkt der Applikation 56 Tage lang bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte im Labor gelagert. Die unmittelbar vor der Applikation elektrisch gemessenen Betonfeuchten (Bild 8) schwankten bei den einzelnen Probepplatten zwischen 1,8-M- und 2,6 M-%, jeweils bezogen auf das Betongewicht. Anhand der einzelnen Feuchte-Messwerte in der Tabelle 2 soll gezeigt werden, wie stark die Feuchtwerte tatsächlich streuen; ferner, wie aufwändig und schwierig es ist, bei gleichen Herstell- und Lagerbedingungen die Probepplatten so zu konditionieren, dass die Ausgangsfeuchte für alle annähernd gleich ist. Die jeweiligen Mittelwerte basieren auf je 9 Einzelmessungen der Feuchte für die einzelnen Probekörper mit dem elektrischen Feuchtemessgerät.

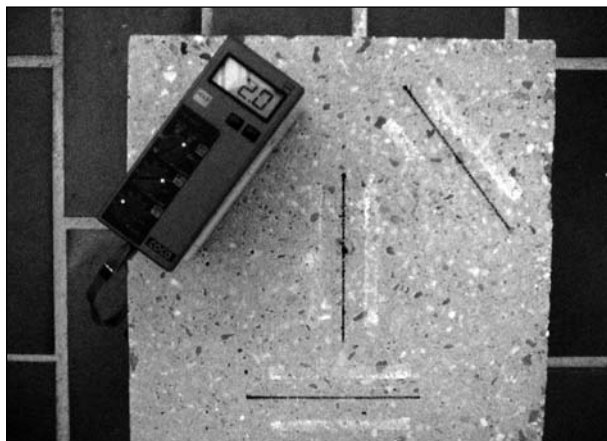


Bild 8: Elektrisches Feuchtemessgerät zur Bestimmung der Betonfeuchte vor der Applikation und vor der jeweiligen Messung der Hydrophobierungsqualität

Die Produkte wurden sowohl auf horizontal als auch auf vertikal ausgerichtete Probekörper appliziert, um ihre Verarbeitbarkeit auf einer Brückenkappe bzw. auf einem Brückenwiderlager oder auf einer Stütze zu simulieren und daraus Schlüsse auf die entsprechenden Verarbeitungseigenschaften ziehen zu können (Bild 9). Die Behandlung erfolgte unter jeweils gleichen Laborbedingungen. Bei der Horizontalapplikation zeigten alle Produkte in ihrer Verarbeitbarkeit ein annähernd gleich gutes Verhalten.

Dagegen bestätigte sich bei der Vertikalapplikation der Pasten aufgrund ihrer Konsistenz – wie erwartet – deren Vorteil. Bei den Emulsionen und den klarflüssigen Mitteln ließ sich ein Abfließen an der vertikalen Oberfläche nicht verhindern. Die dadurch zwangsläufig geringere Menge an aufgetragenem Material erforderte somit mehrere Arbeitsgänge, die jeweils „frisch in frisch“ ausgeführt werden mussten. Da aus Umweltschutzgründen inzwischen keine lösemittelhaltigen, sondern nur noch reine, unverdünnte Wirkstoffe und wässrige Produkte für den Bundesfernstraßenbereich zugelassen sind, ist es zwingend erforderlich, dass nass in nass bzw. frisch in frisch gearbeitet wird. Eine ausreagierte Hydrophobierung kann im Falle einer evtl. erforderlichen Nach-Hydrophobierung praktisch kein wässriges Produkt mehr aufnehmen, weil bereits eine schwach ausgeprägte Wirksamkeit aus der Erstapplikation ausreicht, das Eindringen eines wässrigen Produktes zu verhindern bzw. stark zu behindern (Kapitel 3.5.2).

Probe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mittelwert
Nummer	M-%	M-%	M-%	M-%	M-%	M-%	M-%	M-%	M-%	M-%
A	1,8	1,6	2,4	2,5	2,5	2,3	2,6	1,8	3,0	2,3
B	3,0	2,7	2,2	1,5	2,8	2,8	2,7	2,9	2,9	2,6
C	1,6	1,1	0,8	1,4	2,5	2,5	2,1	2,3	2,2	1,8
D	2,1	2,2	2,2	1,4	2,2	2,5	1,5	1,3	1,9	1,9
E	2,1	1,3	1,9	2,3	2,5	2,0	2,6	2,2	2,3	2,1
F	3,0	1,9	2,8	2,2	1,5	2,7	2,8	2,6	2,6	2,5
G	2,7	1,4	2,9	1,8	2,5	2,5	2,6	2,7	2,5	2,4
H	2,6	1,7	2,9	1,7	2,6	2,7	2,8	2,7	2,3	2,4
I	2,0	1,8	2,8	2,2	2,4	2,6	2,4	2,7	2,6	2,4
J	1,5	2,0	1,5	2,6	2,1	2,3	2,3	2,0	2,2	2,1
K	1,8	2,2	1,6	2	2,3	1,2	1,9	1,7	2,6	1,9
L	2,1	1,6	1,9	1,8	2,4	2,2	2,6	2,2	1,9	2,1

Tab. 2: Beispiel einer Feuchtemessung an vertikal ausgerichteten Platten vor der Applikation; Messung mit dem elektrischen Feuchtemessgerät

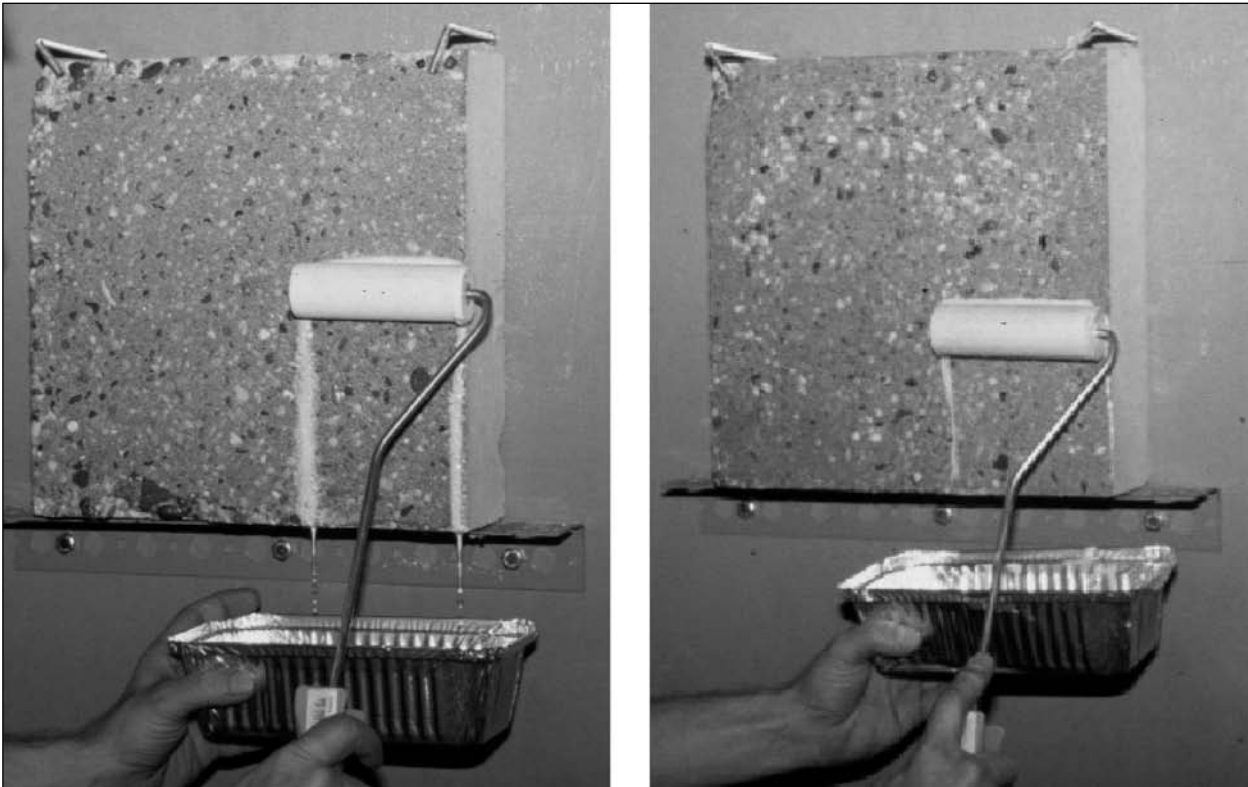


Bild 9: Applikation einer Emulsion (links) und einer Paste (rechts) auf vertikale Probeflächen

Alle Produkte wurden mit Rollen aufgetragen (Bild 9), zum einen, weil eine Rolle sich für eine kleine Versuchsfläche gut eignet; zum anderen aber auch, weil dies die einzige Applikationsart ist, die für alle Produkte in den jeweiligen Angaben zur Ausführung vorgesehen war. Da nach diesen Angaben zur Ausführung zu applizieren war, konnte eine Applikation durch Eintauchen der Probeplatten in das Hydrophobierungsmittel, wie es in vorangegangenen Untersuchungen [3, 4] gewählt worden war, hier nicht erfolgen.

Die 10 in Kapitel 5.4 genannten Probeplatten, auf die ergänzend 5 Produkte appliziert wurden, waren zum Zeitpunkt der Applikation derart trocken – der Feuchtegehalt lag bei 1 M-% –, sodass die anschließend gemessenen Wirksamkeitswerte eine außerordentlich hohe Qualität vorgaben. Solche niedrigen Feuchte-Messwerte werden an Betonbauteilen von Brückenbauwerken praktisch nicht erzielt, weil diese kaum so weit austrocknen können wie die Laborplatten. Die Messwerte werden daher nur nachrichtlich genannt, belegen allerdings die deutliche Abhängigkeit der Hydrophobierungsqualität von der Applikationsfeuchte (Kapitel 5.2). Für eine unter den üblichen Randbedingungen applizierte Hydrophobierung können die Werte jedoch nicht als repräsentativ angesehen werden

und sollen demzufolge auch nicht für die vergleichenden Qualitätsbetrachtungen herangezogen werden.

6.2 Messung der Hydrophobierungsqualität

Wie in Kapitel 3.5.3 dargelegt, wurde die Qualität der jeweiligen Hydrophobierungen nach dem bisherigen Verfahren gemäß [1] ermittelt. Auf der Grundlage der Mittelwerte nach 90 Minuten Messdauer wurden Messwert-Zeitkurven aufgezeichnet, um einen aussagefähigeren Aufschluss über die Qualität der einzelnen Produkte in Abhängigkeit von den Applikations- und Feuchtebedingungen zu gewinnen. Auf eine Ermittlung der Messwerte an den vertikal applizierten Probeplatten mit den Vertikal-Gebern (Bild 11) wurde wegen des erhöhten Aufwandes dieser Messart verzichtet. Stattdessen wurde die Wirksamkeit an diesen Platten ebenfalls in der horizontalen Lage (Bild 10) ermittelt. Die Übereinstimmung der beiden Messmethoden mit den voneinander abweichenden Messwertaufnahmen für horizontale und vertikale Oberflächen wurde bereits in früheren Untersuchungen [3, 4] nachgewiesen mit dem Ergebnis, dass bei gleicher Qualität die Messwerte auf der vertikalen Fläche

		Untersuchungen im Labor	Freifelduntersuchungen an Betonbauteilen			
			Plötzetalbrücke Bernburg (H) BAB A 14	Besedau (V) BAB A 14	Krefeld (H) Innerorts	Kassel (V) BAB A 44
Produkt 1	P	24	12	4	2	
Produkt 2	E	24				
Produkt 3	E	24				
Produkt 4	E	16	12			
Produkt 5	P	24	12			
Produkt 6	K	24	12			
Produkt 7	K	24	12			
Produkt 8	P	24				
Produkt 9	K	24	12			
Produkt 10	E	24		4		
Produkt 11	E	24				
Produkt 12	P	16	12			2
Produkt 13*	G	16		4	2	2
Produkt 14	E	16			2	
Produkt 15	P	16			2	
Produkt 16	K	16		4		
Produkt 17**	E		12			
S einzeln		336	96	16	8	4
S gesamt				460		
H = Horizontal-Messung auf Brückenkappen V = Vertikal-Messung an Stützen, Widerlagern * Dieses Produkt (Gel) ist nicht zugelassen ** Dieses zugelassene Produkt ist nur an der Plötzetalbrücke bei Bernburg eingesetzt worden						

Tab. 3: Unterschiedliche Hydrophobierungsmittel, die auf Brückenkappen, Stützen und Widerlagerwände aufgebracht wurden

doppelt so groß sind wie die auf der horizontalen Fläche (Kapitel 3.5.1).

Mit den Messungen an den Probepplatten wurde im Oktober 2002 begonnen. Die Erstmessung erfolgte 14 Tage nach der Applikation ohne vorhergehende Freibewitterung. Die weiteren Messungen erfolgten jeweils im April und im September bzw. Oktober der darauffolgenden Jahre, die letzte im September und Oktober 2005.

Jede Messung der 7 Messreihen zwischen Herbst 2002 und Herbst 2005 bestand aus einer Doppelmessung (2 Einzelmessungen). Im Rahmen einer jeden Einzelmessung wurden jeweils vier Messwerte ermittelt. Somit wurden auf jeder der 22 Platten pro Messdurchgang mit 4 Messgebern 8 Einzelmesswerte, insgesamt also 176 Einzelmesswerte, ermittelt. Im Verlauf der Untersuchungen wurden in den 7 Messreihen – 6 davon konnten nur gewertet werden (Kapitel 6.1) – an den 22 Probepplatten 1.056 Einzelmesswerte ermittelt⁵. Mit der großen Anzahl

an Einzelmesswerten sollte die Aussagekraft der Qualitätsbestimmung gesteigert werden (Tabelle 3).

Weitere 124 Messungen mit ebenfalls jeweils 4, also insgesamt 496 Einzelmesswerten wurden an Betonbauteilen von 4 verschiedenen Brückenbauwerken durchgeführt, um zu belegen, dass die erzielten Laborergebnisse auch unter Baustellenbedingungen reproduzierbar sind. Die Bauwerke sowie die applizierten Produkte sind in Tabelle 3 aufgeführt. Für die Untersuchungen auf den Brückenbauwerken wurden die zugelassenen Produkte von eigenem Personal appliziert, um gleiche Bedingungen wie für die Laboruntersuchungen zu haben. Ausgenommen hiervon sind drei von einer

⁵ 11 (Produkte) * 2 (Platten – horizontal und vertikal) * 8 (Einzelmesswerte) * 6 (Messreihen). Insgesamt wurden 7 Messreihen durchgeführt; die 4. konnte allerdings nicht gewertet werden, weil die Probepplatten falsch konditioniert wurden und demzufolge zu trocken (ca. 1-M-%) waren.

Baufirma hydrophobierte Kappenflächen an der Plötzetalbrücke im Zuge der BAB A 14. Hierbei handelt es sich um ein Bauwerk, bei dem im Zuge einer Instandsetzungsmaßnahme versuchsweise 3 unterschiedliche Hydrophobierungsprodukte appliziert wurden. Davon wurden zwei Produkte auch im Labor an Probeplatten untersucht. Weitere 5 Produkte, die durch die BAST auf Probeflächen im Zuge derselben Kappe appliziert wurden, machten dieses Bauwerk zu einem idealen Referenzobjekt für vergleichende Untersuchungen im Labor und in der Baupraxis.

7 Messergebnisse

7.1 Übereinstimmung der Messergebnisse

Im Zuge der beschriebenen umfangreichen Messungen an Probekörpern und Betonbauteilen von Brückenbauwerken, die mit den jeweils gleichen Produkten behandelt wurden, konnte festgestellt werden, dass die auf den Probeplatten erzielten Messwerte mit den an den Brückenbauwerken ermittelten Werten sehr gut übereinstimmen. Insbesondere lässt sich dies an dem Brückenbauwerk Plötzetalbrücke im Zuge der BAB A 14 belegen, wo insgesamt 8 Produkte appliziert wurden. Davon wurden 7 Produkte auch auf Betonplatten im Labor untersucht (Tabelle 3). Alle Produkte, deren hohe Qualität im Labor nachgewiesen werden konnte, erzielten auch im Freiversuch die besten Ergebnisse. Eine im Freiversuch mit einem bestimmten Produkt behandelte Betonfläche konnte damit nicht in ausreichender Qualität geschützt werden. Auch hier zeigt sich eine Übereinstimmung mit den Laborwerten. Das gleiche Produkt erzielte auf den Betonprüfkörpern ebenfalls lediglich eine mäßige Qualität.

An drei weiteren Bauwerken (Bauwerke bei Bessedau, bei Krefeld und bei Kassel) wurden Produkte auf horizontalen und vertikalen Oberflächen eingesetzt (Tabelle 3); auch hier wurde die Qualität sowohl auf horizontalen als auch auf vertikalen Oberflächen gemessen. Auch hier zeigten sich die erwarteten Übereinstimmungen der Ausführungsqualität zwischen horizontalen und vertikalen Flächen einerseits (Kapitel 3.4) und andererseits zwischen den auf den Probeplatten und den auf den Brückenflächen gemessenen Werten mit den entsprechend gleichen Produkten.

7.2 Abhängigkeit der Messergebnisse von der Feuchte

Zum jeweiligen Zeitpunkt der Applikation der einzelnen Produkte sowie auch während der zahlreichen Messungen der Hydrophobierungsqualität sowohl an den Betonbauteilen der einzelnen Brücken als auch auf den Betonprobekörpern wurden immer auch die zugehörigen Betonfeuchten mit dem elektrischen Feuchtemessgerät gemessen. In Kapitel 10.2, Anlage 4, sind die Messergebnisse dargestellt, die eine für die Praxis ausreichende Übereinstimmung zwischen den elektrisch ermittelten Feuchtwerten und den im Labor ermittelten Gewichts-differenzen in Abhängigkeit vom jeweiligen Feuchtegehalt belegen.

Auf der mit 4 Betonprobekörpern geringen Datenbasis konnte festgestellt werden, dass die Messwerte der Feuchte bis 1,5 M-% nur marginal vom tatsächlichen über das Gewicht ermittelten Feuchtwert abweichen. Bei 2 M-% beträgt der tatsächliche Wert 2,3 M-%, bei 2,5 M-% beträgt er 3,1 M-%, bei 3 M-% beträgt er bereits 4 M-%. Die Abweichungen nehmen also mit zunehmender Feuchte stark zu.

Aufgrund der genannten Messungen

- der unterschiedlichen Feuchtezustände während der Applikation und der jeweils damit korrespondierenden Qualität der Hydrophobierung sowie
- der unterschiedlichen Feuchtezustände während der Messung und der jeweils damit korrespondierenden Messwerte der Hydrophobierungsqualität

konnte belegt werden, dass

- eine direkte Abhängigkeit der Hydrophobierungsqualität von der Feuchte während der Applikation und ebenso
- eine direkte Abhängigkeit der Messgrößen von der Feuchte während der Messung

gegeben sind. Die mit einem sehr wirksamen Hydrophobierungsmittel gewonnenen Werte in Tabelle 4 belegen einerseits die Abhängigkeiten der Qualität von der Applikationsfeuchte und andererseits die Abhängigkeit der Messgrößen von der Messfeuchte. Bei steigender Feuchte während der Messung erhöhten sich die Messwerte in jeder einzelnen Stufe der Applikationsfeuchte und zeigten somit eine fallende Qualität an.

Alle im Frühjahr ermittelten Messwert-Zeitkurven zeigen unabhängig von den einzelnen Produkten im Mittel höhere Werte als die im Herbst gewonnenen. Im Frühjahr ist der Feuchtegehalt der Probeplatten nach Freibewitterung stets höher als während der Herbstmessung, also nach der Sommerlagerung. Im Einzelnen liegen die Werte im Herbst zwischen 1 M-% und 2 M-%, im Mittel bei 1,5 M-%, und im Frühjahr zwischen 2 M-% und 3 M-%, im Mittel bei 2,5 M-%.

Das Phänomen der Feuchteaufnahme und -abgabe in Abhängigkeit von der Jahreszeit steht nur scheinbar im Widerspruch zu der Aussage, dass im Laufe der Zeit das Betongefüge, insbesondere vertikaler und stark geneigter Bauteile, trockener wird (Kapitel 3.2). Die Ergebnisse zur Abhängigkeit der Messwerte von der Messfeuchte wurden auf den freibewitterten Probekörpern (Bild 7) gewonnen, die zudem zuvor konditioniert wurden. Hier zeigte sich, dass die Feuchte der Probekörper abnahm. Diese Ergebnisse von den stark geneigten Flächen sind auf die Feuchtebedingungen auf Brückenkappen übertragbar. Da Wasserdampf nahezu ungehindert durch die offenen Betonporen sowohl aus als auch eintreten kann und sie relativ lang feuchten Witterungsbedingungen ausgesetzt sind, können sie durchaus infolge kapillaren Saugens Feuchtigkeit aufnehmen, die sie im Laufe des Sommers wieder verlieren. Die auf den Brückenkappen ermittelten Feuchtigkeiten belegen tatsächlich den an den Probekörpern beobachteten Trend, dass im Laufe der Zeit der Vorgang des Austrocknens gegenüber dem des Saugens überwiegt.

Um eine gute Hydrophobierungsqualität zu erzielen, wird empfohlen, die Hydrophobierung bei einer Feuchte von höchstens 3 M-% zu applizieren und die Qualität bei höchstens 3 M-% Feuchte zu messen (Tabelle 4). In der Regel wird unter günstigen Witterungsbedingungen und bei höheren Temperaturen appliziert und die Qualität gemessen. Unter solchen Bedingungen liegt die Feuchte wesentlich unter 3 M-%, sodass die Messwerte deutlich unterhalb des Grenzwertes bleiben. Wenn man die in [2] vorgeschriebene Probeflächen anlegt und die Feuchte am Bauteil misst, lässt sich vor einer größeren Schutzmaßnahme feststellen, ob man das geeignete Mittel und eine nicht zu hohe Applikationsfeuchte gewählt hat (Kapitel 3.4).

Unabhängig von den genannten Abhängigkeiten wird sich die Wirksamkeit einer Hydrophobierung, bedingt durch Verkehrs- und Witterungseinflüsse

sowie durch die üblichen Alterungsprozesse, im Laufe der Zeit verringern. Einen entsprechenden Qualitätsabfall wird man im Verlauf der Jahre an den jeweils zur gleichen Jahreszeit gemessenen steigenden Messwerten feststellen. Wenn sich die Messwerte dem Grenzwert 300 nähern, kann man eine Nachhydrophobierung planen. Dabei ist zu beachten, dass hierfür ausschließlich reine Wirkstoffe oder aber lösemittelhaltige Produkte geeignet sind (Kapitel 3.5.2).

In Tabelle 4 sind Messwerte der Qualität eines hochwirksamen pastösen Hydrophobierungsmittels auf Betonprüfkörpern in Abhängigkeit von der Applikationsfeuchte und von der Feuchte während der Messung dargestellt. Die einzelnen Werte stellen Mittelwerte dar, die auf jeweils 2 (3 M-%, 4 M-%, 5 M-% Applikationsfeuchte) bzw. 4 Betonprüfkörpern (2 M-% Applikationsfeuchte) gemessen wurden.

Anhand der gemittelten Messwerte in Tabelle 4 sollen die beiden Feuchteabhängigkeiten verdeutlicht werden.



Bild 10: Messung auf einer horizontal liegenden Platte im Labor

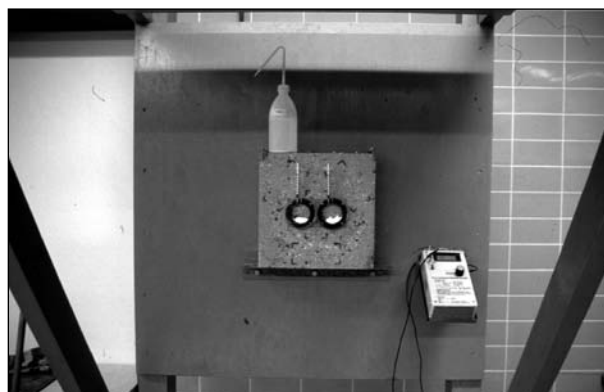


Bild 11: Vorbereitung einer Messung auf einer vertikal aufgehängten Platte im Labor

	Mess- feuchte	1,50 M-%	2 M-%	2,50 M-%	3 M-%	3,50 M-%
Applikationsfeuchte						
5-M-%	Platte 101	47	59	90	247	775
	Platte 102					
4-M-%	Platte 103	40	51	84	156	308
	Platte 104					
3-M-%	Platte 105	37	40	49	136	293
	Platte 106					
2-M-%	Platte 107	14	27	43	82	139
	Platte 108					
	Platte 109					
	Platte 110					

Tab. 4: Gemittelte Messwerte der Hydrophobierungsqualität auf Betonprüfkörpern in Abhängigkeit von der Applikationsfeuchte und von der Feuchte während der Messung; die hier dargestellte pastöse Hydrophobierung besitzt eine sehr gute Wirksamkeit

Die beiden Probekörper 101 und 102 wurden bei einem Applikations-Feuchtegehalt von 5 M-% hydrophobiert. Wenn die Qualität bei 1,5 M-% gemessen wird, erhält man im Mittel einen Hydrowert von 47. Ermittelt man die Qualität bei einer Plattenfeuchte von 3,5 M-%, steigt der mittlere Hydrowert auf 775 (16-fach) bei tatsächlich gleicher Qualität an. Scheinbar ist die Qualität allerdings nicht mehr tolerierbar. Auch bei einer Applikationsfeuchte von 4 M-% (Probepplatten 103 und 104) steigt der Hydrowert von im Mittel 40 (Applikations-Messfeuchte 1,5 M-%) auf den mittleren Hydrowert von 308 (7,5-fach) bei 3,5 M-% Messfeuchte an. Auch in diesem Fall ist die Qualität tatsächlich unverändert geblieben, scheinbar allerdings nicht mehr ausreichend. Werden die Platten (107, 108, 109, 110) bei 2 M-% Applikationsfeuchte hydrophobiert, erhält man bei 1,5 M-% Messfeuchte mit einem gemittelten Hydrowert von 14 tatsächlich eine sehr hohe Qualität. Die Messung bei 3,5 M-% Messfeuchte ergibt im Mittel einen immerhin 10fachen gemittelten Hydrowert von 139, der eine scheinbar schlechtere Qualität anzeigt.

Mit sinkender Applikationsfeuchte nimmt die Hydrophobierungsqualität zu. Andererseits werden mit steigender Messfeuchte bei tatsächlich gleich bleibender Hydrophobierungsqualität höhere Hydrowerte gemessen. Die anlässlich der umfangreichen Untersuchungen und insbesondere in der Praxis gesammelten Erfahrungen bei den Frühjahrs- und Herbstmessungen haben erbracht, dass die Applikationsfeuchte höchstens 3 M-% und die

Messfeuchte zwischen 1,5 M-% und 3 M-% liegen sollten (schattierter Bereich in Tabelle 4), damit man bei den an Betonbauteilen üblichen Feuchtegehalten plausible Hydrophobierungsqualitäten bzw. Messwerte erzielen kann.

Wenn sich die in Tabelle 4 dargestellten Abhängigkeiten in weiteren Messdurchgängen aufgrund einer breiteren Datenbasis bestätigen lassen, wird es möglich sein, einen Bewertungsmaßstab sowohl für die Applikationsfeuchten als auch für die Messfeuchten zu finden. Mit Hilfe eines geeigneten Bewertungsmaßstabes, beispielsweise in Form von Tabellen oder von Kurven, könnten dann die Hydrophobierungsmesswerte, die bei unterschiedlichen Applikations- und Messfeuchten ermittelt wurden, normiert und so direkt untereinander verglichen werden. Vorstellbar erscheint es, die Messwerte auf den Feuchtwert 2 M-% zu beziehen bzw. umzurechnen.

7.3 Unterschiedliche Wirkqualitäten

Alle Produkte, die im Rahmen der Messreihe eingesetzt waren, haben den in [1] festgelegten oberen Grenzwert von 300 deutlich unterschritten; somit ist jedes der Produkte als geeigneter Feuchteschutz für freibewitterte Betonflächen einsetzbar. Aufgrund ihrer hohen Konsistenz eignen sich die pastösen Produkte insbesondere für geneigte Flächen besser als die dünnflüssigen Mittel. Durch den relativ hohen Wirkstoffanteil und die Zusammensetzung der pastösen Produkte ist weitestgehend zielsicher eine gute Qualität erreichbar, weil davon auszugehen ist, dass auch bei höheren Bauwerks- und Umgebungstemperaturen sowie bei größeren Luftbewegungen nur vernachlässigbar geringe Anteile verdunsten, also praktisch der gesamte Wirkstoffgehalt in das Betongefüge eindringt. Die größere Kontaktzeit der pastösen Mittel an der Bauteiloberfläche bewirkt in der Regel eine größere Eindringtiefe des Wirkstoffes und trägt dazu bei, die Qualität zu steigern und auch dauerhaft zu erhalten. Eine solche Qualität ist mit anderen zugelassenen Mitteln mit gleich hohen Wirkstoffgehalten ebenfalls erreichbar, wenn sie unter den richtigen Applikationsbedingungen eingesetzt werden und das ausführende Personal im Umgang mit Hydrophobierungen geschult ist und über die erforderlichen Erfahrungen verfügt. Wichtig in dem Zusammenhang ist auch, dass die in [2] geforderten Probeflächen angelegt werden, um aufgrund der Ergebnisse sowohl die Qualität einer Hydro-

phobierung als auch die übrigen Randbedingungen zur Erzielung einer hohen Qualität am Bauwerk festlegen zu können.

Auf Betonoberflächen, die mit unverdünnten Silanen behandelt wurden, konnte in der überwiegenden Zahl der Fälle lediglich eine deutlich geringere Wirksamkeit gemessen werden als auf Flächen mit pastösen Mitteln, obwohl die Bedingungen hinsichtlich der applizierten Menge und der Feuchte des Betons untereinander gleich waren. Dies lässt den Schluss zu, dass die Mittel bei gleicher Applikationsmenge unterschiedlich tief in das Betongefüge eindringen, was zu unterschiedlich hohen Konzentrationen im Betongefüge in Abhängigkeit von der Eindringtiefe führen kann. Wenn allerdings der Feuchtegehalt in einer bestimmten Tiefe des Gefüges ein tieferes Eindringen nicht zulässt, kann sich bei gleicher Applikationsmenge auch eine höhere Konzentration über die geringere Eindringtiefe (oberhalb der feuchten Betonzone) bzw. eine gleichmäßigere Tiefenverteilung einstellen, was vermutlich einer höheren Qualität gleichkommt.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen konnten die Zusammenhänge über unterschiedliche Tiefenverteilungen der Vergleichsprodukte nicht in vollem Umfang geklärt werden. Der messtechnische Nachweis bleibt somit Folgeuntersuchungen vorbehalten.

8 Zusammenfassung

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen an einer Auswahl von insgesamt 16 Hydrophobierungsmitteln (Tabelle 1) zeigen, dass diese Produkte inzwischen eine hohe Qualität erreicht haben. Wenn diese Mittel regelwerksgerecht von geschultem Personal eingesetzt werden, lassen sich damit auch eine hohe Ausführungsqualität erzielen und Betonbauteile gegen eindringendes Wasser und darin gelöste Chloride erfolgreich und über eine lange Dauer schützen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen sollte nachgewiesen werden, ob die Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit der Hydrophobierungsmittel gegenüber früheren Produkten gestiegen sind. Alle Produkte, die im Rahmen der Messreihe eingesetzt waren, haben den festgelegten oberen Grenzwert von 300 deutlich unterschritten; somit ist jedes der Produkte zum „bedingten Feuchteschutz freibewit-

terter Betonflächen“ einsetzbar. Nach einer Versuchsdauer von 4 Jahren lassen die Messwert-Zeitkurven den Schluss zu, dass eine wesentlich höhere Dauerhaftigkeit als bei den früheren Produkten zu erwarten ist.

Aufgrund ihrer hohen Konsistenz eignen sich die pastösen Produkte insbesondere für geneigte und senkrechte Flächen besser als die dünnflüssigen Mittel. Durch den relativ hohen Wirkstoffanteil und die Zusammensetzung sowie durch die größere Kontaktzeit der pastösen Produkte an der Bauteiloberfläche ist weitestgehend zielsicher eine hohe Qualität erreichbar, weil davon auszugehen ist, dass auch bei höheren Bauwerks- und Umgebungstemperaturen sowie bei größeren Luftbewegungen kaum Anteile verdunsten, also praktisch der gesamte Wirkstoffgehalt in das Betongefüge eindringt. Auch mit den übrigen Mitteln mit gleich hohen Wirkstoffgehalten ist eine solche Qualität erreichbar, wenn sie unter den richtigen Applikationsbedingungen eingesetzt werden und das ausführende Personal im Umgang mit Hydrophobierungen erfahren ist.

Da bereits zu Beginn der Untersuchungen erkennbar war, dass die Feuchtigkeit während der Applikation der Hydrophobierung und während der Messung die Ausführungsqualität beeinflusst, sollten diese beiden Einflussgrößen ebenfalls quantitativ festgestellt werden. Zu diesem Zweck wurden zu Beginn einer Applikation und während der Folgemessungen immer auch die Feuchtigkeiten des Betons im oberflächennahen Bereich des Betons mit einem elektrischen Feuchtemessgerät ermittelt. Ein solches Gerät wurde gewählt, weil es zerstörungsfrei arbeitet und leichter handhabbar ist als das derzeit in Teil 3, Kapitel 4, der ZTV-ING verbindlich geforderte CM-Gerät. Die für den praktischen Betrieb erforderliche Messgenauigkeit des Gerätes wurde nachgewiesen.

In den Untersuchungen zur Abhängigkeit einerseits der Hydrophobierungsqualität von der Feuchte während der Applikation und andererseits der Hydrophobierungs-Messwerte von der Feuchte während der Messung konnte belegt werden, dass

- eine deutliche Abhängigkeit der Hydrophobierungsqualität von der Feuchte während der Applikation und ebenso
- eine deutliche Abhängigkeit der Messwerte von der Feuchte während der Messung

bestehen. Mit sinkender Applikationsfeuchte nimmt die Hydrophobierungsqualität zu. Andererseits steigen mit steigender Messfeuchte die Hydrophobierungs-Messwerte, und die Hydrophobierungsqualität nimmt scheinbar ab. Tatsächlich misst man jedoch unter gleichen Feuchtebedingungen auch gleich hohe Qualitäten.

Die anlässlich der umfangreichen Untersuchungen und insbesondere in der Praxis gesammelten Erfahrungen bei den Frühjahrs- und Herbstmessungen haben erbracht, dass die Applikationsfeuchte bei höchstens 3 M-% und die Messfeuchte zwischen 1,5 M-% und 3 M-% – jeweils gemessen mit dem elektrischen Feuchtemessgerät – liegen sollten (schattierter Bereich der Tabelle 4).

Die Zulassung eines Produkts, also die Aufnahme in die Zusammenstellung der zertifizierten Stoffe und Stoffsysteme nach ZTV-ING, Teil 3, Kapitel 4 und die damit verbundene vorangegangene Grundprüfung nach TP-OS, bilden eine der Voraussetzungen für die Einsatzfähigkeit bzw. Verwendbarkeit eines Produktes auf einer Betonoberfläche. Eine hohe Ausführungsqualität setzt darüber hinaus auch den regelwerksgerechten Einsatz der Produkte sowie einen qualifizierten Umgang damit voraus. Es müssen Probeflächen angelegt und die Randbedingungen hinsichtlich Betoneigenschaften und Feuchtebedingungen festgelegt werden. Und letztendlich darf auf einen Qualitätsnachweis im Rahmen der Eigenüberwachung mit dem vorgeschriebenen Messverfahren nicht verzichtet werden.

9 Ausblick

Hydrophobierungen schützen zwar nur gegen eindringendes Wasser, nicht jedoch gegen Kohlendioxid. Doch kann man davon ausgehen, dass die Korrosionsgefahr infolge Karbonatisierung eher gering ist, da insbesondere der Korrosionspartner Wasser weit gehend entfällt und die in Form von Wasserdampf eindringende Feuchtigkeit praktisch vernachlässigbar (Kapitel 3.2) ist.

Auf Brückenkappen sind grundsätzlich die Systeme OS A (Hydrophobierung) und OS F als Schutzmaßnahmen zugelassen. Vielfach kann auf das sowohl hinsichtlich des Applikationsaufwandes als auch wegen der hohen Kosten sehr aufwändige befahrbare Oberflächenschutzsystem (OS F) verzichtet werden. Ein solches System ist diffusions-

dicht und verliert bei stärkerer Nutzung durch Fußgänger und Radfahrer rasch seine Griffigkeit, sodass es aus Verkehrssicherheitsgründen häufiger zu erneuern ist. Die Hydrophobierung einer Brückenkappe verändert hingegen die Griffigkeit nicht.

Wie in den Untersuchungen von WITTMANN [10] nachgewiesen wurde, lässt sich selbst gerissener Beton mit Rissen, deren Rissbreiten höchstens 0,3 mm betragen, bei sorgfältiger Applikation erfolgreich hydrophobieren. In solchen Fällen müssen die Risse nicht eigens behandelt werden. Die Rissflanken werden ebenso wie die Oberfläche des Betonbauteils hydrophobiert, sodass Wasser kaum eindringen kann. Im Rahmen erster Tastversuche an AKR-gefährdeten hydrophobierten Betonfahrbahndecken soll erklärt werden, ob infolge der zunehmenden Austrocknung des Betons im Oberflächenbereich der Schadensfortschritt verlangsamt werden kann.

Die im Zuge der Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse über die positiven Eigenschaften müssen durch gezielte Versuche ergänzt werden, um die ökonomischen und ökologischen Vorteile einer Hydrophobierungsmaßnahme gegenüber den sehr viel aufwändigeren Oberflächenschutzmaßnahmen mit Beschichtungen zu verifizieren.

Die in Tabelle 4 dargestellten Abhängigkeiten müssen in weiteren Messdurchgängen bestätigt werden. Mit Hilfe eines auf einer breiteren Datenbasis gefundenen Bewertungsmaßstabes wird es möglich sein, die Hydrophobierungsmesswerte, die bei unterschiedlichen Applikations- und Messfeuchten ermittelt wurden, zu normieren.

Das benutzte elektrische Feuchtemessgerät arbeitet innerhalb der in Kapitel 7.2 genannten Toleranzen reproduzierbar. Zur Bestätigung der Aussagen zur Messgenauigkeit müssen jedoch im Zuge einer weiteren umfangreichen Messreihe Vergleichsuntersuchungen an Betonprobekörpern und mit dem CM-Gerät ergänzt werden.

Literatur

- [1] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (ZTV-SIB 90). Verkehrsblatt-Verlag Dortmund, Verkehrsblatt-Dokument, Nr. B 5230 – Vers. 90.1
- [2] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING). Verkehrsblatt-Verlag Dortmund, Verkehrsblatt-Sammlung, Nr. S 1056
- [3] Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln. Teilbericht: Wirkungsweise und Beurteilung der Qualität von Hydrophobierungsmitteln, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 1993
- [4] Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 10, Bergisch Gladbach 1995
- [5] Technische Lieferbedingungen für Oberflächenschutzsysteme und Technische Prüfvorschriften für Oberflächenschutzsysteme (TL OS/TP OS). Verkehrsblatt-Verlag Dortmund, Verkehrsblatt-Dokument Nr. B 5234, Ausgabe 1996
- [6] BUDNIK, J., GROßMANN, F.: Instandhaltung von Betonbauwerken – Praxiswissen für Ingenieure, Technische Akademie Wuppertal, Verlag TÜV Rheinland, 1991
- [7] Messung der Hydrophobierungsqualität. Neugestaltung des Messgerätes zur schnelleren Messung und besseren Handhabbarkeit bei der Eigenüberwachung der Ausführung, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 37, Bergisch Gladbach 2002
- [8] Hydrophobieren von Betonflächen. Empfehlungen für die Applikation
- [9] DIN-Fachbericht 102 Betonbrücken. Sonderdruck für das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2. Auflage 2003, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich
- [10] WITTMANN, F. H.: Hydrophobieren von Betonoberflächen. International Journal for Restoration, Vol. 10, No 4, 391-416 (2004)